Fachadas de ladrillo caravista

Fachadas de ladrillo caravista

ISBN 84-613-7196-9

Sede central:
C/ Ingeniero Fernández Casado, 1 Coslada (28823) Madrid- España
www.geohidrol.com

Fábrica:
Pol. Industrial El Saco Parcela 10 Alfajarin (50172) Zaragoza - España

PVP: 90 €

Prólogo

La importancia que el arte de construir con ladrillo ha tenido para el desarrollo de la arquitectura ha sido tan grande y ha ofrecido tan variado número de vertientes, que aún hoy es oportuno profundizar en las posibilidades que ofrece el ladrillo cerámico en la expresión plástica y en las prestaciones técnicas de los edificios.

GeoHidrol, como empresa del sector seriamente comprometida con la investigación y desarrollo del tema de las fábricas, quiere aportar con esta publicación una herramienta que sirva de ayuda a los agentes que intervienen en el proceso edificatorio interesados en esta unidad constructiva.

Juan Gil Clares
Presidente GH

Agradecimientos

A los proyectistas y constructores que han depositado su confianza en GeoHidrol, en particular a los Arquitectos Carlos Expósito, Antonio Morales, Mateo Corrales y Alberto Martín de Lucio, por sus valiosas aportaciones recopiladas en esta publicación.

A los técnicos de Hispalyt, que han puesto a nuestro alcance su prolífica documentación y experiencia sobre el tema, en particular a Víctor Sastre por la paciencia y el interés en el seguimiento del proceso de redacción.

A los Fabricantes de Ladrillo de la Sección “Cara vista”, que han aportado su profundo conocimiento del material para precisar, matizar y aclarar conceptos.

Sobre todo, a los que contribuyen a nuestra superación día tras día con sus consejos, observaciones y crítica constructiva.

ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Componentes	9
3. Criterios	59
4. Condiciones	107
5. Requisitos	137
6. Procesos patológicos	297
7. Fachadas convencionales. Soluciones GEOANC®	319
8. Fachadas no convencionales. Fachadas G.H.A.S.®	351
9. Sistema STRUCTURA®	387
10. Obras realizadas	399
11. ANEJOS	419

GEO HIDROL

1. Introducción

1.1 Evolución del marco normativo referente a los muros de fábrica de ladrillo 4

1.2 Tendencia del nuevo marco normativo en las fachadas de ladrillo 6

1. Introducción

Los cerramientos de ladrillo cerámico representan uno de los elementos constructivos más importantes en las obras de edificación. Paradójicamente, las prestaciones, soluciones y especificaciones técnicas relacionadas con esta unidad de obra no han sido suficientemente consideradas en la normativa de obligado cumplimiento de nuestro país durante el último siglo. Quizás por esta razón, las fachadas de ladrillo cerámico son uno de los elementos más afectados por la nueva normativa y el consiguiente marco reglamentario que todavía se está gestando en el momento de redactar estas líneas.

La evolución en la forma de concebir, proyectar y construir los cerramientos de fachada, experimentada durante el siglo XX, se produjo sin el aval y el respaldo que hubiera supuesto una evolución en el mismo sentido de la normativa o, cuando menos, de las reglas de aplicación.

Ello dio lugar a la aparición de disfunciones, prácticas abusivas, y toda la problemática que supone la evolución de cualquier sistema constructivo sin el previo análisis de la trascendencia que ello tiene en las prestaciones del edificio.

Ninguno de los agentes que intervienen en el proceso edificatorio desconocía esa situación. Prueba de ello es la numerosa y variada bibliografía que surgió sobre el tema en las últimas décadas; y la proliferación de manuales, reglas de buena práctica, normas internas de organismos y oficinas de control, etc., intentando paliar en cierta medida la escasez de normativa oficial al respecto, y suscitando una razonable polémica acerca de la idoneidad de determinadas soluciones constructivas para los cerramientos de fachada; llegando, incluso, a cuestionarse en algunos foros la viabilidad de algunas prácticas denominadas equívocamente *"tradicionales"*.

Tampoco eran ajenos a esta situación, lógicamente, las instituciones y los ponentes que participaron en la redacción del *Código Técnico de la Edificación* recientemente aprobado. No en vano, los cerramientos de fachada son objeto de consideración al menos en cuatro Documentos Básicos de los que componen dicho Código Técnico. De esta manera, mientras que hasta hace pocos meses el problema del proyectista o constructor interesado en las fachadas de ladrillo, estaba en el vacío legal y en la indefensión que suponía la carencia de normativa al respecto; hoy el problema, quizás, sea la labor de compatibilizar en una determinada solución constructiva los numerosos requisitos y prestaciones del edificio que se encomiendan a los cerramientos de fachada, de forma que se puedan cumplir simultáneamente todos los documentos básicos que les afectan, y cuya trasversalidad no estaba suficientemente probada en el momento de su entrada en vigor.

Por otra parte, desde que se aprobó la primera versión del Código Técnico en marzo de 2006, ha pasado un tiempo suficiente como para tener cierta perspectiva de la trascendencia que

el nuevo código tiene en los cerramientos de fachada. El período de carencia de la nueva ley proporcionó un margen de tiempo para indagar en los modelos y recursos del análisis que atañen a los cerramientos; los tres años transcurridos desde su vigencia con carácter obligatorio han permitido ponerlo a prueba y experimentar soluciones con un enfoque novedoso respecto a las propuestas que proliferaban hasta entonces; y, a fecha de hoy, con un significativo número de obras terminadas, ya es posible constatar el alcance y la validez de los modelos y recursos habilitados por la nueva normativa, que permiten incrementar las prestaciones en los cerramientos de ladrillo sin apenas incrementar el coste de la solución.

Por esta razón, el momento actual es singularmente oportuno para abordar los objetivos que desde el departamento técnico de GeoHidrol se pretenden conseguir con este libro. El principal de ellos es presentar un análisis riguroso y sistemático, tanto del comportamiento del material cerámico como de los procedimientos que ofrece la técnica actual, para afrontar el reto que supone la nueva normativa que atañe a los cerramientos de fachada. Esto debe producir como resultado la posibilidad de utilizar los sistemas tradicionales con la confianza que proporciona el conocimiento del material y las técnicas que se utilizan, y aumentar el campo de aplicación de esta unidad constructiva con sistemas innovadores y, no por ello, más costosos.

Ya existe perspectiva suficiente para poder decantar lo que permanece como válido en el tratamiento de las fachadas de ladrillo cara vista, y lo que se puede poner en cuestión sobre las prácticas y reglas anteriores; deducir los criterios y convenciones que estaban por determinar y juzgar los nuevos sistemas y procedimientos que han surgido al amparo de la reciente normativa. Es posible, además, evaluar cuantitativamente la trascendencia que tendrá el nuevo código en el coste de la unidad constructiva que nos ocupa; y, lo que quizás sea más importante, establecer nuevas pautas para optimizar las soluciones, a la luz de un conocimiento más profundo de las posibilidades del material cerámico.

1.1 Evolución del marco normativo referente a los muros de fábrica de ladrillo

Como se ha dicho anteriormente, la normativa de nuestro país referente a los elementos de fábrica de ladrillo no ha acompañado históricamente a estos elementos en su evolución.

Mientras que la aparición de nuevos materiales estructurales tenía como consecuencia la publicación más o menos inmediata de las correspondientes normas, en las que se recogían los modelos y criterios para su aplicación, la reglamentación sobre elementos de fábrica de ladrillo se ha mantenido prácticamente invariable en su contenido durante varias décadas.

Durante mucho tiempo, la única norma de obligado cumplimiento sobre fábricas de ladrillo cerámico ha sido la Norma Básica de Edificación FL-90 *"Muros resistentes de fábrica de ladrillo"*, que quedó derogada con la entrada en vigor del Código Técnico. Hay que señalar que, aunque pudiera parecer una norma relativamente moderna por la fecha de su aprobación, en realidad era prácticamente idéntica en su contenido y presentación a la antigua norma MV-201/1972.

La Norma MV-201 fue una buena norma, extraordinariamente avanzada para su tiempo. En una época en la que los modelos ortodoxos de cálculo se basaban en el *"método de las tensiones admisibles"*, y las hipótesis de plastificación se aplicaban con cierta reserva a materiales de probada ductilidad, como puede ser al acero, paradójicamente, la norma sobre fábricas de ladrillo contenía implícito un modelo plástico de respuesta de las secciones.

Este mismo sentido de modernidad estaba latente en el procedimiento de obtención de esfuerzos en muros de carga, repartiendo los momentos de nudo por capacidad, en lugar de hacerlo por rigidez, procedimiento que en la reciente norma de hormigón ni siquiera ha sido reconocido sin reservas. También estaba cuidadosamente explicado el comportamiento a pandeo, como un incremento de excentricidad en función de la esbeltez. Todo ello presentado en un tono didáctico que no suele ser habitual en los textos legales; hasta el punto de que los modelos e incluso las figuras de la antigua norma de ladrillo han servido históricamente para explicar muchos aspectos del comportamiento de otros materiales, como el hormigón armado, cuya norma de aplicación, a pesar de su extensión, es mucho menos explícita.

Sin embargo, la Norma MV-201 y su sucesora, la NBE FL-90, tenían su ámbito de aplicación fuertemente restringido. Esta limitación estaba relacionada con el enfoque tradicional en el tratamiento de los muros de ladrillo. Lo tradicional en estos elementos y en cualquier tipo de fábrica, en general, es su utilización trabajando básicamente a compresión; y de hecho, atendiendo a este criterio, la antigua norma no reconocía a los muros de ladrillo ningún otro papel estructural, más allá de su función como muros de carga.

Cuando los cerramientos perdieron su papel estructural de muros portantes, quedaron fuera del ámbito de aplicación de la norma sobre *"Muros resistentes de fábrica de ladrillo"*, sin que existiera ninguna otra, con rango de norma básica, que sirviera de respaldo para el proyecto y la ejecución de los cerramientos de fachada no portantes. Los métodos de análisis aplicables al tipo constructivo de fábricas no cargadas sólo estaban disponibles en el Eurocódigo 6, que se trataba de un proyecto experimental que empezó a gestarse en la década de los 90 como un reglamento europeo, pero que actualmente ha pasado al área de normalización, tramitándose en España como *"norma UNE"*, y cambiando, por tanto, su naturaleza de *"código"* por la de *"norma"*, que puede servir de referencia en un contrato de obra pero no con carácter obligatorio.

Desde el punto de vista de los requisitos de tipo funcional que se les encomendaban a los cerramientos, el precedente del nuevo marco normativo está constituido por dos normas básicas, en las que se definían las condiciones térmicas y acústicas de los edificios, que también fueron derogadas, sucesivamente, en el momento en que entraron en vigor los correspondientes documentos básicos.

Este panorama reglamentario se completaba con una serie de normas tecnológicas de aplicación a los cerramientos de ladrillo que, aunque fueron útiles en su día, nunca tuvieron rango de normas de obligado cumplimiento y también han quedado obsoletas por su falta de revisión.

El Código Técnico de la Edificación, aprobado el 29 de marzo de 2006, ha supuesto un considerable esfuerzo de unificación de toda la normativa de obligado cumplimiento de nuestro país, armonizándola con las exigencias y prestaciones que impone la Comunidad Económica Europea para las obras de edificación. Ha supuesto, también, un esfuerzo por cubrir las lagunas y dar respuesta técnica y respaldo reglamentario no sólo a los cerramientos de fachada sino a otros tantos materiales, sistemas y tipos constructivos que, por su modernidad y consiguiente falta de tradición, estaban sumidos en un vacío legal.

Desde el punto de vista del comportamiento mecánico, el Documento Básico *"Seguridad Estructural: Fábrica"* no sólo se ocupa de los muros de carga sino que contiene los modelos y procedimientos para abordar el análisis de cualquier elemento de fábrica, sea cual sea el papel estructural que tenga encomendado. En este sentido, las fábricas adquieren una categoría de material estructural similar a la que puede tener, por ejemplo, el hormigón armado.

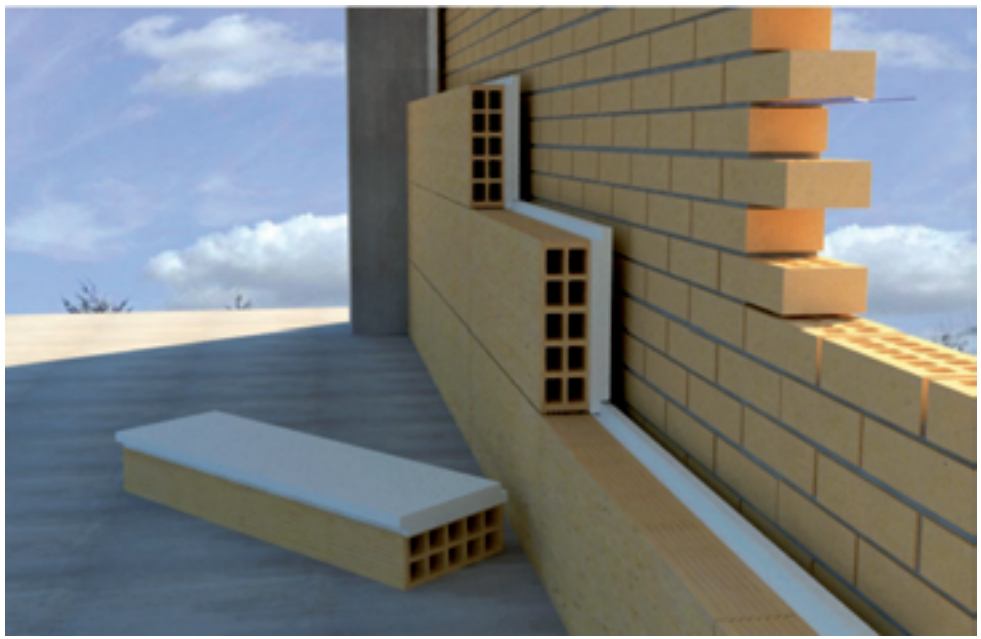
Los cerramientos de fachada, en rigor, no son muros estructurales puesto que no tienen que dar cuenta más que de sí mismos, pero sí son elementos capaces de suministrar una respuesta estructural frente a las acciones a las que están sometidos y, por consiguiente, también son susceptibles de un análisis estructural. En todos los modelos que describe el DB SE-F para los muros con acciones laterales, entre los que se encuentran los muros de fachada sometidos a la acción de viento, el parámetro fundamental que determina el rango de validez de la solución es siempre el mismo: la *esbeltez*. Es importante destacar que se trata de un *parámetro geométrico*, cuyo control es ineludible en cualquier sistema constructivo que se adopte.

También es importante destacar el papel que desempeña la presencia de carga gravitatoria en la respuesta mecánica de cualquier tipo de muro. Sea cual sea la naturaleza del elemento de fábrica que se esté analizando, la introducción de la acción gravitatoria en el análisis mejora sustancialmente su comportamiento, por lo que, en este sentido, el documento básico que se ocupa de la seguridad estructural de

CTE
CÓDIGO TÉCNICO
DE LA EDIFICACIÓN

las fábricas no difiere significativamente de los procedimientos contenidos en las normas tradicionales. En todos los modelos que describe el citado documento básico para analizar a viento los muros de fachada, la presencia de carga gravitatoria es beneficiosa. En los modelos que sirven para estudiar las soluciones convencionales, como la que corresponde al *cerramiento confinado*, la carga gravitatoria es imprescindible para contrarrestar el empuje contra los forjados que requiere el comportamiento en arco. En los sistemas menos convencionales, que consisten en separar el cerramiento de la estructura, la carga gravitatoria es siempre favorable para eliminar o disminuir las tracciones.

Esta importante consideración viene a confirmar una vez más los fundamentos tradicionales del comportamiento estructural de las fábricas. Desde tiempo inmemorial, los elementos de fábrica se han analizado casi exclusivamente con los dos únicos parámetros que intervienen decisivamente en su capacidad de respuesta frente a acciones horizontales: la geometría y la presencia de carga gravitatoria. Es posible que no se reconozcan a simple vista en el DB SE-F los procedimientos tradicionales de análisis que han servido, durante milenios, para construir obras de fábrica espectaculares; pero, sin embargo, una exploración minuciosa de los resultados a los que conduce la nueva normativa, permite concluir que los fundamentos siguen siendo los mismos. Se dedica una buena parte del contenido de la presente publicación a destacar este importante aspecto.



1.2 Tendencia del nuevo marco normativo en las fachadas de ladrillo

La inclusión de los cerramientos de los edificios en una buena parte de los documentos básicos que constituyen el nuevo marco normativo no supone en absoluto una restricción al empleo del ladrillo cara vista como material de acabado exterior de las fachadas. Por el contrario, el nuevo Código Técnico abre un campo ilimitado para la utilización de este material, cuyo principal componente, los ladrillos, ya gozaban de una tradición milenaria que deja fuera de toda duda su idoneidad para el empleo al que se destinan en edificación.

La trascendencia que ello tiene o va a tener en los cerramientos de ladrillo cara vista es enorme y muy positiva, en varios aspectos, y para todos los agentes que intervienen en el proceso edificatorio y que, de alguna manera, están interesados en esta unidad constructiva. Porque, si bien es cierto que las exigencias en cuanto a las prestaciones de los edificios se han elevado considerablemente (sobre todo las relacionadas con la seguridad estructural y la eficiencia energética) no es menos cierto que la misma normativa que impone más requisitos aporta también las vías adecuadas para conseguirlos.

Cuando comenzó la gestación del Código Técnico surgió una razonable inquietud en todos los ámbitos del proceso edificatorio por el incremento del coste que supondría el cumplimento de las nuevas normas y su repercusión sobre el precio final de la obra ejecutada. Es cierto que en

muchos aspectos el incremento de prestaciones que se exigen al edificio supone un incremento del coste de determinadas unidades constructivas, respecto a lo que se venía haciendo hasta ahora. Sin embargo, en lo que atañe a los cerramientos de fachada, esta circunstancia no tiene por qué producirse necesariamente en todos los casos.

El mero hecho de la existencia de un marco legal como referencia para cualquier debate o juicio acerca de la bondad de una determinada solución constructiva de cerramiento, además de constituir el mejor aval para el proyectista y la mejor garantía de calidad para el usuario, debe producir como resultado la eliminación de los elementos auxiliares y la complejidad constructiva que conllevan determinadas reglas que estaban al uso hasta hace poco tiempo. Las reglas que no tienen la correspondiente bonificación en la normativa dejan paso a los recursos y procedimientos cuya influencia en la mejora de prestaciones está explícita y sancionada en los Documentos Básicos. Afortunadamente, en el caso de las fachadas de ladrillo, los recursos más rentables que ofrece la normativa, como por ejemplo la incorporación del peso en el análisis, no suponen coste adicional. Este aspecto queda suficientemente destacado en los últimos capítulos de esta publicación.

Las soluciones de fachada convencionales que se venían haciendo hasta ahora, entendiendo como tales las que se encastran en la estructura por confinamiento, y no precisan más elementos que las piezas cerámicas trabadas con mortero, no sólo se pueden seguir haciendo, siempre que se mantengan dentro de un determinado rango geométrico de validez, sino que desde la entrada en vigor del C.T.E. también se pueden justificar sin incertidumbres ni ambigüedades, por lo que a partir de ahora, además quedarán amparadas por la normativa, al margen de cualquier debate o polémica. El capítulo de Requisitos de este libro dedica una gran parte de su contenido a exponer minuciosamente los procedimientos y las variables que sirven para verificar la validez de los sistemas constructivos habituales de los cerramientos de fachada de ladrillo.

Además, sólo ahora se puede hablar con propiedad de *"soluciones convencionales"*, puesto que es posible establecer las *"convenciones"* que las regulan respondiendo a prestaciones y modelos explícitos sin ambigüedad en la normativa. De hecho, ya han surgido documentos de apoyo al proyectista, que se están tramitando en la actualidad como *"Documentos Reconocidos"*, en donde las soluciones habituales de fachada aparecen tabuladas. De estos textos merecen especial mención el *"Documento de Aplicación a Vivienda: Seguridad Estructural – Fabricas"* promovido por el Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España; y el *"Catálogo de Soluciones Cerámicas para el cumplimiento del Código Técnico de la Edificación"* promovido por Hispalyt (Asociación Española de Fabricantes de Ladrillos y Tejas de Arcilla Cocida). Es interesante señalar que las soluciones tabuladas para los cerramientos de fachada de ladrillo cerámico, desde el punto de vista del comportamiento mecánico, prácticamente sólo contienen dos variables fundamentales que son: la geometría de los paños y la presencia de carga gravitatoria.

Las soluciones no convencionales, es decir, las que precisan recursos adicionales, bien por su disposición constructiva, o bien porque superan el rango geométrico de las convencionales, a partir de ahora también pueden ser dimensionadas aplicando literalmente el C.T.E., por lo que también quedarán amparadas por la normativa, sin necesidad de recurrir a ningún tipo de certificación adicional, que inevitablemente encarecería el coste de la solución.

Pero lo más importante es que la frontera entre unas y otras, es decir, la necesidad de recurrir a dispositivos auxiliares, ya no constituye una cuestión objeto de debate, ni una decisión tomada a priori por el proyectista, ni una imposición sistemática por parte de ningún agente de los que controlan el proceso constructivo, sino que se trata de un resultado del análisis que se puede hacer dentro del marco legal que ya existe para ello. Los elementos adicionales a las piezas y el mortero sólo son imprescindibles si se necesitan para cumplir o aumentar determinadas prestaciones. En este momento ya se puede establecer qué tipos de dispositivos de todos los que se ofertan en el mercado son los adecuados en cada caso; y pueden ser dimensionados estrictamente para cada situación particular del proyecto, por lo que es posible optimizar al máximo el coste final de la unidad constructiva.

El proceso de análisis de las soluciones que quedan amparadas por el Código Técnico, llevado a cabo por

los estudiosos e interesados en las fachadas de ladrillo cerámico, ha producido, como resultado más notorio, un giro importante en la evolución de los sistemas constructivos no convencionales. Debido al importante papel estructural que la normativa atribuye a los muros de fábrica como elementos portantes de sí mismos, las propuestas más novedosas están en la línea de lo que en esta publicación se ha denominado *"Fachadas Autoportantes"*, precisamente porque permiten sacar el mayor partido al material cerámico produciendo resultados de altas prestaciones con una extraordinaria economía de medios. Conviene destacar que lo que convierte en novedosas a este tipo de soluciones es, paradójicamente, la recuperación del carácter tradicional que las fábricas de ladrillo siempre han tenido como elementos portantes. Se trata de soluciones que también están tabuladas, a disposición del usuario, en el mencionado *"Catálogo de Soluciones Cerámicas"*, y que se pueden utilizar con absoluta confianza porque además han sido testadas y construidas.

En los últimos capítulos de este libro se describe la aplicación del *Sistema G.H.A.S.* a las fachadas de ladrillo cerámico, que responde a esta línea de soluciones autoportantes habilitada por el Código Técnico, y que Hispalyt ha amparado y patrocinado mediante la creación de la marca "*Structura*". Existe ya un significativo número de obras realizadas con estos sistemas, la mayoría destinadas a viviendas de protección oficial con presupuesto limitado, que dan testimonio de la calidad constructiva que se puede conseguir, sin necesidad de incrementar de forma significativa el coste de la solución. En los ejemplos de obras realizadas que se describen en el último capítulo de este libro puede sorprender la erradicación, prácticamente total, de dispositivos de apoyo, perfilería auxiliar y demás artilugios, que han proliferado hasta la saciedad en la bibliografía especializada, antes de la aprobación del Código Técnico. Ello ha sido posible, simplemente, poniendo a disposición del proyecto un aprovechamiento más racional del material con el que se trabaja, posibilidad que ha sido habilitada por el nuevo marco normativo.

En lo que atañe a las fachadas de ladrillo cerámico todavía queda mucho por hacer. Disponemos de una buena materia prima, de muchos años de historia que han dejado excelentes muestras de la calidad arquitectónica que supone el conocimiento del material y ahora, además, de herramientas y procedimientos sancionados por la normativa, que permitirán avanzar, en su correcta utilización, a todos los interesados en esta unidad constructiva. Los que hemos participado en la elaboración de este libro tenemos el convencimiento de que será de utilidad para cualquier agente del proceso edificatorio interesado en utilizar ladrillos cerámicos en sus edificios.

2. Componentes

2.1 Componentes básicos de las fábricas de ladrillo cerámico 11

2.1.1 Componente básico: Ladrillo cerámico 11
2.1.2 Componente básico: Mortero 26

2.2 Componentes auxiliares de las fábricas 53

2.2.1 Componentes auxiliares de las fábricas: Revestimientos y barreras 53
2.2.2 Componentes auxiliares de las fábricas: Armaduras 56
2.2.3 Componentes auxiliares de las fábricas: Dispositivos de conexión 57
2.2.4 Perfiles para dinteles 58

GEO HIDROL

2. Componentes

Una fábrica es esencialmente un conjunto de piezas unidas con argamasa. En determinadas ocasiones se precisa incorporar otros elementos auxiliares tales como imprimaciones, armaduras, dispositivos de anclaje, etc., con objeto de complementar sus prestaciones resistentes o funcionales. En este capítulo se indican los características principales de los componentes básicos y de los componentes auxiliares constitutivos de las fábricas de ladrillo cerámico, así como su designación y las propiedades que deben ser objeto de especificación en proyecto.

2.1 Componentes básicos de las fábricas de ladrillo cerámico

2.1.1 Componente básico: Ladrillo cerámico

En su acepción común, se define el *ladrillo cerámico* como una pieza generalmente ortoédrica, obtenida por moldeo, secado y cocción a temperatura elevada de una pasta arcillosa, cuya mayor dimensión no supera los 30 cm.

El calificativo de *"cerámico"* incluye al ladrillo dentro de un amplio grupo al que pertenecen los materiales inorgánicos, no metálicos, procesados o consolidados a alta temperatura. Esta acepción de la ciencia de los materiales es mucho más amplia que la definición común del diccionario, la cual solamente considera *"cerámicos"* a los productos de tejería, alfarería, porcelana y similares.

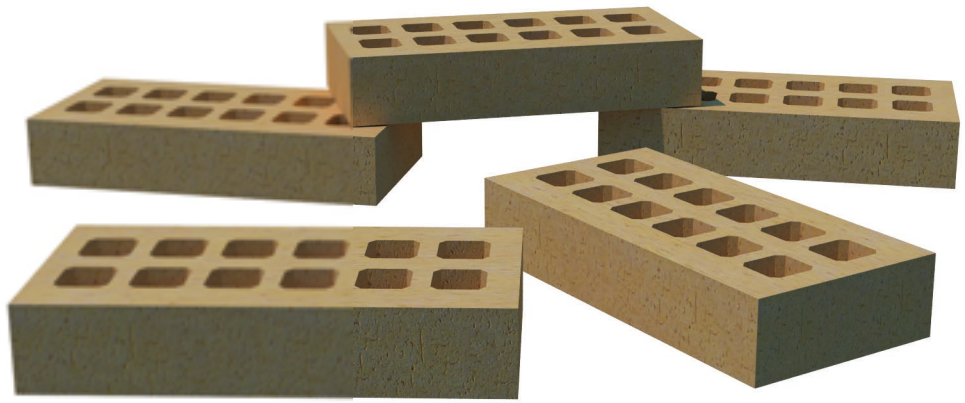
Las clases de materiales generalmente considerados como cerámicos son óxidos, nitruros, boratos, carburos, silicatos y sulfuros. Sin embargo, por extensión también pertenecen al grupo de materiales cerámicos los compuestos intermetálicos como los aluminatos, además de los fosfatos, antimoniuros y arseniuros, que constituyen el campo de la *cerámica moderna* o *avanzada*[1].

Los ladrillos son productos *cerámicos tradicionales* cuyo principal componente es la arcilla. La arcilla con la que se elaboran los ladrillos es un material sedimentario de partículas muy pequeñas de silicatos hidratados de alúmina[2]. El precursor del ladrillo es el *adobe*[3], puesto que se basa en el mismo concepto de utilización de barro arcilloso para la ejecución de muros, aunque este último no experimenta los cambios físico-químicos de la cocción. En este sentido, el ladrillo es la versión irreversible del adobe, producto de la cocción a altas temperaturas.

1 La cerámica moderna se utiliza para aplicaciones estructurales (componentes de artefactos, herramientas cortantes y cojinetes) y electrónicas (materiales ópticos y magnéticos, condensadores, sensores y superconductores de alta temperatura). También constituyen áreas importantes de la cerámica moderna o avanzada los materiales para aislamiento térmico, membranas y filtros. Ejemplos de materiales cerámicos modernos son los nitruros y carburos de silicio, la zirconita endurecida y la cerámica de fibra de vidrio-carbono reforzada.

2 Según los tipos y procedencia, la arcilla se compone, además, de otros minerales como la ilita y la montmorillonita, que recibe su nombre de la localidad francesa de Montmorillon, componente con un fuerte carácter expansivo.

3 La palabra actual que empleamos para designar el adobe proviene del término egipcio dbt que significa "ladrillo de barro crudo".

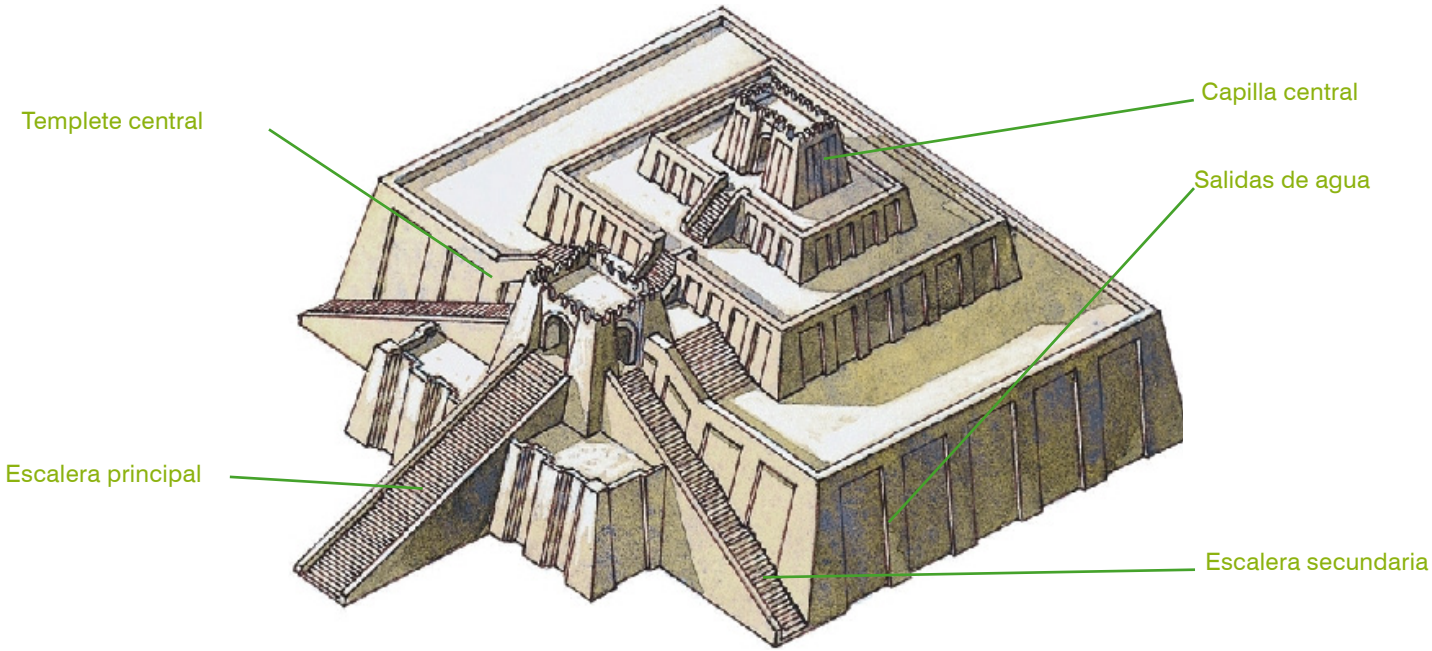


El origen de la construcción con ladrillo se remonta a la más lejana antigüedad. Podría decirse que el ladrillo es el material de construcción más antiguo fabricado por el hombre. Se sabe que los habitantes de Jericó en Palestina fabricaban ladrillos desde hace unos 9.000 años, y eran utilizados como el principal material de construcción debido a la escasez de madera y piedras naturales. La importancia de la arcilla para las primeras sociedades sedentarias llega incluso a reflejarse en la religión de dichos pueblos, así según el Génesis, *"Dios utilizó la arcilla para modelar al hombre".*

Los sumerios y babilonios levantaron zigurats[4], palacios e incluso ciudades amuralladas con ladrillos secados al sol, que recubrían con otros ladrillos cocidos en hornos, más resistentes y decorativos, para lo cual los revestían con esmaltes brillantes formando frisos ornamentales. Se fabricaban ladrillos allí donde se disponía de arcilla, generalmente en zonas próximas a los ríos o llanuras aluviales, como en Mesopotamia donde la arcilla era el material de construcción más asequible, tanto para muros en forma de adobes y ladrillos, como para cubiertas y suelos. Su uso en la construcción se difundió primero a Egipto[5] y al lejano Oriente, pasando después a Europa a través de Grecia y Roma. En sus últimos años los persas construían con ladrillos al igual que los chinos, que levantaron la gran muralla.

El mundo greco-romano fue más lento en la incorporación de la arcilla a sus edificaciones, ya que no utilizan el ladrillo cocido hasta aproximadamente el siglo I a. C. Una gran aportación de los griegos es la invención de la teja, que servía para cubrir los techos y proteger las estructuras de madera[6].

La cultura del Imperio Romano, a pesar de haberse incorporado tardíamente a la utilización de la arcilla como material básico, fue sin embargo la gran difusora de la construcción en ladrillo, consiguiendo además unas piezas cerámicas muy resistentes con gran riqueza de formas y tamaños. La técnica de diseñar y construir con ladrillo permitió la realización de los vastos complejos monumentales del Imperio, por la posibilidad de reducir costes y tiempo. Los monumentos erigidos con ladrillo se podían terminar en un corto plazo, pudiendo ser revestidos posteriormente con piedra o con estuco para mejorar el acabado. Los romanos construyeron con ladrillos baños, anfiteatros y acueductos que, en la mayoría de las ocasiones, revistieron de mármol.



Esquema de templo mesopotámico o *Zigurat*

Durante el curso de la Edad Media, tanto en el Imperio Bizantino como en el norte de Italia, en los Países Bajos y en Alemania, así como en cualquier otro lugar donde escaseara la piedra, los constructores valoraban el ladrillo por sus cualidades decorativas y funcionales. Realizaron construcciones con ladrillos templados, rojos y sin brillo, creando una amplia variedad de formas, como cuadros, figuras de punto de espina, de tejido de esterilla o lazos flamencos. Esta tradición continuó en el renacimiento y en la arquitectura georgiana británica, que utilizaba el ladrillo tanto en edificios domésticos como en palacios y castillos y fue llevada a América del Norte por los colonos[7].

Pero fue en España donde, por influencia musulmana, el uso del ladrillo alcanzó mayor difusión, sobre todo en Castilla, Aragón y Andalucía. Los enladrillados policromos propios de la arquitectura neogótica del siglo XIX supusieron otro desarrollo estilístico europeo que se extendió por todo el mundo.

Desde entonces hasta nuestros días la técnica de construcción con ladrillo evoluciona continuamente. En la actualidad el ladrillo es un material muy presente, tanto en el ámbito doméstico como en edificios singulares o emblemáticos. A lo largo del último siglo reconocidos diseñadores y arquitectos han demostrado de forma fehaciente el papel que puede asumir el ladrillo en la arquitectura contemporánea.

Sin embargo, las piezas cerámicas, es decir los *ladrillos*, mantienen desde milenios sensiblemente la misma composición, proporción, tamaño, forma y aspecto. Este carácter tradicional de los ladrillos cerámicos (y cuando hablamos de tradición nos referimos a una tradición milenaria) que se mantiene como un invariante a lo largo de la historia es, cuando menos, una garantía de idoneidad de su diseño para todas y cada una de las aplicaciones a las que se ha destinado.

Parroquia Santuario
Nuestra Señora del Perpetuo Socorro
Arquitecto Juan Bautista Lázaro
(1849-1919)
Estilo gótico racionalista

4 La configuración de la torre de Babel bíblica corresponde al tipo arquitectónico del *zigurat*. La descripción da idea de que ya se conocía la técnica de cocer la arcilla: "Y *se dijeron unos a otros: Venid, hagamos ladrillos y cozámoslos al fuego. Y se sirvieron de ladrillos en lugar de piedras, y de betún en vez de argamasa…"* (Libro del Génesis, Capítulo XI, versículo 3).

5 En Egipto la roca también era muy abundante, lo que provocó que ambos materiales constructivos alternaran. En general, la piedra se reservaba para conjuntos arquitectónicos de gran entidad y elevado costo como los templos.

6 Los romanos desarrollaron y perfeccionaron el sistema de tejas inventado por los griegos con el uso de *tegulas* e *imbrices*.

7 Aunque en algunos textos históricos se atribuye a los colonos la introducción de los ladrillos en el nuevo continente, lo cierto es que el ladrillo, en sus formas incipientes, ya era conocido por los indígenas americanos de las civilizaciones prehispánicas. En regiones secas construían casas de ladrillos de adobe secado al sol. Las grandes pirámides de los olmecas, mayas y otros pueblos fueron construidas con ladrillos revestidos de piedra.

Fabricación de los ladrillos cerámicos

El trabajo de la arcilla como realización humana consciente aparece por primera vez en el Paleolítico Superior (25.000 a. C.) con las esculturas de barro secas. Desde este primer momento hasta la actualidad, las técnicas y métodos de elaboración de la arcilla han experimentado una constante evolución, a la vez que ha aumentado la demanda y la variedad de usos aplicados a los productos cerámicos.

Existe una gran diversidad de procesos para fabricar los productos cerámicos en general. Teniendo en cuenta que los usos de la arcilla, desde la antigüedad, trascienden el campo de la construcción, la elección del proceso adecuado para un producto particular se fundamenta en la complejidad de la forma, los requisitos de prestaciones específicas y el costo del producto terminado.

En particular, los ladrillos son productos cerámicos de formas simples y de costo relativamente barato, pero con una gran diversidad de campos de aplicación y cada vez con mayores exigencias en lo que se refiere a prestaciones mecánicas y físicas para su adecuado empleo en la construcción de edificios.

Chace Center (Integrado en la Escuela de Diseño de Rhode Island)
Arquitecto: Rafael Moneo

La fabricación de ladrillos cerámicos para la construcción actual es un proceso cada vez más industrializado, resultado de una constante evolución de las técnicas y sistemas, para conseguir productos de elevadas prestaciones en diferentes aspectos, que se han ido adaptando a lo largo de mucho tiempo a las exigencias de calidad que la sociedad reclama para sus edificios. A continuación se expone una breve síntesis del conjunto de los procesos fundamentales encaminados a la fabricación de ladrillos. Sólo hacemos una pequeña alusión a las técnicas no industriales, aunque muchas de ellas siguen siendo empleadas hoy día por alfares de producción artesanal, habida cuenta de que las variantes regionales e incluso locales son muy significativas.

Fabricación de ladrillos: Materia prima

La materia prima fundamental utilizada para la producción de la cerámica tradicional y de los ladrillos en particular es la arcilla[8], por tratarse de un elemento que, al aplicarle agua, se convierte en dúctil y maleable. La forma que se le confiere cuando está húmeda se conserva tras la desaparición del agua, haciendo de este material el más versátil de los que el hombre ha tenido a su alcance. La abundancia de la arcilla en la naturaleza, su relativa facilidad de tratamiento y la resistencia e impermeabilidad que confiere a los elementos, son los motivos de que este material sea uno de los más profusamente utilizados desde las civilizaciones antiguas.

La arcilla se compone, en esencia, de sílice, alúmina, agua y cantidades variables de óxidos de hierro y otros materiales alcalinos, como los óxidos de calcio y los óxidos de magnesio. Las arcillas que tienen mejores condiciones para la industria cerámica son las secundarias o sedimentarias, producto de la descomposición de los feldespatos por la acción erosiva de la atmósfera, junto con la acción química del anhídrido carbónico y emanaciones volcánicas, que han sido transportadas y depositadas a lo largo del tiempo en pantanos, lagos o ríos, adquiriendo diversas sustancias durante el traslado y la sedimentación, que las hacen aptas para las distintas aplicaciones. Se presentan en terrenos estratificados, generalmente en capas muy regulares.

Las arcillas micáceas son las más abundantes en la corteza terrestre y las que se emplean habitualmente en la industria ladrillera. Su estructura está formada por la superposición de un gran número de planos paralelos idénticos entre sí.

Las propiedades físicas más destacadas de la arcilla son: el tamaño de la partícula, la fluidificación, la plasticidad por la mezcla con una adecuada cantidad de agua, el endurecimiento por la acción de calor, la coloración debida a la presencia de óxidos metálicos y la capacidad de absorber materiales como aceites, colorantes o gases.

Las propiedades químicas más importantes para la industria cerámica son las relacionadas con las reacciones efectuadas entre los diferentes silicatos de la arcilla para formar un material con propiedades específicas como resistencia, dureza, densidad y baja absorción.

- *Tamaño de las partículas de la arcilla*

Las partículas de arcilla tienen un tamaño inferior a una micra (μ = 0,001 mm), por lo que presentan una gran superficie relativa al volumen, lo que favorece las otras dos propiedades de fluidificación y plasticidad.

- *Fluidificación de la arcilla*

La arcilla tiene la propiedad de mantenerse en suspensión en el agua durante un cierto tiempo, depositándose lentamente en estratos. Esta velocidad de sedimentación puede ser acelerada o retardada añadiéndole un electrolito.

Las arcillas en general tienen reacción alcalina. Los electrolitos alcalinos aumentan la fluidificación y deslizamiento; al contrario que los ácidos, que provocan la coagulación o floculación.

- *Plasticidad de la arcilla*

La *plasticidad* se define en física como la propiedad que tiene un cuerpo de conservar una deformación permanente por la acción de una fuerza. Representa un estado intermedio entre el sólido y el líquido.

Las arcillas poseen la propiedad de adquirir plasticidad a medida que se les añade agua, pasando por un máximo, y después disminuye al formarse una suspensión, por separarse demasiado las laminillas de material al interponerse el agua en su estructura cristalina.

La plasticidad depende de la naturaleza del mineral disperso y de la polaridad del líquido, por lo que existen varias teorías para explicar la plasticidad de las arcillas: morfológicas (tamaño y forma de las partículas), físicas (capilaridad y tensión superficial) y químicas (fenómenos coloidal y electroquímicos).

Se puede intervenir en la plasticidad de las arcillas incorporando determinados productos. La plasticidad aumenta con sustancias inorgánicas, como los hidróxidos, carbonatos o silicatos sódicos; y sustancias orgánicas, como el oxalato y lactato sódico, tanino, ácido oleico y humus. Disminuye con productos desgrasantes y fundentes, como la arena, que se añade en la fabricación de ladrillos para evitar las grietas en el proceso de desecación; o el serrín, turba, menudos de carbón y grafito, que se añaden para conseguir ladrillos ligeros.

La temperatura también disminuye la plasticidad puesto que provoca una disminución de agua, aunque se precisa que sea elevada. El aire interpuesto es causa de disminución de la plasticidad, por lo que es habitual hacer el vacío en la máquina extrusora para aumentarla.

8 También se utilizan otras materias plásticas, como el *caolín*, llamado así al silicato de aluminio hidratado o arcilla pura; y otras no plásticas, como los desgrasantes, fundentes y colorantes.

Fabricación de ladrillos: Procesos

Extracción de la arcilla

La obtención de arcilla se puede realizar de diversas formas, aunque los procedimientos fundamentales de extracción son dos, en función de la situación de la cantera.

La arcilla que se halla en la orilla de los ríos y en superficie se consigue cortándola en bloques. Resulta un sistema sencillo pero tiene el inconveniente de portar gran cantidad de materia orgánica que debe ser eliminada para la correcta cocción de la pasta.

La arcilla enterrada se debe extraer de forma parecida a la que se utiliza en las minas a cielo abierto. El procedimiento consiste en cavar hasta encontrar una veta arcillosa, que queda expuesta completamente, separándola de las capas de tierra y vegetación. Se crea de esta manera una mina a cielo abierto de la cual se obtiene la arcilla cortándola en bloques.

La situación geográfica de las factorías suele estar íntimamente relacionada con el lugar en el que se obtiene la materia prima con el objeto de facilitar su transporte o incluso eliminarlo completamente.

Maduración de la arcilla

Antes de incorporar la arcilla al ciclo de producción, hay que someterla a ciertos tratamientos de trituración, homogeneización y reposo en acopio, para obtener una adecuada consistencia y uniformidad de las características físicas y químicas deseadas.

El reposo a la intemperie tiene, en primer lugar, la finalidad de facilitar el desmenuzamiento de los terrones y la disolución de los nódulos para impedir las aglomeraciones de las partículas arcillosas.

Se suelen preparar las arcillas provocando primero una meteorización, exponiéndolas en capas de pequeño espesor a la acción del hielo y lluvias, para que se disgreguen y laven.

La exposición a la acción atmosférica favorece, además, la descomposición de la materia orgánica que pueda estar presente y permite la purificación química y biológica del material. De esta manera se obtiene un material completamente inerte y poco propenso a posteriores transformaciones mecánicas o químicas.

Tratamiento mecánico previo

Después de la maduración que se produce en la zona de acopio, sigue la fase de pre-elaboración que consiste en una serie de operaciones cuya finalidad es purificar y refinar la materia prima.

En primer lugar se rompe el material hasta reducir las dimensiones de los terrones a un diámetro comprendido entre 15 y 30 mm. A continuación se separa la arcilla de las piedras o chinos, haciéndola pasar por dos cilindros que giran a diferentes velocidades. El *desintegrador* se encarga de triturar los terrones de mayor tamaño, más duros y compactos, por la acción de una serie de cilindros dentados.

La última operación de esta fase es el paso por el *laminador refinador*, formado por dos cilindros rotatorios lisos montados en ejes paralelos, separados entre sí de 1 a 2 mm, espacio por el cual se hace pasar la arcilla sometiéndola a un aplastamiento y un planchado que hacen aún más pequeñas las partículas. Así se consigue la eventual trituración de los últimos nódulos que pudieran estar todavía en el interior del material.

Humidificación de la arcilla

Antes de iniciar la operación de moldeo, se lleva la arcilla a un mezclador, donde se agrega agua para obtener la humedad precisa, en proporciones diferentes según el procedimiento que se vaya a utilizar en el moldeo, hasta formar un barro consistente.

Las partículas del material son capaces de absorber higroscópicamente hasta el 70% en peso de agua. Debido a la característica de absorber humedad, la arcilla, cuando está hidratada, adquiere la plasticidad suficiente para ser moldeada, muy distinta de cuando está seca, que presenta un aspecto terroso.

Moldeo de la masa

La fase de fabricación de la cerámica en la cual la materia prima inicial adquiere formas útiles se llama *moldeo primario.* En este proceso se aprovecha la plasticidad de la arcilla cuando se mezcla con agua, aunque se pueden agregar plastificantes orgánicos para lograr la plasticidad deseada, o desgrasantes que confieren a la pasta una mayor resistencia y una menor contracción durante el secado[9].

El moldeo normalmente se hace en caliente utilizando vapor saturado aproximadamente a 130° C y a presión reducida. Procediendo de esta manera, se obtiene una humedad más uniforme y una masa más compacta, puesto que el vapor tiene mayor poder de penetración que el agua.

En general, los procesos de moldeo primario se pueden realizar por vaciado, extrusión, prensado, grabado y moldeo por inyección. Los habituales en la fabricación de ladrillos cerámicos son el moldeo por extrusión y el moldeo por prensado[10].

La *extrusión* es un proceso que consiste en forzar a que la masa plástica pase a través de una boquilla situada al final de la extrusora. La boquilla es una plancha perforada que tiene la sección en negativo del objeto que se quiere producir.

La tira expulsada se corta posteriormente a la longitud deseada, procurando que resulten ásperas las caras que forman los lechos para que se adhieran mejor al mortero. A menudo se usan procesos secundarios de acabado para dar la forma exacta a la pieza obtenida por extrusión. Los ladrillos obtenidos por este procedimiento deben mantener constante la sección, reproducida en negativo por la forma de la boquilla.

El *prensado* se usa si las piezas a fabricar tienen relieves y superficies curvas, que no se pueden producir por extrusión. El proceso consiste en conseguir la forma de las piezas por consolidación bajo presión. Las mezclas que se utilizan contienen menor proporción de agua que las utilizadas en el proceso de extrusión. Los productos resultantes son más compactos, con la forma general del recipiente y cualquier perfil del estampado inferior[11].

Los moldes deben ser de mayores dimensiones que las del objeto que se desea obtener, para prever la contracción (entre el 10% y el 15%) que experimentan las pastas en los siguientes procesos de desecación y cocción.

Desecación de la arcilla

La desecación previa a la cocción es una de las fases más delicadas del proceso de fabricación de ladrillos. De esta etapa depende, en gran parte, el buen resultado y la calidad del producto, sobre todo en lo que se refiere a la ausencia de fisuras.

Tiene por objeto eliminar de la pasta el agua de amasado, que viene a ser del 15% al 50% de su peso, hasta que quede reducida al mínimo posible, en torno a un 5%.

La desecación se debe practicar de una manera lenta y gradual, para evitar alabeos y resquebrajaduras, produciéndose una disminución paulatina de peso y un color más claro. Es normal que la eliminación del agua del material crudo se lleve a cabo insuflando aire caliente mezclado con una cantidad de humedad variable. Esto elimina cambios bruscos de temperatura y humedad y, por tanto, evita la producción de fisuras localizadas[12].

Esta operación se realiza en secadores situados generalmente en la parte alta de los hornos anulares para aprovechar el calor que irradia del horno. A veces se hace circular aire de un extremo a otro, por el interior del secador, y otras veces es el material el que circula por el interior en sentido contrario al aire calentado por unos radiadores, con los gases del horno, e impulsado por un ventilador o aspirador.

El recorrido suele durar unas veinticuatro horas, consiguiéndose de esta forma una desecación gradual, puesto que los ladrillos húmedos se van poniendo en

9 La utilidad de los desgrasantes era conocida por los antiguos egipcios en la fabricación de adobe. El barro del río Nilo reduce su tamaño casi un 30% cuando se seca; sólo la acción de estos compuestos permitía que los adobes se mantuvieran compactos y sin quebrarse.

10 El moldeo de ladrillos en la antigüedad tenía sus propios procedimientos que es posible reconstituir gracias a la información histórica, como las pinturas murales de tumbas egipcias y fuentes literarias romanas. La mezcla de arcilla y otros elementos (paja y arena), una vez se había constituido en una masa compacta y homogénea, se vertía en un molde con forma de paralelepípedo que solía estar recubierto con una fina capa de arena para evitar que se pegara. En países como Egipto, la cercanía a campos con paja y la proximidad de una fuente inagotable de agua facilitaban la rapidez en el moldeo de ladrillos. Una fábrica con una cuadrilla de cuatro albañiles produce tres mil ladrillos diarios en el Egipto moderno siguiendo el procedimiento antiguo. Aun admitiendo que la velocidad de producción fuera menor en época faraónica, la cantidad total sería considerable.

11 En los ladrillos cocidos de la antigüedad se estampillaban a veces diversos motivos como el nombre del fabricante, del comerciante, del emperador reinante o de los cónsules. Esta costumbre comienza en Mesopotamia, y se extendió a Egipto y Roma.

12 Vitrubio en su obra *"De Architectura"* indicaba que las épocas del año más satisfactorias para orear las piezas cerámicas eran la primavera y el otoño, pues en ellas el secado se producía lentamente y sin cambios fuertes de temperatura.

contacto con el aire primeramente frío y húmedo que ha secado los ladrillos que le preceden, y después, gradualmente, con el aire más seco y caliente.

Cocción de los ladrillos

Las formas porosas obtenidas por moldeo se deben convertir en un material denso. Este proceso de la fabricación de ladrillos se denomina *cocción* en general, y también, con carácter más restringido, *sinterización* o *vitrificación* cuando se refiere a la fabricación de otros materiales cerámicos tradicionales.

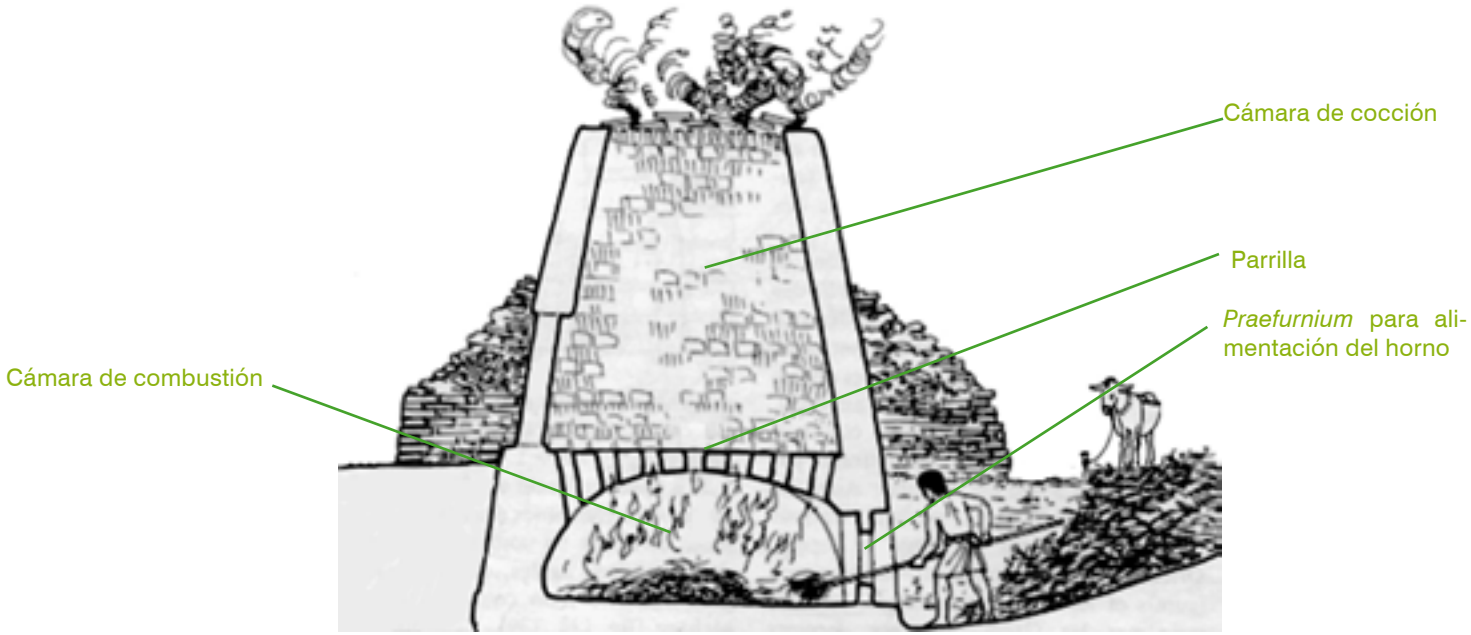
En esta fase de la fabricación se consigue que la forma de los productos moldeados cerámicos permanezca inalterable, debido a la consistencia pétrea que adquieren por las reacciones que se verifican entre los elementos constitutivos de las arcillas. Este proceso es fundamental para conseguir piezas con las características mecánicas adecuadas. La cocción se debe producir a una temperatura determinada y durante el tiempo necesario para que lleguen a formarse las fases vítreas que suponen la densificación del material.

En la antigüedad se utilizaban hornos cerrados para la cocción de los ladrillos. El horno cerrado romano supone la culminación del modelo tradicional y estaba compuesto por tres partes fundamentales: la zona donde ardía la materia vegetal, la cámara de fuego en la que se expandía la llama y la cámara de cocción, en la que se cargaba y cocían los ladrillos. La cochura era muy larga, con una duración aproximada de tres días.

En las fábricas actuales de ladrillo la cocción se realiza en hornos de túnel, de unos 2 m^2 de sección y que en algunos casos pueden llegar a medir hasta 120 m de longitud. En el interior del horno la temperatura varía de forma continua y uniforme; hay una zona de caldeo, otra central de cocción y la de enfriamiento. La temperatura punta oscila entre 900ºC y 1200ºC.

El material desecado colocado en carros especiales entra de forma continua por una de las extremidades del túnel, y sale por el extremo opuesto una vez que está cocido.

Durante las fases de endurecimiento, por secado o por cocción, el material arcilloso adquiere características de notable solidez con una disminución de masa, por pérdida de agua, comprendida entre un 5% y un 15%, referida a su estado plástico inicial. Los cambios más significativos que expe-



Esquema en sección de horno romano

rimenta la masa arcillosa con el calor, en función de la temperatura, son los siguientes:

La eliminación del agua higroscópica se produce a una temperatura aproximada de 100º C; en esta fase la arcilla todavía no pierde su agua de composición y conserva la propiedad de producir masas plásticas. La pérdida de la plasticidad se produce cuando el agua llamada *de combinación* es liberada, a temperaturas comprendidas entre 300º C y 400º C. Alrededor de los 700º C el agua de la arcilla es eliminada totalmente.

Las propiedades tales como la dureza, contracción y sonoridad se adquieren por la acción del calor, alrededor de los 800º C, cuando la sílice y la alúmina comienzan a formar un silicato anhidro, combinación que se completa en torno a los 1.100º C. Alrededor de 1.500º C aparecen los primeros síntomas de vitrificación.

Vidriado de los ladrillos, esmalte y pintura

Después de la cocción, las piezas cerámicas pueden requerir algún tipo de acabado específico para lograr determinadas propiedades de la superficie.

El vidriado consiste en cubrir con una capa vítrea la superficie de los productos cerámicos para hacerlos impermeables a los líquidos, fáciles de limpiar, y con diversas coloraciones mediante los esmaltes.

Los ladrillos y tejas se suelen vidriar con cloruro sódico o sal común, echándola sobre los objetos hacia el final de la cocción, que se disocia en cloro y sodio; el sodio reacciona con la arcilla, formando un silicato alumínico sódico, que confiere al producto las propiedades del vidriado.

Los colores cerámicos se consiguen por la presencia de óxidos metálicos fundidos con silicatos alumínico-alcalinos (fundentes). Los más utilizados son los óxidos de hierro por su actividad y abundancia; dependiendo de si la llama es oxidante o reductora se obtiene color rojo, amarillo, pardo, verde o gris. También se utiliza el óxido de cobalto para el tono azul, el de cromo para algunos tonos verdes, el de estaño para el blanco; y el de platino e iridio para distintas tonalidades de gris y negro.

Almacenaje de los ladrillos

Antes del embalaje se procede a la formación de paquetes sobre palés, que permitirán después moverlos fácilmente con carretillas de horquilla. El embalaje consiste en envolver los paquetes con cintas de plástico o de metal, de modo que puedan ser depositados en lugares de almacenamiento para posteriormente ser trasladados en camión.

Ladrillo vidriado

Especificaciones técnicas de los ladrillos cerámicos

Las especificaciones técnicas de los ladrillos cerámicos están recogidos en la norma UNE-EN 771-1:2003/A1:2006 *"Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: piezas de arcilla cocida"*.

Las características mecánicas y físicas de los ladrillos cerámicos, que deben ser objeto de especificación en proyecto, puesto que intervienen en su comportamiento estructural y condiciones de uso, se determinan de acuerdo con los criterios y procedimientos de las siguientes normas de ensayo:

- UNE 772 *"Métodos de ensayo para piezas de fábrica de albañilería".*

Esta norma se compone de varias partes, dedicada cada una de ellas al aspecto específico que constituye el objeto de ensayo[13].

- UNE 67027:1984 *"Ladrillos de arcilla cocida. Determinación de la absorción de agua".* (Actualmente en desuso, se sustituye por el anejo C de la UNE-EN 771-1)

- UNE 67028:1997 EX *"Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de heladicidad".*

- UNE 67030:1985 *"Ladrillos de arcilla cocida. Medición de las dimensiones y comprobación de la forma".* (Actualmente en desuso, se sustituye por la UNE 772-16)

- UNE 67036:1999 *"Productos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de expansión por humedad".*

- UNE 67039:1993 EX *"Productos cerámicos de arcilla cocida. Determinación de inclusiones calcáreas"*.

Geometría de los ladrillos

La forma del ladrillo es la de un prisma rectangular, y esta característica ha sido un invariante desde sus orígenes. El tamaño de los ladrillos, una vez se afianzó el proceso de fabricación, se fue estandarizando para facilitar la construcción de muros[14].

Cada una de las tres aristas del prisma reciben el nombre de *soga, tizón* y *grueso*, respectivamente de mayor a menor. De la misma manera, cada una de las diferentes caras del ladrillo recibe el nombre de *tabla* (soga x tizón), *canto* (soga x grueso) y *testa* (tizón x grueso).

Por lo general, la *soga* tiene el doble de longitud que el *tizón* o, más exactamente, dos tizones más una junta, lo que permite combinarlos de diferentes formas. El *grueso,* por el contrario, puede no estar modulado.

Existen diferentes formatos de ladrillos, por lo general de un tamaño que permita manejarlos con una mano. Los ladrillos cara vista usados con mayor frecuencia, según las regiones, son el formato *métrico* o *castellano*, de 24 cm de soga y 11,5 cm de tizón; y el formato *catalán* de 29 cm de soga y 14 cm de tizón (nótese que la soga es dos veces el tizón más 1 cm de junta). El grueso es variable, ajustándose a los valores de la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Dimensiones aproximadas de los ladrillos

Dimensiones: soga x tizón x grueso (cm)	
Formato métrico o castellano	Formato catalán
24 x 11,5 x 7	29 x 14 x 7,5
24 x 11,5 x 5,2	29 x 14 x 6
24 x 11,5 x 3,5	29 x 14 x 5,2

Clasificación de los ladrillos

De las numerosas clasificaciones del ladrillo según el aspecto que se analice (proporción y orientación de huecos, geometría, acabado exterior, etc.) citamos en primer lugar la clasificación fundamental según la *clase*, que hace referencia a su campo de aplicación.

Ladrillo visto (V)

Los ladrillos vistos o *cara vista* deben tener alguna de sus caras con un acabado apropiado para manifestarse al exterior sin ningún tipo de revestimiento.

Las características que determinan el comportamiento de los ladrillos cara vista son la *absorción* y la *succión* (*ver apartado de características)*.

Ladrillo común (NV)

Son ladrillos para utilizar normalmente en muros de carga y fábricas revestidas.

Tanto los ladrillos vistos como los ladrillos comunes deben tener las paredes con espesor suficiente para evitar fisuras en el proceso de fabricación o en el acopio y puesta en obra.

Los ladrillos se pueden clasificar también atendiendo al *grupo* al que pertenecen según la proporción, posición y tamaño de los huecos.

13 Relación de Normas UNE 772 que se refieren a procedimientos de ensayo de piezas cerámicas:

- UNE 772-1:2002 *"Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión".*
- UNE 772-2:1999/A1:2005 *"Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 2: Determinación del porcentaje de superficie de huecos en piezas para fábrica de albañilería (por impresión sobre papel)".*
- UNE 772-3:1999 *"Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 3: Determinación del volumen neto y del porcentaje de huecos por pesada hidrostática de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería".*
- UNE 772-5:2002 *"Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 5: Determinación del contenido en sales solubles activas en las piezas de arcilla cocida para albañilería".*
- UNE 772-7:1999 *"Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 7: Determinación de la absorción de agua por inmersión en agua hirviendo de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería que sirven de barrera al agua por capilaridad".*
- UNE 772-9:1999/A1:2008 *"Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 9: Determinación del volumen y porcentaje de huecos y del volumen neto, de piezas de arcilla cocida y silicocalcáreas para fábrica de albañilería, mediante relleno de arena".*
- UNE 772-11:2001/A1:2006 *"Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería, en hormigón, piedra natural y artificial, y de la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería".*
- UNE 772-13:2001 *"Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 13: Determinación de la densidad absoluta seca y de la densidad aparente seca de piezas para fábrica de albañilería (excepto piedra natural)".*
- UNE 772-20:2001/A1:2006 *"Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 20: Determinación de la planeidad de las caras de piezas para fábrica de albañilería".*

14 Vitrubio y Plinio indican cuáles son las medidas más frecuentes para los ladrillos crudos (*Lidio* 29,6 x 14,8; *tetradoron* 29,6 x 29,6; *pentadoron* 37 x 37). A pesar de que los estudios del mismo tipo para el Próximo Oriente y Egipto no están tan avanzados, se cree que las dimensiones del ladrillo también serían homogéneas, cuando menos por regiones y alfares.

Ladrillo macizo

Es el ladrillo sin perforaciones o con perforaciones en la tabla de volumen total no superior al 25% de la pieza, y de sección de cada perforación no superior a 2,5 cm^2.

Los ladrillos macizos se pueden obtener mediante un proceso de extrusionado de la arcilla a través de una boquilla o por prensado sobre un molde. En este último caso las arcillas deben tener una granulometría específica y bajo contenido en humedad.

La mayoría de los ladrillos macizos se utilizan como ladrillos vistos. En particular, los ladrillos prensados tienen las características adecuadas para conseguir fachadas de gran efecto estético utilizando aparejos sin llagas (*"a hueso"*). Algunos incorporan en una o ambas tablas unos rebajos llamados *cazoletas*, cuya utilidad es la de poder albergar un espesor de mortero suficiente para garantizar la perfecta adherencia entre las piezas, evitando problemas de estanquidad y resistencia, sobre todo si se emplean llagas de espesores inferiores a 0,5 cm. También suelen llevar rebajos en las testas para posibilitar la ejecución de muros sin llagas.

Ladrillo perforado

Presenta perforaciones en la tabla de volumen comprendido entre el 25% y el 45% del volumen de la pieza. Se obtienen por extrusión de la arcilla a través de una boquilla.

La resistencia y la estanquidad quedan aseguradas al penetrar el mortero en las perforaciones, lo que asegura una adherencia perfecta entre ambos materiales.

El ladrillo perforado es el que se utiliza con mayor profusión en muros de carga y en cerramientos de ladrillo cara vista, empleándose habitualmente en aparejos con llagas convencionales, en torno a 1 cm de espesor.

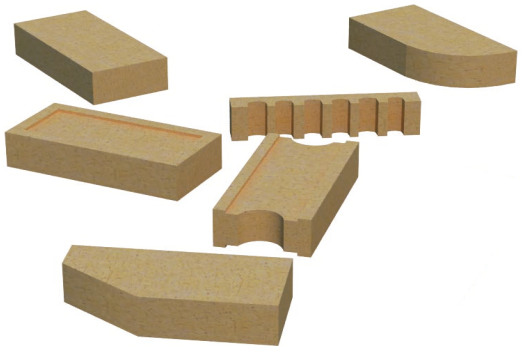
Ladrillo hueco

Presenta perforaciones en el canto o en la testa, cuya superficie de cada una de ellas no debe ser superior a 16 cm^2, lo que reduce el volumen de cerámica y de mortero empleado en la fábrica.

Su uso está restringido a tabiquería o a muros que no deben soportar cargas especiales y, los de mayor espesor, a cerramientos de fachada.

Se resumen en la tabla 2.2 las características y proporciones de huecos de cada uno de los grupos de piezas, según el *Documento Básico Seguridad Estructural: Fábrica*[15] del Código Técnico de la Edificación.

Existen otros tipos especiales de ladrillo, que se caracterizan por tener alguna prestación específica en alguno de los aspectos relacionados con el acabado, el uso o la función a la que se destinan. Se indican los siguientes:



Ladrillos macizos

Tabla 2.2. Grupos de piezas

Característica	Grupo		
	Maciza	Perforada	Hueca
Volumen de huecos (% del bruto) (1)	≤ 25	≤ 45	≤ 70
Volumen de cada hueco (% del bruto)	≤ 12,5	≤ 12,5	≤ 12,5
Espesor combinado (% del ancho total) (2)	≥ 37,5	≥ 20	--

(1) Los huecos pueden ser huecos verticales que atraviesen las piezas, rebajos o asas.

(2) El espesor combinado es la suma de los espesores de las paredes y tabiquillos de una pieza, medidos perpendicularmente a la cara del muro.

*Fuente: DB SE-F, Tabla 4.1 "Grupos de piezas".

Ladrillo de tejar o manual

Simula el antiguo ladrillo de fabricación artesanal, presentando una apariencia tosca con caras rugosas y no muy planas.

Se utiliza por su aspecto estético, produciendo excelentes resultados ornamentales.

No está sujeto a las tolerancias dimensionales.

Ladrillo de baja succión

Es el que tiene una succión inferior a 0,5 kg / (m^2·min), lo que supone la necesidad de observar una serie de recomendaciones específicas para conseguir una correcta puesta en obra.

La cualidad de *baja succión* se consigue en el proceso de fabricación utilizando materias primas específicas, o sometiendo a los ladrillos a un tratamiento posterior, lo cual da lugar los siguientes tipos:

Ladrillo klínker y ladrillo gresificado

Son ladrillos cerámicos fabricados a partir de arcillas especiales que, al ser cocidas a altas temperaturas, cierran de tal forma su porosidad que dan como resultado un material muy denso y poco absorbente.

Tanto el *ladrillo klínker* como el *ladrillo gresificado* tienen una densidad superior a 2 g/cm^3, y un coeficiente de absorción inferior al 6%. Además, el ladrillo klínker tiene una resistencia a normalizada a compresión superior a 40 N/mm^2.

Pueden ser perforados, macizos o prensados.

Ladrillo hidrofugado

El hidrofugado es un proceso que consiste en la aplicación de un producto que repele la humedad, bien por inmersión o bien por aspersión. Cuando se utiliza el sistema de aspersión, el hidrofugante se aplica sólo a las caras vistas y, a veces, parcialmente a las tablas, quedando sin hidrofugar zonas del interior de las perforaciones. Mediante el procedimiento de inmersión queda hidrofugada la totalidad de la superficie del ladrillo.

Es importante destacar que este proceso no elimina la capacidad de transpiración del ladrillo; esto significa que la pieza hidrofugada es impermeable al agua en estado líquido, pero mantiene la permeabilidad al paso de la misma en forma de vapor.

Ladrillo esmaltado

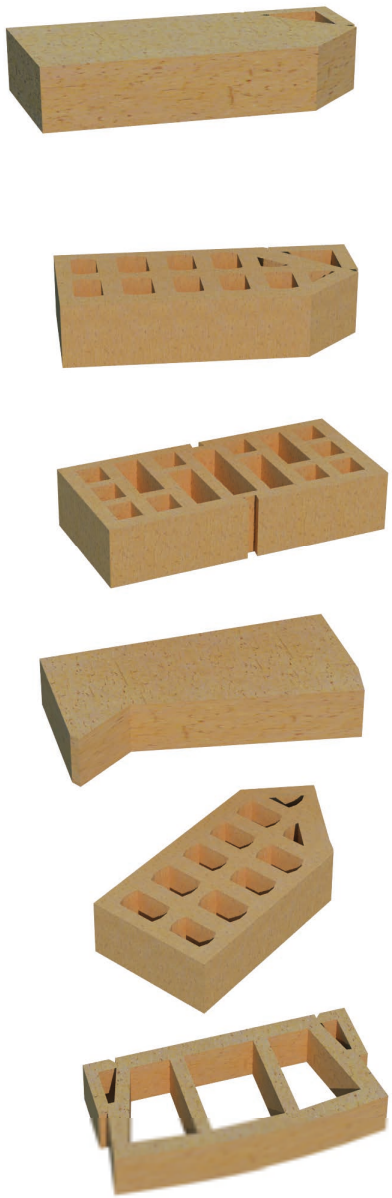
Es un ladrillo con sus caras vistas revestidas con esmalte, por monococción. Esto permite obtener una gran variedad de colores según los compuestos utilizados.

Tanto la succión como la absorción de los ladrillos esmaltados son prácticamente nulas en las caras vistas, por lo que su comportamiento ante el agua de lluvia es mejor que el correspondiente a los ladrillos comunes. En el resto de las caras las características siguen siendo las mismas de un ladrillo visto.

Ladrillos especiales

Son ladrillos de formas diversas, que se obtienen con boquillas o moldes especiales, gracias a la versatilidad del material cerámico. Responden a nece-

15 En adelante, DB SE-F.



Ladrillos especiales

sidades funcionales y ornamentales, por lo que algunas de sus características geométricas no están recogidas en la normativa, ya que corresponden a diseños particulares.

Habitualmente estas piezas se emplean para formar parte de un arco, realizar ménsulas, rematar cornisas y muros, encuentros en esquina, uniones en ángulo, cambios de espesor, redondeos, etc., facilitando el diseño y mejorando el acabado de encuentros complicados y puntos singulares.

Ladrillo acústico o fonoabsorbente

Es un ladrillo con el que se consiguen muros que superan los 45 dBA de aislamiento acústico a ruido aéreo.

Se utiliza para medianerías, generalmente enlucido con 1 ó 1,5 cm de yeso por ambas caras, por sus características de aislante acústico.

Sus dimensiones más habituales son 25 x 12,2 x 6,8 cm; y la colocación es similar a la de cualquier otro ladrillo cerámico.

Ladrillo refractario

Es un producto cerámico con una resistencia al calor igual o superior a 1500º C, y que, además de una pequeña conductividad térmica, presenta una gran resistencia a los agentes químicos y a la abrasión en caliente.

Estas propiedades se deben a la mayor proporción de óxido de aluminio en la composición de las arcillas.

Se utiliza para revestir chimeneas, barbacoas y espacios que vayan a estar en contacto directo con el fuego.

Características de los ladrillos cerámicos

Forma y dimensiones

Los ladrillos deben presentar regularidad de forma y dimensiones para que sea posible la obtención de tendeles de espesor uniforme, igualdad de hiladas, paramentos regulares y ausencia de asientos diferenciales, Este requisito es especialmente importante en los ladrillos cara vista. El fabricante debe declarar las dimensiones de las piezas en milímetros, en este orden: largo, ancho y alto. Se deben indicar en términos de *dimensiones nominales*, aunque también se pueden dar las *dimensiones modulares*[16]. Debe declarar, además, las tolerancias y recorridos según las categorías definidas en las tablas 2.3 y 2.4 respectivamente.

Cuando las piezas se vayan a utilizar con junta fina de mortero, el fabricante debe declarar también la desviación máxima de la planeidad y del paralelismo de las caras.

Parámetros físicos y mecánicos

Los parámetros físicos y mecánicos de los ladrillos se limitan a determinados valores mínimos o máximos, según los casos, con el objeto de asegurar la resistencia mecánica, la durabilidad y el aspecto de las fábricas ejecutadas.

- *Masa*

La masa de los ladrillos cerámicos está íntimamente relacionada con la clase y grupo al que pertenecen. Los ladrillos cara vista pertenecen al grupo

Tabla 2.3. Tolerancias de las dimensiones de los ladrillos cara vista

Categoría	Tolerancia (el mayor de los dos valores)	
	Valor relativo (mm)	Valor absoluto
T1	± 0,40 • (dimensión nominal)$^{1/2}$ (en mm)	± 3 mm
T2	± 0,25 • (dimensión nominal)$^{1/2}$ (en mm)	± 2 mm
Tm	Desviación en mm declarada por el fabricante	

Tabla 2.4. Recorrido máximo de las dimensiones de los ladrillos cara vista

Categoría	Recorrido máximo (mm) (para cualquier dimensión de la muestra)
R1	0,60 • (dimensión nominal)$^{1/2}$ (en mm)
R2	0,30 • (dimensión nominal)$^{1/2}$ (en mm)
Rm	Recorrido en mm declarado por el fabricante

*Fuente: Norma UNE-EN 771-1:2003/A1:2006 *"Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Piezas de arcilla cocida"*. Apartado 5.3.1.2 *"Tolerancias dimensionales (piezas HD)"*.

de piezas macizas o perforadas, con una densidad aparente alta (mayor de 1000 kg/m^3, según la norma UNE-EN 771-1).

El fabricante debe declarar, tanto la densidad aparente como la densidad absoluta de las piezas, puesto que este parámetro interviene directamente en el cumplimiento de los requisitos acústicos.

- *Resistencia a compresión*

Según el DB SE-F, artículo 4.1 *"Piezas"*, párrafo 4, la resistencia normalizada[17] a compresión de los ladrillos debe ser como mínimo de 5 N/mm^2.

No obstante, se pueden aceptar piezas con una resistencia normalizada a compresión inferior, hasta 4 N/mm^2, en fábricas sustentantes y hasta 3 N/mm^2 en fábricas sustentadas, siempre que se limite la tensión de trabajo a compresión en estado límite último al 75% de la resistencia de cálculo de la fábrica, o se realicen estudios específicos sobre la resistencia a compresión de la misma.

La resistencia normalizada a compresión de los ladrillos debe ser declarada por el fabricante, y se expresa en múltiplos de 2,5 a partir del valor mínimo indicado.

- *Succión*

La succión es la característica que determina la velocidad con la que los ladrillos absorben el agua. Mide la masa de fluido que una pieza es capaz de incorporar inmediatamente después de ponerse en contacto con él, en relación a su superficie. La unidad de medida es kg / (m^2·min).

Este parámetro, que indica la cantidad de agua que el material puede absorber del mortero durante el fraguado, es considerado como el principal índice de las piezas cerámicas en relación con la adherencia final del aparejo. La succión depende del número de poros capilares de la pieza pero sin embargo no da idea de su estructura[18]. Los poros de mayor diámetro (más de 5 micras) no provocan ninguna interacción con el mortero, pues no se producen fuerzas capilares suficientes para vencer las de la porosidad de aquel. Estos poros sólo capturan agua libre pero no contribuyen a extraer agua del mortero. Por ello, una elevada capacidad de succión del líquido no garantiza siempre una elevada interacción con el mortero.

Estudios que relacionan la succión con la adherencia apuntan que la resistencia de la fábrica ante tracciones aumenta con la succión pero hasta valores moderados de ésta. Para altas succiones disminuye debido a la fuerte interacción con las piezas inferiores y pérdida de adherencia con la hilada superior.

La succión de las piezas también condiciona el tiempo utilizado en su puesta en obra. Durante el intervalo desde que se deposita el mortero sobre la hilada inferior hasta que se coloca la pieza superior, aquélla puede absorber gran cantidad de agua disminuyendo la trabajabilidad de la pasta, lo que se traduce en una merma de la adherencia final con la hilada superior. Este efecto es más acusado cuanto más tiempo transcurre si no se humedecen previamente las piezas.

16 Las *dimensiones nominales* son las dimensiones reales de las piezas teniendo en cuenta las desviaciones admisibles especificadas. Las *dimensiones modulares* son las dimensiones del espacio ocupado por las piezas, incluyendo las holguras necesarias de juntas y tolerancias.

17 Se define *"resistencia normalizada a compresión de piezas de fábrica"* la que se obtiene por asimilación a la de una pieza equivalente secada al aire, de 100 mm de ancho y 100 mm de alto. La *"resistencia característica a compresión"* es la correspondiente al fractil 5% de la resistencia.

18 Piezas con índices semejantes de succión pero de diferente estructura capilar, tomadas con el mismo mortero, proporcionan fábricas con distinta adherencia.

El pliego de condiciones técnicas particulares debe fijar el límite de succión de agua de los ladrillos. En ningún caso debe ser superior a 4,5 kg / (m^2·min).

Los valores extremos se dan para los ladrillos blancos con elevado porcentaje de carbonato cálcico en su materia prima, que presentan los valores máximos de succión; y en el otro extremo, con valores mínimos, los ladrillos klínker, gresificados e hidrofugados.

Los valores altos de succión pueden deshidratar el mortero, originando fisuras por las que pasa el agua a través del muro en periodos de lluvia relativamente cortos. Para evitar este problema hay que tomar la precaución de humedecer adecuadamente las piezas cerámicas antes de su colocación.

Cuando el valor de succión del ladrillo es inferior a 0,5 kg / (m^2·min), se califica de baja succión y no se debe humedecer antes de la colocación, siendo necesario, además, observar una serie de precauciones especiales en su puesta en obra para un adecuado comportamiento (*véase el capítulo de "Criterios").*

- Absorción

El coeficiente de absorción es la cantidad máxima de agua, expresada en porcentaje, que puede incorporar un ladrillo en su masa. Constituye un índice del adecuado proceso de cocción de los ladrillos.

El rango de variación del coeficiente de absorción oscila entre el 20% para los ladrillos blancos, y el 8% para los ladrillos cara vista comunes que se han cocido a 950ºC, dependiendo siempre del tipo de arcilla.

La absorción de agua se manifiesta en periodos prolongados de lluvia.

Este parámetro debe ser declarado por el fabricante si se utilizan las piezas como barrera de anticapilaridad.

- *Contenido de sales solubles*

Este parámetro es importante cuando los ladrillos se utilizan en fábricas vistas o con una protección limitada (por ejemplo una fina capa de mortero). El fabricante debe declarar el contenido de sales solubles activas, basándose en las categorías que se indican en la tabla 2.5.

- *Heladicidad*

Es la característica que determina el comportamiento del ladrillo frente a la acción del hielo. Constituye un parámetro determinante de la durabilidad de la fábrica.

Los *ladrillos vistos* deben obtener la clasificación de *"no heladizos"*, puesto que quedan expuestos directamente a la acción de las inclemencias ambientales. Los *ladrillos no vistos* no precisan este requisito.

- *Coloración*

Los *ladrillos vistos* deben tener una coloración uniforme, aunque pueden presentar variaciones en tonos e intensidad siempre que se mantenga una entonación homogénea a lo largo de todo el suministro de la obra.

Los *ladrillos vistos* coloreados superficialmente se ensayan sometiéndoles a un proceso de cocción en horno eléctrico a 600ºC durante dos horas. El resultado del ensayo resulta aceptable si las superficies de las caras coloreadas no experimentan variaciones de color ni de aspecto.

2.1.2 Componente básico: Mortero

El mortero es una mezcla compuesta por conglomerantes inorgánicos, como el cemento y la cal; agregados inertes o pasivos, también llamados áridos, como la arena, agua y, a veces, adiciones y/o aditivos. Se utiliza en albañilería para recibir, trabar y rejuntar piezas de las fábricas, y como revestimiento de superficies exteriores e interiores.

Tabla 2.5 Contenido de sales solubles activas de los ladrillos

Categoría	Contenido total en masa (%)	
	$NA^+ + K^+$	Mg^{2+}
S 0	Sin exigencia	Sin exigencia
S 1	≯ 0,17	≯ 0,08
S 2	≯ 0,06	≯ 0,03

*Fuente: Norma UNE-EN 771-1:2003/A1:2006 *"Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Piezas de arcilla cocida"*. Tablas 1 y 2 *"Categorías según el contenido de sales solubles activas"*.

Se tratan aquí en profundidad los *morteros para fábricas*[19], cuya función es suministrar cohesión a las piezas o mampuestos, asegurando un comportamiento monolítico del conjunto. Los morteros de revestimiento y los morteros especiales se tratan sólo a nivel general, en cuanto que participan de características y propiedades comunes a los anteriores.

Además de la misión fundamental de conformar un elemento solidario, el mortero debe corregir las variaciones dimensionales y adecuar a la función prevista las características físicas de las piezas que amalgama. Por tanto, debe asegurar la continuidad superficial del elemento de fábrica evitando resquicios de aire o filtración de agua. Además contribuye al resultado estético que el proyectista diseña en las fábricas vistas, en aspectos como la dimensión modular, el color o la textura.

Especificaciones técnicas del mortero

Las especificaciones técnicas de los morteros para albañilería están recogidas en las siguientes normas:

- UNE-EN 998-1:2003/AC:2006 *"Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido".*

- UNE-EN 998-2:2004 *"Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería".*

Los procedimientos de ensayo de los morteros para albañilería se regulan por la norma UNE-EN 1015 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería".*[20]

19 También se conocen con otras acepciones, tales como *morteros de juntas* o *morteros de levante*.

20 Relación de normas UNE-EN 1015 referentes a los procedimientos de ensayo de los morteros para albañilería:

- UNE-EN 1015-1:1999/A1:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 1: Determinación de la distribución granulométrica (por tamizado)".*

- UNE-EN 1015-2:1999/A1:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestras total del mortero y preparación de los morteros para ensayo".*

- UNE-EN 1015-3:2000/A1:2005/A2:2007 *"Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)".*

- UNE-EN 1015-4:1999 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 4: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por penetración del pistón)".*

- UNE-EN 1015-6:1999/A1:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco".*

- UNE-EN 1015-7:1999 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire del mortero fresco".*

- UNE-EN 1015-9:2000/A1:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del período de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco".*

- UNE-EN 1015-10:2000/A1:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido".*

- UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y compresión del mortero endurecido".*

- UNE-EN 1015-12:2000 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros de revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes".*

- UNE-EN 1015-17:2001/A1:2005 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 17: Determinación del contenido en cloruros solubles en agua de los morteros frescos".*

- UNE-EN 1015-18:2003 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido".*

- UNE-EN 1015-19:1999/A1:2005 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido".*

- UNE-EN 1015-21:2003 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 21: Determinación de la compatibilidad de los morteros de revoco monocapa con los soportes".*

Componentes del mortero

Esencialmente el mortero se compone de los áridos que dan volumen al conjunto, y del conglomerante que llena los vacíos que quedan entre los granos de áridos. El volumen final del mortero es menor que la suma de los volúmenes de sus componentes. Esto es debido a que gran parte de los finos ocupan los vacíos que quedan entre los granos de árido, cuyas partículas son de mayor tamaño.

El agua que se añade a la mezcla posibilita el proceso químico de endurecimiento del conglomerante o *fraguado.* Eventualmente se pueden incorporar determinados productos, generalmente líquidos, denominados aditivos, si se desea conferir alguna propiedad específica a mortero. Las propiedades del mortero dependen fundamentalmente de la clase o tipo de conglomerantes que lo compone. En un lugar secundario influye el tipo y tamaño de los áridos.

Los conglomerantes se dividen en dos clases según la necesidad de aire que precisan para fraguar:

- *Conglomerantes hidráulicos* (cemento y cal hidráulica): pueden fraguar con o sin presencia de aire, incluso bajo el agua.

- *Conglomerantes aéreos* (cal aérea viva y cal hidratada): necesitan la combinación con algún elemento del aire para fraguar, como por ejemplo el anhídrido carbónico que se combina con la cal aérea.

En razón de esta característica, la clase de conglomerante condiciona su campo de aplicación. En albañilería se suelen utilizan conglomerantes hidráulicos. Los conglomerantes aéreos se emplean sólo en elementos muy expuestos al aire, tales como los revocos finos. Una excepción a esta regla es la cal aérea, que puede adquirir un cierto grado de hidraulicidad cuando se le adiciona en pequeñas proporciones cemento o polvo de ladrillo. Ello permite utilizar este conglomerante en determinados casos de fraguado sin aire, y se puede combinar con el cemento hidráulico para mejorar sus propiedades de plasticidad y adherencia.

En general, los conglomerantes hidráulicos tienen más resistencia mecánica pero menos capacidad de adherencia que los aéreos.

La clasificación de los conglomerantes en función de su resistencia mecánica, de mayor a menor, es la siguiente:

- Cemento común
- Cemento de albañilería
- Cal hidráulica
- Cal aérea
- Yeso

Componentes del mortero: Cemento

El cemento es una mezcla de caliza, arcilla, hierro y magnesio (estos dos últimos en pequeñas cantidades). Es un conglomerante que mezclado con agua, arena y a veces cal, forma una masa plástica y untuosa que se endurece rápidamente al secarse. Proporciona una buena cohesión a las construcciones de fábrica, es impermeable y permite obtener una gran resistencia mecánica y química.

Con rigor se debería hablar de cementos (en plural) ya que existen dos categorías: el natural y el artificial. La primera categoría comprende un cierto número de productos que se diferencian por su composición y resistencia, siendo la caliza el principal componente.

Dentro de la segunda categoría, el más conocido de los cementos artificiales y el que confiere mayor resistencia al mortero es el *cemento pórtland*, cuyo nombre proviene de la isla de Pórtland, de donde se extrae la roca caliza necesaria para su composición.

El proceso de fabricación del cemento pórtland artificial consiste en triturar y moler la roca en seco o con un método llamado *"húmedo"*. De ello se obtiene un polvo cuyos granos no sobrepasan el milímetro de espesor. Esta mezcla se cuece a una temperatura aproximada de 1.450°C. El producto obtenido, llamado *klínker*, se enfría y se reduce a polvo en un torno para formar el cemento.

Según los mismos principios, pero añadiéndole otros productos como cal, puzolana o cenizas, se obtienen los cementos derivados como el cemento de lechada, de puzolana o de cenizas.

Estos diferentes productos ofrecen calidades y niveles de resistencia diferentes, los cuales se encuentran indicados en los sacos.

En general, los cementos deben cumplir las prescripciones técnicas que se especifican en la *Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08)*, aprobada por Real Decreto 956/2008 de 6 de junio, que regula la recepción de los cementos mediante la presenta-

ción de los documentos que acredita el marcado CE, o el cumplimiento del Real Decreto 1313/1988, de 28 de octubre, por el que se declara obligatoria la homologación de los cementos y, según corresponda, la realización de una inspección visual del suministro.

Los procedimientos de ensayo de cementos se rigen por la Norma UNE-EN 196 *"Métodos de ensayo de cementos"*.[21]

Los diferentes tipos de cemento atendiendo a las características adicionales que presentan y las normas en las que están definidos, son los siguientes:

Cementos sujetos al marcado CE

- *Cemento común (CEM)*

Está definido en la Norma UNE-EN 197-1:2000/A3:2008 *"Cemento. Parte 1: composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes"*. Se compone, en general, de klínker y adiciones tales como escorias de horno alto, humo de sílice, puzolana natural o calcinada, cenizas volcánicas, esquistos calcinados y caliza, en diferentes proporciones que condicionan su clasificación en una amplia gama de tipos.

No tienen ninguna característica adicional específica, y se utilizan para la fabricación de morteros y hormigón estructural[22].

La designación de los cementos comunes debe comenzar con la referencia a la norma UNE-EN 197-1. Los cementos pórtland se designan con las siglas CEM I, seguidas de la clase de resistencia y de la letra "R" o "N" si son de alta resistencia inicial o de resistencia inicial normal, respectivamente. Por ejemplo: "Cemento pórtland EN 197-1 CEM I 32,5 N", corresponde a un cemento pórtland de clase resistente 32,5 y resistencia inicial normal. Los cementos pórtland con adiciones se designan con las siglas CEM II seguidos de una barra (/) y de la letra que indica el subtipo (A ó B) separada por un guión (-) de la letra que identifica el componente principal empleado como adición. Los cementos con escorias de horno alto, los cementos puzolánicos y los cementos compuestos se designan con las siglas CEM III, CEM IV y CEM V, respectivamente[23].

21 Relación de normas UNE-EN 196 referentes a los procedimientos de ensayo de los cementos:

- UNE-EN 196-1:2005 *"Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas"*.
- UNE-EN 196-2:2006 *"Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos"*.
- UNE-EN 196-3:2005 *"Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen"*.
- UNE-EN 196-5:2006 *"Métodos de ensayo de cementos. Parte 5: Ensayo de puzolanicidad para los cementos puzolánicos"*.
- UNE-EN 196-7:2008 *"Métodos de ensayo de cementos. Parte 7: Métodos de toma y preparación de muestras de cemento"*.
- UNE-EN 196-8:2005 *"Métodos de ensayo de cementos. Parte 8: Determinación del calor de hidratación. Método por disolución"*.
- UNE-EN 196-9:2005 *"Métodos de ensayo de cementos. Parte 9: Determinación del calor de hidratación. Método semiadiabático"*.
- UNE-EN 196-10:2008 *"Métodos de ensayo de cementos. Parte 10: Determinación del contenido de cromo (VI) soluble en agua en cementos"*.

22 La Instrucción RC-08 incluye dentro de la calificación de *cementos comunes* a los que tienen la característica adicional de bajo calor de hidratación, lo que supone un valor característico del calor de hidratación inferior a 270 J/g (medido a los 7 días según el *"método de disolución"*, o a las 41 horas según el *"método semiadiabático"*).

23 Para la fabricación de morteros de albañilería se recomienda el uso de la clase 32,5 debido a que los cementos de clases superiores producen mezclas menos plásticas, para iguales resistencias del mortero. Las clases elevadas se deben especificar sólo en el caso de utilizar cementos blancos. Este tipo de cementos, con o sin cal, y con áridos procedentes de mármoles machacados o calizas caoliníticas, se utiliza para la fabricación de morteros blancos y coloreados.

Tabla 2.6 Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos comunes

Clase de resistencia (1)	Resistencia a compresión (N/mm²) UNE-EN 196-1				Tiempo de fraguado UNE-EN 196-3		Estabilidad de volumen UNE-EN 196-3	Calor de hidratación (2) (J/g)	
	Resistencia inicial (N/mm²)		Resistencia nominal (N/mm²)		Inicio (minutos)	Final (horas)	Expansión (mm)	UNE-EN 196-9	UNE-EN 196-8
	2 días	7 días	28 días					41 horas	7 días
32,5 N	--	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 12	≤ 10	≤ 270	
32,5 R	≥ 10,0	--							
42,5 N	≥ 10,0	--	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60				
42,5 R	≥ 20,0								
52,5 N	≥ 20,0	--	≥ 52,5	--	≥ 45				
52,5 R	≥ 30,0								

(1) N = resistencia inicial normal; R = alta resistencia inicial.
(2) Sólo para los cementos de bajo calor de hidratación.

Tabla 2.7 Prescripciones químicas de los cementos comunes

Característica	Norma de ensayo	Tipo de cemento	Clase de resistencia	Prescripción(1)
Pérdida por calcinación	UNE-EN 196-2	CEM I CEM III	Todas	≤ 5,0%
Residuo insoluble	UNE-EN 196-2	CEM I CEM III	Todas	≤ 5,0%
Contenido de sulfatos (expresado en SO3)	UNE-EN 196-2	CEM I CEM II(2) CEM IV CEM V CEM III(3)	32,5 N 32,5 R 42,5 N 42,5 R 52,5 N 52,5 R Todas	≤ 3,5% ≤ 4,0%
Contenido de cloruros (CL-)	UNE 80217 (EN 196-21)	Todos(4)	Todas	≤ 0,10%
Puzolanicidad	UNE-EN 196-5	CEM IV	Todas	Puzolanicidad a la edad de 8 ó 15 días

(1) Las prescripciones expresadas en porcentaje se refieren a la masa del cemento final
(2) El cemento tipo CEM II/B-T puede contener hasta el 4,5% de sulfato para todas las clases de resistencia.
(3) El cemento tipo CEM III/C puede contener hasta el 4,5% en masa de sulfato.
(4) El tipo de cemento CEM III puede contener más del 0,10% de cloruros, pero en tal caso el contenido máximo debe ser consignado en los envases y el los albaranes de entrega.
*Fuente: *"Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08)"*. Tabla A1.1.3. y Tabla A1.1.4

Las prescripciones relativas a las características mecánicas y físicas, y las relativas a las características químicas, que deben cumplir los cementos comunes, incluidos los de bajo calor de hidratación, figuran en las tablas 2.6 y 2.7, respectivamente, según sus clases de resistencia.

- *Cemento de escorias de horno alto de baja resistencia inicial (L)*

Está definido en la norma UNE-EN 197-4:2005 *"Cemento. Parte 4: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos de escorias de horno alto de baja resistencia inicial"*.

Tienen una reducida resistencia inicial comparada con la de un cemento común de la misma clase de resistencia, por lo que pueden necesitar alguna precaución adicional tal como la ampliación del tiempo de retirada de apeos o un cuidado especial con climatologías severas.

Tabla 2.8 Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos de albañileria

Tipo y clase de resistencia	Resistencia a compresión (N/mm^2) UNE-EN 196-1			Tiempo de fraguado UNE-EN 196-3		Finura sobre tamiz de 90 µm UNE 80122(EN 196-6)	Estabilidad de volumen UNE-EN 196-3
	7 días	28 días		Inicio (minutos)	Final (1) (horas)	Residuo (%)	Expansión (mm)
MC 5	---	≥ 5	≤ 15	≥ 60	≤ 15	≤ 15	≤ 10
MC 12,5	≥ 7	≥ 12,5	≤ 32,5				
MC 12,5 X (1)	≥ 7	≥ 12,5	≤ 32,5				
MC 22,5 X	≥ 10	≥ 22,5	≤ 42,5				

(1) El término "X" designa un cemento de albañilería al cual no se ha incorporado un aditivo inclusor de aire.
(2) Si el tiempo de principio de fraguado es menor de 6 horas, no se prescribe ningún requisito para el final del fraguado.
*Fuente: *"Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08)"*. Tabla A1.5.3b.

- *Cemento especial de muy bajo calor de hidratación (VLH)*

Está definido en la norma UNE-EN 14216:2005 *"Cemento. Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos especiales de muy bajo calor de hidratación"*.

Para este tipo de cementos sólo existe una clase de resistencia (22,5). Los morteros que utilizan este tipo de cemento en su fabricación necesitan una protección adicional contra la desecación y la carbonatación durante su curado.

Tabla 2.9 Prescripciones químicas de los cementos de albañilería

Característica	Norma de ensayo	Tipo y clase de cemento	Prescripción (% en masa, referido a muestra desecada)
Contenido de sulfatos (expresado como SO3)	UNE-EN 196-2	MC 5	≤ 2,0
		MC 12,5 MC 12,5 X MC 22,5 X	≤ 3,0(1)
Contenido de cloruros (expresado como Cl-)	UNE 80217:1991	MC 5	---
		MC 12,5 MC 12,5 X MC 22,5 X	≤ 0,10

(1) Si el contenido de klínker es mayor o igual al 55% de su masa, el límite máximo aplicable debe ser el 3,5% en masa.
*Fuente: *"Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08)"*. Tabla A1.5.4.

- *Cemento de albañilería (MC)*

Está definido en la norma UNE-EN 413-1:2005 *"Cementos de albañilería. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad"*.

Se compone de klínker de cemento pórtland en proporción no inferior al 25% en masa, elementos inorgánicos tales como cales hidráulicas o hidratadas y, en algunos casos, aditivos en proporción no superior al 1% en masa[24]. Eventualmente puede incluir pigmentos, excepto aquellos que contengan negro de humo. Para controlar el fraguado se suele añadir sulfato de calcio en pequeñas cantidades a los otros componentes del cemento de albañilería durante su fabricación.

El cemento de albañilería reemplaza a la cal hidráulica reforzada con una pequeña cantidad de cemento, cumpliendo una función casi similar.

La principal característica es el corto tiempo de fraguado, cualidad necesaria cuando se debe levantar una fábrica en vertical con rapidez.

Requiere más tiempo de amasado y se trabaja con mayor dificultad que el mortero común, aunque puede corregirse esta circunstancia añadiendo una pequeña proporción de cal aérea.

Las prescripciones relativas a las características mecánicas y físicas, y las relativas a las características químicas, que deben cumplir los cementos de albañilería, figuran en las tablas 2.8 y 2.9, respectivamente, según sus clases de resistencia.

Adicionalmente, para los cementos de albañilería también son de aplicación algunas de las prescripciones establecidas para el mortero fresco que se indicarán más adelante.

Cementos sujetos al Real Decreto 1313/1988

Para muchas aplicaciones, particularmente en condiciones ambientales severas, la composición del cemento puede influir en la durabilidad de los morteros y pastas, haciéndolos vulnerables a los agresivos químicos, a los ciclos hielo-deshielo y, en su caso, mermando las condiciones de protección de las armaduras. Cuando el cemento se utiliza en condiciones especialmente severas en alguno de estos aspectos se debe recurrir a los cementos comunes con características adicionales específicas. Los que se indican a continuación no están sujetos al marcado CE, sino que las condiciones de recepción se rigen por el Real Decreto 1313/1988, de 28 de octubre, por el que se declara obligatoria la homologación de los cementos para la fabricación de morteros y hormigones.

- *Cemento resistente a los sulfatos (SR)*

Está definido en la norma UNE 80303-1:2001/1M:2006 *"Cementos con características adicionales. Parte 1: cementos resistentes a los sulfatos"*.

El cemento resistente a los sulfatos es un cemento común en cuya fabricación se emplea un klínker que tiene restringida la proporción de aluminatos de calcio para hacerlo resistente a la posible combinación con sulfatos. Tiene una resistencia mecánica ligeramente inferior a la del cemento común equivalente y se debe utilizar cuando el contenido de sulfatos sea igual o mayor que 600 mg/l en el caso de aguas, o 3.000 mg/kg en el caso de suelos.

- *Cemento resistente al agua de mar (MR)*

Está definido en la Norma UNE 80303-2:2001 *"Cementos con características adicionales. Parte 2: cementos resistentes al agua de mar"*.

Análogamente al tipo anterior, se trata de un cemento común, fabricado con klínker que tiene restringida la proporción de aluminatos y ferro aluminatos para poder ser utilizado en elementos expuestos al ataque del agua de mar.

Se debe utilizar en ambiente marino sumergido o de zona de carrera de mareas (medio marino alternado), que corresponden a los ambientes III b y III c, respectivamente, conforme a las clases de exposición definidas en la tabla 3.1 *"Clases generales de exposición"* del DB SE-F.

- *Cemento blanco (BL)*

Está definido en la norma UNE 80305:2001 *"Cementos blancos"*.

El cemento blanco es similar al cemento común o de albañilería en cuanto a sus características mecánicas, físicas y químicas, pero con unas prescripciones adicionales de blancura. Debe cumplir con el requisito de color definido por las coordenadas CIELAB determinadas según el método de ensayo de la norma UNE 80117:2001 *"Métodos de ensayos de cementos. Ensayos físicos. Determinación del color en los cementos blancos"*, de tal manera que el parámetro L* sea igual o mayor que 85,0.

Existe un único tipo y clase de cemento blanco de albañilería, designado como *BL 22,5 X UNE 80305*. La designación significa que se trata de cemento blanco (BL) con una resistencia característica a compresión a los 28 días de 22,5 N/mm^2 (22,5) y sin agente inclusor de aire (X).

- *Cemento para usos especiales (ESP)*

Está definido en la norma UNE 80307:2001 *"Cementos para usos especiales"*.

Está compuestos por cemento klínker, escorias de horno alto, puzolanas naturales (en contenido no superior al 40%) o cenizas volantes, y otros componentes minoritarios adicionales, como por ejemplo, filler.

Componente del mortero: Conglomerante cal

La cal es el conglomerante más antiguo que se conoce. Hasta la revolución industrial y el descubrimiento del cemento en Pórtland (1824), la cal ha sido el principal ligante de la construcción en morteros, revestimientos y pinturas. Se ha utilizado desde antiguo para proporcionar solidez a los edificios de piedra, formando parte también de los frescos y estucos que los decoran.

Se produce a partir de caliza y una pequeña proporción de arcilla (sólo el 10%) cocidas a altas temperaturas. La fabricación de cales comprende dos procesos químicos, calcinación e hidratación, a los cuales van asociadas las operaciones de transporte, trituración y pulverización de la caliza, además de la separación por aire y el almacenamiento adecuado de la cal obtenida, para evitar los procesos de recarbonatación.

Muchas de las propiedades de la cal, útiles para los diferentes usos a los que se destina, dependen de la calidad de la caliza utilizada, que varía según la roca de extracción. De las calizas más puras proceden las cales aéreas o *grasas*, y de las calizas más arcillosas, ricas en sílice, proceden las cales hidráulicas o *magras*.

Los constructores antiguos aplicaban las cales disponibles en las canteras y caleras más próximas debido a las dificultades del transporte, aunque conocían una amplia gama de procedimientos para corregir los efectos de las cales encontradas, y dotar a sus morteros de determinadas cualidades necesarias para el caso concreto de aplicación, independientemente de la procedencia de la cal, como son el control de la rapidez en el endurecimiento, la dureza y las propiedades impermeabilizantes.

Esta circunstancia dio lugar a que surgieran varias denominaciones para la cal, típicas de los lugares de procedencia, pero es fácil suponer que todas las clases de cal han convivido desde todos los tiempos, aunque en la literatura sobre el tema no se mencionan las cales con propiedades hidráulicas hasta hace dos siglos[25].

Además de la composición de la roca de procedencia, en las propiedades de la cal obtenida interviene decisivamente el proceso de fabricación, sobre todo la temperatura de calcinación. Una caliza impura produce una cal dura si se calcina a temperaturas elevadas.

La porosidad y, como consecuencia, la densidad de las cales también depende de la temperatura de calcinación; a mayor temperatura se obtiene menor porosidad y por lo tanto mayor densidad. Como consecuencia de esto, a mayor temperatura la cal va perdiendo actividad química; es por esta razón por lo que conviene sinterizar la cal a temperaturas próximas a la de disociación de la caliza.

24 El contenido de aditivos orgánicos no debe superar el 0,5% expresado en masa del producto desecado.

25 Quizás por esta razón en la actualidad a las cales hidráulicas se les atribuye un carácter menos tradicional, asociado también a la idea de que se trata de cales menos puras.

Según el tipo de caliza utilizada, la cocción permite la fabricación de varios tipos de cal.

- *Cal aérea*

Procede de una caliza pura (carbonato de calcio). La calcinación se produce por la cocción a una temperatura en torno a los 900ºC, y va acompañada de una pérdida del 45% de su peso, correspondiente a la pérdida de gas carbónico.

El resultado de la cocción produce óxido de calcio *(cal viva)*, que no posee propiedades de fraguado bajo el agua, o lo hace de forma muy lenta. El hidróxido de calcio *(cal apagada)* aplicable en la construcción se obtiene incorporando agua, proceso que se conoce como apagado de la cal. Este proceso genera mucho calor, por lo que se hace en fábrica o bien por personal especializado.

Cuando se apaga una cantidad de cal, se puede almacenar en una balsa o *"pudridero"* durante años, dejando que siga *apagándose* y madurando. El periodo mínimo para poder ser usada es de seis meses, pero cuanto más tiempo pase en reposo mejor comportamiento tiene después, mejorando el siguiente proceso llamado *carbonatación* cuando se utiliza en revocos o morteros.

Una vez que la cal se utiliza empieza a cristalizar y a carbonatarse, desde la superficie hacia dentro, conservando un núcleo húmedo que es el que le confiere sus propiedades y elasticidad, gracias al cual tiene un comportamiento mecánico mejor que el de un cemento pórtland, tanto en morteros como en revocos exteriores e interiores.

El proceso de carbonatación se inicia con el agua añadida en la elaboración del mortero. Este proceso supone una reacción lenta, que puede durar varios meses y exige la presencia de agua y gas carbónico del aire a la vez.

Una vez evaporada el agua, la carbonatación continúa utilizando el ácido carbónico procedente de la afinidad que tiene el vapor de agua presente en el aire con el gas carbónico. Al cabo del tiempo, después de carbonatarse completamente, la cal apagada retorna a su estado original en la cantera, que es el de roca caliza.

Sólo la cal aérea se puede conservar en perfectas condiciones durante siglos, ya que posee poros que dejan transpirar a los muros y al mismo tiempo los impermeabilizan. La cal aérea, aplicada sobre ladrillo tradicional, regula la temperatura del interior gracias al efecto de *"respiración"* del muro a través suyo.

El inconveniente de la cal aérea cuando se usa en construcción es que tiene poca resistencia mecánica, por lo que habitualmente se utiliza mezclada con productos puzolánicos (cemento, escoria, etc.) para aumentar su resistencia, dando lugar a los otros tipos de cal que se indican a continuación.

La cal aérea constituye un producto ideal para revestimientos en los que se desea obtener un buen resultado final de acabado, gracias a la elevada finura y excelente maleabilidad, que se puede aumentar aún más trabajando con cal grasa en pasta. Su elevada porosidad permite el intercambio de vapor de agua en los cerramientos de los edificios y contribuye en buena medida al aislamiento térmico.

La cal de mejor calidad es la que tiene mayor porcentaje de carbonato; las ideales son las que se acercan a la composición del mármol, de aplicación muy limitada en albañilería.

- *Cal dolomítica*

Es un tipo particular de cal aérea. Las rocas de procedencia (calizas dolomíticas) tienen carbonato de calcio asociado con carbonato de magnesio.

La particularidad de la cal dolomítica es que se obtiene por cocción de las calizas dolomíticas a temperaturas inferiores a 900ºC.

- *Cal hidráulica natural*

La cal hidráulica se denomina *natural* cuando no tiene ningún tipo de adición. Su resistencia viene dada por la combinación de los elementos contenidos en la roca de procedencia, que se produce durante el proceso de cocción.

Procede de rocas calizas mezcladas con arcillas, ricas en elementos químicos como hierro, aluminio y sílice. En el proceso de cocción a temperaturas comprendidas entre 800ºC y 1.500ºC, según el tipo de dureza y densidad que se desee obtener, el calcio se combina con dichos elementos químicos formando silicatos, aluminatos y ferro-aluminatos de calcio.

Al contacto con el agua estos compuestos tienden a formar hidratos insolubles, los cuales confieren al conglomerante un carácter hidráulico. La presencia de estos elementos produce un comportamiento como material de construcción similar al cemento blanco pero con peores resultados.

Al contacto con el aire húmedo, la cal y los hidratos así formados carbonizan al combinarse con el gas carbónico del aire. Esta reacción dura varios meses y es la parte aérea del proceso.

Los textos sobre materiales de construcción del siglo XIX clasificaban las cales hidráulicas según su índice de hidraulicidad, que dependía fundamentalmente de su contenido de arcilla, entre el 5% y el 30%. El contenido de arcilla constituye un factor que determina, no sólo la hidraulicidad de la cal, sino también su resistencia mecánica.

Las cales hidráulicas naturales tienen una resistencia a compresión a los 28 días comprendida entre 2 N/mm^2 y 5 N/mm^2. Las menos resistentes, con una resistencia mecánica similar a la de las cales aéreas, tienen un contenido muy bajo en arcilla (menor del 8%). A las más resistentes les corresponde un contenido en arcilla comprendido entre el 15% y el 20%. La mayor resistencia mecánica de las cales con mayor hidraulicidad, es decir, con mayor contenido en arcilla, se debe a la presencia de sílice en su composición.

La cal hidráulica natural se puede utilizar en construcción en el campo de rehabilitación de edificios antiguos, ya que no contiene ningún tipo de sulfato, aluminato ni otras sales perjudiciales[26].

Además, la cal hidráulica natural tolera las transferencias de humedad y sales minerales en los muros. La mayor impermeabilidad y buena resistencia a las agresiones ambientales, sobre todo en medio marítimo, la convierte en un ingrediente idóneo para la ejecución de revestimientos exteriores e interiores.

Gracias a su mayor endurecimiento inicial, la cal hidráulica natural permite realizar trabajos en el exterior durante todas las épocas del año, incluso durante los meses de invierno, siempre que se proporcione una protección contra el hielo, el agua de lluvia o el calor, durante las primeras 72 horas de curado.

- *Cal hidráulica artificial*

La cal hidráulica artificial consigue su resistencia durante el proceso de hidratación, es decir, durante su apagado, no durante la cocción. Se denomina también *cal hidratada* y tiene una hidraulicidad superior a la de las cales hidráulicas naturales. La calificación de *artificial* se debe a que se obtiene incorporando elementos puzolánicos en la mezcla, que se añaden antes o después de la cocción, tales como klínker, puzolanas de origen natural (volcánicas) o artificial (mezcla de sílice, aluminio y óxido férrico), cenizas volantes procedentes de la combustión del petróleo y escorias siderúrgicas.

La cal hidráulica artificial es similar al cemento *"natural"* (cemento cocido a temperaturas inferiores a la sinterización) ya que sus elementos constitutivos son prácticamente los mismos. El cemento pórtland sería el resultado de una cocción de los elementos citados, solo que con temperaturas mucho más altas (por encima de la sinterización). La diferencia se traduce en que el cemento adquiere mayor resistencia debido a un proceso de endurecimiento exclusivamente hidráulico. Como contrapartida, la cal tiene mejores cualidades bioclimáticas, mayor facilidad de manejo y más capacidad de retención de agua.

26 El cemento suele ser incompatible con prácticamente todos los materiales que constituyen los edificios del patrimonio a restaurar.

La cal hidráulica se utiliza para fabricar los *morteros de cal*, cuyos componentes básicos son la cal como conglomerante exclusivo, la arena y el agua. Estos morteros son más fáciles de usar y más flexibles, pero endurecen con más lentitud y una vez secos no son impermeables.

Por las razones anteriores, los morteros de cal tienen menos resistencia que los morteros de cemento. Esta merma de resistencia de los morteros hechos con cal puede tener importancia si se utilizan, por ejemplo, en cimentaciones, pero apenas tiene trascendencia en su aplicación para la construcción de fábricas de ladrillo.

Para obtener un mortero fácil de trabajar y también con una buena resistencia, es preferible mezclar cal y cemento en proporciones variables según sea su lugar de aplicación. Con este procedimiento se obtiene el *mortero bastardo* o *mortero mixto*, que no es propiamente mortero de cemento ni de cal, sino de ambos, y su finalidad es mejorar la plasticidad del mortero y la retención de agua del mismo, produciendo mezclas de un color más claro.

Los cristales de cal hidratada, por su reducido tamaño, se extienden alrededor de las partículas de cemento y áridos de mayor tamaño. Sus dimensiones facilitan su movimiento y su capacidad de unión, consiguiendo una plasticidad mayor. Así, la utilización de morteros mixtos proporciona una mayor resistencia a flexión del elemento construido, al dotar a las juntas de mayor plasticidad para absorber, sin romperse, las posibles elongaciones debidas a tensiones de tracción.

Lo habitual actualmente es utilizar cales aéreas (L), que se sirven en polvo o en pasta. También se pueden utilizar, aunque es menos frecuente, las cales hidráulicas (HL). En la ejecución de fábricas se debe utilizar cal aérea apagada, regulada por la norma UNE-EN 459-1/AC:2002 *"Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad"*. Se suministra en sacos de 50kg, si bien para pequeños trabajos se puede adquirir en bolsas de menor peso.

Las especificaciones y ensayos relativos a las cales usadas en la construcción están descritos en las siguientes normas:

- UNE-EN 459-2:2002 *"Cales para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo".*

- UNE-EN 459-3:2002 *"Cales para la construcción. Parte 3: Evaluación de la conformidad".*

Conglomerante yeso

El yeso es un mineral común que se encuentra en grandes depósitos en la naturaleza. Es un sulfato de calcio hidratado compacto o terroso; su formación se debe a la precipitación del sulfato de calcio en agua de mar, aunque también se puede obtener de forma artificial.

El método común para calcinar el yeso consiste en moler el mineral y colocarlo en grandes calcinadores. La temperatura se eleva aproximadamente entre 120º C y 150º C, agitando constantemente para mantener uniforme la temperatura. El material, conocido como *yeso blanco, mate o de parís*, y por el fabricante como *yeso de primera sedimentación*, se puede retirar y vender en esta calidad, o se puede calentar hasta 190º C para producir un material conocido como *yeso de segunda sedimentación*.

El endurecimiento del yeso es esencialmente una reacción química de hidratación, inversa a la correspondiente a la calcinación. El yeso se asienta y endurece debido a que el agua reacciona para formar un hidrato sólido y cristalino. La hidratación tiene lugar a temperaturas inferiores a los 99º C, más o menos, por lo que el yeso se debe calentar a más de 99º C para una deshidratación práctica. El yeso comercial contiene generalmente algo de goma en el agua utilizada, o algún material, ya sea pelos o residuos grasos de los corrales, para retardar el tiempo de fraguado.

El yeso ocupa un lugar aparte en el campo de los conglomerantes en la medida que, contrariamente a la cal o al cemento, se puede emplear sin otro material. Esta particularidad hace del yeso una argamasa para unir ladrillos por sí solo, aunque sea de naturaleza diferente.

El yeso, en general, no es compatible con los cementos y cales. En las mezclas de albañilería no se debe añadir como un conglomerante más, puesto que el material puede reventar en algunas zonas y se corre el riesgo de provocar la aparición de eflorescencias. Por eso, se debe utilizar como conglomerante exclusivo o, a lo sumo, reforzado con una pequeña proporción de cemento o cal para hacerlo más resistente[27].

En general el yeso se reserva para los trabajos interiores.

Componente del mortero: Áridos

Los áridos, también llamados *"conglomerados"* o *"granulados"* son materiales naturales masivos procedentes de la fragmentación de las rocas, compuestos por un mineral o la combinación de varios, inertes con el resto de componentes del mortero y que se aglutinan por el cemento o la cal para dar cuerpo al conjunto.

La utilización de los áridos para la fabricación de pastas procede de la antigüedad. Los griegos y los romanos empleaban arena, grava y rocas volcánicas para hacer una variedad de hormigón con el que construían sus edificios, algunos de los cuales hoy perviven, como la cúpula del Panteón de Agripa en Roma. El arquitecto e ingeniero Vitrubio diseñó cisternas para almacenar agua con estos materiales. Algunas calzadas romanas, todavía en uso, se realizaron con rocas trituradas.

En general, los áridos utilizados para la fabricación de morteros deben ser resistentes al hielo y a la abrasión, impermeables y, preferentemente, extraídos de ríos.

Los áridos, en general, no se encuentran con la limpieza y distribución granulométrica adecuadas, por lo que es necesario proceder a su tratamiento.

El tamaño adecuado de los áridos se consigue, bien por un proceso de disgregación natural, o bien por un proceso mecánico, empleando máquinas diseñadas para la aplicación de esfuerzos a las rocas, provocando su fragmentación y, por tanto, su reducción de tamaño[28].

Hoy en día, los procesos de fabricación se realizan con modernas máquinas cada vez más especializadas. El material que llega a la planta se procesa con objeto de obtener el producto final especificado, en lo que se refiere a características tales como granulometría, humedad, limpieza, partículas anormalmente ligeras y forma geométrica, pero sin alterar las características físicas y químicas del árido. Esto se consigue por medio de las operaciones sucesivas de alimentación, trituración, transporte, cribado, lavado y almacenamiento.

Los procesos típicos empleados para la obtención de un árido de buena calidad empiezan en la fase de elección de la propia gravera o cantera. En el caso de la cantera, la granulometría y la limpieza del producto terminado están influenciadas por los efectos de las operaciones de perforación, voladura, carga y transporte.

Para definir y corregir la variabilidad en los materiales hay que basarse en un programa de muestreo eficaz. Las muestras se recogen al azar según las normas correspondientes y en varias etapas del proceso de producción. Sin embargo, el control más cuidadoso del proceso de fabricación de áridos en una planta puede ser anulado debido a unas malas condiciones en la manipulación, almacenamiento, carga o transporte.

La mala manipulación en el proceso de producción del árido puede ocasionar alguna de las principales causas de detrimento de la calidad del producto, como son la segregación, la contaminación o la falta de uniformidad en el contenido de humedad estable.

La segregación de los áridos gruesos se reduce prácticamente al mínimo mediante la separación del material en fracciones de varios tamaños, para posteriormente dosificarlos por separado según el producto. El control eficaz de segregación y de materiales de menor tamaño se logra cuando la proporción de medidas máximas a mínimas se mantiene dentro de unos estándares.

Para evitar la contaminación y degradación de los áridos se deben formar los stocks en horizontal o en capas ligeramente inclinadas, evitando los conos con pendientes excesivas. Es importante prohibir el paso de camiones y demás maquinaria móvil sobre los almacenamientos.

El contenido de humedad estable se debe mantener fundamentalmente en los áridos finos puesto que son los que más humedad acumulan. Depende principalmente de la granulometría, tamaño, forma de la partícula, textura superficial y coeficiente de absorción. Todos los áridos producidos o manipulados por métodos hidráulicos y los áridos lavados se deben almacenar con un drenaje adecuado, durante un tiempo, antes de ser despachados al cliente.

27 Como excepción a lo anterior existe un tipo de revoco de cal y yeso utilizado en Cataluña, que no se ha difundido en otras regiones posiblemente porque se requiere para su aplicación una particular destreza artesanal.

28 En la antigüedad esta operación se hacía manualmente por los esclavos y los presos condenados a picar en las canteras. Se calcula que, a mano, es posible triturar unas 125 toneladas al año.

Las partículas redondas y con buena graduación que han estado en un almacenamiento con drenaje, pueden tener un contenido de humedad estable en 12 horas aproximadamente. Por el contrario, las partículas con mala graduación, planas y angulosas, almacenadas con un mal drenaje, necesitan más tiempo para estabilizar su humedad.

La arena de sílice es el árido usado con mayor frecuencia en la elaboración de morteros.

Se suelen utilizar arenas de río naturales, de machaqueo, o mezcla de ambas. Las primeras proceden del lecho de los ríos y se extraen a cielo abierto; las segundas resultan de la trituración de los restos de piedras naturales. En el caso de emplear arenas de machaqueo, hay que proceder al lavado de las mismas para evitar un alto contenido en finos.

En cualquier caso es imprescindible que la arena esté limpia antes de utilizarla, para obtener una mezcla homogénea y sólida. Cualquier cuerpo extraño como las materias orgánicas, o inclusive la sal cuando se emplea

arena de mar, corrompe la calidad del mortero. En este sentido, se recomienda utilizar arenas normalizadas, cuyo contenido total de materias perjudiciales (mica, yeso, feldespato descompuesto, piritas, etc.) no sea superior al 2%.

En la figura se representa la *curva granulométrica*[29] característica de la arena que se suele utilizar para la fabricación de morteros. Esta curva puede presentar ligeras modificaciones, para adaptarse al espesor de los tendeles y a las propiedades del conglomerante. Por ejemplo, la arena debe pasar por un tamiz de apertura no superior a 1/3 del espesor del tendel, ni a 5 mm. Las arenas más gruesas tienen menos vacíos y por ello requieren menos proporción de conglomerante. El contenido de finos se debe limitar para no dificultar la adherencia de la pasta de cemento.

En la fabricación de morteros para albañilería no sólo es importante la granulometría de la arena, sino también la forma de los granos. Las propiedades mejoran si los granos son redondos o poliédricos, evitando las arenas cuyos granos tengan forma de laja o acícula.

La arena puede estar seca, tener humedad natural o estar embebida en agua. Si se acopia a la intemperie, es recomendable colocarla sobre un plástico o una plancha de chapa. A pesar de estas precauciones, la arena se humedece con el simple contacto con el aire, y lo más frecuente es que la que se utiliza contenga humedad natural, por lo que su volumen aumenta. Este fenómeno se llama *"esponjamiento"* y su incidencia se debe tener en cuenta a la hora de establecer la dosificación adecuada de los componentes del mortero.

Componente del mortero: Agua

Se pueden utilizar para el amasado del mortero todas las aguas potables y las sancionadas como aceptables por la experiencia.

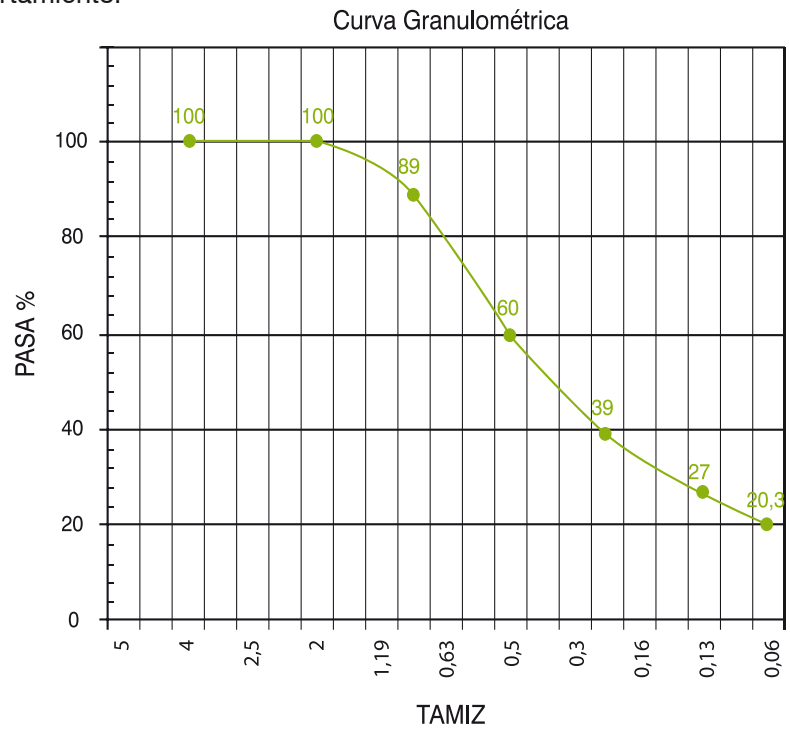
No se deben utilizar aguas marinas, debido a que producen eflorescencias en las fábricas.

Componente del mortero: Aditivos

Son sustancias o productos que, mezclados con el agua en pequeñas cantidades (por regla general, menores del 5% con relación a la masa del conglomerante) antes de que ésta sea vertida para elaborar el mortero, modifican en estado fresco o endurecido alguna de sus características, propiedades o comportamiento.

Suelen ser productos de síntesis procedentes de la industria química que han tenido una influencia extraordinaria en el desarrollo y campo de aplicación de los morteros.

Los aditivos se clasifican según la norma UNE-EN 934-3:2004/AC:2005 *"Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 3: Aditivos para morteros de albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado"*, en función de su acción principal, es decir, según la característica que se quiere modificar. Se pueden incorporar en la mezcla uno o varios aditivos, siempre que sean compatibles entre ellos. Los utilizados con mayor frecuencia son los siguientes:



- Reductores de agua (plastificantes)
- Reductores de agua de alta actividad (superplastificantes)
- Retardadores de fraguado
- Oclusores de aire
- Reductores de permeabilidad (hidrófugos)
- Retenedores de agua

De todos ellos, merecen mención especial los de tipo higrófugo, utilizados para evitar el paso de la humedad. Las mezclas que contengan este tipo de aditivo deben tener como único conglomerante el cemento común, aunque admiten una pequeñísima cantidad de cal hidráulica para hacerlas más adherentes y poderlas trabajar con mayor facilidad.

En los documentos de origen debe figurar la designación del aditivo, según la norma UNE- EN 934-3:2004/AC:2005 *"Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 3: Aditivos para morteros de albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado"*, así como la garantía del fabricante de que el aditivo, agregado en las proporciones y condiciones previstas, produce la función principal deseada. En cualquier caso, los aditivos no deben afectar desfavorablemente a la calidad del mortero o de la fábrica, incluido el comportamiento frente al fuego; ni mermar su durabilidad. En particular, no deben favorecer la corrosión de los metales embebidos. En este sentido, cuando se utiliza fábrica armada, se deben evitar los aditivos que contengan cloruro cálcico.

Las normas que regulan los ensayos de aditivos para morteros son las siguientes:

- UNE 83207:2005 *"Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Determinación de la pérdida por calcinación a (1.050 ± 25)°C".*
- UNE 83258:2005 *"Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Aditivos para morteros de albañilería. Determinación de la consistencia por medio de la mesa de sacudidas".*
- UNE 83259:2005 *"Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Aditivos para morteros de albañilería. Determinación del contenido en aire ocluido".*
- UNE-EN 934-6:2002/A1:2006 "*Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 6: Toma de muestras, control y evaluación de la conformidad"*.

Componente del mortero: Adiciones

Son productos que forman parte del mortero, modificando sus propiedades hidráulicas. Se puede utilizar una sola adición o la combinación de varias.

Las más conocidas son los filleres calizos, los materiales puzolánicos naturales o artificiales, las escorias siderúrgicas y el humo de sílice.

29 Se denomina *"curva granulométrica"* a la cantidad de granos de distintos tamaños expresada en porcentaje con respecto al total de la arena.

Tipos de mortero

Existen numerosas clasificaciones de los morteros, que responden cada una de ellas a criterios diferentes. Así, se pueden clasificar según el procedimiento utilizado para su especificación, según el uso al que vayan a ser destinados, según su proceso de fabricación o según el tipo de conglomerante utilizado.

Según el concepto que se utilice para su especificación (prestación o receta), existen dos tipos de mortero para albañilería:

- *Mortero diseñado:* mortero cuya composición y sistema de fabricación se han elegido por el fabricante con el fin de obtener las propiedades especificadas (concepto de prestación). Debe ser objeto de los correspondientes ensayos de aptitud al uso.
- *Mortero prescrito:* mortero que se fabrica a partir de componentes primarios (conglomerantes y áridos) en unas proporciones determinadas (concepto de receta). Sus propiedades dependen de las características de sus componentes y de su dosificación.

En la fabricación de morteros prescritos sólo se pueden utilizar adiciones y aditivos si forman parte de una receta que figure en el correspondiente anejo nacional o que, en su caso, haya sido fijada por el proyectista. Por otra parte, se ha de tener en cuenta que la diversidad de tradiciones regionales, así como la variedad de ciertos materiales disponibles para fabricar morteros tradicionales, no permiten establecer composiciones exactas de tipo general para los morteros de receta.

En estos casos el fabricante de mortero debe declarar las proporciones (en peso o en volumen) de cada uno de los componentes de la mezcla y la resistencia a compresión, teniendo en cuenta, como referencia, los documentos públicos reconocidos.

Los tipos de mortero para albañilería, definidos por sus propiedades o su campo de aplicación son los siguientes:

- *Mortero para uso corriente o mortero ordinario (G):* es un mortero para utilizarlo en juntas cuyo espesor sea superior a 3 mm y en el que únicamente se utilizan áridos normales.

- *Mortero para juntas y capas finas o mortero de junta delgada (T):* mortero diseñado con un tamaño máximo de árido menor o igual a 2 mm[30], para realizar juntas cuyo espesor está comprendido entre 1 mm y 3 mm. Sólo se puede emplear cuando las piezas se rectifiquen o moldeen para este requisito.

- *Mortero ligero (L):* mortero diseñado cuya densidad en estado endurecido y seco es igual o menor de 1300 kg/m^3. En este mortero se utiliza, por lo general, un árido ligero. Los tipos de mortero para albañilería definidos según el sistema de fabricación son:

- *Mortero industrial:* dosificado, mezclado y, en su caso, amasado en una fábrica y suministrado al lugar de utilización. Puede ser *"mortero seco"* cuando se trata de una mezcla preparada de los componentes primarios (conglomerantes y áridos) que sólo requiere la adición de agua o *"mortero húmedo"* cuando se suministra listo para su empleo.

- *Mortero predosificado:* sus componentes básicos (conglomerantes y áridos) son dosificados independientemente en una fábrica y se suministra al lugar de utilización, en donde se mezclan y amasan en las proporciones y condiciones especificadas por el fabricante[31].

- *Mortero premezclado de cal y arena*: sus componentes son dosificados y mezclados en una fábrica y se suministra al lugar de utilización, donde se añaden otros componentes especificados o suministrados por el fabricante (por ejemplo, cemento), y se mezclan y amasan en las condiciones definidas por éste.

- Mortero hecho *"in situ":* formado por los componentes primarios dosificados, mezclados y amasados en la obra.

Según los conglomerantes utilizados en la fabricación, los morteros se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- *Mortero de cal:* es el más antiguo, utilizado por los romanos en sus obras. Se obtiene llenando los huecos de la arena con una pasta formada por cal apagada y agua, en una proporción de un volumen de cal por cada tres de arena. Este tipo de mortero tiene el inconveniente de que endurece demasiado lentamente, por eso en la actualidad se utiliza muy poco.

- *Mortero de cemento:* es el que contiene conglomerantes del tipo de cementos naturales o pórtland en su composición. Se utiliza cuando se precisan altas resistencias iniciales, o bien resistencias elevadas del mortero endurecido. Las mezclas pobres en cemento se hacen ásperas y difíciles de trabajar. Para mejorar la maleabilidad en mezclas pobres se puede añadir a la mezcla ligeras proporciones de limos e, incluso, arcillas, ya que proporcionan rellenos lubricantes a los granos de arena.

- *Mortero bastardo:* se compone de cemento, cal y arena y reúne las ventajas de los dos anteriores; es decir, una buena maleabilidad y altas resistencias iniciales. No se deben utilizar cales hidráulicas debido a que, mezcladas con cemento pórtland, pueden producir expansión. Lo habitual es utilizar cales apagadas en su elaboración.

- *Mortero con aditivos:* en su elaboración se utilizan aditivos que confieren a la mezcla propiedades específicas. Los aditivos más utili-

zados son los aireantes, que introducen aire en el interior de la masa del mortero, aumentando la capacidad de retención de agua y también mejorando la plasticidad, sobre todo en mezclas pobres de cemento; los anticongelantes, retardadores o aceleradores de fraguado; y los hidrófugos.

• *Mortero de cemento de adición*: es un mortero elaborado con cemento pórtland y minerales finamente divididos, siendo éstos potencialmente hidráulicos (puzolanas o escorias) o totalmente inertes (caliza) desde el punto de vista de la propiedad conglomerante. La proporción de adiciones inertes que se puede mezclar no debe ser superior al 35%.

• *Mortero de cemento-cola:* está elaborado con mezcla de cemento y compuestos orgánicos tipo resinas solubles en agua. Se utiliza para las juntas finas. Se suelen dosificar al 50% en peso de arena, y normalmente bajo las instrucciones del fabricante. En su composición se emplean arenas finas, por la baja tensión superficial que presentan. Con este tipo de mortero se debe emplear agua de amasado en pequeña cantidad, con lo que se reduce la humedad en la obra y el tiempo de secado.

Dosificación del mortero

Es fundamental que los componentes del mortero estén proporcionados, es decir, *dosificados*, para que formen una masa plástica, homogénea y de fácil manejo, que no se disgregue.

Durante la etapa de aplicación del mortero, o sea en estado fresco, la pasta formada por el conglomerante y el agua lubrica los puntos de contacto entre las partículas de áridos, facilitando su deslizamiento e impidiendo su separación.

En la etapa de fraguado y endurecimiento final, la pasta conglomerante adhiere no sólo a las partículas de áridos entre sí, sino también a todo el mortero con las piezas o con la superficie del paramento, en el caso de los revocos.

Existen dos maneras de realizar la dosificación del mortero: en volumen, que es la que se emplea en obra; y en peso, que es la que se realiza en las centrales y se utiliza para mezclas muy cuidadas.

Las proporciones en volumen de los diferentes tipos de conglomerantes, áridos y agua que integran un mortero están determinadas por reglas empíricas y por algunos fundamentos teóricos, en función de su uso o lugar de aplicación.[32]

Una regla sencilla de dosificación establece que la suma de los volúmenes de los conglomerantes y la suma de los volúmenes de áridos deben estar en proporción no menor de 1:2,25 y no mayor de 1:3.

Atendiendo a las variantes de compactación de los materiales sueltos y a la humedad de los áridos, que puede modificar su volumen hasta casi un 30%[33], los límites de la proporción anterior se puede extender a valores comprendidos entre 1:2 y 1:3,5. Excepcionalmente el tope máximo de esta relación se puede ampliar en los mor-

30 Tamaño máximo del árido cuando la muestra se toma a partir de un lote según la norma *UNE-EN 1015-2* y se ensaya de acuerdo con la norma *UNE-EN 1015-1*.

31 Los componentes básicos de este mortero se presentan, por regla general, en un silo que tiene un compartimento para cada material. Además, puede tener aditivos y adiciones en sus correspondientes depósitos o silos, de aquí que este mortero también se conozca como *"mortero predosificado multisilos o mortero de dos componentes"*.

32 Si el mortero se prepara en obra, no debe tomarse como unidad de medida la *palada* porque el volumen que se recoge con ella varía según el grado de finura del material que se está midiendo.

33 El contenido de agua incide también en su peso unitario: 1 dm^3 de arena mojada es menos pesado que 1 dm^3 de arena seca. Esta aparente contradicción se debe a que en la arena húmeda el agua forma una película entre los granos separándolos entre sí, de modo que en el mismo volumen hay más cantidad de granos de arena cuando está seca que cuando está húmeda. Dado que el material de los granos es más pesado que el agua, la arena seca es más pesada pues tiene mayor cantidad de granos que la arena húmeda, para un mismo volumen.

teros con cemento de albañilería hasta 1:5 y, en algunos casos, hasta 1:6.[34]

Otra circunstancia a tener en cuenta es que la arena inmersa en la humedad del mortero tiene menor volumen que cuando estaba acopiada al aire. La razón se debe a que la arena suelta está sin compactar, mientras que en el interior del mortero acomoda sus granos que se deslizan con mayor facilidad dentro de la humedad del mismo, de manera que su volumen se reduce al mínimo.

Respecto a la proporción de conglomerante, lo ideal es que el mortero se comporte del mismo modo y con análogas características mecánicas que el ladrillo que une.

Si la mezcla es muy rica en conglomerante, por encima de los límites de proporción indicados, o sea, con menor volumen de áridos, resulta muy difícil trabajarla en estado fresco, y puede presentar fisuras en estado endurecido debido a la retracción natural de fraguado cuando el conglomerante está demasiado concentrado. Una de las funciones de los áridos es disminuir los efectos de la retracción de fraguado incorporando masa al conjunto.

Si la mezcla es pobre en conglomerante, por debajo de los límites de proporción indicados, o sea, con mayor volumen de áridos, éstos se disgregarán en estado fresco, separándose de la pasta, produciendo un mortero sin resistencia ni adherencia suficientes en estado endurecido.

En la tabla 2.10 se sugieren, a título orientativo, las dosificaciones recomendadas para la elaboración del mortero en función del lugar de aplicación.

En obra, la mejor manera de realizar la dosificación en volumen es por medio de cubos de volumen adecuados a la cantidad de mortero que se desea realizar [35]. Si se utiliza algún método de compactación del contenido del cubo, por ejemplo, golpeándolo contra el suelo o aplastándolo con la paleta, se debe hacer por igual sobre todos los materiales a dosificar, para evitar una baja calidad de la mezcla.

Si se va a elaborar un mortero bastardo, conviene preparar, al menos 16 horas antes de su utilización, una mezcla de cal viva y arena con la cantidad de agua necesaria para su apagado.

Especificación del mortero

En proyecto, los morteros se pueden especificar con dos criterios diferentes:

- *Especificación por resistencia:* se designan por la letra M seguida de la resistencia a compresión a la edad de 28 días, en N/mm^2, obtenida sobre probetas prismáticas de 4 cm x 4 cm x 16 cm (por ejemplo, la designación M5 se refiere a un mortero con una resistencia a compresión a los 28 días de 5 N/mm^2).

- *Especificación por dosificación:* se designan por la proporción, en volumen, de los componentes fundamentales, comenzando por el cemento al que se le asigna el valor de volumen "1", a continuación la cal, y luego la arena (por ejemplo la designación 1:1:6 se refiere a un mortero de cemento, cal y arena, en el cual de cada ocho partes, una es de cemento, otra es de cal y seis son de arena). La elaboración debe incluir las adiciones, aditivos y cantidad de agua con los que se supone se obtiene el valor de resistencia previsto.

La relación entre la resistencia mecánica y tipo de los morteros de albañilería y la dosificación en volumen de sus componentes se indica en la tabla 2.11.

El tipo de mortero más habitual para fábricas de ladrillo es el de clase M5, tipo b, cuya dosificación es 1:1:7, es decir, una parte de cemento, una parte de cal y siete partes de arena.

Tabla 2.10 Dosificación recomendada para morteros de albañilería

Lugar de aplicación	Dosificación	Componentes del mortero					Relación árido / conglom.
		Cemento		Cal		Arena	
		Normal	Albañilería	Hidráulica	Aérea		
Cimientos de ladrillo común	1 : 1/2 : 4	1		1/2		4	2,67
	1 : 1/4 : 3 1/2	1		1/4		3 1/2	2,80
	1 : 1/8 : 4 1/2		1	1/8		4 1/2	4,00
	1 : 1/16 : 4 1/2		1		1/16	4 1/2	4,24
Muros de sótanos espesor ≥ 0,30 m	1 : 1/4 : 3	1		1/4		3	2,40
	1 : 1/4 : 3 1/2	1		1/4		3 1/2	2,80
	1 : 1/8 : 5		1	1/8		5	4,44
Muros de sótanos espesor 0,15 m	1 : 1/4 : 3	1		1/4		3	2,40
	1 : 1/4 : 3 1/2	1		1/4		3 1/2	2,80
	1 : 1/8 : 4 1/2		1	1/8		4 1/2	4,00
Dados de apoyo	1 : 3	1				3	3,00
	1 : 3 1/2	1				3 1/2	3,50
Fábrica armada	1 : 3	1				3	3,00
Dinteles armados	1 : 3	1				3	3,00
Muros de ladrillo en general espesor ≥ 0,30 m	1/8 : 1 : 3 1/2	1/8		1		3 1/2	3,11
	1/4 : 1 : 4	1/4		1		4	3,20
	1 : 4 1/2		1			4 1/2	4,50
	1 : 1/8 :5		1	1/8		5	4,44
Muros de ladrillo en general espesor ≤ 0,20 m	1/8 : 1 : 3	1/8		1		3	2,67
	1/8 : 1 : 1/16 : 5	1/8	1	1/16		5	4,21
	1/8 : 1 : 5	1/8	1			5	4,44
Machones de ladrillo	1/4 : 1 : 3	1/4		1		3	2,40
	1/4 : 1 : 5	1/4	1			5	4,00
Arcos y bóvedas	1/2 : 1 : 3 1/2	1/2		1		3 1/2	2,33
	1/2 : 1 : 6	1/2	1			6	4,00
	1/2 : 1 : 1/8 : 6 1/2	1/2	1	1/8		6 1/2	4,00
Apoyos de arcos y bóvedas	1 : 1 : 5	1		1		5	2,50
	1/2 : 1 : 5 1/2	1/2	1			5 1/2	3,67
Muros mixtos de ladrillo y piedra	1 : 1 : 5	1		1		1	2,50

34 Resulta fácil comprender que cuando se dosifica en volumen hay gran diferencia entre medir las proporciones de las mezclas con los áridos secos, con la humedad natural o con los áridos embebidos en agua. Un 3% en peso de humedad natural en la arena supone un esponjamiento en volumen de un 29%. El porcentaje de humedad en peso de una arena embebida en agua es del 15% y ello supone un aumento de volumen de un 17%. Esto impone la necesidad de permitir una cierta tolerancia en el cumplimiento exacto de las proporciones prescritas en una determinada dosificación. Basándose en su experiencia, los operarios adaptarán las proporciones por medio del colmado o no de los recipientes o modificando ligeramente la dosificación.

35 Conviene utilizar dos cubos, uno para la medición del cemento y otro para la arena. Los cubos deben ser de material resistente a la abrasión e inatacable por el cemento o la cal.

Características del mortero

Características del mortero en estado fresco

El mortero fresco para albañilería es un mortero completamente amasado y listo para su empleo. Las propiedades y características que se le exigen dependen del uso al que vaya a ser destinado.

La norma UNE-EN 998-2:2004 *"Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería"* establece los requisitos para los morteros hechos en fábrica (*morteros industriales*) utilizados para trabazón y rejuntado en muros, pilares y tabiques de albañilería, estructural o no, destinados a la edificación y a la ingeniería civil.

En relación a los morteros frescos, la citada norma define las prestaciones y propiedades que debe declarar el fabricante relativas a los aspectos que se indican a continuación. Los valores declarados pueden ser contrastados mediante los ensayos correspondientes según las normas que se indican en cada caso.

- *Mortero fresco: Trabajabilidad*

Es la propiedad que determina la facilidad de la puesta en obra del mortero fresco y el tiempo de utilización sin necesidad de tener que añadirle agua. También se conoce como *plasticidad*.

Un mortero de elevada plasticidad se puede extender fácilmente sobre las piezas, a la vez que resiste su peso durante la colocación, posibilita su alineamiento al adherirse a la superficie vertical y puede salir fuera de las juntas con facilidad al aplicar presión sobre las piezas.

La plasticidad depende de la consistencia de la mezcla, de la granulometría de la arena utilizada y de la cantidad de finos. Se puede mejorar con el empleo de aditivos plastificantes y oclusores de aire. También mejora si se utiliza una determinada proporción de cal en la mezcla, ya que aumenta el número de finos, actuando como lubricante, sin perjudicar sensiblemente su resistencia.

El tiempo práctico de utilización del mortero lo debe declarar el fabricante. El procedimiento de verificación de esta propiedad está definido en la norma UNE-EN 1015-9:2000/A1:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco"*. La duración del tiempo de utilización obtenida del ensayo no debe ser menor que el valor declarado por el fabricante.

- *Mortero fresco: Contenido en iones cloruro*

Esta propiedad es fundamental si el mortero se va a utilizar en fábrica armada, debido a que los iones cloruro, procedentes de sales solubles en agua, pueden influir en la corrosión de las armaduras.

El contenido de iones cloruro solubles en agua, determinado a partir del mortero tal como se suministra, o calculado a partir del contenido en iones

Tabla 2.11 Dosificación de los morteros en función de su clase y tipo

Tipo de mortero	Resistencia característica (N/mm²)	Proporción cemento	Proporción cal aérea	Proporción cal hidráulica	Proporción arena
M2,5					
a	2,5	1	-	-	8
b		1	2	-	10
c		-	-	1	3
M5					
a	5,0	1	-	-	6
b		1	1	-	7
M7,5					
a	7,5	1	-	-	4
b		1	1/2	-	4
M10					
a	10	1	-	-	4
b		1	1/2	-	4
M15					
a	15	1	-	-	3
b		1	1/4	-	3

cloruro de sus componentes, no debe ser mayor que el valor declarado por el fabricante y, en cualquier caso, no debe exceder de 0,1% con relación a la masa del mortero seco.

El método de ensayo está regulado por la norma UNE-EN 1015-17:2001/A1:2005 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 17: Determinación del contenido en cloruros solubles en agua de los morteros frescos"*.

- *Mortero fresco: Contenido en aire*

El aire ocluido en un mortero se produce por efectos mecánicos o por medio de un aditivo aireante que se incorpora en la masa para hacerlo más manejable.

A medida que aumenta el contenido de aire, aumenta la maleabilidad y la resistencia a los ciclos hielo-deshielo; como contrapartida, disminuye la resistencia, la adherencia y la impermeabilidad.

El contenido en aire de los morteros frescos se determina por medio del procedimiento objeto de la norma UNE-EN 1015-7:1999 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire del mortero fresco"*.

El contenido en aire de un mortero fresco debe estar comprendido dentro del intervalo de valores declarado por el fabricante. Según la *Instrucción RC-08*, para las clases de mortero de albañilería comprendidas entre M5 y M12,5 el contenido en aire debe estar comprendido entre el 8% y el 22% en volumen.

En el caso de morteros para albañilería en los que se han utilizado áridos porosos, el contenido en aire se puede determinar, como método alternativo, a partir de la densidad aparente del mortero fresco, calculada según la norma UNE-EN 1015-6:1999/A1:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco"*.

- *Mortero fresco: Consistencia*

Esta propiedad del mortero fresco constituye un índice aproximado de la proporción de los componentes y, sobre todo, de la cantidad de agua y finos utilizados en la mezcla[36].

La consistencia de los morteros frescos hechos con conglomerantes minerales y áridos normales y ligeros se determina por medio de la mesa de sacudidas, cuyo procedimiento es objeto de la norma UNE-EN 1015-3:2000/A1:2005/A2:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)"*. La consistencia se expresa por el escurrimiento experimentado por la probeta de mortero ensayada, definido por el valor medio del diámetro en mm.[37]

Existe una correlación entre la consistencia de un mortero y la densidad aparente en estado fresco. Si no se especifica la consistencia, se debe utilizar el nivel definido para los diversos tipos de mortero en función de la densidad aparente del mortero fresco, según la tabla 2.12.

En la norma UNE-EN 1015-6:1999/A1:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco"* se incluye la denominación de los morteros en función de su escurrimiento, determinado por la mesa de sacudidas.

Existe un procedimiento alternativo para determinar la consistencia de un mortero fresco regulado por la norma UNE-EN 1015-4:1999 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 4: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por penetración del pistón)"*.[38]

36 En el argot utilizado en la construcción se dice que un buen mortero, en lo que se refiere a su consistencia es el que *"cuelga de la paleta"*.

37 Una consistencia plástica corresponde a obtener un diámetro de la probeta ensayada en la mesa de sacudidas de valor comprendido entre 140 mm y 200 mm.

38 Según este criterio, la *consistencia normal* de un mortero para albañilería, según la *Instrucción RC-08*, es aquélla a la que le corresponde un valor de penetración del pistón de 35 ± 3 mm.

- *Mortero fresco: Retención de agua*

Es la capacidad de conservar el agua de amasado que posee el mortero ante las condiciones externas (atmosféricas, absorción de las piezas, etc.).

Esta propiedad también está relacionada con la facilidad de aplicación del mortero. Una adecuada retención permite mantener la plasticidad de la pasta para que las piezas puedan ser colocadas y niveladas, lo que se relaciona directamente con su *trabajabilidad*. Además la capacidad de retención permite controlar la exudación producida por el diferente peso específico de los componentes del mortero. La exudación ocasiona asentamientos por sedimentación del mortero que genera efectos contraproducentes en la película superior del tendel, mermando la resistencia a la adhesión.

La capacidad de retención de agua es especialmente importante cuando el mortero está en contacto con ladrillos o bases de alta absorción. Una pérdida significativa de dicha agua se traduce en una insuficiente hidratación del conglomerante (fenómeno conocido como *"afogarado"*) que puede inhibir el efecto aglutinante del mortero. Un mortero con una elevada capacidad de retención de agua en estado fresco puede almacenar la humedad que absorbe de la superficie en donde se aplica, habitualmente muy porosa.

La capacidad de retención de agua es necesaria en función del grado de succión de las piezas utilizadas, aunque también influyen las condiciones meteorológicas del momento en el que se aplica el mortero. Si la retención de agua es baja y el ambiente lo propicia, el material puede rezumar humedad alterando sus propiedades. Al contacto con las piezas, el agua asciende hacia la parte superior del tendel y hacia los poros de las piezas formando conductos capilares en el mortero que debilitan la resistencia de la junta. Simultáneamente los áridos descienden generando intersticios bajo la pieza superior, además de mermar la resistencia por el aumento de la relación agua / cemento en la interfase superior de la junta. De este modo, el conjunto de llagas y tendeles adquiere una estructura porosa que provoca baja resistencia y compromete la durabilidad.

Según la *Instrucción RC-08*, la retención de agua del mortero fresco de albañilería debe ser igual o superior al 80% para las clases comprendidas entre M5 y M12,5; y al 75% para las clases superiores. Esta característica se debe medir sobre muestras de pasta de consistencia normal.

Para aumentar la capacidad de retención de agua de un mortero resulta clave reducir el tamaño de sus poros. En este sentido es favorable la existencia de finos en la granulometría del árido. Además, para un volumen dado, la pre-

Tabla 2.12. Nivel definido de consistencia en función de la densidad aparente del mortero fresco

Densidad aparente del mortero fresco (kg/m^3)	Consistencia Valor del escurrimiento (mm)
> 1200	175 ± 10
> 600 a ≤ 1200	160 ± 10
>300 a ≤ 1200	140 ± 10
< 300	120 ± 10

*Fuente: Norma UNE-EN 1015-3:2000/A1:2005/A2:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)"*.

Tabla 2.13. Clasificación y denominación del mortero fresco en función del escurrimiento

Mortero	Valor del escurrimiento (mm)
Seco	< 140
Plástico	140 a 120
Fluido	> 200

*Fuente: Norma UNE-EN 1015-6:1999/A1:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco"*.

sencia de partículas finas implica mayor superficie envolvente por donde se absorbe el agua, es decir, mayor retención. Lo mismo sucede con el tamaño de las partículas del conglomerante.

También se puede incrementar esta propiedad con el uso de cales, que en general tienen una mayor capacidad de retención de agua que los cementos, con el uso de adiciones finas como cenizas volantes o puzolanas, y también incorporando en la mezcla aditivos específicos como oclusores de aire o plastificantes, en mayor o menor medida, según las condiciones de la puesta en obra. El aumento del tiempo de amasado también incrementa esta propiedad.

La práctica de humedecer adecuadamente las piezas cerámicas antes de su colocación ayuda a controlar en buena medida la capacidad de retención de agua del mortero. Es habitual humedecer las piezas instantes antes de ser colocadas, lo cual no siempre proporciona las adecuadas condiciones de interacción entre el mortero y los ladrillos. Si queda remanente una película de agua rodeando las piezas, aumenta la proporción agua / cemento del mortero y además se dificulta la succión. Para evitarlo es preferible saturar las piezas con antelación suficiente a su puesta y colocarlas una vez que sus paredes hayan adquirido la posibilidad de succión.

En otro extremo, si la fábrica se ejecuta con piezas de baja succión es desaconsejable el humedecimiento previo de las mismas así como una retención de agua elevada, puesto que se resentiría la interacción adecuada entre los materiales y las piezas casi flotarán sobre el mortero.

En la tabla 2.14 se resumen las prescripciones que deben cumplir, con carácter general según la *Instrucción RC-08*, tanto el mortero fresco como el cemento de albañilería, relativas al contenido de aire y a la capacidad de retención de agua, en función del tipo y clase de resistencia, obtenidas a partir de muestras tomadas de una pasta de consistencia normal.

Segregación

Es el fenómeno que consiste en la separación de los ingredientes del mortero. Se controla evitando el agua en exceso de la mezcla y utilizando arenas con tamaños no muy grandes.

- *Mortero fresco: Adherencia*

Es la propiedad que mide la resistencia del mortero fresco a deslizarse sobre la superficie del soporte en el que se aplica.

Se mejora aumentando el porcentaje de cemento respecto al de cal y utilizando finos arcillosos en la arena.

Tabla 2.14 Prescripciones para el mortero fresco

Tipo y clase de resistencia	Contenido de aire UNE-EN 413-2 (% en volumen)		Retención de agua UNE-EN 413-2 (% en masa)
MC 5 MC 12,5	≥ 8	≤ 22	≥ 80
MC 12,5 X MC 22,5 X	---		≥ 75

*Fuente: *"Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08)"*. Tabla A1.5.3b.

Características del mortero en estado endurecido

El estado endurecido es el que presentan los morteros una vez se han producido los procesos químicos y físicos del fraguado.

La norma UNE-EN 998-2:2004 *"Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería"* define, para los morteros endurecidos, las prestaciones de las características relacionadas con la resistencia a compresión, con la resistencia de unión (adhesión) y con la densidad aparente.

• *Mortero endurecido: Resistencia a compresión*

La resistencia a compresión es generalmente el parámetro más utilizado para identificar y prescribir un mortero. La razón se debe a que es una de las propiedades que se determina con mayor facilidad y, además, de ella se pueden deducir otras características.

En la resistencia mecánica del mortero inciden numerosas variables. Las fundamentales son el contenido y la categoría del cemento, el contenido de agua y, sobre todo, la relación agua / cemento.

La resistencia mecánica a compresión del mortero para albañilería se determina a la edad de 28 días sobre probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm, confeccionadas, curadas y conservadas de acuerdo con el procedimiento indicado en la norma UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido"*.

El valor expresado en N/mm^2 constituye uno de los parámetros que se puede utilizar para la especificación de los morteros.

Para los morteros de albañilería diseñados, el fabricante debe declarar la resistencia a compresión, siempre que el contenido en cal aérea del mortero, calculado como hidróxido de calcio Ca $(OH)_2$, sea igual o mayor del 50%, en masa, con relación a la cantidad total del conglomerante.

En otro caso, puede declarar la clase de mortero de acuerdo con la tabla 2.15, en donde dicha resistencia a compresión, cuyo valor se debe superar, se designa en megapascales (N/mm^2), precedido de la letra "M".

El DB SE-F, cuando se refiere al tipo de *mortero ordinario especificado por resistencia*, utilizado para la construcción de fábricas con requisitos estructurales, incluye la siguiente serie: M5; M7,5; M10 y M15.

Tabla 2.15 Designación de los morteros

Clase	M 1	M 2,5	M 5	M 10	M 15	M 20	M d
Resistencia a compresión (N/mm^2)	1	2,5	5	10	15	20	d (1)

(1) *"d"* es una resistencia a compresión mayor de 25 N/mm^2 declarada por el fabricante.
*Fuente: Norma UNE-EN 998-2:2004 "*Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería".*

• *Mortero endurecido: Resistencia de unión (adhesión)*

Esta propiedad se podría definir como la *resistencia al despegue*. Está directamente relacionada con la resistencia a tracción y a cortante del mortero, las características de las piezas o del material del soporte, el contenido de humedad y la calidad de su puesta en obra. Una buena adhesión produce mayor resistencia global de la fábrica y una mayor impermeabilidad.

El proceso de la unión mecánica entre el mortero y las piezas de albañilería, que garantiza el monolitismo de la fábrica, se desarrolla en tres fases.

En primer lugar se produce la succión del agua desde el mortero a las piezas colocadas. Esta fase se inicia instantáneamente al contactar ambos materiales y puede durar unos minutos o incluso horas. A continuación se transporta el conglomerante por el agua succionada introduciéndose en los poros de la pieza. El proceso finaliza con la hidratación y cristalización del conglomerante en los poros colmatados produciendo los enlaces químicos entre la pasta y las piezas.

Se puede cuantificar la adhesión como el producto de la *tensión adherente* entre los materiales y la *superficie adherente* que resulta de su puesta en contacto.

La tensión adherente máxima que se puede alcanzar en la interfase mortero / pieza depende del enlace químico de los cristales de cemento del mortero en los poros de la pieza. En este parámetro intervienen la cantidad, el grado de penetración y la hidratación del conglomerante en dichos poros.

La tensión adherente aumenta cuanto mayor cantidad de cemento sea posible transferir a las piezas y cuanto más adecuado sea el nivel de hidratación que active la acción ligante del cemento. En este sentido se destaca la importancia de paliar el *desecado* del mortero humedeciendo las piezas cerámicas previamente a su puesta en obra.

La superficie adherente está determinada por el área de contacto eficaz entre la pasta y las piezas. Cuanto mayor sea esta superficie mayor es el número de enlaces químicos y, consecuentemente, la adhesión final del conjunto. En la superficie de contacto conseguida entre ambos materiales intervienen las características del mortero y de las piezas, aunque son fundamentales las condiciones de ejecución.

En este sentido, la existencia de perforaciones en la tabla de los ladrillos favorece la penetración de la pasta incrementando la interfase mortero / pieza. Las oquedades deben tener una abertura suficiente para que la pasta del mortero pueda penetrar y bañar las paredes verticales de los orificios. Si las aberturas son pequeñas el mortero no penetra y las puentea.

También incide en esta propiedad la cualidad superficial de las caras de contacto de las piezas con el mortero. Cuanta mayor rugosidad tengan las caras de contacto, mejor respuesta adherente presentará la fábrica ante solicitaciones de corte.

La resistencia de unión (adhesión) del mortero para albañilería diseñado, destinado a construcciones sometidas a requisitos estructurales, en combinación con elementos de albañilería, la debe declarar el fabricante como *"resistencia inicial a cortante"*, basándose en ensayos según la norma UNE-EN 1052-3:2003/A1:2008 *"Métodos de ensayo para fabricas de albañilería. Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante"*; o basándose en los siguientes valores tabulados:

- Resistencia inicial a cortante para los morteros de uso corriente y para los morteros ligeros (L): 0,15 N/mm^2.

- Resistencia inicial a cortante para los morteros de juntas y capas finas (T): 0,30 N/mm^2.

En los morteros utilizados para revestimientos las características a considerar relacionadas con este aspecto son la compatibilidad y la capacidad de adhesión con el material de soporte. Su determinación está regulada respectivamente por las normas:

- UNE-EN 1015-21:2003/A1:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 21: Determinación de la compatibilidad de los morteros de revoco monocapa con los soportes".*

- UNE-EN 1015-12:2000 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros de revoco y enlucidos endurecidos aplicados sobre soportes".*

39 El conocido fenómeno de la *retracción de fraguado* se puede describir de forma simplificada de la siguiente forma. La evaporación progresiva del agua de amasado y la estructura interna del mortero, que es discontinua por la existencia de poros y capilares, originan la coexistencia de una fase líquida y otra gaseosa. Aparecen entonces tensiones superficiales que causan compresiones sobre las paredes de los intersticios, ocasionando la contracción del mortero. Este proceso está directamente relacionado con el tamaño de los poros existentes. Cuanto más elevado es el contenido de finos y el del conglomerante, mayor es la retracción hidráulica potencialmente alcanzable. Además, al interaccionar el mortero con las piezas de albañilería, puede verse afectado por la absorción de éstas, incrementándose su retracción hidráulica. Este efecto es más acusado cuanto mayor es la velocidad de absorción inicial o *succión* de las piezas en contacto.

• *Mortero endurecido: Estabilidad dimensional*

Los morteros sufren cambios de volumen a lo largo de su vida útil debidos a diferentes causas. Las principales son las debidas a su inherente proceso de consolidación desde el estado fresco al estado endurecido.

Durante las fases de fraguado y endurecimiento el mortero experimenta retracciones plásticas de secado que, junto con las térmicas, derivan en la contracción final del material[39].

La parámetros que aumentan la retracción del mortero son: el alto contenido en áridos muy finos, la excesiva cantidad de cemento y agua, los espesores de junta excesivos, la sequedad del ambiente y los cambios de temperatura.

Los cambios de volumen por causas térmicas ocasionan contracciones y dilataciones del mortero cuyo valor absoluto entre las piezas no es significativo. Sin embargo sí puede ocasionar efectos perjudiciales si se considera globalmente el muro o cerramiento ejecutado cuando es de longitud excesiva y no se prevén las adecuadas juntas de movimiento verticales.

Aun así, en fábricas ejecutadas con piezas cerámicas vistas, la retracción del mortero de las juntas no es un fenómeno problemático. En primer lugar, porque el fenómeno opuesto de la expansión por humedad lo contrarresta y, en segundo lugar, porque el volumen que representa el mortero de las juntas es pequeño en comparación con el que representa el mortero aplicado en revestimientos.

- *Mortero endurecido: Absorción de agua*

Los morteros endurecidos son susceptibles de absorber agua por capilaridad. Esta propiedad debe ser declara por el fabricante cuando estén destinados a ser utilizados en construcciones exteriores. El método de ensayo está regulado por la norma UNE-EN 1015-18:2003 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido"*.

El nivel de saturación que puede alcanzar un mortero, conocido como *valor crítico de saturación de agua* es función del sistema y naturaleza de poros (abiertos, cerrados, intercomunicados, capilares, etc.) de los que depende la facilidad con la que el agua puede acceder al material.

En la porosidad del mortero influye extraordinariamente el tipo de conglomerante utilizado (cemento con o sin adiciones, cales, etc.), la cantidad de agua empleada, el grado de hidratación, el sistema de preparación y la edad del mortero.

- *Mortero endurecido: Permeabilidad al vapor de agua*

Esta característica está relacionada con el comportamiento higrotérmico de los muros de cerramiento.

Los morteros destinados a ser utilizados en construcciones exteriores deben ser impermeables a la humedad en estado líquido, pero deben permitir el paso del vapor de agua, para evitar procesos patológicos provocados por humedades de condensación. La aportación de cal hidratada al mortero mejora sustancialmente la permeabilidad al vapor de agua sin mermar la estanquidad al agua en estado líquido.

El método de ensayo para morteros utilizados como revestimiento de muros se regula por la norma UNE-EN 1015-19:1999/A1:2005 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido"*.

Los valores tabulados del coeficiente de difusión del vapor de agua del mortero están incluidos en la norma UNE-EN 1745:2000 *"Fábrica de albañilería y componentes para fábrica. Métodos para determinar los valores térmicos de proyecto"*. Se precisan para realizar el estudio higrotérmico de los cerramientos.

- *Densidad (del mortero endurecido en estado seco)*

Esta característica es función de la composición del mortero y del tipo de árido utilizado en su fabricación. Se determina mediante ensayos regulados por la norma UNE-EN 1015-10:2000/A1:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido"*.

La densidad del mortero endurecido debe estar comprendida dentro del intervalo declarado por el fabricante. Se prescribe el valor máximo de la densidad del mortero para albañilería ligero (L) en estado endurecido seco al valor de 1.300 kg/m^3.

- *Mortero endurecido: Conductividad térmica*

Esta característica debe ser declarada por el fabricante, así como los fundamentos en los que se basa para su declaración, cuando el mortero para albañilería se vaya a utilizar en construcciones sometidas a requisitos térmicos.

El fabricante debe declarar los valores de cálculo de la conductividad térmica del mortero para albañilería de acuerdo con la norma UNE-EN 1745:2002 *"Fábrica de albañilería y componentes para fábrica. Métodos para determinar los valores térmicos de proyecto"*.

La conductividad térmica del mortero influye en el estudio del comportamiento higrotérmico de los cerramientos de fachada y debe ser inferior al valor declarado.

- *Mortero endurecido: Durabilidad*

Además de las propiedades indicadas, los morteros deben tener una estabilidad adecuada capaz de resistir las condiciones del medio en donde se vayan a encontrar, de modo que mantengan su integridad estructural y su apariencia externa al menos durante el periodo de vida útil previsto; y que su duración persista teniendo en cuenta las condiciones de exposición local, climáticas y de mantenimiento.

Las medidas encaminadas a asegurar la durabilidad del mortero deben considerar no sólo la composición, propiedades y comportamiento del material, sino también la clase de exposición a la que estará sometido el elemento de fábrica en el que se incorpora.

La clase de exposición determina la agresividad del medio en el que se debe mantener el elemento sin menoscabo de sus propiedades. El DB SE-F, en el artículo 3.1 *"Clase de exposición"* diferencia dos tipos: clase de exposición general y clase de exposición específica. Para caracterizar estas clases se consideran cuestiones relativas al entorno (orientación, salinidad del medio, ataque químico, etc.) pero también, en particular, importa la severidad de la exposición local a la humedad, es decir, la situación del elemento en el edificio y el efecto de ciertas soluciones constructivas, tales como la protección que pueden ofrecer los aleros, cornisas y albardillas.

Se indican a continuación los factores más significativos relacionados con la durabilidad del mortero o de las fábricas en las que se incorpora.

- *Mortero endurecido:* Heladicidad

Se conoce como *"heladicidad"* el cuadro característico de rotura final de un material provocado por la intermitencia de la formación de hielo y deshielo.

Los efectos de las heladas en el mortero dependen de la cantidad de agua que puede penetrar o *"valor crítico de saturación de agua"*. Este parámetro está directamente relacionado con la estructura de poros que existe en el material, si son abiertos, cerrados o intercomunicados, ya que la propia estructura del sistema de poros puede facilitar o dificultar la entrada de agua al interior.

La estructura porosa del mortero depende del conglomerante y aditivos, de la relación agua / cemento, del grado de hidratación, del sistema de preparación y de la edad del mortero.

Se consigue una buena resistencia a las heladas con una adecuada capacidad de acomodación para evitar grietas de retracción, realizando morteros compactos, utilizando aditivos específicos, y mediante un adecuado proceso de ejecución.

En la actualidad no existe una norma europea que regule los métodos de ensayo relacionados con la durabilidad, por lo que no se han incorporado requisitos a este respecto. No obstante, la aptitud de empleo de un mortero para albañilería en medios agresivos se puede basar en los resultados de ensayos realizados por un laboratorio cualificado o en la propia experiencia del fabricante.

- *Mortero endurecido: Acción de iones sulfato*

Los iones sulfato, procedentes de sales solubles en agua o derivados de reacciones de transformación del anhídrido sulfuroso presente en determinadas atmósferas industriales y urbanas, pueden reaccionar con los aluminatos de calcio hidratados del klínker del cemento o de las cales hidráulicas, provocando la formación de un compuesto expansivo conocido con el nombre de *ettringita* que altera la estabilidad dimensional de los morteros. La formación de la *ettringita* no es inmediata y requiere una cantidad suficiente de aluminatos y sulfatos solubles, así como la variación del grado de humedad.

Otro efecto perjudicial de los sulfatos solubles es la posibilidad de formar disoluciones saturadas y sobresaturadas en los poros del mortero, en donde pueden cristalizar como sales con gran cantidad de agua, provocando un aumento de volumen y, por tanto, una presión sobre las paredes de los poros, que da lugar a las correspondientes fisuras y, por consiguiente, a un incremento de las posibilidades de deterioro del mortero por la acción de agentes externos.

Se previene una posible reacción con los iones sulfato prescribiendo cementos resistentes a éstos (SR) con bajo contenido en aluminato de calcio.

- *Acción de iones cloruro*

Los iones cloruro sólo afectan a los morteros que incluyen en su interior llaves, armaduras o mallas de acero, introducidas como refuerzo en fábricas armadas. Los iones cloruro procedentes de las sales solubles en agua pueden provocar la corrosión de las armaduras dispuestas en el seno del mortero.

Se previene este efecto limitando el contenido de iones cloruro a un máximo de 0,1% de la masa del cemento empleado.

- *Mortero endurecido: Reacción frente al fuego*

Los elementos de albañilería no combustibles que contengan como máximo un 1,0% (en masa o en volumen, según el valor más crítico) de materiales orgánicos distribuidos homogéneamente, se clasifican como clase A1 de la reacción frente al fuego sin tener que hacer ensayos (según la decisión de la Comisión 96/603/CE y sus modificaciones).

En el resto de los casos, es decir, los morteros para albañilería que contengan una fracción mayor del 1,0% de materiales orgánicos, se deben clasificar de acuerdo con la norma UNE-EN 13501-1:2007 *"Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego"*, y declarar la clase apropiada de la reacción al fuego.

Características de los morteros de junta delgada

Los morteros para juntas y capas finas deben satisfacer los requisitos descritos en apartados anteriores con carácter general para cualquier mortero de albañilería y, además, los requisitos adicionales que se indican a continuación.

- *Tamaño máximo del árido*

El tamaño máximo de los áridos en los morteros de junta fina no debe ser mayor que 2mm, según ensayos realizados de acuerdo con la norma UNE-EN 1015-1:1999/A1:2007 *"Método de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 1: Determinación de la distribución granulométrica (por tamizado)"*.

- *Tiempo abierto o tiempo de corrección*

Es el período de tiempo durante el cual puede el albañil modificar la posición de una pieza sin perturbar la adherencia.

Esta característica la debe declarar el fabricante sólo en el caso de morteros para juntas y capas finas. El ensayo se realiza según la norma UNE-EN 1015-9:2000/A1:2007 *"Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco"*. El valor no debe ser superior a 5 minutos en cualquier caso.

2.2 Componentes auxiliares de las fábricas

Los componentes auxiliares se utilizan en la construcción de fábricas para mejorar sus condiciones mecánicas, funcionales y, en ocasiones, su aspecto.

Se pueden clasificar en tres grandes grupos, atendiendo a la misión que tienen encomendada: revestimientos y barreras, armaduras y dispositivos de anclaje.

Los revestimientos y barreras son elementos yuxtapuestos que protegen los muros ante las agresiones exteriores, fundamentalmente climáticas. Algunos de ellos tienen además la función de configurar la apariencia que la fábrica presenta al exterior.

Las armaduras son barras o mallas de acero protegido, que se incorporan en el interior de la masa del muro, modificando sustancialmente las características del material, sobre todo las relacionadas con el comportamiento mecánico y resistente, haciéndole apto para resistir esfuerzos estructurales de tracción, que no son resistidos, en general, por los materiales pétreos.

Por último, los dispositivos de anclaje y conexión son elementos que tienen la función de transmitir a la estructura portante del edificio, con carácter selectivo, los esfuerzos resistidos por la fábrica, o de transmitir esfuerzos de un muro a otros a través de determinados tipos de juntas.

Los revestimientos y barreras son objeto de dimensionado atendiendo al nivel del requisito de protección (térmica, acústica, contra el fuego, etc.) que se desee conseguir. Sin embargo, aunque algunos de ellos, como los enfoscados y revocos, indudablemente modifican y mejoran el comportamiento mecánico de las fábricas, no se les suele asignar ninguna función resistente, debido a que no están establecidos los modelos precisos para incorporar su contribución en el análisis estructural.

Por el contrario, tanto las armaduras incorporadas en la masa del muro, como los dispositivos de anclaje y conexión, deben ser objeto de dimensionado, atendiendo a la función resistente que tengan encomendada. Deben, además, disponer de la protección adecuada para el nivel de exposición correspondiente a la fábrica en la que se incorporan.

2.2.1 Componentes auxiliares de las fábricas: Revestimientos y barreras

Los revestimientos protegen las fábricas contra la acción de los agentes atmosféricos y configuran su aspecto exterior. En las fábricas de ladrillo cara vista el aspecto exterior lo constituye el propio acabado de las piezas.

Las barreras impiden o dificultan el paso de la humedad o del flujo calorífico o acústico, y quedan ocultas al exterior. Se deben incorporar tanto en las fábricas revestidas como en las que vayan a quedar vistas.

Se indica a continuación las barreras utilizadas con mayor frecuencia en los cerramientos.

- *Barreras antihumedad*

Son elementos yuxtapuestos al muro para impedir el paso del agua de escorrentía o capilaridad.

Están formadas por materiales bituminosos (láminas o morteros, placas asfálticas, betunes, alquitranes, breas, pinturas al clorocaucho, etc.), o por láminas textiles de diversos plásticos. También existen sistemas de impermeabilización in situ a base de emulsiones de caucho. Las barreras más utilizadas son las láminas impermeables (bituminosas, de caucho, de plástico, de polietileno, etc.) y los recubrimientos a partir de morteros hidrófugos. Algunos materiales utilizados para aislamiento térmico pueden constituir también una barrera antihumedad, si tienen un coeficiente de absorción de valor reducido.

Las láminas impermeables horizontales en los muros deben permitir la transmisión de cargas sin sufrir ni causar daños, y deben tener suficiente resistencia superficial de rozamiento para evitar el movimiento de la fábrica que descansa sobre ellas. No son recomendables los materiales que pueden rebosar del muro por aplastamiento.

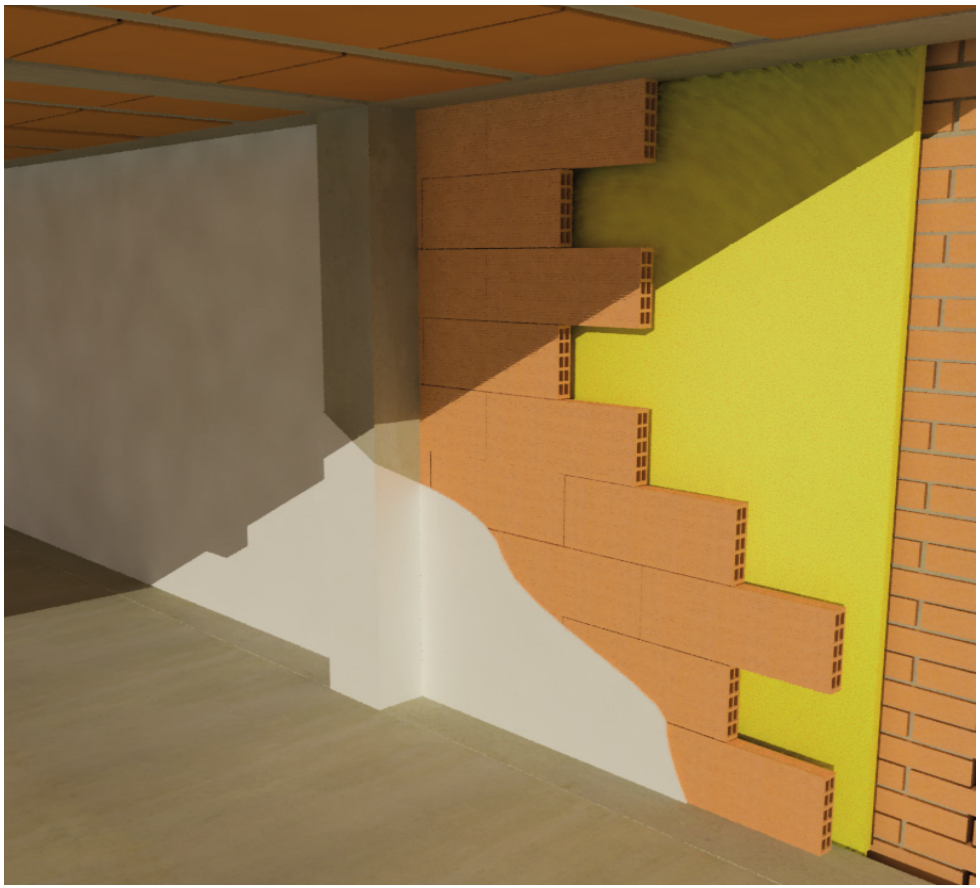
Se deben utilizar siempre en aquellos puntos de la fábrica susceptibles al paso de agua: en el arranque, en los encuentros con el forjado, en los dinteles, en las jambas, en los antepechos y en los demás puntos singulares de la fachada; así como en el interior de las jardineras y en los muros de contención.

- *Aislantes térmicos*

Un material aislante, desde el punto de vista térmico, es aquel que posee la propiedad de reducir el flujo de calor que pasa a través del mismo. Los materiales que se usan en construcción con propiedades aislantes pueden ser orgánicos de origen natural (corcho, fibra de celulosa, cáñamo, coco, lino, paja, caucho o cera), orgánicos sintéticos (láminas plásticas rígidas, semirrígidas o flexibles, espumas aislantes) o inorgánicos (lana de roca, fibra de vidrio, perlita, vermiculita, etc.).

Habitualmente se emplean como aislantes térmicos los materiales inorgánicos compuestos por fibra de vidrio o lana de roca, y los orgánicos sintéticos a base de espumas de poliuretano y planchas rígidas de poliestireno expandido o extruido[40].

El poliestireno expandido es un material plástico y rígido, con estructura celular cerrada y rellena de aire, fabricado a partir del moldeo de perlas de poliestireno expandible o uno de sus copolímeros. Se presenta en planchas de color blanco y es un aislante adecuado para fachadas. Presenta unos niveles mínimos de absorción, que oscilan entre el 1% y el 3% en volumen, incluso sumergiendo el material completamente en agua. La estabilidad dimensional se sitúa en valores que oscilan entre 0,05 y 0,07 mm/metro de longitud y grado Kelvin.



El poliestireno extruido es una espuma plástica producida a partir de la extrusión de una mezcla fluida de poliestireno y un gas espumante. Se presenta en paneles rígidos, con estructura celular cerrada. Sus propiedades son altamente aislantes, con valores de conductividad térmica muy bajos, comprendidos entre 0,029 W/(m·ºK) y 0,036 W/(m·ºK). Tiene también valores muy bajos de absorción de agua y prestaciones mecánicas muy elevadas, con resistencias comprendidas entre los 0,2 N/mm^2 y 0,7 N/mm^2. Es un material aislante muy adecuado para colocarlo en la cámara de aire de las fachadas.

Los poliuretanos se presentan en espuma que se proyecta sobre las superficies. Si se utiliza este material es necesario consultar con el fabricante la posible casuística que se puede presentar en cuanto a la adherencia del producto al soporte y contar con personal especializado.

Otros tipos de materiales aislantes orgánicos, aunque menos utilizados en la construcción, son la espuma elastomérica, el policloruro de vinilo, el polietileno, la resina fenólica y la urea-formaldeído.

En el caso de utilizar poliuretanos deben estar libres de CFC; y en el caso de utilizar materiales plásticos, deben estar libres de halógenos.

• *Aislamiento acústico*

Un material aislante desde el punto de vista acústico es aquel que tiene la propiedad de amortiguar y modificar el flujo acústico que pasa a través del mismo.

Las barreras acústicas pueden ser frente a ruido aéreo o frente a ruido de impacto. Habitualmente poseen capacidad para funcionar simultáneamente como aislantes térmicos y acústicos y, las que tienen estructura de celdas cerradas, también como barrera antihumedad.

En general son láminas de polietileno o espuma reticulada, protegidas por una película antidesgarro. También pueden tener estructura de sándwich, formada por varias capas absorbentes y aislantes al ruido, una capa central de plomo, y otras exteriores de material espumado.

• *Láminas de revestimiento de soportes y frentes de forjado*

Son barreras interpuestas entre los elementos estructurales (soportes y frentes de forjado) y los paños de fábrica, cuya función es la desolidarización entre ambos para evitar procesos patológicos derivados de su incompatibilidad mecánica y física.

Suelen ser láminas compuestas de espuma de polietileno reticulado, con un espesor mínimo de 5 mm y diferentes niveles de protección del acabado exterior, para poder ser utilizadas según la agresividad del medio.

Pueden servir simultáneamente como aislamiento térmico, acústico y barreras antihumedad.

• *Materiales de relleno y sellantes*

Los rellenos y sellantes utilizados generalmente en las juntas de movimiento deben ser necesariamente de materiales elásticos.

Para el sellado, especialmente por la cara exterior de la junta, se debe utilizar un material de bajo módulo de elasticidad y polimerización acelerada. Se recomienda una masilla de la clase 25-LM, según la norma UNE 104307:2001 *"Edificación. Sellantes. Clasificación y especificaciones"*. También las siliconas neutras ofrecen un buen comportamiento en cuanto a la adherencia y la elasticidad frente al paso del tiempo.

Para evitar que el sellante se adhiera al relleno o que existan problemas de incompatibilidad entre el relleno y el sellante de una junta, es recomendable disponer un cordón o un elemento de separación entre ambos, por ejemplo de espuma de polímeros expandidos.

• *Pinturas*

En las situaciones excepcionales en las que se desee utilizar pinturas en la fábrica, sólo son recomendables pinturas elásticas que dispongan de una ficha técnica con sus características definidas, y que cumplan las especificaciones de la norma UNE 48244:2007 *"Pinturas y barnices. Recubrimiento en emulsión acuosa para hormigón y albañilería en exteriores"*.

La velocidad de transmisión agua - vapor (permeabilidad) debe ser media o alta, lo cual supone un valor superior a 15 g/(m^2·día); y la permeabilidad al agua debe ser baja, lo cual supone un valor inferior a 0,1 kg/(m^2·$h^{1/2}$). Estos parámetros se determinan según la norma UNE-EN ISO 7783-2:1999 *"Pinturas y barnices. Materiales de recubrimiento y sistemas de recubrimiento para albañilería exterior y hormigón. Parte 2: Determinación y clasificación de la velocidad de transmisión agua – vapor (permeabilidad)"*.

La relación de contraste no debe ser inferior a 0,98 para el color blanco, o a 0,95 para otros colores.

Para poder cubrir pequeñas fisuras, el alargamiento en rotura tiene que ser superior al 120% y el valor medio de tres determinaciones de adherencia debe ser superior a 1,5 N/mm^2.

40 Una cámara de aire se puede considerar que ejerce la función de aislante térmico cuando está sin ventilar o ligeramente ventilada, con una superficie de abertura al exterior menor que 1500 mm^2 por metro de longitud contado horizontalmente.

2.2.2 Componentes auxiliares de las fábricas: Armaduras

Son elementos constituidos por barras o alambres de acero, que se incorporan en el interior de la masa del muro, modificando sustancialmente sus propiedades mecánicas, hasta el punto de constituir en determinadas condiciones, junto con las piezas y el mortero, un material compuesto, *la fábrica armada*, esencialmente distinto de la fábrica tradicional.

Las armaduras incluidas en la fábrica tienen dos misiones fundamentales:

- Suministrar capacidad resistente a tracción, flexión y cortadura, posibilitando la utilización de elementos de fábrica como elementos estructurales con mayores prestaciones y dimensiones más esbeltas.

- Garantizar una distribución homogénea de tensiones en el interior de la masa del muro, consiguiendo un material dúctil y evitando los riesgos de fisuración que se derivan de la fragilidad que caracteriza a todos los materiales pétreos.

Las características y especificaciones técnicas de las armaduras prefabricadas para tendeles están reguladas por la norma UNE-EN 845-3:2006 *"Especificación de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 3: Armaduras de junta de tendel de malla de acero".*

Materiales para armaduras

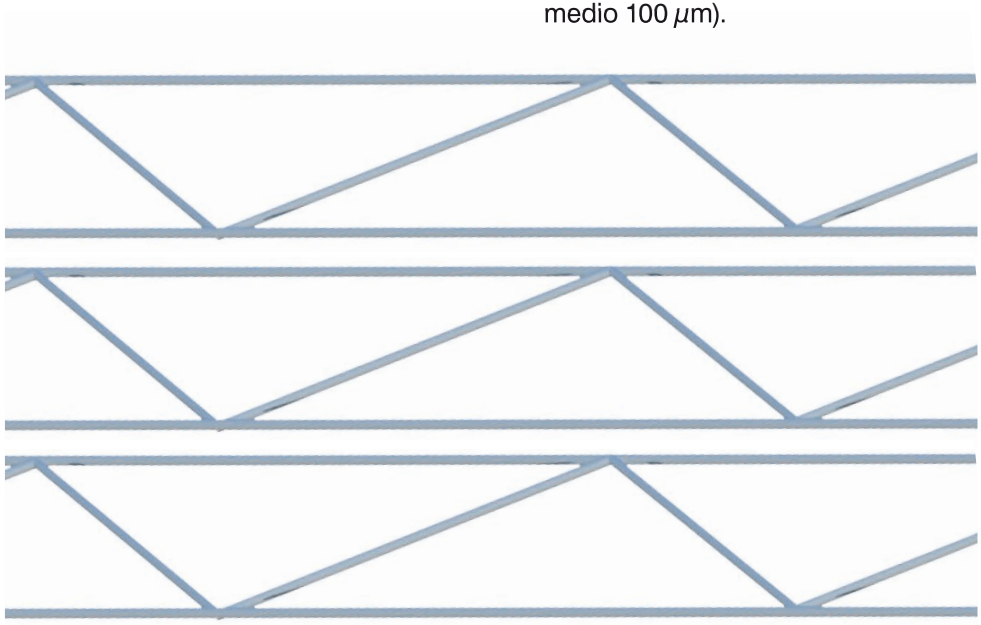
Los materiales para la fabricación de armaduras de tendel son, en general, alambres de acero al carbono o acero inoxidable, con revestimientos de cinc y, a veces, de material orgánico, en distintas cuantías, para conseguir una protección frente a la corrosión adecuada al nivel de exposición en el que van a ser utilizadas.

Según la norma indicada anteriormente, los materiales y sistemas de protección frente a la corrosión con los que se pueden fabricar las armaduras de junta de tendel son los siguientes:

- Acero inoxidable austenítico (UNE-EN 10088-1:2006 *"Aceros inoxidables. Parte 1: Relación de aceros inoxidables")*: aleaciones de níquel, cromo y molibdeno; o sólo de níquel y cromo.

- Alambre de acero (UNE-EN 10020:2001 *"Definición y clasificación de los aceros")* con revestimiento cincado (UNE-EN 10244-2:2001 *"Alambre de acero y productos de alambre. Recubrimientos metálicos no ferrosos de acero. Parte 2: Recubrimientos de cinc o de aleaciones de cinc"*) posterior a la fabricación: masa mínima de revestimiento de cinc 265 g/m^2 (protección fuerte); 105 g/m^2 (protección media) ó 60 g/m^2 (protección débil).

- Alambre de acero (UNE-EN 10020) con revestimiento cincado (UNE-EN 10244-2) y revestimiento orgánico (UNE-EN 10245-1:2001 *"Alambres de acero y productos de alambre. Recubrimientos orgánicos del alambre. Parte 1: Reglas generales")*: masa mínima de revestimiento de cinc 60 g/m^2; y grosor mínimo de revestimiento orgánico 80 μm (valor medio 100 μm).



Tipos de armaduras

La misma norma UNE-EN 845-3:2006 *"Especificación de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 3: Armaduras de junta de tendel de malla de acero"* establece que las armaduras de tendel para uso estructural deben estar constituidas por una malla de alambres soldado con dos disposiciones posibles:

- Dos alambres longitudinales de tamaño no menor de 3 mm soldados de forma discontinua a los alambres transversales (disposición en *escalera*).

- Dos alambres longitudinales de tamaño no menor de 3 mm soldados a un alambre continuo diagonal (disposición en *cercha)*.

La configuración más adecuada para la función estructural de la armadura de tendel es la que corresponde al tipo *cercha*, frente a otros tipos de disposiciones de los alambres, por constituir una malla indeformable en su propio plano, lo que le confiere una mayor capacidad resistente frente a esfuerzos de flexión y cortadura, independientemente de las condiciones del mortero en las que va embutida.

También es preferible que todos los alambres que constituyen la armadura estén soldados en el mismo plano, para garantizar un perfecto recubrimiento de mortero en tendeles de espesores habituales.

2.2.3 Componentes auxiliares de las fábricas: Dispositivos de conexión

En general, los dispositivos de conexión, anclajes, llaves y fijaciones son elementos auxiliares cuya función es transmitir esfuerzos selectivos de la fábrica a la estructura del edificio o a otra fábrica.

Su función está directamente relacionada con las condiciones de sustentación impuestas a los paños de fábrica, es decir, con su estabilidad. Por consiguiente, son objeto de cálculo y dimensionado, en función del tipo y magnitud de los esfuerzos que deben transmitir. Además, es imprescindible que su configuración geométrica permita reproducir las condiciones de cálculo impuestas a los vínculos de sustentación, de forma que permitan determinados movimientos e impidan otros.

También es imprescindible, debido a su función estructural, que posean la protección adecuada al tipo de exposición correspondiente a la fábrica en la que se ubican. Son elementos que, en la mayoría de las ocasiones, quedan expuestos al ambiente exterior y, sin embargo, en una posición inaccesible para un correcto mantenimiento. Por ello, deben ser de acero inoxidable AISI 304, con un límite elástico igual o superior a 235 N/mm^2.

Existen dos tipos claramente diferenciados, en función de su misión estructural y de la naturaleza de los esfuerzos que deben transmitir: los anclajes y las llaves de atado en juntas de movimiento.

Las llaves utilizadas en las juntas de movimiento deben tener uno de sus extremos recubierto por una funda de plástico, para evitar su adherencia con el mortero y así permitir el movimiento horizontal en el plano del muro.

Las especificaciones técnicas de los dispositivos de conexión están definidas en la norma UNE-EN 845-1:2000 *"Especificación de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 1: Llaves, amarres, colgadores, ménsulas y ángulos"*.

2.2.4 Perfiles para dinteles

Se pueden utilizar perfiles metálicos laminados, conformados en frío o soldados, dimensionados de acuerdo con las cargas que vayan a soportar.

El tratamiento o protección de estos perfiles debe ser similar a los de cualquier elemento estructural utilizado en la obra, según la clase de exposición del paño en el que se incorporan.

Las especificaciones de los dinteles prefabricados metálicos se rigen por la norma UNE-EN 845-2:2005 *"Especificaciones de componentes auxiliares para fábrica de albañilería. Parte 2: Dinteles"*.

Los procedimientos de ensayo de todos los elementos auxiliares para fábricas están regulados por la norma UNE-EN 846 *"Métodos de ensayo de componentes auxiliares para fábricas de albañilería"*.[41]

41 Relación de normas UNE-EN 846 referentes a los procedimientos de ensayo de los elementos auxiliares para fábricas de albañilería:

- UNE-EN 846-2:2001 *"Métodos de ensayo de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 2: Determinación de la adhesión de las armaduras de tendel prefabricadas en juntas de mortero"*.
- UNE-EN 846-3:2001 *"Métodos de ensayo de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 3: Determinación de la resistencia al cizallamiento de las soldaduras en armaduras de tendel prefabricadas"*.
- UNE-EN 846-4:2001 *"Métodos de ensayo de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 4: Determinación de las características de capacidad de carga y carga-deformación de los amarres"*.
- UNE-EN *846-5:2001 "Métodos de ensayo de componentes auxiliares para fábricas de albañilería: Parte 5: Determinación de la resistencia a tracción y a compresión y las características de carga-desplazamiento de las llaves (ensayo entre elementos)"*.
- UNE-EN 846-6:2001 *"Métodos de ensayo de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 6: Determinación de la resistencia a tracción y a compresión y las características de carga-desplazamiento de las llaves (ensayo sobre un solo extremo)"*.
- UNE-EN 846-7:2001 *"Métodos de ensayo de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 7: Determinación de la resistencia al cizallamiento y las características de carga-desplazamiento de llaves conectadoras y de deslizamiento (ensayo en una junta de mortero entre dos elementos)"*.
- UNE-EN 846-9:2001 *"Métodos de ensayo de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 9: Determinación de la resistencia a flexión y de la resistencia al cizallamiento de los dinteles"*.
- UNE-EN 846-10:2001 *"Métodos de ensayo de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 10: Determinación de la resistencia y de las características de carga-deformación de las ménsulas"*.
- UNE-EN 846-11:2001 *"Métodos de ensayo de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 11: Determinación de las dimensiones y arqueo de los dinteles"*.
- UNE-EN 846-13:2002 *"Métodos de ensayo de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 13: Determinación de la resistencia al impacto, abrasión y corrosión de revestimientos orgánicos"*.

3. Criterios

3.1 Criterios estructurales 61

3.1.1 Resistencia mecánica de las fábricas 61
3.1.2 Criterios específicos de los muros de cerramiento 63

3.2 Criterios de proyecto 70

3.2.1 Modulación 70
3.2.2 Aparejo 70
3.2.3 Tipos de muros 74
3.2.4 Juntas verticales de movimiento 76
3.2.5 Fábricas de diferentes materiales 78
3.2.6 Fábrica armada 78

3.3. Criterios de suministro, recepción y acopio de materiales 81

3.3.1 Suministro y recepción de los ladrillos cerámicos 81
3.3.2 Suministro y recepción del cemento 82
3.3.3 Suministro y recepción de la arena 83
3.3.4 Suministro y recepción del mortero 84
3.3.5 Suministro y recepción de los elementos auxiliares 84

3.4 Criterios de ejecución 85

3.4.1 Muretes de referencia o de muestra 85
3.4.2 Replanteo y nivelación 85
3.4.3 Amasado del mortero 86
3.4.4 Humedecimiento de los ladrillos 87
3.4.5 Colocación de los ladrillos 88
3.4.6 Corte de las piezas 90
3.4.7 Juntas de mortero 90
3.4.8 Rozas y rebajes 96
3.4.9 Criterios de ejecución específicos para fábrica armada 97
3.4.10 Criterios de ejecución de las juntas de movimiento 98
3.4.11 Criterios de ejecución de los chapados con plaquetas 98
3.4.12 Protección de la fábrica durante su ejecución 99
3.4.13 Limpieza de la fábrica ejecutada 101

3.5 Criterios de control 102

3.5.1 Control de recepción de materiales 102
3.5.2 Control de ejecución de la fábrica 105

GEO HIDROL

3. Criterios

3.1 Criterios estructurales

La fábrica de ladrillo es un excelente material estructural cuando trabaja básicamente a compresión. La limitación de su comportamiento mecánico en muy raras ocasiones está condicionada por su resistencia mecánica. Casi siempre las restricciones a la utilización de las fábricas de ladrillo como material estructural están impuestas por la presencia de empujes horizontales excesivos, por flexiones fuera del plano del muro, por fuertes excentricidades de carga o por tracciones locales.

Aunque a las fábricas se les reconoce una pequeña resistencia a flexión, lo cierto es que los valores, tanto de la resistencia por llagas como de la resistencia por tendeles, son muy pequeños. Sin embargo, el DB SE-F incorpora recursos adicionales con los que se puede suplir esta deficiencia.

El principal recurso para contrarrestar las tracciones debidas a acciones horizontales consiste en acumular peso. Si un muro está comprimido, el valor de la tensión normal de compresión se suma en su totalidad al valor de la resistencia a flexión (DB SE-F, capítulo 5.4 *"Muros con acciones laterales locales"*, fórmula 5.27). Con el peso propio de dos o tres plantas, un cerramiento puede llegar a contrarrestar totalmente las tracciones por acción lateral y se evita, además, el consiguiente riesgo de fisuración.

Incluir armaduras de tendel constituye otro recurso adicional para suplir la deficiente resistencia a flexión de las fábricas. La armadura de tendel incrementa la capacidad resistente del muro a flexión horizontal, lo que permite aumentar la luz de flexión en paños esbeltos. La fábrica armada está reconocida como material estructural en el DB SE-F, en donde se pueden encontrar los modelos de comportamiento y respuesta estructural específicos para esta técnica[1].

3.1.1 Resistencia mecánica de las fábricas

Resistencia característica a compresión

Para el cálculo de los muros portantes se considera como parámetro fundamental el valor de la resistencia característica a compresión de la fábrica[2]. Incluso para el cálculo de muros no portantes, este valor sirve de referencia para obtener alguno de los términos relacionados con la capacidad resistente a flexión o cortante.

La resistencia característica a compresión de la fábrica, f_k, se puede obtener, en función de la resistencia normalizada a compresión de las piezas[3], f_b, considerando el valor mínimo garantizado por el fabricante, y la resistencia a compresión del mortero, f_m. Los valores usuales para las fábricas de ladrillo cara vista se indican en la tabla 3.1.

1 Los modelos de análisis y dimensionado de la fábrica armada son los mismos que los utilizados para el hormigón armado. El DB SE-F indica, literalmente: *"En todo lo que afecta a las armaduras activas o pasivas, y modelos de capacidad resistente de la sección, se seguirán, en lo que no se contradiga a aquí, las prescripciones de la norma de hormigón vigente"*. (DB-SE F, capítulo 5.6 *"Fábrica armada a flexión"*, artículo 5.6.2, párrafo 1).

2 Se define *resistencia característica a compresión de la fábrica* como la resistencia a compresión correspondiente al fractil 5% de la resistencia.

3 Se define *resistencia normalizada a compresión de las piezas de fábrica* como la resistencia a compresión de las piezas por asimilación a la resistencia a compresión de una pieza equivalente secada al aire, de 100 mm de ancho por 100 mm de alto.

Tabla 3.1. Resistencia característica a la compresión de las fábricas de ladrillo

Resistencia característica a la compresión de las fábricas de ladrillo f_k (N/mm²)								
Resistencia normalizada de las piezas, f_b (N/mm²)	5	10		15		20		25
Resistencia del mortero, f_m (N/mm²)	2,5	5	7,5	7,5	10	10	15	15
Ladrillo macizo con junta delgada	-	5	5	7	7	9	10	11
Ladrillo macizo	2	4	4	6	6	8	8	10
Ladrillo perforado	2	4	4	5	6	7	8	9

*Fuente: *"Código Técnico de la Edificación DB SE-F. Tabla 4.4 "*

El valor de la resistencia a compresión de la fábrica es el parámetro más representativo de su capacidad portante. Sin embargo, la resistencia a compresión casi nunca condiciona el dimensionado de los muros portantes y, menos aún, el dimensionado de los no portantes, puesto que los valores son suficientemente elevados para los esfuerzos habituales que deben resistir. Casi siempre es la excentricidad de las cargas, que determina a su vez la estabilidad del muro, el aspecto que condiciona la validez estructural de una determinada solución. Si la excentricidad está controlada, generalmente la estabilidad queda asegurada, y la resistencia a compresión resulta muy holgada.

En el proyecto de fábricas a las que se exigen prestaciones estructurales específicas, que requieren capacidad resistente a flexión y cortante, se deben utilizar para el cálculo los valores de resistencia correspondientes a este tipo de solicitaciones. Estos valores se pueden obtener, en la fase de proyecto, tomando como referencia la categoría del mortero utilizado, según las tablas 3.2 y 3.3.

En determinadas condiciones se puede incrementar la resistencia a flexión vertical de las fábricas, adoptando valores en función de su resistencia característica a compresión[4]: *"En el caso en que se adopten disposiciones especiales sobre la trabajabilidad del mortero y su penetración en los huecos de las piezas se podrá adoptar como resistencia a la flexotracción la de 0,1·f_k"*. (DB SE-F, artículo 4.6.4 *"Resistencia a flexión"*, párrafo 3).

Los valores de resistencia mecánica de las fábricas de ladrillo reconocidos por la normativa son excesivamente conservadores. En situaciones en las que interese obtener unos valores más afinados porque se precisen mayores prestaciones, o en las que sea necesario verificar la resistencia real de una fábrica ejecutada, se puede recurrir a realizar los ensayos correspondientes. Estos ensayos de resistencia están regulados por las normas UNE que se resumen en la tabla 3.4.

Independientemente de los valores de resistencia establecidos en la normativa, obtenidos a partir de las respectivas resistencias de las piezas y morteros, conviene tener presente los siguientes criterios de carácter general, relativos al comportamiento estructural conjunto de piezas y mortero.

Una elevada resistencia a compresión de las piezas indica una buena resistencia a tracción transversal, y consiguientemente una buena resistencia de la obra de fábrica. Una elevada resistencia a compresión del mortero también indica menor dilatación transversal. Sin embargo, la facilidad de trabajo de la pasta aconseja mezclas plásticas, con mayores porcentajes de finos, aunque la resistencia del mortero sea menor. Por lo tanto, para conseguir mayor resistencia a compresión de la fábrica, es preferible utilizar piezas más resistentes y morteros más plásticos.

Tabla 3.2 Resistencia característica a cortante de las fábricas de ladrillo

Resistencia característica a cortante de las fabricas de mortero ordinario							
Tipo de piezas		f_{vko} (N/mm²)			Límite de f_{vk} (N/mm²) (1)		
	Mortero (2)	M1	M2,5	M10	M1	M2,5	M10
Ladrillo cerámico macizo		0,1	0,2	0,3	1,2	1,5	1,7
Ladrillo cerámico perforado		0,1	0,2	0,3	1,4*	1,2*	1,0(*)

(*) La menor de las resistencias longitudinales a compresión.
(1) Para llagas a hueso o con tendel hueco, el valor es el 70% del consignado.
(2) Para valores intermedios, no se interpola, sino que se empleará la columna correspondiente al valor inferior.
*Fuente: *"Código Técnico de la Edificación DB SE-F. Tabla 4.5 "*

Tabla 3.3 Resistencia característica a flexión de las fábricas de ladrillo

Resistencia a flexión de la fábrica (N/mm²)								
Tipo de piezas	Morteros ordinarios				Morteros de junta delgada		Morteros ligeros	
	f_m < 5 N/mm²		f_m ≥ 5 N/mm²					
	f_{xk1}	f_{xk2}	f_{xk1}	f_{xk2}	f_{xk1}	f_{xk2}	f_{xk1}	f_{xk2}
Ladrillo cerámico	0,10	0,20	0,10	0,40	0,15	0,15	0,10	0,10

*Fuente: *"Código Técnico de la Edificación DB SE-F. Tabla 4.6 "*

No son aconsejables arenas que produzcan morteros poco plásticos, aunque sean arenas limpias de río, pues el operario tiende a facilitar el trabajo agregando mayor cantidad de cemento de la estipulada, con lo que aumenta considerablemente la retracción del mortero y la consecuente fisuración de la fábrica. En general, es perjudicial una dosificación de cemento superior a la necesaria.

Es imprescindible establecer una correlación entre las resistencias de las piezas y los morteros[5]. Ambos materiales se deben dilatar en la misma medida al entrar la fábrica en carga; sin embargo, las deformaciones transversales del mortero son generalmente mayores, provocando en las piezas tensiones de tracción perpendiculares a la dirección del esfuerzo, con lo que éste se fragmenta en pequeñas columnas sueltas. Las fábricas comprimidas no llegan a rotura aplastadas, sino agrietadas por *efecto Poisson*, con tensiones de tracción perpendiculares al esfuerzo.

El comportamiento de las fábricas a pandeo empeora notablemente si se produce succión del agua de amasado del mortero. Por ello es bueno mojar las piezas cerámicas (excepto las de baja succión) antes de su puesta en obra.

La resistencia al corte de las fábricas no se consigue aumentando la resistencia a compresión de las piezas o morteros, sino limitando el número de huecos o perforaciones de las piezas.

3.1.2 Criterios específicos de los muros de cerramiento

Desde el punto de vista del comportamiento estructural, los muros de fábrica que tienen la función exclusiva de compartimentación o cerramiento, no se deben tratar como un caso particular de los muros portantes. Por el contrario, el hecho de estar desprovistos en buena medida de carga gravitatoria obliga a reconsiderar las reglas y criterios que se han utilizado tradicionalmente en el cálculo estructural de los elementos de fábrica.

La ausencia de carga gravitatoria significativa es una circunstancia que no mejora el comportamiento mecánico de los muros de fábrica, sino todo lo contrario. Las condiciones de estabilidad frente a las acciones horizontales se ven mermadas en la misma medida en que el muro se ve desprovisto de tensiones de compresión.

4 El criterio es similar al que existía en la antigua norma FL-90 *"Muros Resistentes de Fábrica de Ladrillo"*.

5 El DB SE-F limita el valor máximo de la resistencia característica del mortero al 75% de la resistencia normalizada de las piezas. En la tabla 3.1 sólo aparecen las combinaciones compatibles.

6 El DB SE-F dedica un apartado específico para plantear los modelos de análisis estructural que son de aplicación a los muros de cerramiento, sobre el que se insistirá más adelante.

Por esta razón, es preciso analizar con extremo cuidado las condiciones de geometría y sustentación de los muros de cerramiento, estableciendo reglas específicas para este tipo singular de muros de fábrica que, en ningún momento, se pueden deducir extrapolando los criterios que son de aplicación a los muros de carga[6].

En esta sección se indican los criterios estructurales de carácter general que son de aplicación a los muros de cerramiento en todos los casos, sea cual sea el sistema constructivo adoptado.

Tabla 3.4. Normas UNE de aplicación a los ensayos de resistencia mecánica de las fábricas de ladrillo

NORMAS DE ENSAYO PARA FÁBRICAS DE ALBAÑILERÍA. Propiedades mecánicas	
	"Métodos de ensayo para fábricas de albañilería.
UNE-EN 1052-1:1999	*Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión"*
UNE-EN 1052-2:2000	*Parte 2: Determinación de la resistencia a la flexión"*
UNE-EN 1052-3/A1:2008	*Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante"*
UNE-EN 1052-4:2001	*Parte 4: Determinación de la resistencia al cizallamiento incluyendo la barrera al agua por capilaridad"*
UNE-EN 1052-5:2006	*Parte 5: Determinación de la resistencia a la adhesión por el método de arranque"*

*Fuente: Organismo de Normalización AENOR.

Criterios relativos a la geometría

Los aspectos de índole geométrica constituyen el principal condicionante del comportamiento mecánico de las fábricas, incluso de las que se utilizan sólo con la función de cerramiento.

Sea cual sea el modelo de análisis que se utilice para la verificación del requisito de seguridad estructural, el principal parámetro que condiciona la validez de la solución es la esbeltez del muro. Como criterio general, es importante tener en cuenta que la esbeltez de un muro de cerramiento no sólo depende de la razón entre la altura y el espesor, sino que disminuye sustancialmente si el muro está unido eficazmente en los bordes laterales a soportes o a otros muros que lo rigidicen transversalmente.

La esbeltez de un muro con una altura atípicamente muy elevada se puede mantener dentro de un rango de valores razonables, conservando su espesor de medio pie, sin más que rigidizar el muro en los bordes laterales a distancias suficientemente cortas.

Si se desea utilizar piezas cerámicas de medio pie de espesor, la esbeltez viene determinada por las dimensiones de los paños entre sustentaciones; por consiguiente, los criterios de índole geométrica condicionan tanto las alturas como las luces máximas de los pórticos de fachada o de los elementos estructurales en los que se sustenta el cerramiento.

La normativa limita la esbeltez al valor 27, aunque esta limitación sólo se refiere a los muros de carga y, por extensión, a la planta de arranque de los muros de cerramiento *autoportantes*. No obstante, se deben evitar los elementos excesivamente esbeltos, que pueden tener problemas de estabilidad. En este sentido, la altura entre forjados para evitar un cálculo exhaustivo con muros de medio pie de espesor, es de aproximadamente 3,00 m.

Criterios relativos a las sustentaciones

Las condiciones de sustentación de los muros de cerramiento constituyen un factor primordial para su comportamiento mecánico, puesto que intervienen decisivamente en el modo de respuesta del elemento para equilibrar las acciones exteriores.

Las sustentaciones representan los vínculos con la estructura del edificio a las que se transmiten los esfuerzos. La posibilidad de generar determinadas reacciones en los bordes del paño o de liberarlas determina el modelo de comportamiento estructural del muro y las tensiones a las que estará sometido.

El criterio fundamental para un buen comportamiento estructural de los muros de fábrica, con carácter general, es que estén bien sustentados en el arranque. Esto significa que el elemento estructural que sirve de apoyo en la base de un muro, tanto si es de carga como si es de cerramiento, debe tener rigidez suficiente para controlar las deformaciones a valores muy estrictos. Esto no se consigue con elementos muy resistentes, sino con elementos de luces cortas.

Antes de indicar las condiciones de sustentación de los muros de cerramiento en el arranque, es importante matizar este concepto. En un cerramiento continuo, tanto si es *autoportante* como si está confinado entre forjados sin interrupción de la continuidad en vertical, el *"apoyo"* se produce inevitablemente en la primera hilada de la planta baja (o de la planta primera si hay soportal)[7]. Por consiguiente, las condiciones que se indican a continuación sólo se refieren al elemento estructural en la planta de arranque, y no a los elementos intermedios embutidos. Por el contrario, en los casos en los que el cerramiento apoya en los forjados de cada planta con la continuidad interrumpida mediante juntas horizontales de movimiento, o en paños con huecos corridos, o cuando por alguna razón de proyecto se interrumpe la continuidad vertical del paño, las siguientes condiciones se deben respetar en todos y cada uno de los elementos de arranque de los paños interrumpidos.

Con carácter general, el elemento estructural en el que arranca un muro de fábrica debe tener limitado el valor de los asientos diferenciales, si se trata de un elemento de cimentación, o el valor de la flecha, si se trata de un elemento en vano. Debido a la enorme rigidez que tienen los muros, no pueden acompañar a los elementos en los que se sustentan cuando los movimientos relativos de éstos son importantes, y el hecho de quedar *"descolgados"* localmente constituye una de las principales causas de disfunción estructural.

Arranque en cimentación

Si el muro de cerramiento arranca de cimentación, por ejemplo sobre una zapata corrida, el criterio de rigidez se puede obtener del DB SE-Cimientos, artículo 2.4.3 *"Estados límite de servicio"*.

El criterio se basa en controlar la rigidez del cimiento estableciendo límites a la distorsión angular.

Se define distorsión angular *"β"* como el asiento diferencial entre dos puntos dividido por la distancia que los separa.

siendo:

- β_{AB} → la distorsión angular entre los puntos A y B

$$\beta_{AB} = \frac{\delta s_{AB}}{L_{AB}} = \frac{s_B - s_A}{L_{AB}}$$

- S_A → el asiento del punto A
- S_B → el asiento del punto B
- δS_{AB} → el asiento diferencial entre los puntos A y B
- L_{AB} → la distancia entre los puntos A y B

La tabla 2.2 *"Valores límite basados en la distorsión angular"* del DB SE-Cimientos establece la limitación de 1/2000 para muros de carga sin armar con flexión cóncava hacia abajo, que es el caso asimilable al de un muro de fábrica, aunque sea de cerramiento, siempre que tenga continuidad hasta la cimentación.

La condición anterior se puede conseguir disponiendo bajo el muro una zapata corrida de hormigón en masa o armado, con canto suficiente según sean las características y el tipo de terreno.

Si el terreno es flojo y no se puede garantizar la anterior limitación de los asientos diferenciales, se puede recurrir a la disposición de armaduras de tendel en las primeras hiladas para prevenir la posible fisuración del elemento de fábrica por el hecho de quedar descolgado localmente.

La base de la zapata corrida debe ser horizontal y situada en un solo plano. Si ello no es posible, se puede organizar la cimentación en bancadas uniformes, haciendo coincidir cada una de ellas con juntas verticales de movimiento del muro.

Si el arranque del cerramiento se produce sobre la cabeza de un muro de sótano, la condición de rigidez se cumple sin necesidad de ninguna comprobación adicional.

Cuando es necesario cimentar con zapatas aisladas o pilotes, se deben disponer entre ellos las correspondientes vigas de unión, dimensionadas para resistir a flexión la carga del muro, de manera que no se supere el límite de distorsión angular indicado anteriormente.

Arranque en vigas o forjados

Para evitar fisuración en los cerramientos, las vigas o forjados deben ser suficientemente rígidos, especialmente los situados en el perímetro en el que arranca la fachada.

En este caso, la condición de rigidez también se puede deducir de la misma tabla 2.2 *"Valores límite basados en la distorsión angular"* del DB SE-Cimientos, considerando la limitación de 1/500 aplicable a estructuras reticuladas con tabiquería de separación. Esto equivale a limitar la flecha instantánea de los elementos de arranque a 1/1000 de la luz.

Cuando se trata de estructuras porticadas, en las que el cerramiento de fábrica arranca de los zunchos o vigas de borde correspondientes, se consigue resolver la condición de rigidez necesaria en el apoyo mediante dos procedimientos alternativos.

Un procedimiento consiste en no sobrepasar el límite de flecha establecido limitando convenientemente la luz entre soportes. En este sentido, hay que tener en cuenta que la limitación de flecha conduce a resultados aceptables cuando se trata de luces limitadas (en torno a 5,00 m ó 6,00 m como máximo).

Para luces elevadas es necesario establecer, además, un límite de flecha absoluto compatible con la enorme rigidez de los muros de fábrica, que en ningún caso debe sobrepasar el valor de 7 mm ó 6 mm en fábricas sin armar. El recurso habitual para cumplir esta condición es prever un nervio de rigidización en el borde con un canto superior al del

7 La consideración en cuanto a la forma de sustentarse un elemento continuo de fábrica está explícita, sin dejar lugar a duda, en el DB SE-Acciones en la Edificación, artículo 2.1 *"Peso propio"*, párrafo 5: *"El peso de las fachadas y elementos de compartimentación pesados ... se asignarán a aquellos elementos que inequívocamente vayan a soportarlos. En caso de continuidad con plantas inferiores, debe considerarse que la totalidad del elemento gravita sobre sí mismo."*

forjado, o un soporte adicional intercalado para reducir la luz. Si ello no es posible, se puede recurrir a la disposición de armaduras en las primeras hiladas para prevenir el consiguiente riesgo de fisuración en los paños de planta baja.

Otro procedimiento consiste en efectuar un análisis estructural exhaustivo, incorporando el cerramiento, con su rigidez correspondiente, en el modelo de cálculo, cuando su presencia resulte desfavorable para el propio cerramiento o para la estructura. Esta alternativa es necesaria cuando se prevean deformaciones importantes en paños de elevadas proporciones geométricas. En este caso se debe diseñar el cerramiento con los recursos adicionales deducidos del análisis correspondiente, adecuados a la solución constructiva adoptada *(véanse las soluciones del Sistema G.H.A.S.)*.

Criterios relativos a las juntas estructurales

El cerramiento debe respetar las juntas de carácter estructural del edificio al que pertenece. Para ello, es imprescindible hacer coincidir estas juntas con alguna de las juntas de movimiento propias del cerramiento.

Criterios relativos a huecos y entrepaños

Desde el punto de vista estructural, los huecos en los cerramientos constituyen un punto singular, pues interrumpen su continuidad. Es creencia habitual que los huecos suponen un debilitamiento del muro, aunque no siempre es así. Si los huecos son pequeños y discontinuos, generalmente las carpinterías que los circundan constituyen un aporte adicional de rigidez o de resistencia, aunque no se considere en el cálculo. Si los huecos son rasgados en vertical, los montantes de las carpinterías y sus correspondientes fijaciones al forjado pueden llegar a desempeñar el papel de poste auxiliar de rigidización transversal del cerramiento en paños de grandes luces.

Otra cuestión es la presencia de huecos corridos en horizontal. Este tipo de composiciones de fachada supone interrupciones del cerramiento que obligan a diseñar y disponer elementos específicos en cada planta para transmitir la carga gravitatoria a cada uno de los forjados, lo que implica interrumpir también la forma natural de trabajar que tienen los muros de fábrica.

La incidencia de los huecos en el análisis, para las diferentes soluciones constructivas, se desarrollará más adelante en la sección de Requisitos y siguientes. En este capítulo se enuncian los criterios de carácter geométrico que se deben tener en cuenta a la hora de estudiar y componer en proyecto los huecos del cerramiento.

Como sucede en cualquier elemento de fábrica, el comportamiento mecánico de los huecos está condicionado fundamentalmente por la geometría, no sólo del propio hueco, sino también del dintel y del entrepaño que queda entre dos huecos consecutivos o, en su caso, del machón de esquina.

Las proporciones geométricas entre los distintos elementos de un hueco tiene incidencia incluso en la forma de transmisión de la carga gravitatoria a los apoyos. Si el dintel tiene un canto modesto en relación a su luz (en particular, si el canto es menor que la mitad de la luz), la trasmisión de la totalidad de la carga gravitatoria se realiza por flexión propiamente dicha; en este caso el dintel o cargadero funcionan como una viga ordinaria, es decir con tensiones de tracción y compresión en todas las secciones a lo largo de su desarrollo. Por el contrario, si la altura del dintel es superior a la mitad de la luz libre del hueco, funciona como una viga de gran canto, y sólo una parte de la carga se transmite por flexión a los apoyos extremos, concretamente la carga que queda comprendida en el arco de descarga (arco parabólico de altura igual al 60% de la luz libre del hueco). El resto de la acción gravitatoria se transmite mediante bielas comprimidas de trayectoria oblicua, es decir, produciendo empujes.

Lo fundamental en el diseño y distribución de los huecos de fachada, para un comportamiento estructural adecuado en este último caso, es dotar de suficiente ancho a los machones, es decir, conseguir que los entrepaños tengan un desarrollo suficiente para que el empuje producido por la compresión oblicua caiga siempre dentro de su base de sustentación, con la holgura precisa para que el bloque comprimido correspondiente a la totalidad de la carga sea resistido con seguridad suficiente en la hilada del arranque. Se trata, por tanto, de una condición geométrica que relaciona la luz del hueco con el canto del dintel y, a su vez, con la altura del machón.

La condición geométrica anterior se puede expresar de la siguiente forma:

$b \geq 0{,}5 \cdot e + L_o \cdot h / (4 \cdot z + 2 \cdot h)$ *

siendo:

- b ancho mínimo del contrafuerte
- e ancho adicional necesario por aplastamiento, de valor:
  - $e = R / (t \cdot f_d)$, donde:
  - R es el valor de cálculo de la totalidad de la carga del muro sobre el apoyo ($R = P / 2 + F / 2$)
  - t es el espesor del muro
  - f_d es la resistencia de cálculo a compresión de la fábrica
- L_o luz libre del hueco
- h altura del contrafuerte
- z brazo de palanca, de valor:
  - $0{,}4 \cdot H + 0{,}2 \cdot L$, pero no mayor de $0{,}7 \cdot L$, donde:
  - H es la altura total de la fábrica sobre el dintel
  - L es la luz de cálculo del hueco, hasta el eje de las sustentaciones, pero no mayor de $1{,}15 \cdot L_o$, o sea:
  - L $\leq 0{,}8 \cdot H$ $1{,}0 \cdot H$ $1{,}0 \cdot H$ $1{,}5 \cdot H$ $2{,}0 \cdot H$
  - z = $0{,}7 \cdot L$ $0{,}6 \cdot L$ $0{,}6 \cdot H$ $0{,}7 \cdot H$ $0{,}8 \cdot H$

* Fuente: Documento de Aplicación SE-F a Vivienda. Seguridad estructural Fábrica. Consejo Superior de los Arquitectos de España.

Este criterio de carácter geométrico es especialmente importante cuando la altura de planta, y por consiguiente la altura del machón, es importante, sobre todo si se trata de los machones de esquina. La oblicuidad de la carga puede demandar un ancho importante de machón aunque el espesor del bloque comprimido sea relativamente pequeño.

Si no es posible dotar al machón de desarrollo suficiente para cumplir la condición anterior, es preciso incrementar el esfuerzo de tracción que corresponde al empuje no resistido, a la hora de calcular el dintel.

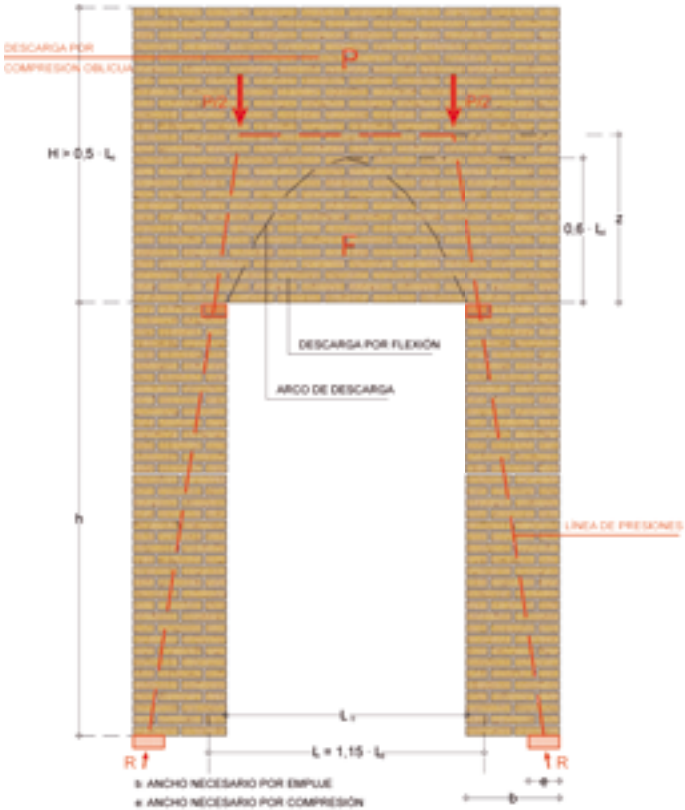
Para resistir las tracciones producidas por la descarga del hueco, tanto las correspondientes a la descarga por flexión propiamente dicha, como las que corresponden al empuje cuando el contrafuerte es escaso o inexistente, se pueden utilizar diferentes recursos. Aun en el caso de no existir contrafuerte, el valor de la tracción suele ser moderado y, en la mayoría de las situaciones se puede resolver con una pequeña cuantía de acero colocada en la parte inferior del dintel. Sin embargo, sea cual sea el recurso que se utilice para resistir las tracciones, es preciso conseguir una condiciones geométricas adecuadas para resolver el equilibrio.

Si se utiliza el recurso de fábrica armada con armadura de tendel, el ancho mínimo del macho queda determinado por la resistencia a compresión de la fábrica, para evitar que la jamba se aplaste por compresión, y por la longitud de anclaje de la armadura.

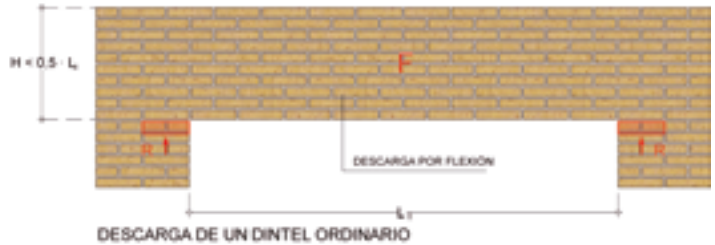
Si se utilizan elementos específicos, de un material diferente a la fábrica, para

resolver los dinteles de huecos, como es el caso de los cargaderos (pueden ser de hormigón, madera o acero), es fundamental conseguir suficiente ancho de entrega para asegurar un perfecto reparto de cargas y liberar a las jambas de una perjudicial concentración de tensiones. Como criterio general, la longitud de entrega de perfiles en la fábrica no debe ser menor que el canto del perfil y, en ningún caso, debe ser inferior a 12 cm.

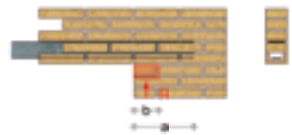
Si estas dimensiones geométricas mínimas no se pueden garantizar, el recurso habitual es disponer un elemento vertical auxiliar con objeto de que restituya las condiciones deficitarias del apoyo, a modo de soporte o de tirante,



DESCARGA DE UN DINTEL DE GRAN CANTO CON CONTRAFUERTE



DESCARGA DE UN DINTEL ORDINARIO

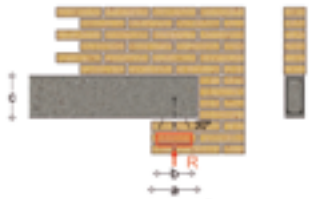


b: ANCHO NECESARIO POR COMPRESIÓN EN LA JAMBA
a: ANCHO NECESARIO POR ANCLAJE DE LA ARMADURA

SOLUCIÓN CON ARMADURA

e: EXCENTRICIDAD DE CARGA EN EL TIRANTE

SOLUCIÓN CON TIRANTE
(con entrega insuficiente o huecos corric



b: ANCHO NECESARIO POR COMPRESIÓN EN LA JAMBA
a + c: ANCHO NECESARIO POR ENTREGA DEL CARGADERO

SOLUCIÓN CON CARGADERO

b: ANCHO INSUFICIENTE

SOLUCIÓN CON SOPORTE
(con entrega insuficiente)

según se sustente en el forjado inferior o se cuelgue del forjado superior, respectivamente. Si los huecos son corridos en horizontal, o tienen configuración en esquina, la presencia del poste auxiliar es imprescindible.

Los esfuerzos del poste que sostiene el dintel son de compresión o tracción, según se trate de soporte o tirante, respectivamente, aunque la solicitación que condiciona su dimensionado en la mayoría de los casos es la flexión, razón por la cual esta función no puede ser encomendada a redondos o tirantillas. En los huecos puntuales que carecen del contrafuerte necesario, el empuje no contrarrestado supone flexión del poste en el plano del muro. En las situaciones en las que la sustentación de la fábrica en el cargadero se produce de forma asimétrica, el poste debe resistir la flexión que corresponde a la excentricidad de la carga, en el plano perpendicular al muro, con objeto de evitar la torsión del cargadero. Si el poste funciona como soporte, los esfuerzos de segundo orden debidos al pandeo suponen flexión del poste en todos los casos.

Como criterio general, si el machón entre dos huecos tiene una longitud inferior a 0,30 m, en ningún caso se le puede asignar un papel estructural, debiendo calcularse el dintel para cubrir ambos huecos, prescindiendo del machón. De la misma manera, si la distancia en horizontal de un hueco a la esquina del edificio es inferior a 0,50 m, la descarga no se puede hacer por el propio elemento de fábrica, debiendo disponerse un perfil metálico auxiliar con resistencia a flexión (puede ser un tubo o similar).

Si se utilizan elementos específicos, de un material diferente a la fábrica, para resolver los dinteles de huecos, como es el caso de los cargaderos, es fundamental conseguir suficiente ancho de entrega para asegurar un perfecto reparto de cargas y liberar a las jambas de una perjudicial concentración de tensiones. Como criterio general, la longitud de entrega de perfiles en la fábrica no debe ser menor que el canto del perfil y, en ningún caso, debe ser inferior a 12 cm.

Criterios específicos en zonas sísmicas

Las limitaciones geométricas relativas a las longitudes de entrepaños y proximidad de los huecos a las esquinas son más restrictivas en edificios situados en regiones sísmicas.

En zonas con aceleración sísmica de cálculo de valores por encima de 0,12·g no conviene disponer distancias menores de 0,60 m entre huecos consecutivos, ni de 0,80 m entre un hueco y una esquina, a no ser que se resuelvan con una estructura específica auxiliar de montantes y dinteles.

Si el cerramiento tiene soportal en planta baja, y éste se resuelve con pilastras o pilares intercalados de fábrica, su dimensión debe ser como mínimo de 0,45 m de lado.

Un criterio de buen diseño estructural en zonas sísmicas supone distribuir los huecos de fachada con la mayor uniformidad posible, evitando cambios bruscos de tensión en zonas contiguas de los paños. Si dos paños colindantes tienen una composición de huecos muy diferente, por ejemplo, una zona de huecos corridos junto a un paño ciego, es aconsejable disponer una junta de movimiento entre ambos. También es aconsejable que la traza de los huecos coincida en plantas sucesivas, en la medida de lo posible.

En zonas con sismicidad muy elevada es un buen criterio, aunque no obligatorio, que los cerramientos tengan un espesor mínimo de 0,14 m; y, en los casos resueltos con anclajes, conviene disminuir el intervalo entre ellos, sin sobrepasar la distancia de 0,40 m.

Si se practican rozas verticales, éstas se deben separar, como mínimo, una distancia de 2,00 m, y su profundidad no debe ser mayor que la quinta parte del espesor del muro.

3.2 Criterios de proyecto

El análisis de los elementos de fábrica y las soluciones constructivas adecuadas para conseguir las correspondientes prestaciones, tanto desde el punto de vista estructural como funcional, son mucho más sencillos si se tienen en cuenta las características propias del material desde la fase del proyecto.

Las principales características que determinan el comportamiento de los muros de fábrica son de índole geométrica. Además de la geometría del propio muro, es decir, de la relación entre sus tres dimensiones, es importante considerar en el proyecto la geometría de las propias piezas y las posibles formas de organizarlas, así como los criterios para componer los distintos elementos de fábrica consigo mismos y con el resto de los elementos del edificio.

En apartados sucesivos se indican los criterios generales que tienen especial incidencia en el proyecto de ejecución cuando se utilizan elementos de fábrica de ladrillo cara vista.

3.2.1 Modulación

Las construcciones de fábrica, así como cada uno de los elementos que las constituyen, se deben organizar de acuerdo con las dimensiones modulares de los ladrillos[8]. Las dimensiones modulares constituyen una retícula a la que se deben ajustar los planos medios de las juntas de una fábrica. Las longitudes y alturas de muros y machones, deben ser múltiplos de la longitud y altura modular del ladrillo, respectivamente.

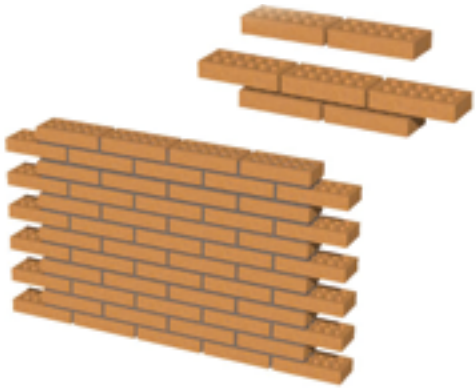
En fábricas de ladrillo cara vista, las longitudes y alturas reales de los huecos deben ser iguales a las longitudes y alturas modulares más el espesor de una junta. Las longitudes reales de muros, machones y entrepaños deben ser iguales a las longitudes modulares menos el espesor de una junta.

El espesor de las juntas (llagas y tendeles) influye decisivamente, no sólo en la modulación, sino en el comportamiento mecánico de la fábrica. El espesor de la llaga viene forzado por la modulación de las piezas. El espesor de los tendeles admite una pequeña horquilla de valores para adaptar la altura total del muro a un número entero de hiladas. A este respecto, el DB SE-F indica en el apartado 7.1.5 *"Detalle de aparejos de fábrica"* que, para poder emplear los valores y ecuaciones relativos a la resistencia de las fábricas, el espesor de los tendeles y de las llagas de mortero ordinario o ligero se debe mantener en valores comprendidos entre 8 mm y 15 mm, y el de tendeles y llagas de mortero de junta delgada, en valores comprendidos entre 1 mm y 3 mm.

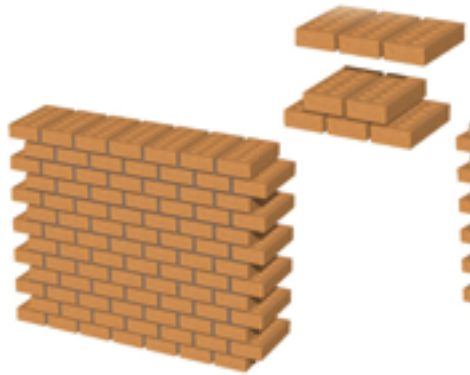
3.2.2 Aparejo

Se define *aparejo* como la ley de traba que rige la disposición en que se deben colocar los ladrillos de un muro para organizar su unidad constructiva.

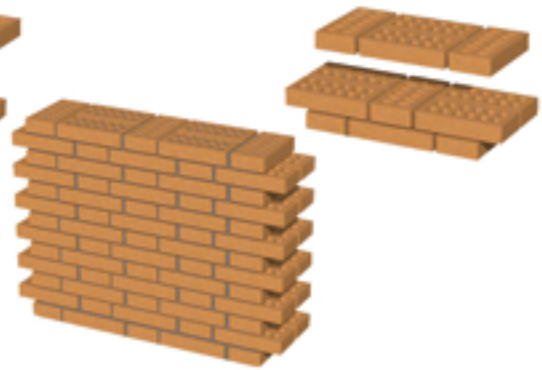
El aparejo constituye la regla básica para la construcción de fábricas. En fábricas con ladrillos cara vista el tipo de aparejo empleado, además, forma parte esencial del aspecto y caracte-



Aparejo a Sogas



Aparejo a Tizones



Aparejo a Sogas y Tizones

rísticas del muro y determina, desde las dimensiones del elemento, hasta los encuentros y los enjarjes, de manera que el muro constituya una unidad homogénea en toda su altura.

La ley de traba supone fundamentalmente solapar las piezas de hiladas consecutivas para que el muro se comporte como un elemento estructural único. El DB SE-F, en el apartado 7.1.4 *"Traba de la fábrica"* fija con carácter general el solape mínimo en el menor de los siguientes valores:

- 0,4 veces el grueso de la pieza
- 40 mm

En las esquinas o encuentros el solape de las piezas no debe ser menor que su tizón; sin embargo, en el resto del muro se pueden emplear piezas cortadas para conseguir el solape preciso.

El diseño permite numerosas combinaciones, siempre y cuando todas las piezas queden trabadas en una o más direcciones y en todo su espesor.

Tipos de aparejo de fábricas de ladrillo

La ley de traba, aplicada al caso particular de las fábricas de ladrillo, se traduce en dos reglas fundamentales:

- Se puede adoptar cualquier tipo de aparejo de llagas encontradas pero utilizando siempre piezas no inferiores a ½ ladrillo.
- Los solapes no deben ser menores de ¼ de la soga menos una junta.

No siempre es posible cumplir las leyes de traba correctas, sobre todo en las esquinas. También existen situaciones en las que, por motivos estéticos, los ladrillos se colocan con las llagas alineadas, es decir, sin aparejar. En estos casos se puede restituir la falta de traba entre las piezas incorporando armadura de tendel.

El espesor del muro puede ser de uno o más tizones. Habitualmente, al muro de espesor igual a un tizón se le denomina *muro de ½ pie*; y al muro de espesor igual a una soga (dos tizones más una junta) se le denomina *muro de 1 pie*. Los posibles aparejos se pueden agrupar en tres tipos fundamentales, según el espesor total del muro que se desee obtener:

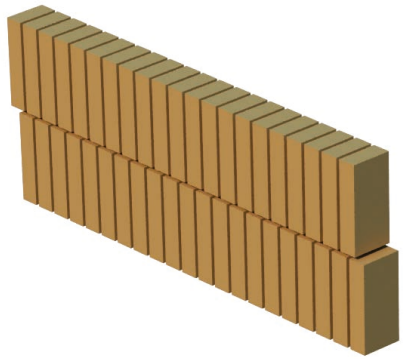
- Aparejo a sogas: la pieza se apoya sobre su tabla y la testa es normal al plano del muro, resultando la dimensión de soga paralela al mismo. El espesor del muro resultante es de ½ pie (el tizón) y constituye el tipo de aparejo utilizado con mayor frecuencia en la construcción de cerramientos de fachada de ladrillo cara vista.
- Aparejo a tizones: también llamado *a la española*. La pieza está apoyada sobre su tabla y la testa es paralela al plano del muro, resultando la dimensión del tizón paralela al mismo. El espesor del muro resultante es de 1 pie (la soga). Su campo de aplicación fundamental es la construcción de muros de carga, generalmente con ladrillo común para revestir.
- Aparejo a sogas y tizones: las piezas se van combinando a soga y tizón de diversas maneras, bien en hiladas alternas (aparejos inglés y belga) o en la misma hilada (aparejos flamenco y holandés). El espesor del muro resultante es de 1 pie (la soga) y se suele utilizar en la construcción de fachadas de ladrillo cara vista cuando al muro es muy esbelto o debe cumplir, además, una función portante. Su traba es mejor que la correspondiente al aparejo a tizones, pero su ejecución es más complicada y requiere mano de obra experimentada.

Se citan aquí, para completar las posibilidades de aparejo con piezas de ladrillo, otros tipos utilizados habitualmente, aunque no en la construcción de cerramientos de fachada ni en muros que requieran alguna prestación de tipo mecánico.

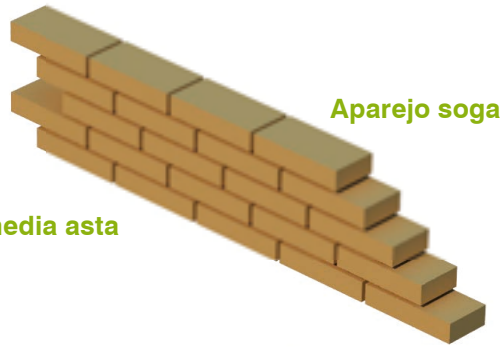
- Aparejo a panderete: la pieza se apoya en el canto y la tabla es paralela al plano del muro. El espesor del muro es el grueso de la pieza (la menor dimensión) por lo que no está preparado para resistir cargas exteriores, excepto su propio peso. Se emplea exclusivamente para la ejecución de tabiques.
- Aparejo palomero: es un aparejo a panderete, pero dejando huecos entre las piezas horizontales. Se emplea en la construcción de tabiques provisionales que deben permitir la ventilación de la estancia, y para conformar la pendiente en faldones de cubierta.

8. Se entiende como *dimensión modular* de una pieza a la dimensión teórica de fabricación más el espesor de una junta.

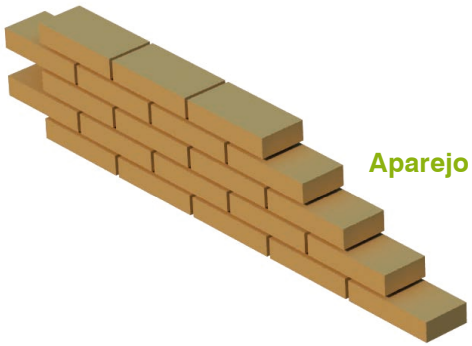
Aparejo de muros de 1/2 pie



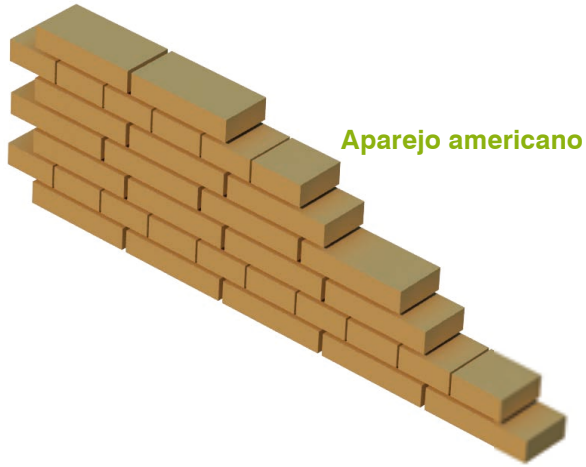
Aparejo a sardinel



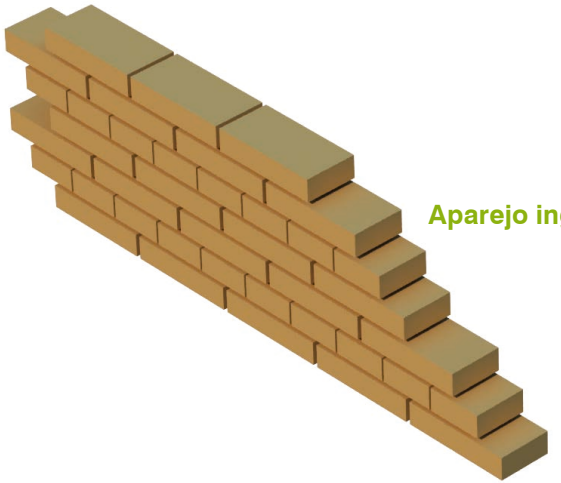
Aparejo soga a tercio de asta



Aparejo soga a media asta

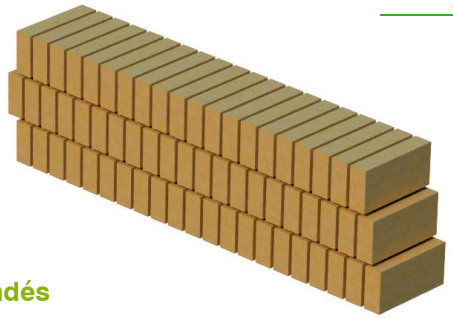


Aparejo americano



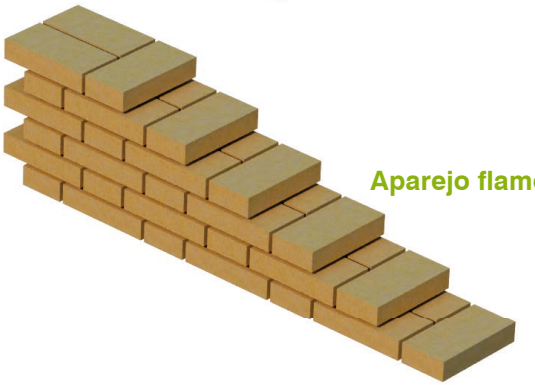
Aparejo inglés antiguo

Aparejo de muros de 1 pie

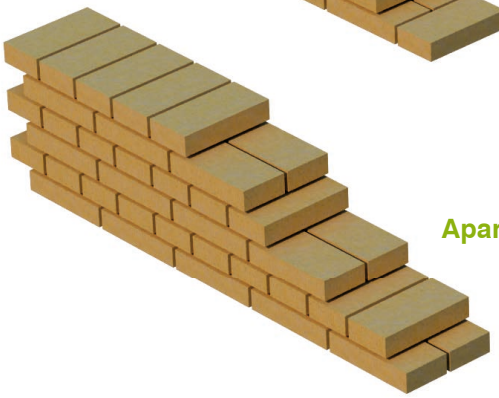


Aparejo a sardinel

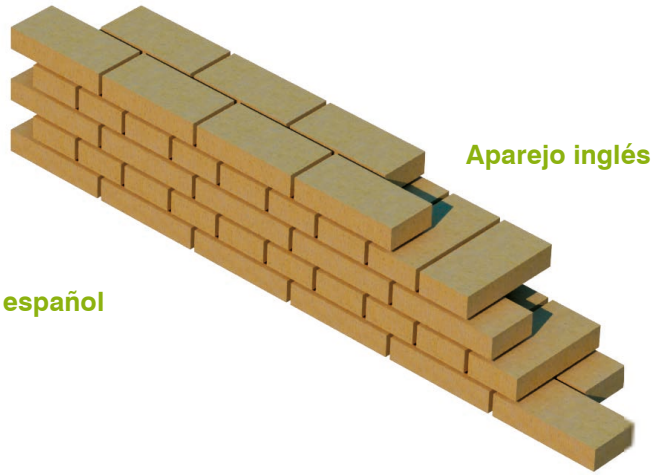
Aparejo holandés



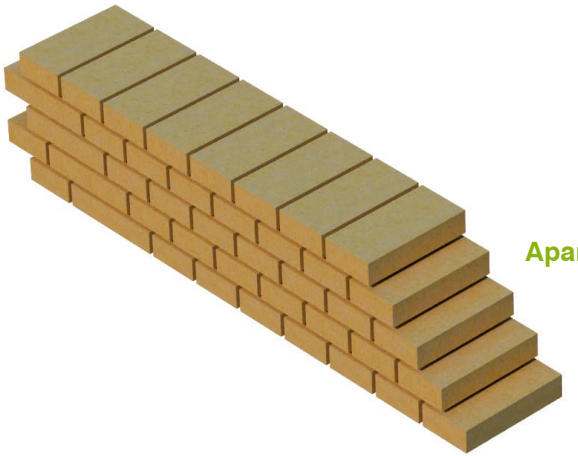
Aparejo flamenco o gótico



Aparejo belga



Aparejo inglés



Aparejo español

Aparejo a panderete y sardinel

Aparejo a palomero

Aparejo a panderete

3.2.3 Tipos de muros

Con relación a los diferentes procedimientos que se pueden utilizar para conseguir una trabazón estable de las piezas que constituyen los muros, estos se clasifican en los siguientes tipos:

Muro aparejado de una hoja

Es el realizado con un solo tipo de piezas, con espesor igual a uno o más tizones.

En este tipo de muro el aparejo debe ser tal que todas las piezas queden trabadas en una o más direcciones en todo su espesor (sin cámara ni sutura continua).

Muro verdugado

Es un muro aparejado de una hoja, según las condiciones del apartado anterior, y que alterna *"témpanos"* con *"verdugadas"* o hileras de ladrillo más resistente.

Las verdugadas tienen la misión de dar más resistencia al muro. La altura de cada verdugada debe ser no menor de dos hiladas; y la altura del témpano, menor que siete veces la altura de la verdugada.

Muro doblado

Está formado por dos hojas paralelas, con una sutura continua entre ellas, de ancho no mayor de 25 mm. Las dos hojas deben ir enlazadas eficazmente mediante anclajes capaces de transmitir las acciones laterales entre ellas, con un área mínima de 300 mm^2/m^2 de muro, dispuestos uniformemente en número no menor de dos unidades por m^2 de muro. La armadura de tendel también puede actuar como elemento de conexión entre las hojas siempre que cumpla los siguientes requisitos de cuantía mínima definidos en el DB SE-F, apartado 7.5.1 *"Sección mínima de la armadura"*:

- Área de armadura no menor del 0,03% de la sección vertical del muro.
- Separación vertical entre hiladas armadas no mayor de 600 mm.

Los elementos de enlace deben ser resistentes a la corrosión para el tipo de exposición correspondiente a la ubicación del muro.

Muro apilastrado

Es un muro con resalto de pilastras ejecutadas simultáneamente y aparejándolas con él.

Esta solución se suele utilizar habitualmente cuando se prevén cargas importantes perpendiculares al muro. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las pilastras, aunque proporcionan al muro una mayor resistencia ante acciones verticales, para que produzcan una mejora considerable en la resistencia ante acciones horizontales, deben estar cargadas.

Muro capuchino

Es un muro de dos hojas de piezas iguales o diferentes, normalmente separadas por una cámara intermedia, de ancho no superior a 110 mm, vacía o llena de un material no resistente.

Es habitual que en los muros capuchinos una de las dos hojas tenga función

portante. Esta función, en la mayoría de los casos, corresponde a la hoja interior. La hoja exterior recibe las acciones horizontales, que deben ser transmitidas a la hoja portante mediante anclajes o armaduras de tendel.

El número de anclajes o la cuantía de armadura de tendel que enlazan las dos hojas deben ser obtenidos mediante el cálculo de acuerdo con las acciones a que esté sometido el muro.

En cualquier caso, los anclajes o armadura tienen que ser resistentes a la corrosión para el tipo de exposición correspondiente a ubicación del muro.

Muro careado

Es el muro formado por dos tipos de piezas eficazmente trabadas entre sí de manera que trabajen solidariamente, de las cuales una pieza constituye la cara vista y la otra pieza constituye el trasdós.

Muro de revestimiento

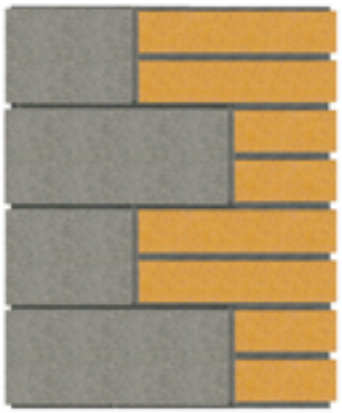
Es el muro que reviste exteriormente a otro muro o a un entramado sin estar trabado a ellos, por lo que no contribuye a la resistencia. Tanto su estabilidad como la transmisión de posibles acciones laterales entre ambos muros se suele resolver mediante anclajes que deben cumplir los mismos requisitos de protección indicados anteriormente.

Muros de una hoja (con sutura discontinua)

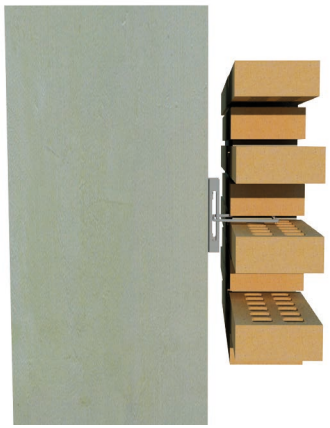
Muro doblado (con sutura continua)

Muro aplilastrado

Muro capuchino (con cámara intermedia)



Muro careado



Muro de revestimiento

3.2.4 Juntas verticales de movimiento

Las juntas verticales de movimiento son interrupciones en la continuidad de los paños de fábrica, cuya función es la de absorber deformaciones y evitar procesos patológicos producidos por la acumulación de tensión debida a una coacción impuesta al movimiento horizontal.

El objeto de la junta es parcelar el paño de fábrica para conseguir que las variaciones dimensionales posteriores a su ejecución sean compatibles con aspectos funcionales, como la estanquidad de las fachadas; con aspectos mecánicos, evitando los esfuerzos elevados que conllevan roturas de los elementos constructivos; o con aspectos estéticos, evitando la aparición de fisuras descontroladas o el desprendimiento del material de acabado.

En las fábricas de ladrillo cerámico, el factor fundamental que determina la necesidad de incorporar juntas verticales de movimiento es el fenómeno de expansión por humedad, que puede llegar a producir esfuerzos importantes por el aumento de volumen de los ladrillos con el paso del tiempo.

Otros factores que causan movimientos impuestos con el consiguiente riesgo de fisuración son la rigidez y la retracción de los morteros de cemento muy resistente y poco dúctil; y las variaciones dimensionales de origen térmico, que están directamente relacionadas con las condiciones de exposición de los paños, la orientación geográfica de los mismos y su textura y color[9].

La incorporación de juntas verticales de movimiento en el proyecto de las fábricas ha tenido lagunas en la normativa. Hasta la entrada en vigor del Código Técnico, en donde se suministran recomendaciones para las distancias máximas entre juntas en elementos de fábrica, la única norma que se refería a este aspecto era la Norma Básica de la Edificación FL-90, que sólo afectaba a muros de carga, no a cerramientos.

Tabla 3.5 Distancia entre juntas de movimiento de fábricas sustentadas de ladrillo cerámico

Fábrica de ladrillo cerámico (1)		
Retracción final (mm/m)	Expansión final por humedad (mm/m)	Distancia entre juntas (m)
≤ 0,15	≤ 0,15	30
≤ 0,20	≤ 0,30	20
≤ 0,20	≤ 0,50	15
≤ 0,20	≤ 0,75	12
≤ 0,20	≤ 1,00	8

(1) Se puede interpolar linealmente.
Fuente:"Código Técnico de la Edificación DB SE-F. Tabla 2.1".*

La NBE FL-90 prescribía la disposición de juntas verticales cada 40 m ó 50 m, en clima marítimo, según la resistencia del mortero; y cada 30 m ó 40 m, en clima continental. Estos valores, para los cerramientos de fachada, en algunos casos son excesivamente elevados.

Por ello, y con objeto de establecer los criterios para el proyecto de juntas de movimiento, es necesario diferenciar si los paños de fábrica tienen función portante y, por tanto, el movimiento horizontal está coaccionado por los forjados a los que sustenta; o se trata de paños cuya única función es de cerramiento.

En el primer caso, las separaciones entre las juntas de movimiento se deben establecer según los criterios que condicionan la distancia entre juntas estructurales, puesto que se deben situar, necesariamente, en continuación con las juntas previstas en los forjados a los que sustenta el muro.

En el segundo caso, el Eurocódigo 6 (UNE-ENV 1996-2:1998) *"Proyecto de estructuras de fábrica. Parte 2: Proyecto, selección de materiales y ejecución de fábricas"* en la tabla 2.2 indica, con carácter general, que la separación horizontal máxima recomendada entre juntas de movimiento es de 12 m para los muros de fábrica de ladrillo[10].

El DB SE-F afina bastante más en este aspecto. En el artículo 2.2 "*Juntas de movimiento"* establece las distancias máximas de paños correspondientes a *fábricas sustentadas* de diferentes materiales. En el caso de fábricas de material cerámico las longitudes máximas de los paños están condicionadas fundamentalmente por el índice de ex-

pansión final por humedad de las piezas, y pueden oscilar desde 8 m hasta 30 m. La tabla 3.5 resume los valores de distancias máximas recomendadas para fábricas de ladrillo.

Los valores de la tabla 3.5 tienen un carácter orientativo para casos generales, aunque son susceptibles de algunos matices.

Si el muro es de directriz curva se debe disminuir las distancias entre juntas verticales de movimiento, dependiendo de la curvatura del muro.

También es prudente reducir a la mitad la distancia de la primera junta al extremo arriostrado de un muro y en los petos de azoteas, sobre todo cuando la planta es quebrada.

La incorporación de armadura de tendel permite aumentar la distancia entre juntas, proporcionalmente a la cuantía dispuesta, y así lo reconoce el EC-6, aunque esta circunstancia no ha sido incorporada en el DB SE-F. Existe ya una larga experiencia en el empleo de fábrica armada, de la que se puede deducir que, con cuantías en torno a las mínimas establecidas por control de fisuración, la distancia entre juntas se puede aumentar hasta un 30% aproximadamente. Por ello, se recomienda el empleo de armadura de tendel en paños largos en los que, por exigencias de proyecto, se desea evitar los cortes en la fábrica que toda junta supone.

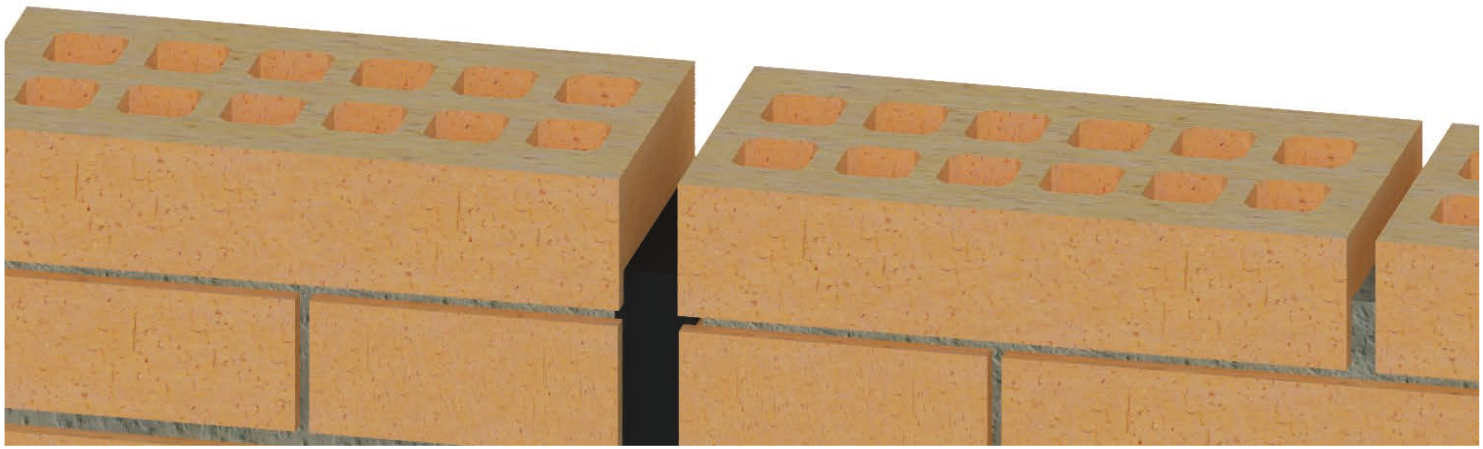
Otro recurso útil para conseguir aumentar ligeramente las distancias entre juntas consiste en el empleo de morteros bastardos, a los que se incorpora una parte de cal en la mezcla, debido a que producen fábricas menos propensas a fisuración por movimientos incompatibles.

En cualquier caso, además de fragmentar los paños largos a las distancias indicadas, es conveniente disponer juntas verticales de movimiento en las siguientes zonas:

- Próximas a las esquinas, si las longitudes de los paños que las conforman superan ligeramente los valores establecidos en la tabla 3.5.
- En paños en los que se producen pequeños quiebros de esquina en Z, con tramos de menos de 1 m de longitud. En esta situación la junta de movimiento evita la aparición de una fisura vertical debido al giro diferencial entre ambos paños.
- En el encuentro entre paños de diferente altura o diferente material.
- En prolongación de huecos verticales muy alargados.
- A lo largo de las líneas de cambio en el espesor de los muros.
- En las juntas estructurales del edificio.

9. Considerando un salto térmico entre 30°C y 70°C según las distintas zonas climáticas y las distintas orientaciones de fachada, la variación dimensional de las fábricas de ladrillo cerámico está comprendida entre 0,18 mm/m y 0,84 mm/m.

10. Aclara explícitamente que se refiere a muros exteriores no armados y no estructurales.



Desde el punto de vista de la estabilidad del muro, la junta genera una interrupción en la traba, lo que puede favorecer el movimiento de la fábrica en sentido perpendicular a su plano frente a acciones horizontales (por ejemplo, viento). En este sentido, es recomendable incorporar llaves de atado que permiten el movimiento en sentido longitudinal y traben la fábrica en sentido transversal, evitando la característica *"ceja"*.

Desde el punto de vista resistente, la junta supone una interrupción en la transmisión de esfuerzos, como si se tratase de dos muros independientes situados en prolongación. También por esta razón es recomendable incorporar llaves de atado que permitan el movimiento en sentido longitudinal y garanticen la continuidad de esfuerzos cortantes entre las dos partes del muro.

Las juntas de movimiento se pueden ejecutar rectas o endentadas, adaptándose al aparejo de la fábrica. En cualquier caso deben atravesar el espesor de la hoja y cualquier revestimiento que no sea suficientemente flexible para asumir la variación dimensional.

Dimensionado del ancho de junta

El ancho de la junta depende del movimiento previsto y del tipo de sellante. Este material debe tener una capacidad de comprimirse y recuperar su estado inicial en una horquilla de valores que oscila entre el 25% y el 50% de su espesor inicial.

La junta de movimiento se debe dimensionar para que, ante una dilatación, los paños que la conforman a ambos lados no lleguen a tocarse y, ante una contracción, no lleguen a despegarse[11]. Las variables que intervienen en el cálculo son, por una parte, la magnitud de la variación dimensional prevista para la longitud del paño y, por otra, el módulo de elasticidad del sellante.

En el caso de juntas destinadas a absorber las variaciones dimensionales de origen térmico, para determinar el ancho estricto de la junta vertical de movimiento se puede tomar como coeficiente de dilatación térmica de la fábrica de ladrillo el valor de $6 \cdot 10^{-6}$ m / (m·ºC). Para las separaciones de juntas indicadas en fábricas de material cerámico y con los sellantes habituales disponibles en el mercado, el ancho de las mismas, en general, puede estar comprendido entre 10 mm y 20 mm.[12]

En las fábricas de material cerámico se puede despreciar la deformación diferida por el fenómeno de fluencia.

En zonas sísmicas con aceleración de cálculo a_c mayor de 0,09·g, para atender a criterios de libre deformación, la anchura mínima de la junta está relacionada con la altura total del edificio. La regla es la siguiente:

$$e_{mín} \geq 4 \cdot (a_c / g) \cdot H$$

siendo:

- $e_{mín} \rightarrow$ ancho mínimo de junta, en cm
- $a_c / g \rightarrow$ razón entre la aceleración de cálculo y la aceleración de la gravedad
- $H \rightarrow$ altura del edificio en m
- $e \rightarrow$ anchura de la junta en cm

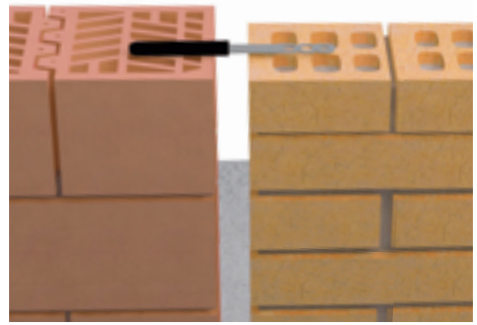
3.2.5 Fábricas de diferentes materiales

En obras de fábrica es conveniente que todos los muros que forman parte de una unidad constructiva sean del mismo material. Sin embargo, se pueden combinar diferentes materiales, siempre que los valores de resistencia a compresión y módulo de deformación de las respectivas fábricas sean similares, y la traba o unión se ejecute correctamente.

El cambio de material debe ser considerado en el proyecto. La compatibilidad modular necesaria para una buena traba entre los diferentes muros debe ser objeto de un detalle gráfico específico.

Si los muros de diferente material están situados en prolongación, la unión entre ellos se debe resolver interponiendo una junta vertical de movimiento.

Si los muros están situados en paralelo o acomete uno contra otro en perpendicular, la unión se puede hacer, bien mediante anclajes, o bien mediante armaduras de tendel situadas en las hiladas coincidentes. En cualquier caso, es conveniente que los muros que se enlazan se levanten simultáneamente.



3.2.6 Fábrica armada

Los orígenes de la fábrica armada se remontan al inicio de la construcción de elementos estructurales tabicados, en los que se dotaba de un ligero armado a los tableros de fábrica que conformaban la estructura fundamental. En general, se trataba de soluciones abovedadas, en las que la armadura tenía la función de absorber las tracciones no deseadas derivadas de empujes horizontales.

En la actualidad existe una tendencia, cada vez más generalizada, a utilizar el armado de las fábricas para mejorar su comportamiento mecánico, especialmente en los aspectos relacionados con la durabilidad, evitando o restringiendo al máximo el riesgo de fisuración.

Este armado se consigue, con carácter general, disponiendo armaduras prefabricas en los tendeles, constituyendo así un material compuesto, con comportamiento dúctil frente a acciones horizontales de sismo o viento y frente a concentraciones locales de tensión por diversas causas.

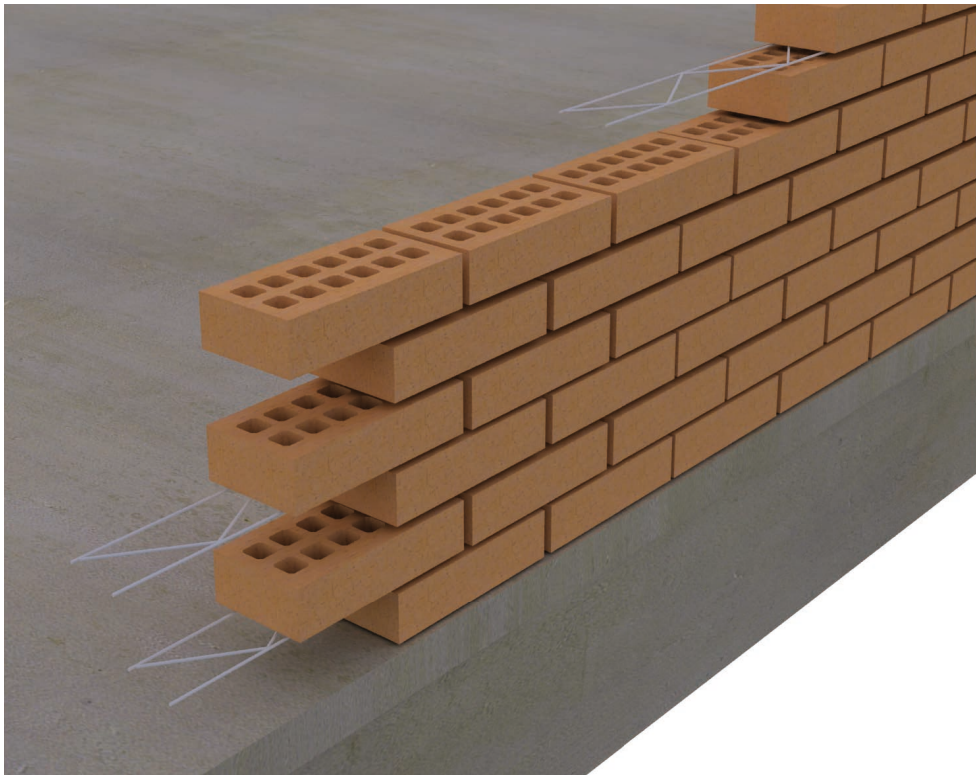
La *fábrica armada* es a la fábrica tradicional lo que el *hormigón armado* es al hormigón en masa. Las armaduras embutidas en la masa del muro, no sólo aumentan sus prestaciones resistentes y funcionales, sino que modifican la naturaleza del material. La trascendencia que tiene en la fase de proyecto la decisión de utilizar fábrica armada es importante. En primer lugar, porque las armaduras son objeto de dimensionado en función del papel estructural que se les asigne y, en segundo lugar, porque los modelos de comportamiento y análisis utilizados para los elementos de fábrica armada son diferentes a los modelos utilizados para el cálculo de la fábrica tradicional.

Conviene destacar aquí las diferencias fundamentales que existen entre la *fábrica armada* y la *fábrica confinada* entre elementos armados.

La fábrica armada es un material compuesto, con propiedades físicas y mecánicas específicas; por el contrario, la fábrica confinada es fábrica tradicional yuxtapuesta a elementos estructurales, que requiere la consideración de los efectos derivados de la consiguiente incompatibilidad entre elementos de naturaleza diferente.

11. El proceso patológico que se genera por una dimensión insuficiente en el ancho de junta, o por un inadecuado módulo de elasticidad del sellante, es la aparición de una segunda junta paralela, en forma de grieta.

12. Sin embargo, el cálculo posee una variable más que viene determinada por la temperatura de la fábrica en el momento de construcción de la junta. Además, la deformación porcentual del sellante o, lo que es lo mismo, la variación de la anchura de la junta de movimiento construida, en tanto por ciento, depende de la *anchura nominal* o anchura de construcción en un instante dado.



Cuando se trata de fábrica armada, las armaduras se alojan en el interior del muro sin perturbar su organización ni modificar el aparejo.

Las armaduras se embuten en el mismo mortero utilizado para la ligazón de las piezas, y la trasmisión de esfuerzos se realiza directamente por adherencia.

Cuando se trata de fábrica confinada, las armaduras se suelen alojar en elementos de hormigón, y la transmisión de esfuerzos entre la fábrica y el elemento armado se realiza por confinamiento, lo cual requiere la presencia de esfuerzos adicionales de compresión que no siempre se pueden garantizar y, en determinados casos, pueden producir efectos secundarios, como riesgo de pandeo o acumulación de carga.

La fábrica armada tiene perfectamente definido el modelo de respuesta estructural, para poder utilizarlo en el proyecto con todas las garantías de un perfecto comportamiento.

La mejora del comportamiento que supone el armado de la fábrica es importante, no sólo para incrementar sus prestaciones mecánicas, sino para dotar a los muros, especialmente a los de cerramiento, de los requisitos de durabilidad que están ligados con factores de índole estética o de estanquidad, entre otros.

Las armaduras embutidas en los tendeles de la fábrica mejoran sustancialmente su comportamiento ante la acción de factores que son difíciles de cuantificar, tales como:

- La retracción y fluencia no tanto de la propia fábrica, sino de la estructura que la sustenta.

- Las variaciones dimensionales de carácter térmico e higrométrico, entre las que hay que resaltar la expansión por humedad de los materiales cerámicos.

- Las deformaciones excesivas de vigas planas y asientos diferenciales.

- Las deformaciones irregulares, de difícil cuantificación, debidas a la falta de homogeneidad o continuidad geométrica de los paños de fachada, sobre todo cuando alternan entrantes con salientes en voladizo, o coexisten huecos muy dispares con tramos ciegos de un mismo paño.

En función del papel estructural y de la naturaleza de los principales esfuerzos que deba resistir el elemento, las armaduras se pueden colocar en el interior del muro en diferentes posiciones y orientación.

El procedimiento más habitual de armar las fábricas consiste en disponer armaduras prefabricas alojadas en los tendeles en posición horizontal. Ello se debe a la gran facilidad de montaje, puesto que es posible organizar el armado por hiladas, a la vez que se ejecuta el muro.

En general, es conveniente en todo tipo de fábricas la disposición de un armado homogéneo en los tendeles, con una cuantía mínima de 0,03% de la sección del muro y, en cualquier caso, se recomienda la disposición de, al menos, un armado puntual en las zonas más propensas a la fisuración, entre las que cabe señalar las siguientes:

- En el arranque de la fábrica, para evitar la fisuración producida por posibles asientos diferenciales o deformaciones excesivas de los elementos estructurales sobre los que se sustenta.

- En las discontinuidades geométricas del muro, tales como el cambio de sección, especialmente en los encuentros con soportes en muros de cerramiento.

- En los encuentros entre muros cuando éstos no se resuelven trabando las piezas.

- En las discontinuidades mecánicas del muro, tales como la zona circundante a los huecos, en las que se producen concentraciones de carga o tensiones locales de tracción.

Si se asigna una función estructural a la fábrica armada, tanto el número de tendeles armados como la cuantía de armadura dispuesta, se debe determinar mediante el análisis, en función de la solicitación del elemento. El cálculo pormenorizado se detalla en la sección de *Requisitos*.

3.3. Criterios de suministro, recepción y acopio de materiales

Las condiciones de suministro y recepción de los materiales para la ejecución de fábricas están reguladas por el DB SE-F y las Normas UNE correspondientes a cada uno de ellos, donde se establecen las prescripciones técnicas particulares, métodos de ensayos y criterios generales para la aceptación o rechazo de las partidas a su llegada a obra. Algunas de estas normas se han citado en la sección correspondiente a *Componentes*.

3.3.1 Suministro y recepción de los ladrillos cerámicos

Es recomendable que, antes del suministro a obra, los ladrillos queden depositados en fábrica, con las debidas condiciones de humedad y temperatura, al menos durante el período en que se desarrolla el fenómeno de expansión por humedad en su mayor porcentaje (como mínimo, un tiempo entre 15 y 30 días).

Los ladrillos se deben suministrar a obra perfectamente empaquetados en embalajes no herméticos para permitir la absorción de la humedad del ambiente, y paletizados para facilitar su descarga por medios mecánicos[13]. Los embalajes deben ser suficientemente estables y resistentes, y los palés deben ser cargados de manera que no vuelque o caiga el material; si son frágiles o están en mal estado, al utilizarlos en la obra para el movimiento del material pueden originar residuos e incluso constituir un peligro potencial para la seguridad de los trabajadores.

Cuando se trate de piezas especiales, se deben extremar las medidas de protección, almacenaje y manipulación, puesto que resulta complicado reemplazarlas en caso de deterioro, además de tener un coste mayor que los ladrillos normales.

En obra se deben identificar los ladrillos suministrados por el fabricante. Los datos necesarios para ello, que deben estar reflejados en el albarán o en el empaquetado, son los siguientes:

- el nombre del fabricante y, en su caso, la marca comercial
- el tipo (macizo, perforado o hueco)
- la clase (común o visto)
- la resistencia a compresión (expresada en N/mm^2)
- las dimensiones nominales en milímetros de soga, tizón y grueso
- el sello de control de calidad de la entidad encargada (marca AENOR) si lo tiene concedido y el marcado CE.

La recepción debe ser realizada por la dirección facultativa o persona debidamente acreditada en quien delegue, que podrá solicitar la presentación de certificados de ensayo, realizados por un laboratorio debidamente acreditado.

A la llegada del material a obra, la dirección facultativa o persona en quien delegue debe realizar un control previo inspeccionando el material y, si procede, tomando las muestras para realizar los ensayos de control *(ver Criterios de control)*. Cuando los ladrillos suministrados estén amparados por la marca AENOR o el marcado CE, se puede simplificar el procedimiento de recepción, prescindiendo de los ensayos de control. Cualquier anomalía observada en los ladrillos suministrados debe ser comunicada al fabricante siempre antes de su puesta en obra.

Es recomendable disponer en obra de una muestra de varios ladrillos representativa de la gama de tonalidades, que sirve para comprobar que la partida se encuentra dentro de dicha gama. Las piezas patrón y las que se utilicen para la comparación de color deben permanecer limpias y secas en todo momento.

Es conveniente que la descarga se realice directamente en las plantas del edificio, situando los palés cerca de los soportes de la estructura, evitando la colocación de éstos en el centro de los vanos de vigas o forjados, con el fin de no someter a grandes cargas a estos elementos. Debe ser posible localizar e identificar las diversas partidas en la obra. Siempre que se pueda, el traslado se debe realizar con medios mecánicos.

Los ladrillos no deben estar en contacto con el terreno, ya que pueden absorber humedad o sales solubles provocando en la posterior puesta en obra la aparición de manchas y eflorescencias. Se deben apilar sobre superficies limpias,

13. La descarga de ladrillos por vuelco de la caja del vehículo de transporte produce un gran número de piezas rechazables por rotura o desconchado.

planas, horizontales, y en lugares protegidos donde no se produzcan aportes de agua ni se realicen otros trabajos de la obra que los puedan manchar o deteriorar. En invierno se debe tener especial cuidado para proteger los ladrillos de las heladas.

Cuando se utilicen ladrillos de baja succión, klínker o hidrofugados, se debe quitar el plástico del palé dos días antes de su puesta en obra, ya que es fundamental colocarlos completamente secos.

3.3.2 Suministro y recepción del cemento

La recepción de cementos está regulada por la Instrucción RC-08. El cemento para albañilería debe disponer del *Certificado CE de Conformidad* expedido por un organismo notificado y de la *Declaración de Conformidad CE* elaborada por el propio fabricante. Los cementos de características específicas, entre ellos el cemento blanco, mientras no dispongan de las normas armonizadas correspondientes, están sujetos a lo dispuesto en el Real Decreto 1313/1998 de 28 de octubre y, en consecuencia, deben disponer del *Certificado de Conformidad* con los *Requisitos Reglamentarios*.

La recepción hay que llevarla a cabo en el lugar de suministro del cemento, ya sea en la central de mortero preparado, en obra o en cualquier otra instalación en la cual se vaya a emplear el cemento para la fabricación de otros tipos de materiales de construcción, o en la que se vaya a efectuar con el mortero cualquier operación distinta a su almacenamiento o transporte. Si el receptor retirase el cemento de la fábrica o instalaciones del suministrador, la recepción y consiguiente toma de muestras se debe hacer en dicho lugar y en ese momento.

Los cementos se pueden suministrar en sacos adecuados o a granel, mediante instalaciones especiales de transporte, cubas en buen estado o sistemas similares con el hermetismo y seguridad necesarios para garantizar su perfecta conservación, sin que sufra alteración su contenido y preservando el medio ambiente.

La identificación de los cementos suministrados en obra se realiza mediante el albarán y el etiquetado, que deben contener, al menos, los siguientes datos:

- Hoja de suministro o albarán:
  - Número de referencia del pedido.
  - Nombre y dirección del comprador y punto de destino del cemento.
  - Identificación del fabricante y de la empresa de suministro.
  - Designación normalizada del cemento suministrado conforme a la Instrucción RC-08.
  - Cantidad que se suministra.
  - Referencia a los datos del etiquetado correspondiente al marcado CE o contraseña del Certificado de Conformidad con los Requisitos Reglamentarios.
  - Fecha de suministro.
  - Identificación del vehículo que lo transporta (matrícula).
- Etiquetado o conjunto de información que debe ir impresa sobre el envase o, en su caso, en la documentación que acompaña al cemento:
  - El marcado CE propiamente dicho, es decir, el símbolo o pictograma del marcado CE y el número de identificación del organismo certificador.
  - Nombre o marca distintiva de identificación y dirección registrada del fabricante.
  - Número del Certificado CE de Conformidad.
  - Las dos últimas cifras del año en que el fabricante puso el marcado CE.
  - Indicaciones que permitan identificar el producto, así como sus características y prestaciones declaradas, atendiendo a sus especificaciones técnicas.
  - Referencia a la norma armonizada pertinente o contraseña del Certificado de Conformidad con los Requisitos Reglamentarios.
  - Designación normalizada del cemento, indicando el tipo, subtipo (según los componentes principales) y clase resistente.
  - En su caso, información adicional referente al contenido de cloruros, al límite superior de pérdida por calcinación de ceniza volante y/o al aditivo empleado.
  - Fecha de fabricación y de envasado, indicando semana y año.

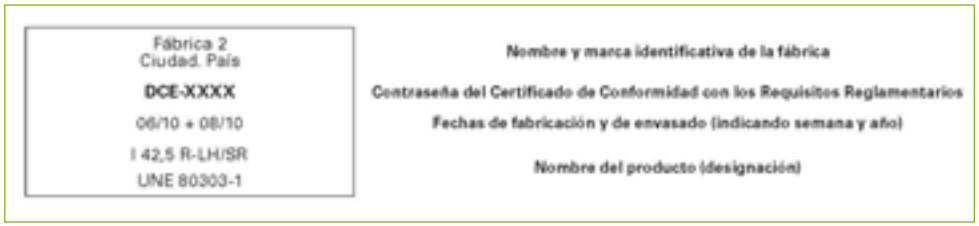
- Condiciones específicas aplicables a la manipulación y utilización del producto.

El almacenamiento de los cementos a granel, una vez aceptada la remesa, se debe hacer en silos estancos evitando, en particular, su contaminación con otros cementos de tipo y/o clase de resistencia distintos. Los silos deben estar protegidos de la humedad y tener un sistema o mecanismo de apertura para la carga en condiciones adecuadas desde los vehículos de transporte, sin riesgo de alteración del cemento. Los diferentes tipos de conglomerantes se deben almacenar por separado para evitar su mezcla.

El almacenamiento de los cementos envasados, una vez aceptada la remesa, se debe realizar sobre palés o plataformas similares, en locales cubiertos, ventilados y protegidos de las lluvias y de la exposición directa del sol. Las instalaciones de almacenamiento, carga y descarga del cemento deben disponer de los dispositivos adecuados para minimizar las emisiones de polvo a la atmósfera.

Los componentes hidráulicos de los conglomerantes son muy sensibles a la humedad. Aunque las condiciones de conservación sean buenas, como norma general, el almacenamiento del cemento en obra no debe ser muy prolongado para evitar su meteorización. En particular, el cemento de clase de resistencia 32,5 no debe estar almacenado en obra un periodo de tiempo superior a tres meses[14].

14. El tiempo máximo de almacenamiento de los cementos de clases superiores es menor. Los cementos de clase resistente 42,5 y 52,5 no deben estar almacenados más de dos meses o un mes, respectivamente. No obstante, cuando el período de almacenamiento de un cemento haya sido superior a 30 días se debe realizar el ensayo de fraguado y el de resistencia mecánica a 3 y 7 días, sobre una muestra representativa del mismo. Si los resultados no cumplen las condiciones de la *Instrucción RC-08* se pueden hacer ensayos para determinar la resistencia del mortero a 28 días, siendo estos resultados decisivos para aceptar o rechazar dicho cemento.



"Ejemplo de etiquetado de cemento sujeto al Real Decreto 1313/1988"

"Ejemplo de etiquetado de cemento sujeto al marcado CE"

3.3.3 Suministro y recepción de la arena

Cada remesa de arena que llegue a obra se debe descargar en una zona de suelo seco, convenientemente preparada para este fin, en la que se pueda conservar limpia.

Las diferentes arenas hay que almacenarlas por separado, según su tipo, origen y granulometría, en lugares protegidos de la contaminación del ambiente exterior y del terreno. Si es preciso, es recomendable cubrir dichos lugares para evitar el exceso de temperatura, humedad o viento.

Los áridos especiales se deben disponer en suficiente cantidad, de una sola vez si es posible, para asegurar la homogeneidad del color en toda la obra.

3.3.4 Suministro y recepción del mortero

Si se utiliza mortero industrial, cada suministro debe ir acompañado del correspondiente albarán; y se debe verificar que las características recogidas en el proyecto y, especialmente, la dosificación y la resistencia a compresión que figuran en el envase corresponden a las solicitadas.

Los datos que deben figurar en la etiqueta, tanto para los morteros de albañilería diseñados como para los morteros prescritos[15], además de la identificación del organismo notificado y del fabricante, son los relacionados con el uso al que está destinado el producto, con indicación expresa de los requisitos específicos (por ejemplo, requisitos estructurales), y los valores de los siguientes parámetros, determinados según la norma UNE-EN 998-2:2002 *"Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería"*, con los que el fabricante se compromete:

- Resistencia a compresión (categoría M) (N/mm^2)
- Resistencia inicial al cizallamiento (N/mm^2)
- Contenido en cloruros, sólo en caso de fábrica armada (%)
- Reacción frente al fuego (clase)
- Absorción de agua, c (kg / (m^2·min^{0,5}))
- Permeabilidad al vapor de agua, μ
- Conductividad térmica, λ (W / (m·K))
- Durabilidad[16] (ciclos hielo – deshielo)

Además, en el caso de los morteros prescritos, en la etiqueta debe constar la proporción de los componentes en volumen (cemento, cal y áridos).

Los suelos o superficies sobre las que se depositen los materiales que componen los morteros o la premezcla de cal y arena de los morteros preparados in situ, deben estar limpios, secos y libres de sustancias que puedan alterar las características o composición final de la mezcla. En tiempo frío se debe prever un ambiente protegido para asegurar que los morteros frescos no se hielen.

Estas mismas precauciones se deben tener en cuenta con los morteros industriales que se sirven en gran cantidad y quedan expuestos a la intemperie.

Los morteros secos se deben acopiar de manera que se permita su empleo de acuerdo al orden de recepción. Debido a que se distribuyen en bolsas, queda garantizada la protección de la masa a mezclar. No obstante, las bolsas deben estar protegidas del agua y del viento, ya que si se encuentran expuestos a la acción de este último, la mezcla puede ver reducido el número de finos que la componen, deteriorando sus características iniciales.

En todos los casos se deben vigilar y proteger los espacios dedicados al almacenamiento del mortero. La posible suciedad en el acopio de los materiales componentes, receptáculos de almacenaje, exposición al agua de lluvia, etc., puede influir en el aspecto final de las juntas de mortero, que devienen en cambios estéticos en los paños de fachada.

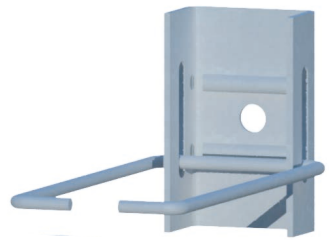
Lo ideal es producir el mortero que se va a consumir inmediatamente para evitar desperdicios o aprovechamientos lesivos.

3.3.5 Suministro y recepción de los elementos auxiliares

Los anclajes, llaves y armaduras de tendel deben estar claramente identificados. Es importante comprobar la documentación correspondiente al marcado CE de estos productos y la conformidad con las normas armonizadas correspondientes[17].

El almacenamiento hay que realizarlo en soportes bajo cubierta, separados del suelo, alejados del barro, aceite, grasa, pintura o trabajos de soldadura. Especialmente se debe evitar el riesgo de depósitos superficiales que afecten a la adherencia y daños que inutilicen al elemento para su función, tales como posibles agrietamientos o erosiones que causen discontinuidades en la película autoprotectora.

Los dinteles y albardillas se deben apilar de forma correcta sobre un adecuado número de apoyos separados del suelo, y las pilas se deben proteger, si fuere necesario, contra manchas y salpicaduras, teniendo en cuenta cualquier exigencia específica de las instrucciones del fabricante.



3.4 Criterios de ejecución

En la ejecución de cualquier tipo de fábrica se deben observar los criterios establecidos en el DB SE-F, Capítulo 7 *"Ejecución"*, y se recomienda además la aplicación del Eurocódigo-6, partes 1-1 y 2. Se indican a continuación los aspectos que tienen especial interés en el proceso de construcción de elementos de fábrica convencional de ladrillo cerámico. Los procedimientos y detalles particulares de los puntos singulares se desarrollan posteriormente en secciones específicas.

3.4.1 Muretes de referencia o de muestra

Son muros construidos antes de comenzar la ejecución de la fábrica, realizados con los mismos materiales y en las mismas proporciones que se pretenden utilizar. Sirven para observar el comportamiento del conjunto ladrillo - mortero y para comprobar que las piezas especiales se adaptan a la forma y el color requeridos. Es necesario construirlos especialmente cuando se va a utilizar ladrillo *cara vista*, sobre todo si se prevén aditivos en el mortero, para conocer cuál es la interacción entre el mortero con aditivo y el ladrillo, ya que se pueden producir reacciones entre ambos causando la aparición de eflorescencias, manchas o cambios de color.

Para la construcción de los muretes de muestra se debe escoger el color y tipo de ladrillo, así como la mezcla y el color de la junta que se haya decidido utilizar, aunque se pueden realizar diversas combinaciones. Es conveniente solicitar al fabricante que los ladrillos sean escogidos al azar.

Para su ubicación se deben elegir lugares bien iluminados por la luz natural, con objeto de poder apreciar realmente su aspecto, y de manera que puedan ser observados a una distancia no inferior a 3 metros, sin que algún objeto intermedio dificulte la visión.

Se deben construir sobre una base de hormigón, perfectamente nivelada y aislada de la humedad del terreno, protegiendo el muro en la parte superior para evitar que el efecto de la lluvia sature el ladrillo y modifique su apariencia; manteniéndolos durante el tiempo necesario para que la fábrica seque y se pueda apreciar su aspecto definitivo.

3.4.2 Replanteo y nivelación

En las fábricas de ladrillo *cara vista* es fundamental la operación de replanteo para evitar en lo posible los engorrosos cortes de piezas y ajustes en las esquinas, quiebros o huecos.

El replanteo horizontal se realiza trazando la planta de los muros con el debido cuidado para que las dimensiones estén dentro de las tolerancias especificadas en proyecto. Los replanteos complementarios se deben referir a los fundamentales con objeto de minimizar los errores.

Se colocan miras sujetas y aplomadas, con todas sus caras escuadradas, a distancias no mayores de 4 metros y siempre en cada esquina, hueco, quiebro o mocheta. Los elementos de apoyo para materializar el replanteo deben estar convenientemente afianzados y suficientemente alejados del área de trabajo para permitir la circulación, maniobras y operaciones del personal y de la maquinaria.

En las miras se marca la modulación vertical y los niveles de antepechos y dinteles de huecos, situando un hilo tenso entre ellas y apoyado sobre las marcas realizadas. El hilo-guía se utiliza para alinear y nivelar el muro, sirviendo de referencia para ejecutar correctamente las hiladas horizontales; para ello, los ladrillos se colocan haciendo coincidir su borde exterior con el hilo.

Se comienza trazando la planta de los muros con piezas escogidas al azar, disponiendo la primera y segunda hilada en seco. Primero se replantean las esquinas y los huecos, debiendo hacerse el replanteo de los mismos en la primera hilada.

15. El *mortero diseñado* es aquel cuya composición y sistema de fabricación han sido elegidos por el fabricante con el fin de obtener las propiedades especificadas, por ejemplo alcanzar una resistencia M5 (concepto de *prestación*). El *mortero prescrito* es el que se fabrica en unas proporciones predeterminadas y cuyas propiedades dependen de estas proporciones declaradas de los componentes (concepto de *receta*).

16. En relación a este último parámetro es suficiente una evaluación basada en disposiciones válidas en el lugar previsto de utilización del mortero.

17 Normas UNE-EN 845 *"Especificación de componentes auxiliares para fábricas de albañilería"* y Normas UNE-EN 846 *"Métodos de ensayo de componentes auxiliares para fábricas de albañilería"*.

Teniendo en cuenta las tolerancias admisibles del ladrillo (sobre el valor nominal) y la máxima dispersión del modelo elegido, se determina el espesor necesario de la junta para que todas tengan una distribución regular y el mismo espesor, dado que la altura de las piezas es constante, siempre dentro de los límites indicados anteriormente.

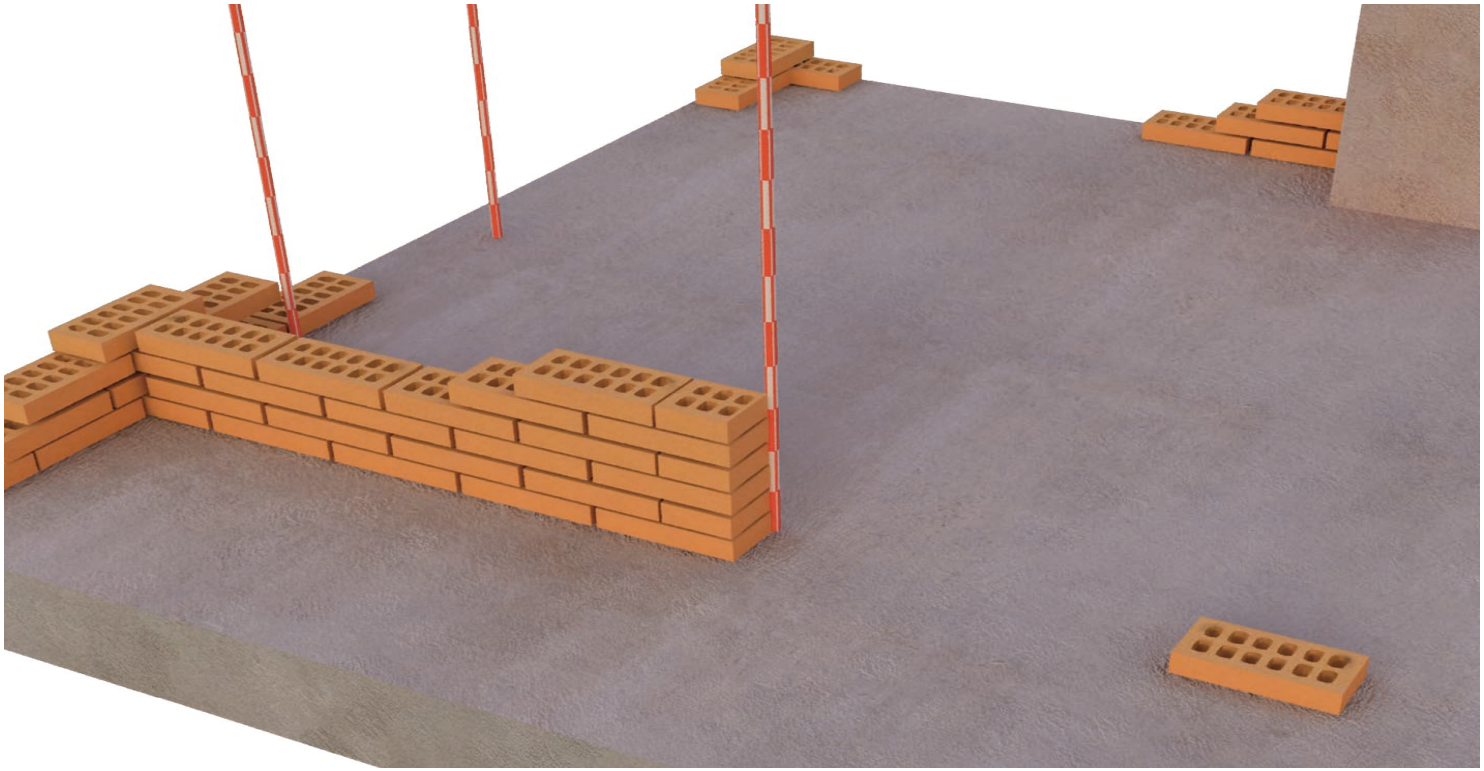
El plano de fachada se define mediante plomos que se bajan desde la última planta hasta la primera, con marcas en cada uno de los pisos intermedios, dejando referencias para que pueda ser reconstruido en cualquier momento el plano así definido.

Salvo indicación contraria en la especificación de proyecto, la fábrica se debe construir aplomada y con los tendeles nivelados horizontalmente, dentro de las pertinentes tolerancias admisibles.

Cuando la fábrica se construya con mortero fino y el forjado o cimentación sean demasiado rugosos o no lo bastante horizontales para permitir el empleo de mortero fino, la primera hilada de piezas de fábrica se puede colocar con mortero ordinario de resistencia apropiada. De acuerdo con los niveles de la obra es probable que la primera hilada deba ser asentada sobre mortero hidrófugo.

3.4.3 Amasado del mortero

Antes de su puesta en obra el mortero debe estar perfectamente mezclado hasta conseguir una masa homogénea sin exudación, utilizando la dosificción de mezcla adecuada para obtener las características de comportamiento requeridas. Cuando la especificación de proyecto no indica la dosificación de la mezcla, se deben elegir los materiales constituyentes, su dosificación y el método de mezcla basándose en ensayos o de acuerdo con el código de buena práctica en el lugar de empleo.



Replanteo de huecos

El amasado de los morteros para la ejecución de fábricas se debe hacer preferentemente con medios mecánicos, puesto que es el procedimiento que ofrece más garantías desde el punto de vista de la homogeneidad y plasticidad de la masa. La mezcla debe ser batida hasta conseguir una distribución uniforme y una activación apropiada de todos sus componentes, durante un tiempo mínimo de un minuto, siendo lo habitual un tiempo de amasado mecánico entre tres y cinco minutos, contado desde el momento en que se hayan añadido todos los componentes. El tiempo de amasado no debe superar los quince minutos[18], excepto cuando se usen morteros retardados.

Los morteros preparados y los morteros secos se deben emplear siguiendo las instrucciones del fabricante, que incluirán el tipo de amasadora, el tiempo de amasado y la cantidad de agua.

El mortero de relleno se debe amasar hasta dotar a la mezcla de suficiente docilidad para rellenar los huecos en los que se coloque y se compacte adecuadamente; debe estar listo para su utilización a la salida de la amasadora, no debiendo añadirse posteriormente conglomerantes, áridos, aditivos o agua.

Cuando el amasado se realice a mano, se debe hacer sobre una plataforma impermeable y limpia, realizando como mínimo tres batidas.

Si se trata de realizar un mortero bastardo se debe mezclar primero la cal con el cemento y una parte del agua necesaria; después se incorpora la arena, sin interrumpir el amasado y, finalmente el resto de agua.

Si se utilizan aditivos se debe mezclar en seco la arena con el cemento hasta que el material adquiera un aspecto homogéneo; el aditivo se agrega disuelto en el agua de amasado. No se deben utilizar aditivos, adiciones o pigmentos salvo que lo permita la especificación de proyecto y siempre de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

El mortero se tiene que utilizar en las dos horas posteriores a su amasado. Si es necesario, durante este tiempo se le puede agregar agua para compensar su pérdida. Pasadas las dos horas, hay que desechar el mortero que no se haya empleado.

En invierno se debe tener especial cuidado para proteger el mortero de las heladas. No se debe utilizar agua, arena o premezcla cal / arena que contengan partículas de hielo.

3.4.4 Humedecimiento de los ladrillos

La normativa obliga a mojar los ladrillos antes de su puesta en obra a excepción de los ladrillos de baja succión, denominados así los que tienen una succión inferior a 0,5 kg / (m^2·min). El objetivo de este proceso, además de eliminar el polvo adherido al exterior de las piezas originado por el proceso productivo, es reducir la expansión potencial por humedad y atenuar la succión. Con ello se evita la deshidratación que sufre el mortero al ponerse en contacto con las piezas cerámicas, fenómeno conocido como *afogarado*[19].

La cantidad de agua embebida en el ladrillo debe ser la suficiente para que no tenga que ser inferida por succión del agua de amasado del mortero, pero sólo la necesaria, sin excedentes que modifiquen la consistencia del mortero o impidan la entrada del mismo en la estructura porosa de la pieza. El exceso del grado de humedad resultante no deriva necesariamente en una mejora de la interacción mortero / pieza. Si existe agua remanente en la superficie de los ladrillos, aumenta la proporción agua/cemento del mortero en contacto con ellos y se puede inhibir la succión total o parcialmente según el grado de colmatación de los poros superficiales de las piezas colocadas.

El humedecimiento se debe realizar con cierta antelación previamente a su puesta. Se consigue mediante riego o inmersión, introduciendo los ladrillos en una balsa durante unos minutos y apilándolos después de sacarlos hasta que haya desaparecido la película de agua superficial. De esta forma se asegura la absorción a través de las paredes externas de la pieza lo cual facilita su adherencia.

18. Una amasada prolongada cuando se emplean agentes aireadores, puede conducir a un exceso de aireación y, por consiguiente, a una reducción en la adherencia y durabilidad.

19. Si se utiliza un mortero excesivamente fluido para compensar la succión de agua del ladrillo se corre el riesgo de que escurra por las juntas y se produzcan retracciones de fraguado que provocan fisuras, penalizando la estanquidad del muro.

El contenido de humedad no sólo se debe asegurar durante la ejecución de la fábrica; es preciso mantenerlo en el muro recientemente construido si existen condiciones que desequen los materiales. Tal es el caso de humedades relativas bajas, temperaturas altas o fuertes vientos.

Criterios específicos para los ladrillos de baja succión

Los ladrillos de baja succión (inferior a 0,5 kg / (m^2·min)), entre los que se incluyen los hidrofugados, los clínker y los gresificados[20], constituyen una excepción al criterio general de humedecerlos antes de su puesta en obra, y requieren condiciones específicas en la prescripción del mortero para un correcto comportamiento.

Este tipo de ladrillos tiene una porosidad superficial sustancialmente menor de lo común. Por consiguiente se inhibe el proceso por el cual se forman los enlaces químicos entre el mortero y la pieza que habilitan la adhesión. El ladrillo apenas succiona la lechada y, por tanto, no permite la adherencia mecánica con los morteros convencionales. Para un mismo mortero dado, la adherencia resultante con un ladrillo de baja succión resulta muy inferior a la obtenida con una pieza convencional, de mayor porosidad.

Otro efecto secundario en el caso de baja succión es que la junta se hunde o se estrangula debido a que el mortero permanece fresco mucho tiempo. La demora en el fraguado hace que, al ir añadiendo peso, los tendeles se aplasten y el mortero rebose ensuciando el paño.

Los ladrillos de baja succión se deben utilizar completamente secos, para lo cual hay que abrir el paquete 48 horas antes de su puesta en obra. Este mismo tiempo se debe dejar transcurrir cuando se corten, hasta su colocación, para que se pueda secar perfectamente la humedad provocada por el corte, además de limpiar la superficie vista.

Si se practican tratamientos de impermeabilización éstos deben afectar sólo a la cara vista, por ejemplo mediante procesos de pulverización del hidrófugo y no de inmersión.

No se debe utilizar arena sin finos, ni con exceso de gruesos. Además es conveniente prescribir un mortero fabricado específicamente para el caso de ladrillos de baja succión.

3.4.5 Colocación de los ladrillos

Los ladrillos se deben colocar con el aparejo dado en la especificación de proyecto; cuando no se indique, el aparejo debe ser conforme a la ley de traba indicada en apartados anteriores.

Las piezas con rebajos se deben colocar con la orientación indicada por el fabricante y los rebajos se deben rellenar completamente con mortero.

Antes de proceder a la colocación de los ladrillos, hay que comprobar que la superficie de apoyo está perfectamente limpia y nivelada, de manera que permita el correcto arranque de la fábrica. Las posibles irregularidades que presenta el plano de apoyo se pueden repasar retacando con mortero.

Se sitúa el hilo de la mira coincidiendo con la arista superior de la hilada que se vaya a ejecutar, sirviendo de referencia para garantizar la horizontalidad de la misma.

Con objeto de lograr la máxima homogeneidad en dimensiones y color, se recomienda utilizar ladrillos de dos o tres paquetes a la vez, cogidos en tandas escalonadas.

Los ladrillos se colocan siempre a restregón. Para ello, se extiende sobre el plano de asiento, o la última hilada, una tortada de mortero en la cantidad suficiente para que el tendel y la llaga resulten de las dimensiones especificadas (unos 4 ó 5 cm), y se iguala con la paleta. El ladrillo se sitúa sobre el mortero a una distancia horizontal respecto del ladrillo contiguo de la misma hilada, anteriormente colocado, aproximadamente del doble del espesor de la llaga. Se aprieta verticalmente al ladrillo y se restriega, acercándolo al ladrillo contiguo ya colocado, hasta que el mortero rebose por la llaga y el tendel, quitando con la paleta el exceso de mortero.

Para realizar correctamente la colocación es imprescindible aportar una cantidad de mortero suficiente para que colmate los tendeles y las llagas según los espesores especificados en el proyecto y replanteo; una ejecución deficiente provoca la penetración del agua de lluvia hacia el intradós del muro. Si alguna junta queda insuficientemente rellena hay que repasarla con más mortero y presionar con la paleta[21].

Es contraproducente mover o golpear los ladrillos después de efectuar la operación de restregón y los movimientos iniciales de nivelación y alineación. Una

vez comenzada la interacción entre los materiales, los golpes y movimientos rompen los enlaces químicos y las piezas ya no se vuelven a adherir bien al mortero. Si fuere necesario corregir la posición de algún ladrillo, hay que retirarlo quitando también el mortero.

En el proceso de colocación de los ladrillos es importante evitar el movimiento de vaivén en el sentido perpendicular al muro puesto que, si se redondea la capa de mortero cuando éste aún no ha endurecido, se reduce notablemente la capacidad portante de la fábrica, sobre todo en presencia de cargas excéntricas. Este efecto se aprecia de manera sensible en muros muy esbeltos.

Una vez ejecutada la primera hilada se levanta el hilo situándolo en la siguiente marca, se nivela y se procede a la colocación de la segunda hilada, y así sucesivamente.

El intervalo de tiempo entre la operación de aplicar el mortero y situar las piezas supone un factor que condiciona la adherencia de la hilada que se coloca respecto a la inferior. El agua del mortero dispuesto en el tendel es absorbida por la hilada sobre la que se asienta y se reduce el flujo hacia las piezas superiores cuanto más tiempo transcurra. Lo más aconsejable es reducir los intervalos de puesta de las piezas al mínimo.

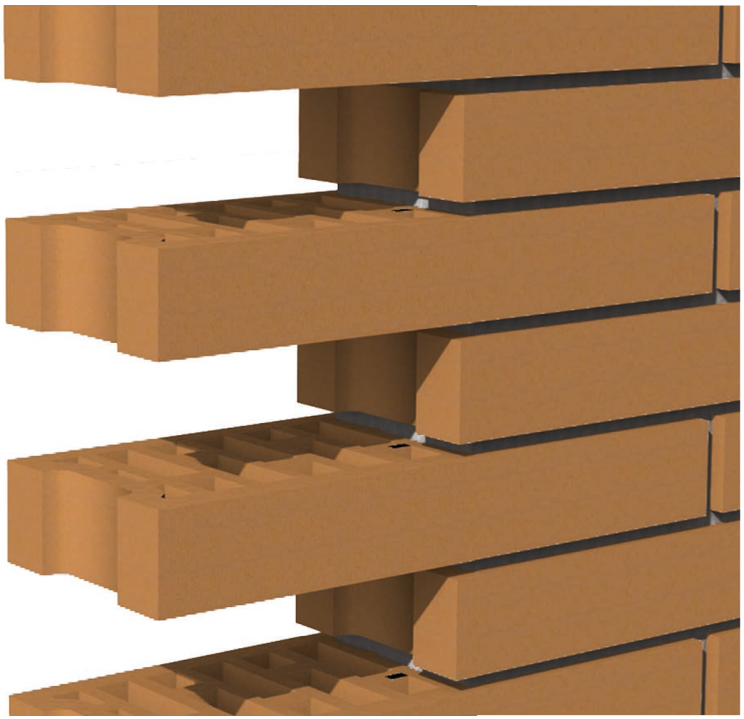
Las fábricas se deben levantar por hiladas horizontales en toda la extensión de la obra, siempre que sea posible. Cuando dos partes de la fábrica hayan de levantarse en épocas distintas, hay que dejar escalonada en sentido ascendente la que se ejecute primero, de forma que lo que se realice posteriormente monte sobre el escalonado. Cuando esto no es posible, se pueden disponer entrantes *(adarajas)* y salientes *(endejas)*.

En cerramientos de dos hojas con cámara intermedia hay que recoger las rebabas del mortero sobrante en cada hilada, para evitar que caigan al fondo de la cámara. Cuando se exija la ventilación y drenaje de la cámara, se deben dejar abiertas en la cima y en la base del muro, y también encima de los huecos, llagas con una separación no superior a 1,50 m.

Las dos caras del muro deben ser perfectamente planas, verticales y paralelas. Para ello se debe controlar periódicamente con plomos y niveles la

20. Existen ladrillos, por ejemplo los vitrificados que pueden llegar a valores de succión inferiores a 0,1 kg / (m^2·min).

21. La presión de asentado con la que el operario dispone las piezas es uno de los factores que tiene más influencia, tanto en la resistencia a la adhesión final de la fábrica como en la estanquidad. Al presionar la pieza contra el mortero se logra un doble efecto. En primer lugar se fuerza al agua a ascender por los poros de las paredes en contacto con la pasta, incrementándose la tensión de adherencia. Además, aumenta la superficie de contacto de la interfase al impregnarse mayor área de las paredes correspondientes a las perforaciones.



Adarajas y endejas

horizontalidad, el alineamiento y la verticalidad del intradós y del extradós del muro ejecutado de la siguiente manera:

- Horizontalidad y alineamiento: se controla colocando una regla sobre la última hilada ejecutada y comprobando con el nivel. También conviene realizar periódicamente una verificación de la horizontalidad con el hilo-guía situado entre las miras. Se sugiere controlar cada cinco o seis ladrillos y ajustar la posición de los mismos aplicando pequeños golpes con el mango de la paleta antes de que se endurezca el mortero.

- Verticalidad: se controla mediante el uso de plomadas en las esquinas y en varios puntos del muro; es recomendable colocar plomadas cada 2 metros. Se debe comprobar la verticalidad de todo el muro y también el plomo de las juntas verticales correspondientes a hiladas alternas, que deben seguir la ley de traba empleada según el tipo de aparejo que se haya elegido. Se sugiere controlar la verticalidad en cada hilada con regla y cada cuatro hiladas con la plomada.

3.4.6 Corte de las piezas

El corte de piezas es habitual, sobre todo en fábricas de ladrillo cara vista, para poder adaptarse al replanteo o para resolver puntos singulares. Con carácter general, nunca se pueden emplear piezas cortadas a tamaño menor de medio ladrillo.

Los ladrillos se deben cortar sobre una mesa de corte, que debe estar limpia en todo momento y provista de chorro de agua sobre el disco. Una vez cortada la pieza, se debe limpiar la superficie vista. Además, para evitar manchas en los ladrillos, también hay que limpiar la máquina especialmente cada vez que se cambie de color de ladrillo.

Es recomendable coger los ladrillos que vayan a ser cortados de las mismas partidas que se estén colocando, para evitar cambios de color entre los ladrillos cortados y el resto.

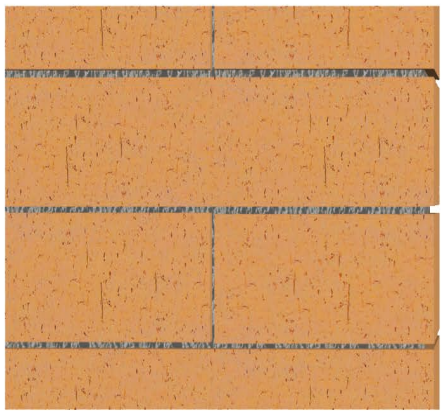
Si se utilizan ladrillos hidrofugados o de baja succión, éstos deben estar completamente secos antes de su puesta en obra, por lo que se deberá dejar transcurrir 48 horas desde el corte hasta su colocación, para que seque completamente la humedad ocasionada en el proceso.

3.4.7 Juntas de mortero

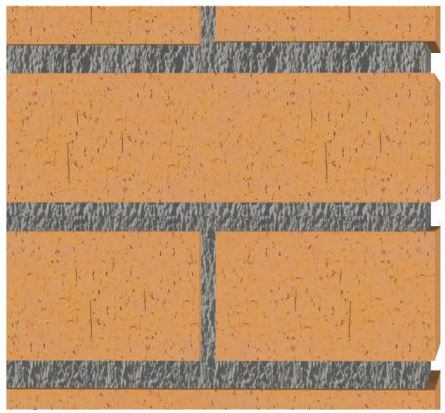
Las juntas de mortero suponen alrededor de un 20% del volumen total de un muro. Sin embargo, su efecto en el resultado final en aspectos como la durabilidad o el comportamiento mecánico es mucho mayor. El mortero tiene encomendadas misiones básicas aparte de ligar las piezas, como son la de proporcionar la resistencia necesaria en las juntas, sellar la fábrica haciéndola estanca al agua pero permeable al vapor, y mantener la modulación y dimensiones dentro de las tolerancias admisibles.

Las juntas se deben ejecutar de tal manera que se asegure su resistencia frente a las acciones a las que estarán expuestas, garantizando el monolitismo de la fábrica; y la adherencia necesaria para evitar la presencia de fisuras garantizando la estanquidad del conjunto.

La superficie crítica en el sistema mortero / pieza suele estar localizada, según la mayoría de los ensayos realizados, en la sección de la junta de mortero con la pieza superior. Por ello, para asegurar el monolitismo resulta crucial la penetración en la mayor medida posible del mortero en las superficies y oquedades de la pieza superior. Con ello se favorece la formación de mayor número de cristales de engarce del mortero en el muro.



Junta delgada



Junta normal

Sin embargo, el aspecto más relevante relativo a la estanquidad que está relacionado con la puesta en obra del mortero radica en la correcta ejecución de las llagas o juntas verticales en todo el espesor del muro. La práctica habitual de colmatar la junta sólo por el exterior aumenta las posibilidades de filtración y no asegura la impermeabilidad del paramento.

Las llagas y los tendeles deben tener en toda la longitud y altura del muro el espesor especificado en el proyecto o el determinado en la fase de replanteo, que se debe mantener constante en todo el elemento.

En lo relativo al acabado estético de los muros cara vista es imprescindible mantener una uniformidad en las características del mortero, particularmente en el color. Una dosificación inadecuada, variaciones en la composición, morteros fabricados en distintas etapas, acopios contaminados, etc., alteran sensiblemente el aspecto final del material pudiendo acarrear en las fachadas variaciones estéticas evidentes de carácter irreversible.

El color del mortero depende del color del cemento, de la arena, de la cal y de los pigmentos empleados, así como de las cantidades que se utilicen de los mismos para obtener la mezcla final. Es recomendable utilizar morteros preparados para poder garantizar que, durante el desarrollo de toda la obra, se dispondrá de un mortero de características constantes.

Cuando se quiera utilizar llagas muy delgadas o aparentemente vacías, se deben tener en cuenta las tolerancias dimensionales sobre el valor nominal y sobre la dispersión del modelo elegido y, si es un ladrillo extrusionado, también sobre el espesor de la cara no vista. Entre cada pieza debe quedar una distancia mínima que permita absorber las tolerancias propias del ladrillo, así como las de colocación.

En las fábricas con juntas a hueso hay que respetar una separación mínima de 2 mm entre las testas de dos piezas contiguas. Desde el punto de vista del comportamiento mecánico, el contacto entre ladrillos es desaconsejable ya que, ante cualquier movimiento de la fábrica, se puede provocar una concentración de esfuerzos excesiva en esos puntos, produciendo deterioros de las piezas.

Juntas de mortero: Elección del mortero

La elección del mortero adecuado en cada caso depende de numerosas variables entre las que se deben considerar las relacionadas con la función que ha de desempeñar el elemento. No existe ninguna combinación de componentes que proporcione el mortero óptimo en todas las propiedades que se pueden exigir a este material. Los factores que mejoran una propiedad pueden alterar otras, a veces en sentido desfavorable.

Mientras que en los muros portantes el factor a considerar sería la resistencia mecánica, en los cerramientos de fachada, expuestos al ambiente exterior, con acciones horizontales que producen excentricidades considerables, es más importante valorar la flexibilidad del conjunto, la adherencia del material y la resistencia a las filtraciones. En los cerramientos de ladrillo cara vista además pueden primar aspectos como la estanquidad, la uniformidad y su acabado o color.

Juntas de mortero: Resistencia a compresión

En general, la resistencia mecánica a compresión del mortero tiene poca influencia en la resistencia final de la fábrica ejecutada, aunque es un índice de calidad del material en lo referente a la prevención de procesos de corrosión. Por otra parte, morteros de elevada resistencia, cuando se utilizan con piezas poco resistentes, pueden producir roturas frágiles en muros.

Por estas razones, el DB SE-F establece las siguientes restricciones, por exceso y por defecto, a la resistencia de los morteros utilizados para la ejecución de fábricas:

"El mortero ordinario para fábricas convencionales no será inferior a M1. El mortero ordinario para fábrica armada o pretensada, los morteros de junta delgada y los morteros ligeros, no serán inferiores a M4. En cualquier caso, para evitar roturas frágiles en los muros, la resistencia a la compresión del mortero no debe ser superior al 0,75 de la resistencia normalizada de las piezas". (DB SE-F, artículo 4.2 "*Morteros*", párrafo 3).

En fábricas de ladrillo cara vista se recomienda el empleo de morteros no superiores en ningún caso a M7,5. Aunque la resistencia mecánica del mortero no constituye un parámetro fundamental, no es una práctica aconsejable intentar alcanzar la resistencia prescrita mediante una mezcla de sus componentes en obra; es preferible recurrir a morteros industriales, solicitados en

función de una resistencia nominal, cuyos controles de calidad previos y sus registros pueden avalar con mayor rigor el valor del resto de sus propiedades.

Juntas de mortero: Contenido en cemento

El aumento de la cantidad de cemento supone, en general, un incremento de la resistencia del mortero. No obstante, dosificar un mortero con exceso de cemento puede comprometer otras propiedades del material y su interacción en el conjunto de la fábrica.

El cemento aporta una rápida ganancia de resistencia, lo cual es favorable si se construye el elemento en época de heladas, pero su exceso produce mezclas más rígidas, lo que puede provocar fisuración en la fábrica debida a movimientos de ésta por pequeños que sean.

En cualquier caso, nunca son aconsejables morteros pobres en cemento; es preferible añadir cal hidratada o aditivos que habiliten una mayor flexibilidad del material.

Juntas de mortero: Relación agua/cemento

En general, el aumento de la relación agua / cemento, bien sea por la adición de agua o por la disminución de la cantidad de cemento, se traduce en un descenso de la resistencia mecánica del mortero.

Sin embargo, a la hora de cuantificar esta relación es importante considerar el conjunto constructivo formado por las piezas y el mortero, en cuya interacción es clave el componente agua. Si el contenido de agua es insuficiente se puede impedir el proceso adecuado de hidratación del conglomerante. Además se dificulta la penetración de éste en los poros de las piezas para formar los vínculos mecánicos adecuados. Por ello, un mortero puede adquirir mayor resistencia individuamente con un menor aporte de agua, pero no por ello se aumenta necesariamente la resistencia final del conjunto.

Juntas de mortero: Consistencia

Con carácter general, para la ejecución de fábricas es recomendable utilizar morteros de consistencia plástica. Los morteros de consistencia seca resultan poco trabajables y es difícil garantizar el trasvase del conglomerante hacia los poros de las piezas. Los morteros de consistencia fluida pueden ocasionar el fenómeno de segregación, por el cual la pasta se derrama hacia abajo dificultando la adherencia con la pieza superior, produciendo además niveles demasiado elevados de porosidad del mortero.

Juntas de mortero: Morteros mixtos

Los morteros que utilizan como conglomerante la cal son menos resistentes que los formados con cemento y muchos más lentos en el proceso de endurecimiento. Sin embargo, la aportación de cal hidratada para formar morteros mixtos es beneficiosa puesto que mejora otras propiedades como la trabajabilidad o la permeabilidad al vapor de agua.

En general, es aconsejable el empleo de la cal como plastificante especialmente cuando la relación en volumen cemento / arena es igual o mayor a 1:4. Cuando se aporta cal hidratada para obtener un mortero mixto es importante cerciorarse de que ésta ha sido debidamente apagada, para evitar la presencia de gránulos de cal viva que originan expansiones debilitando al material. Los morteros industriales que incorporan la cal en sus componentes tienen en consideración este aspecto en los correspondientes controles de calidad.

Juntas de mortero: Tiempo de utilización

Las mejores condiciones para la aplicación del mortero se consiguen disponiendo la pasta recién preparada, evitando que transcurra mucho tiempo desde que es amasada hasta su puesta en obra. La razón es evitar la pérdida de agua debido a la evaporación por la aireación superficial y a la absorción de la arena. Esta pérdida se traduce en una alteración de la consistencia del mortero perjudicando su trabajabilidad y puede llegar a inhibir la hidratación del conglomerante.

Por esta razón, la aplicación del mortero para formar las juntas se debe realizar dentro del tiempo de utilización que éste tenga especificado. Durante este período queda garantizado que el mortero conserva todas sus propiedades en estado fresco. Lo ideal es disponer la cantidad de mortero que se va a consumir para ejecutar las unidades de obra previstas en un tiempo razonable, evitando excedentes que pierdan sus condiciones iniciales. No es conveniente reacondicionar el mortero para hacerlo más trabajable añadiendo agua una vez que se ha superado su tiempo de utilización, pues se pueden modificar sus propiedades iniciales (consistencia, densidad, adherencia en estado fresco, etc.) y otros paráme-

tros, como la relación agua / cemento, que merman el poder ligante en la interfase mortero / pieza afectando fundamentalmente a su durabilidad y a la respuesta de la fábrica ante solicitaciones relacionadas con la adhesión.

Cuando se prevean períodos prolongados de puesta en obra del mortero es preferible utilizar aditivos retardadores de fraguado que dilatan el tiempo de su utilización. El empleo de retardadores puede prolongar su tiempo de uso en fresco hasta 48 horas o incluso más[22].

Juntas de mortero: *Durabilidad*

Uno de los factores fundamentales que influye decisivamente en la durabilidad de una obra de fábrica es la resistencia que presentan sus materiales a los ciclos hielo - deshielo.

En general, la resistencia a la helada aumenta con el contenido de cemento debido a que el mortero, cuando está en el exterior, debe resistir el hielo incluso antes de finalizar el período de endurecimiento y en este sentido es importante que presente altas resistencias iniciales, aunque esto tiene como contrapartida una elevada retracción de secado.

El contenido de aire también es un parámetro directamente relacionado con la resistencia a la helada. El aumento del porcentaje de aire ocluido en el seno de la masa, mediante la utilización de aditivos aireantes en la composición de la mezcla, mejora ostensiblemente el comportamiento ante los ciclos de hielo – deshielo a que están expuestas las juntas, debido a que las pequeñas burbujas de aire en el interior del mortero proporcionan una buena protección del material ante este agente. Sin embargo, un contenido de aire elevado en el mortero perjudica otras propiedades como la resistencia, la adherencia y la impermeabilidad.

Otro agente que perjudica la durabilidad de las fábricas es la presencia de los iones sulfato procedentes de sales solubles en agua o derivados de reacciones en determinadas atmósferas industriales, que produce un compuesto de naturaleza expansiva llamado *ettringita*. Es aconsejable prescribir cementos resistentes a los sulfatos, de bajo contenido en aluminato cálcico, cuando las condiciones del medio son propicias a la generación de sulfatos solubles.

Los iones cloruro de los morteros perjudican la durabilidad de las fábricas que incluyen en su interior armaduras no protegidas. En fábrica armada es conveniente prescribir un mortero con un contenido máximo de 0,1% de estos iones en la masa del cemento seco utilizado. Dada la dificultad de medir este contenido en el mortero endurecido, se determina en los morteros frescos. En morteros que no alberguen acero en su interior no es necesario considerar este parámetro.

Juntas de mortero: *ladrillos de baja succión*

En el caso de utilizar ladrillos de baja succión, el mortero empleado para las juntas debe ser menos fluido, debiéndose reducir la cantidad de agua en el amasado, ya que la pieza cerámica apenas altera el contenido de agua que presenta el mortero en estado fresco. El exceso de agua en la mezcla reduce la resistencia, retrasa el fraguado y puede ensuciar la fachada al no ser absorbida por la junta. En este sentido es aconsejable prescribir morteros con una relación agua / cemento baja[23], que produzca una consistencia plástica.

Para reducir la cantidad de agua de la mezcla sin penalizar la trabajabilidad del mortero es recomendable la adición de cal hidratada o utilizar aditivos plastificantes, que le permite ser más cohesivo en estado fresco.

Si se utiliza ladrillo clínker no es necesario utilizar aditivos hidrofugantes en el mortero. Con carácter general y especialmente en este caso no se

22. Si se utilizan aditivos retardadores hay que tener la precaución de que el mortero no permanezca expuesto a condiciones ambientales severas puesto que, durante el período que transcurre antes de iniciarse los procesos de fraguado y endurecimiento, se puede producir la evaporación del agua de amasado y derivar en un mortero fácilmente disgregable en su fase endurecida.

23. La relación agua / cemento debe ser la justa para una correcta hidratación, sin superar el 50%, teniendo en cuenta la influencia que la humedad de la arena tiene en la dosificación final.

debe añadir agua a la mezcla para su reamasado.

El mortero debe tener una categoría alta, debido a que la resistencia de la pieza es muy elevada. Es aconsejable dotar al mortero de un alto contenido en finos.

Juntas de mortero: ladrillos alta succión

Los ladrillos de alta succión representan el caso inverso al anterior. Si el ladrillo tiene una elevada capacidad de succionar el agua con la que entra en contacto en su superficie, puede resecar la pasta perjudicando sensiblemente la adherencia.

En estas situaciones se debe cuidar que la dosificación del mortero tenga suficiente contenido en agua. También se pueden utilizar retenedores de agua (tipo metil-celulosas de viscosidad intermedia) o morteros mixtos de cal hidratada que reducen la pérdida del líquido en el seno de la pasta y aseguran la adherencia.

Junta redondeada

Junta matada superior

Junta oculta

Junta enrasada

Junta rehundida

Juntas de mortero: Acabados de junta

El acabado de junta influye de forma importante en el aspecto final de la fábrica, ya que las juntas suponen aproximadamente el 20% de la superficie del paramento.

Cuando se definen los acabados de junta se deben incluir en la especificación, además de la propia forma, cualquier exigencia especial para comprimir la junta con el llaguero y la necesidad, si procede, del rejuntado para conseguir un efecto o color determinados. Además, se debe tener en cuenta en el proyecto el efecto de juntas rehundidas e hiladas voladas.

La junta puede tener diferentes formas dependiendo del aspecto estético que se quiera obtener. Los tipos de junta más utilizados son: redondeada, rehundida, matada superior, enrasada y oculta o a hueso. En cualquier caso su diseño debe evitar la acumulación de agua, facilitando su evacuación. En este sentido, no son recomendables las juntas salientes.

Juntas de mortero: Llagueado

La forma y el aspecto definitivo de la junta se obtiene mediante la operación de *llagueado*. Se realiza cuando se está ejecutando la fábrica y antes de que haya fraguado el mortero, repasando las juntas con el llaguero o con la paleta, mejorando de esta forma el comportamiento de las mismas y el aspecto estético de la fábrica. Al repasar la junta hay que tener la precaución de no arrastrar el mortero. No es conveniente esperar demasiado tiempo en retirar el mortero sobrante, pues si endurece el proceso es más laborioso.

Con objeto de conseguir la máxima uniformidad en el tono de las juntas, conviene realizar el llagueado transcurrido siempre el mismo tiempo desde la ejecución, realizando primero las verticales para obtener las horizontales más limpias. El mortero se debe compactar con las herramientas apropiadas antes de que pierda su plasticidad.

Salvo especificación contraria, cuando se empleen ladrillos perforados, las juntas de mortero no se deben rehundir más de 1/3 del espesor de la pared perimetral de la pieza, ni más de 5 mm en muros de espesor igual o menor a 200 mm.

Juntas de mortero: Rejuntado

El *rejuntado* es una operación que se realiza con posterioridad al proceso de fraguado del mortero, y consiste en repasar las juntas incorporando mortero.

Antes de iniciar la operación de rejuntado se deben rascar las juntas a una profundidad entre 10 mm y 15 mm medida desde la superficie acabada, y se debe limpiar y humedecer todo el área para dar la mejor adherencia posible al mortero incorporado. El mortero se debe compactar para asegurar también una buena durabilidad.

El mortero para rejuntado debe tener características de deformación compatibles con las características de deformación del mortero del llagueado.

Juntas de mortero: Curado

El *curado* es el proceso que consiste en suministrar las condiciones de maduración adecuadas para que el mortero expuesto a las condiciones ambientales alcance sus propiedades durante el período de endurecimiento.

Se ha comprobado que el curado en húmedo produce mayor resistencia final en la fábrica que el mismo proceso en seco a la intemperie. El aporte de humedad en edades tempranas impide que las altas temperaturas o la exposición a vientos intensos desequen el mortero garantizando la existencia de suficiente agua en su interior para consolidar las reacciones químicas del fraguado.

3.4.8 Rozas y rebajes

Las rozas o rebajes suponen un debilitamiento de la sección de muro que pueden poner en peligro su estabilidad y, en cualquier caso, reducen la capacidad resistente de la zona afectada en mayor o menor grado, según la inclinación que tome y el tiempo transcurrido desde la ejecución del muro hasta la realización de la roza.

Según el DB SE-F, se pueden disponer rozas o rebajes verticales, sin necesidad de tener en cuenta su efecto en el cálculo, siempre que se respeten determinadas limitaciones relativas a su anchura y profundidad.

En fábricas con piezas macizas o perforadas, las rozas que respeten las limitaciones de la tabla 3.6 no reducen el grueso de cálculo del muro, a efectos de la evaluación de su capacidad resistente.

Si no se cumplen las limitaciones de la tabla 3.6, las rozas o rebajes deben ser considerados en el análisis, teniendo en cuenta el efecto producido por el debilitamiento en la sección del muro. No obstante, en cualquier caso se deben observar las precauciones de carácter general que se indican a continuación, con objeto de no comprometer la estabilidad de la fábrica.

Teniendo en cuenta la dureza del material, se recomienda realizar las rozas con herramientas de precisión.

Siempre que sea posible se debe evitar hacer rozas en los muros inmediatamente después de haber sido ejecutados, teniendo especial cuidado con los muros no estructurales para evitar que la fuerza aplicada por la máquina rozadora dañe al muro. Cuando existe este riesgo, se debe reforzar el muro.

No se pueden realizar rozas o rebajes que atraviesen dinteles u otros elementos estructurales construidos en el muro. En caso de tener que realizar rozas en muros armados o con anclajes, se debe tener especial precaución en no dañar estos elementos. Cuando se prevea que un muro de fábrica armada en los tendeles tiene que rozarse por una o dos de sus caras, se aconseja emplear armaduras de tendel del ancho inmediatamente inferior al máximo recomendado en función del muro, para evitar encontrarse con las armaduras al hacer las rozas.

Se deben evitar las rozas horizontales e inclinadas de pendiente inferior a 70°. Cuando no sea posible, se deben realizar dentro del octavo de la altura libre del muro, sobre o bajo el forjado, preferentemente en las tres últimas hiladas.

Se debe procurar que las rozas verticales queden separadas 20 cm como mínimo de los cercos o precercos de los huecos.

Cuando haya que realizar rozas por las dos caras de un muro, deben quedar separadas como mínimo 50 cm, para evitar un debilitamiento excesivo de la sección que comprometa su estabilidad.

Tabla 3.6 Dimensiones de rozas y rebajes admisibles sin cálculo

Espesor del muro (mm)	Ancho de rozas verticales (mm)	Profundidad de rozas horizontales o inclinadas (mm)	
		Longitud > 1250 mm	Longitud < 1250 mm
≤ 115	100	0	0
116 - 175	125	0	15
176 - 225	150	10	20
226 - 300	175	15	25
> 300	200	20	30

*Fuente: DB SE-F, tabla 4.8

3.4.9 Criterios de ejecución específicos para fábrica armada

Los criterios que se indican a continuación, con carácter general, tienen como objetivo prevenir en lo posible el riesgo de corrosión de las armaduras embutidas en la masa del muro.

El mortero a emplear en fábricas armadas debe ser un mortero de categoría M5 como mínimo, cuidando de forma especial que las piezas no absorban el agua de hidratación necesaria para el correcto fraguado del mismo, dado que la adherencia resulta esencial para obtener las prestaciones requeridas del armado.

El cemento utilizado en la fabricación del mortero debe tener limitado el contenido en iones cloruro al 0,1% para prevenir el ataque químico de las armaduras.

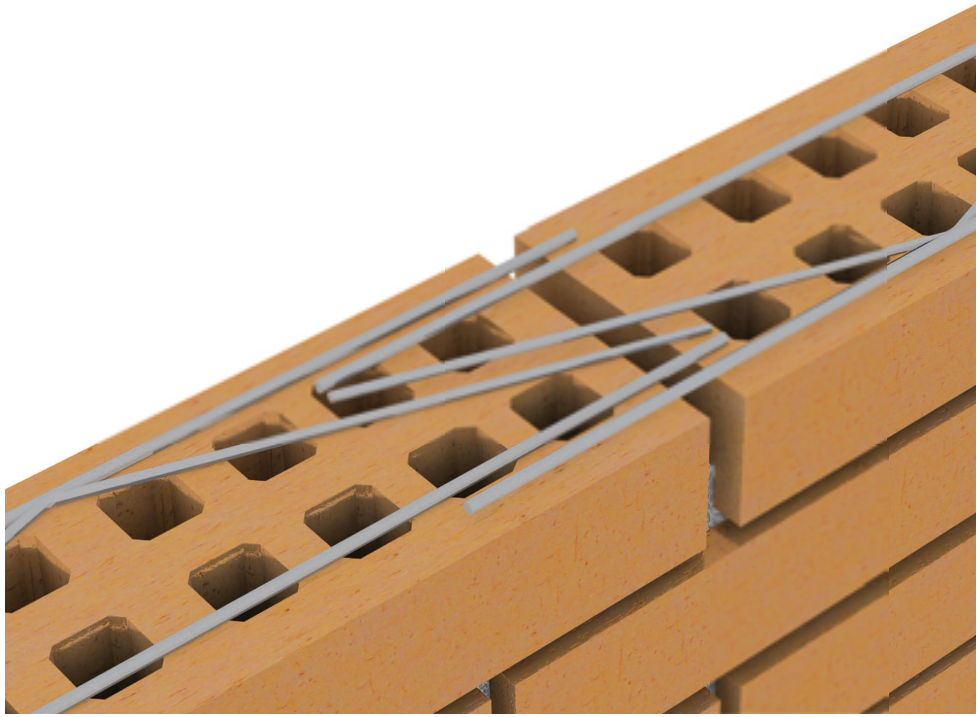
Existe un factor sumamente importante, por su incidencia en la durabilidad de la fábrica armada, cuando está constituida por piezas de material cerámico, que es el de la succión de los ladrillos. Debido al alto riesgo de corrosión del acero, incluso con tratamientos de protección, si el ladrillo absorbe con facilidad la humedad, se pueden producir situaciones de humedades diferenciales, que tienen mucha incidencia en los procesos de ataque por corrosión.

El fenómeno descrito anteriormente se agrava por el hecho de que las armaduras de tendel suelen tener diámetros pequeños, con mucha superficie expuesta para la cuantía de acero considerado. Las consecuencias de un proceso de ataque por corrosión de las armaduras embutidas en las fábricas son difíciles de paliar, dada la imposibilidad de inspección posterior y de abordar tareas de mantenimiento. Por tanto, se debe establecer en el pliego de condiciones técnicas, las condiciones pertinentes de aceptación o rechazo del ladrillo, en función de su coeficiente de succión.

De igual forma, hay que controlar que el espesor del llagueado se mantenga constante y que la disposición de la armadura sobre la tabla de las piezas sea la correcta para que se garantice el recubrimiento total de los alambres, tanto por los efectos que ello supone respecto a la adherencia, como respecto a la propia protección del acero.

Por las razones indicadas anteriormente, se deben controlar de forma especial los puntos singulares en los que la fábrica cambia de plano, en esquinas, quiebros o mochetas, donde los empalmes se deben hacer solapando varillas dispuestas en un mismo plano, nunca superponiéndolas. Si para garantizar el recubrimiento y grueso de tendel fuere necesario, se pueden emplear separadores adecuados para ello.

En relación con el diámetro de las barras, para la mayoría de las aplicaciones de la fábrica armada, como las destinadas a evitar fisuración o colaborar en la estabilidad con ayuda de anclajes, son suficientes diámetros comprendidos entre 3 mm y 5 mm, salvo que la armadura sea requerida para otras funciones estructurales específicas.



3.4.10 Criterios de ejecución de las juntas de movimiento

Las juntas de movimiento constituyen un punto delicado en la construcción de fábricas por ser susceptibles a la penetración de humedad. Además pueden presentar al exterior una apariencia antiestética si no se cuida debidamente su ejecución.

Se presenta a continuación los criterios de carácter general para la ejecución de juntas de movimiento, remitiendo al lector a la sección de *Requisitos* y posteriores, donde se suministran las recomendaciones y reglas de carácter particular.

El ancho de una junta de movimiento no debe ser menor que el especificado. Las tolerancias de la anchura especificada se deben mantener en un margen comprendido entre 0 mm y +2 mm, salvo indicación contraria en el proyecto.

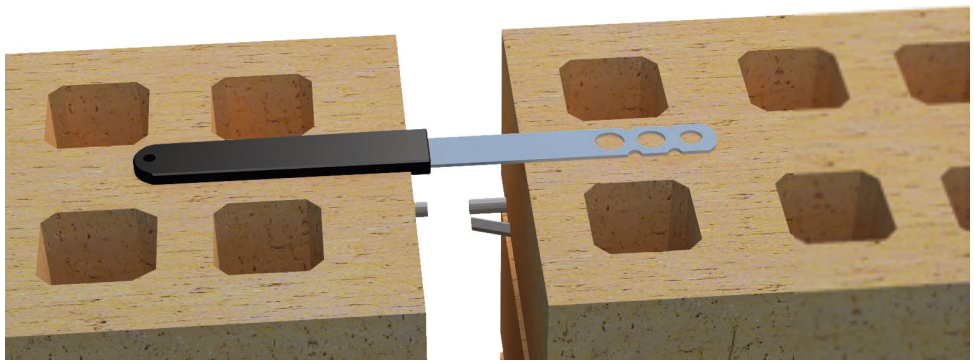
Los componentes auxiliares de la fábrica, incluyendo albardillas y vierteaguas, no deben puentear las juntas de movimiento, exceptuando las llaves de atado.

Los materiales que se empleen para realizar la junta deben mantener la estanquidad del muro, pese a los movimientos de alargamiento y acortamiento, rellenando siempre por completo la junta. Habitualmente se emplea poliestireno para rellenar la junta y silicona para sellarla.

El material de trasdós y el cordón de separación, cuando se requiera, se deben colocar dentro de la junta de tal manera que la distancia desde su cara a la de la junta permita emplear la profundidad correcta del sellante.

Las caras de la junta a las que se aplica el sellante deben estar limpias y libres de materias sueltas. Deben estar también secas, salvo indicación contraria.

Se debe aplicar el sellante a la totalidad de la profundidad especificada, evitando burbujas, y debe quedar adherido a cada lado de la junta.



3.4.11 Criterios de ejecución de los chapados con plaquetas

Una situación habitual, cuando los elementos estructurales del edificio se interfieren con los elementos de la fábrica, es la necesidad del *chapado*[24]. Esta situación constituye un punto delicado, puesto que si no se adoptan las medidas constructivas adecuadas puede ser origen de los siguientes riesgos de procesos patológicos.

En primer lugar, la solidarización de las *"galletas"* o *"plaquetas"* a la estructura mediante mortero resulta muy susceptible a la fisuración (en casos graves puede llevar incluso a la caída de piezas) por los movimientos diferenciales de origen higrotérmico entre ambos y por los propios movimientos estructurales del soporte. El problema se agrava si para la ejecución del chapado se utilizan las vulgarmente llamadas *"pistolas".*

Además, esta fisuración puede generar humedades al ser un punto susceptible a la entrada de agua. También existe riesgo de aparición de humedades por la propia filtración por capilaridad a través del chapado.

La imposibilidad de dar continuidad al aislamiento térmico del cerramiento genera un puente térmico que propicia la aparición de humedades de condensación.

En el caso del paso de la fábrica por delante de los soportes se puede evitar fácilmente esta situación con una disposición retranqueada de los mismos respecto del borde exterior del cerramiento[25].

Por el contrario, esta situación es difícil de evitar en el encuentro de la fábrica con el forjado, si se utiliza el sistema tradicional de construcción del cerramiento. Es una práctica habitual intentar que la apariencia exterior presente una superficie continua del paño, por lo que la fábrica se entrega parcialmente en los forjados, revistiendo el frente de los mismos con las *"plaquetas"* de chapado.

Para evitar los riesgos indicados es conveniente desolidarizar la fábrica de los elementos estructurales por medio de láminas, y hacer solidario el chapado al resto de la fábrica por medio de armaduras de tendel. La estabilidad de las plaquetas se asegura por medio de anclajes con libertad de movimiento vertical para evitar el riesgo de trasvase de carga y la fisuración por incompatibilidad de movimientos.

La interposición de láminas de desolidarización tiene la ventaja de independizar totalmente la fábrica con respecto a la estructura, permitiendo el movimiento diferencial entre ambas y mitigando el efecto de los movimientos propios del trabajo estructural, tanto de los soportes, como de los forjados. Además, si se utiliza para ello una barrera impermeable y aislante, se consigue la estanquidad y rotura del puente térmico en el encuentro de la fábrica con la estructura.

La utilización de armadura de tendel en el encuentro de las plaquetas con el resto del muro tiene la ventaja de proporcionar un control adicional de fisuración y de conseguir que el chapado quede solidarizado con la fábrica, evitando la posibilidad de caída de las piezas.

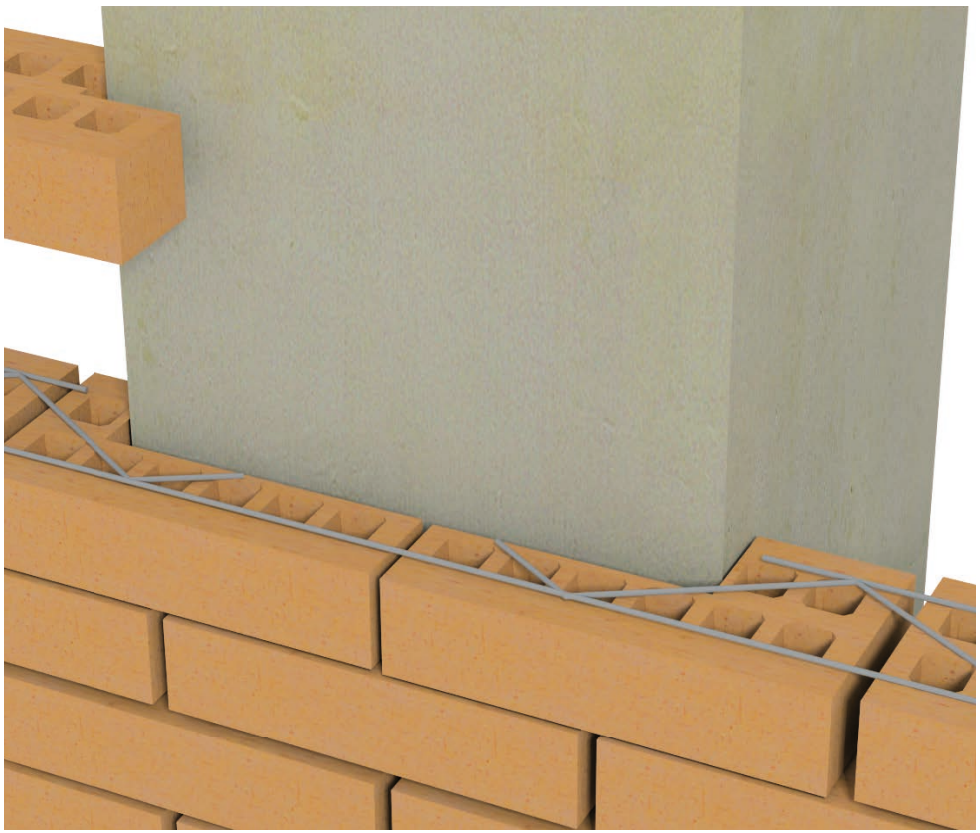
3.4.12 Protección de la fábrica durante su ejecución

La fase de ejecución de las fábricas constituye el período más delicado de toda su vida útil. Mientras se están construyendo y, generalmente, hasta que haya concluido el proceso de fraguado, las fábricas son elementos con propiedades físicas y mecánicas totalmente diferentes a las que tendrán en la fase de servicio.

Sus componentes, sobre todo el mortero, son muy sensibles a los agentes climáticos, fundamentalmente al agua de lluvia, al excesivo calor, al viento y a las heladas. Las constantes mecánicas,

24. Se entiende por *chapado* la colocación de piezas de menor espesor (*"galletas"* o *"plaquetas"*) para permitir el paso de la fábrica por los elementos estructurales cuando no es posible el paso del muro con su espesor completo por delante de los mismos.

25. Esta disposición retranqueada de los soportes, no sólo respecto de la línea de fachada, sino también respecto de la tabica del forjado es muy beneficiosa, incluso desde el punto de vista estructural, pues permite un correcto anclaje de las armaduras de negativos de las vigas por detrás de la ferralla. Tiene el inconveniente, sin embargo, de que los soportes consumen una mayor superficie útil, originando *"mochetas"* más pronunciadas en el interior del edificio.



tales como la resistencia y módulo de elasticidad, son distintos a los valores asignados en el análisis, y las condiciones de sustentación suelen ser inferiores a las previstas.

Por ello, mientras se ejecutan las fábricas pueden estar sometidas a situaciones transitorias, en las que el efecto de las acciones es notablemente superior al considerado en el proyecto.

Protección de la fábrica contra los agentes climáticos

El agua de lluvia que cae sobre una fábrica recién ejecutada puede arrastrar los finos del mortero reduciendo considerablemente sus características físicas, puede disolver determinadas sales provocando la aparición de manchas y eflorescencias, y puede erosionar las juntas con el consiguiente deterioro del aspecto estético.

Las bajas temperaturas perjudican al mortero no sólo en la fase de su preparación, sino también durante la ejecución de la fábrica. El mortero de las juntas es muy sensible a las heladas debido a su alto contenido en agua y al reducido espesor de la junta. Si el mortero se hiela antes de fraguar se ven considerablemente reducidas su adherencia, resistencia y durabilidad.

El tiempo extremadamente seco y caluroso produce una rápida evaporación del agua del mortero que altera su proceso normal de fraguado y endurecimiento y puede provocar fisuras por retracción.

Las medidas de protección de la fábrica contra los agentes atmosféricos durante su ejecución y hasta que finalice el proceso de fraguado del mortero consisten, generalmente, en cubrir las partes ejecutadas y suspender los trabajos cuando las condiciones climáticas son extremas.

La protección contra el agua de lluvia se consigue fácilmente cubriendo la fábrica con plásticos, sobre todo en la parte superior.

En época de lluvia también es importante tomar precauciones para que no se vierta sobre la fábrica el agua acumulada en los forjados, terrazas y cubiertas. Las medidas a tomar en este sentido son las encaminadas a canalizar el agua convenientemente hacia el exterior. Para ello, es conveniente colocar lo antes posible elementos de protección, tales como alféizares, albardillas, umbrales, canalones y bajantes de pluviales provisionales. Esto se puede hacer inmediatamente después de finalizar el tendido y rejuntado de la fábrica.

En tiempo extremadamente seco y caluroso es fundamental mantener húmeda la fábrica. No se debe utilizar para ello el chorro a presión, ya que el agua podría arrastrar el mortero, quedando la junta muy debilitada. También se puede prevenir la excesiva evaporación de la humedad cubriendo la fábrica con un material resistente al vapor, por ejemplo con polietileno.

Durante los períodos de helada se deben evitar las operaciones de ejecución y rejuntado. Si hiela al comenzar la jornada o durante ésta, se deben interrumpir los trabajos y proteger con mantas de aislante térmico y plástico la fábrica recién ejecutada. Conviene inspeccionar las fábricas al comenzar la jornada y demoler las zonas afectadas de la jornada anterior.

Se pueden utilizar aditivos anticongelantes para el mortero, siempre que no tengan ningún efecto nocivo sobre la fábrica y siguiendo atentamente las indicaciones del fabricante en cuanto a dosificación y condiciones de ejecución.

Protección de la fábrica contra los agentes mecánicos

Los agentes mecánicos proceden de las operaciones propias del proceso constructivo de la obra o de las acciones exteriores sobre el elemento que tiene mermadas, durante su ejecución, las condiciones de sustentación o las propiedades resistentes.

Las agresiones mecánicas del primer tipo se deben habitualmente a las operaciones necesarias para otros trabajos en desarrollo, a las actividades de tráfico en la obra, a los procedimientos de vertido del hormigón y al uso del andamiaje. Las medidas de prevención contra los daños mecánicos producidos por estas causas consisten en proteger con guardavivos provisionales las partes más vulnerables como son las aristas en las esquinas y huecos, los zócalos y otros elementos salientes.

La protección contra acciones horizontales en la fase de ejecución de la fábrica es la operación más delicada, puesto que este tipo de acciones y las condiciones precarias de sustentación intervienen decisivamente en la estabilidad del elemento. Como medida de carácter general es aconsejable que los elementos de fábrica que vayan a ir trabados se levanten simultáneamente. En los casos en los que esto no sea posible, la fábrica debe permanecer arriostrada durante su construcción a elementos suficientemente estables,

tales como la propia estructura o los andamios, para evitar el vuelco. También se puede resolver el apeo provisional de los muros que durante su construcción queden temporalmente sin arriostrar con tablones cuyos extremos estén bien asegurados.

Si en la zona se prevén fuertes vientos puede ser necesario tener en cuenta esta contingencia en el dimensionado. Para ello, se debe calcular el muro teniendo en cuenta las acciones horizontales de presión y succión debidas al viento, en ambos sentidos perpendiculares al muro, y a la combinación de ambas.

Las acciones de carácter gravitatorio tienen menos trascendencia en los muros de cerramiento, aunque también se debe prever la situación transitoria que supone la fase de ejecución, sobre todo si se utilizan sistemas de *fachada autoportante*. La medida de prevención en este sentido consiste fundamentalmente en construir la fábrica avanzando en longitud, y no en altura.

La altura de la fábrica ejecutada en una jornada se debe limitar para evitar el aplastamiento del mortero fresco. Si el mortero colocado recientemente no ha adquirido aún la resistencia suficiente para soportar el peso, se puede producir el aplastamiento de los tendeles.

El ritmo de ejecución depende del espesor del muro, del tipo de mortero, de la forma y densidad de las piezas y del grado de exposición al viento. En cualquier caso, la altura máxima de una jornada no debe exceder una planta ni 3 metros. Esta precaución es especialmente importante si se utilizan morteros con retardador de fraguado.

3.4.13 Limpieza de la fábrica ejecutada

Las precauciones que tienen como objeto mantener la fábrica limpia a lo largo de su construcción repercuten significativamente en el coste del acabado final. Las manchas más frecuentes se deben a salpicaduras de mortero; para evitarlas es suficiente proteger las superficies mediante plásticos mientras se esté realizando algún trabajo que las pueda afectar como, por ejemplo, la aplicación de morteros proyectados, pinturas, pulido de terrazas, vertido de escombros, etc.

La limpieza se facilita notablemente si se realiza tan pronto como sea posible después de la aparición de las manchas y, preferiblemente, mediante cepillado antes de que los materiales que contienen cemento se endurezcan. No es aconsejable eliminar las manchas de mortero con estropajos o esponjas húmedas.

En cualquier caso, al final de la obra y cuando la fábrica esté totalmente seca, se deben realizar las labores de limpieza general, protegiendo antes todos los elementos de la fábrica que puedan sufrir algún deterioro y comenzando por la parte superior del elemento, con objeto de evitar el ensuciamiento de las zonas tratadas.

La limpieza de la fábrica terminada se puede llevar a cabo con un ácido comercial (clorhídrico o nítrico) disuelto en diez partes de agua, o con un producto limpiador específico para el tipo de pieza utilizada. Es conveniente realizar previamente algunas pruebas para conocer la efectividad y la reacción del ácido o del producto limpiador sobre las piezas.

La operación propia de limpieza se realiza practicando un cepillado enérgico sobre la zona a limpiar, previamente humedecida con agua, y un aclarado con la cantidad de agua necesaria y suficiente para arrastrar las sales disueltas. Las operaciones de cepillado y aclarado se deben realizar simultáneamente y sin demora entre ambas, con el fin de evitar que el ácido continúe actuando sobre la fábrica. En particular, si se emplea ácido nítrico para la limpieza, se debe tener en cuenta que puede llegar a oxidar algunos tipos de ladrillos cambiando su color. Es aconsejable que esta labor se confíe a especialistas.

Si se trata de limpiar eflorescencias es aconsejable intentar eliminarlas en seco mediante cepillado, ya que en muchos casos esta operación es suficiente para que desaparezcan.

Cuando se emplee el chorro de agua a presión, se debe realizar una prueba para comprobar que no se daña la junta de mortero.

3.5 Criterios de control

En general, el control de calidad en la construcción se centra en dos aspectos fundamentales: el control de recepción de los materiales y el control de ejecución.

Lo habitual es que la calidad de los materiales venga determinada por una serie de características que deben ser sometidas a control, mediante ensayos durante su fabricación. Los ensayos son operaciones técnicas que consisten en determinar si una o varias características de un producto, proceso o servicio están de acuerdo con un requisito determinado; se pueden llevar a cabo tanto en laboratorio como a pie de obra, dependiendo del elemento a comprobar. Si el objeto del ensayo está de acuerdo con la normativa se puede formalizar la garantía de calidad mediante alguno de los siguientes procedimientos:

- Normalización: procedimiento llevado a cabo, generalmente por la administración, con el fin de establecer soluciones para situaciones que se repiten.

- Homologación: procedimiento que supone la aprobación oficial de un producto o proceso y que tiene carácter obligatorio.

- Certificación: procedimiento de carácter voluntario que se solicita a un organismo reconocido para que emita una serie de documentos demostrando el que objeto al que se refiere se ajusta a las normas técnicas. El resultado de la certificación se materializa en la emisión de *Marcas* o *Sellos de Calidad*[26].

El control de ejecución se realiza durante la construcción del edificio, con el objetivo de conseguir la calidad prevista en cada una de las partidas, así como la calidad global del producto. Se puede realizar a través de tres vías diferentes:

- Control de calidad realizado por los técnicos directores de obra.

- Control de calidad llevado a cabo según el programa descrito en el proyecto de ejecución.

- Control de calidad realizado por la constructora a través de sus propios protocolos.

Los documentos de referencia, en los que se establecen los criterios y niveles de control de calidad correspondientes a los elementos de fábrica son el DB SE-F, Capítulo 8 *"Control de la Ejecución"* y el Eurocódigo 6, partes 1-1 y 2.

3.5.1 Control de recepción de materiales

Según la Ley de Ordenación de la Edificación, el director de la ejecución material es el responsable último de la calidad de los materiales que llegan y son utilizados en obra; por lo tanto es este agente, o la persona debidamente acreditada en quien delegue, el responsable de aplicar un control de calidad adecuado, que asegure la buena construcción.

Independientemente de lo que se indica a continuación, es aconsejable que todos los materiales utilizados en la obra garanticen su calidad, mediante sellos o marcas de conformidad con las normas exigidas para cada uno de ellos.

Control de recepción de los ladrillos

Los procedimientos de control de calidad de los ladrillos se regulan por las siguientes normas:

- UNE 67021:1978 *"Cerámica. Control de calidad de fabricación de elementos cerámicos de tierra cocida para la construcción".*

- UNE 67022:1978 *"Cerámica. Toma de muestras para el control estadístico en recepción de la calidad de productos cerámicos utilizados en la construcción"*.

- UNE 67023:1978 *"Cerámica. Toma de muestras para el control estadístico en fábrica de la calidad de productos cerámicos utilizados en la construcción"*.

El control de recepción de las piezas cerámicas constitutivas de la obra de fábrica, en general, consta de dos etapas:

- *Control previo*

Implica la aceptación provisional de la *partida*[27], debiéndose comprobar el cumplimiento de lo especificado en cuanto a identificación de productos, características de aspecto y peso medio y/o densidad aparente media de las piezas.

El suministrador de ladrillos debe facilitar, si así lo requiere la dirección facultativa, con suficiente antelación al comienzo del suministro, dos *muestras*[28] tomadas al azar en la fábrica. Una de ellas se envía al laboratorio aceptado por la dirección facultativa para verificar que cumple con las especificacio-

nes del pliego de prescripciones técnicas particulares de la obra, mientras que la otra, llamada *muestra de contraste*, debe permanecer en la obra almacenada en un local cerrado, hasta transcurrido un mínimo de un mes desde la finalización de las obras de fábrica del ladrillo correspondiente, para que sirva como referencia de comparación para las sucesivas partidas.

Cuando el material llega a obra, el director debe realizar una inspección ocular de los productos comprobando que las piezas están en buen estado y el material es identificable con lo especificado en los albaranes y el empaquetado, y que el producto se corresponde con la muestra aceptada.

Si las comprobaciones son satisfactorias, el director puede aceptar la partida o, en su caso, solicitar ensayos de control. En caso de no ser satisfactorias las comprobaciones el director puede rechazar la partida. Cuando no sea preciso realizar ensayos de laboratorio, la dirección facultativa puede ordenar la conservación de muestras hasta un mes después de la ejecución de las fábricas correspondientes.

Cuando los ladrillos suministrados estén en posesión de un sello o marca de calidad emitidos por la Administración u organismo reconocido, o estén en posesión del marcado CE, la dirección facultativa puede reducir el control de recepción a la identificación y comprobación de las características aparentes.

En el caso de piezas cerámicas para fábricas, en general se recomienda la marca AENOR. Si las piezas disponen de marca AENOR, no es necesario efectuar ensayos; solamente hay que inspeccionar que las piezas coinciden con el pedido y que no se han producido roturas durante el transporte. Para ello es suficiente seleccionar un palé por cada partida.

- *Ensayos de control*

Sirven para comprobar los aspectos relacionados con el correcto comportamiento físico y mecánico de la fábrica, como son las características geométricas, absorción, densidad, sección neta, bruta e índice de macizo, resistencia a compresión y cualquier otra característica pactada.

En el caso de que se vayan a realizar ensayos, bien porque sea necesario o bien porque así lo disponga la dirección facultativa, por tener previsto un plan de control superior al habitual, las muestras se deben tomar al azar, del mismo palé que haya servido para la inspección previa.

La extracción de muestras debe ser realizada por la dirección facultativa o persona en quien delegue, teniendo derecho a presenciarla un representante del suministrador. Las muestras se consideran representativas de la partida recibida en obra. El número de muestras tomado será suficiente para dejar piezas de reserva, con objeto de realizar posibles ensayos de contraste en caso de conflicto o dudas. Si existen ensayos realizados por un laboratorio ajeno a la fábrica, sólo hay que extraer las muestras de contraste.

Las muestras se deben empaquetar para que puedan ser almacenadas con facilidad y con garantía de que no puedan ser alteradas.

26. Las *Marcas* y *Sellos de Calidad* son distintivos concedidos por un organismo autorizado y competente, que acompaña siempre a los productos que cumplen determinadas especificaciones técnicas.

27. Se denomina *"partida"* al conjunto de piezas de la misma designación y procedencia que se reciben en la obra en una misma unidad de transporte. Cuando en un mismo día se reciben varias unidades de transporte con piezas de la misma designación y procedencia puede considerarse que el conjunto constituye la partida.

28. Se denomina *"muestra"* al conjunto de piezas extraídas al azar de un lote y sobre las cuales se van a realizar los ensayos correspondientes. El *"lote"* es el conjunto de piezas de un mismo tipo que se van a juzgar conjuntamente.

Cada muestra llevará una etiqueta que permita su correcta identificación, debiendo figurar en ellas, como mínimo, los siguientes datos:

- Nombre del fabricante y, en su caso, marca comercial.
- Designación de la clase y tipo de ladrillo, sus dimensiones nominales, características físicas y resistencia a compresión.
- Nombre de la obra.
- Número de la partida.
- Fecha de la toma de muestras.

Los ensayos de control de piezas cerámicas deben ser realizados en laboratorios debidamente acreditados por la administración en el área de materiales de arcilla cocida.

Los parámetros que se determinan por ensayo para verificar las características de los ladrillos a que hace referencia todo lo expuesto anteriormente, son los siguientes:

Características dimensionales y de forma de los ladrillos

El ensayo consiste en la medición de las dimensiones y comprobación de la forma, sobre seis piezas tomadas al azar de la muestra. El espesor de las paredes y las perforaciones se comprueban de forma similar.

Características mecánicas y físicas de los ladrillos

Los principales aspectos a comprobar son los siguientes:

- Resistencia a compresión: sobre seis ladrillos de la muestra.

- Heladicidad: sobre doce ladrillos de la muestra, siendo la calificación de *"heladizos"* o *"no heladizos"* el resultado del ensayo.

- Eflorescencias: sobre doce ladrillos de la muestra, siendo la calificación de *"eflorescido"* o *"no eflorescido"* el resultado del ensayo.

- Masa: sobre seis ladrillos de la muestra, desecando con anterioridad las piezas a una temperatura comprendida entre 100°C y 110°C hasta obtener un valor constante. Como resultado se toma el valor medio.

Control de recepción del cemento

El control de recepción del cemento es obligatorio en todos los casos. El procedimiento comprende, al menos, una primera fase de comprobación de la documentación, incluidos los distintivos de calidad y el etiquetado, y una segunda fase, que consiste en una inspección visual del suministro. En previsión de que el responsable de la recepción pudiera considerar necesario realizar ensayos, se puede incluir una tercera fase, potestativa, de comprobación del tipo y clase del cemento, así como de sus características químicas, físicas y mecánicas, mediante la realización de ensayos de identificación y, en su caso, ensayos complementarios.

- *Control del cemento. Primera fase: comprobación de la documentación y del etiquetado*

Al inicio del suministro, el responsable de la recepción, o la persona en quien delegue, debe comprobar que, tanto la documentación que debe facilitar el suministrador, como el etiquetado reglamentario son conformes a lo establecido en la Instrucción RC-08. La documentación debe contener, al menos, lo siguiente:

- Hoja de suministro o albarán.

- Etiquetado.

- Documentos de Conformidad, en particular la documentación correspondiente al marcado CE o, en su caso, a la Certificación de Conformidad del Real Decreto 1313/1988.

- Certificado de garantía del fabricante firmado por persona física, en el caso de aquellos cementos no sujetos al marcado CE.

- Documentación de los distintivos de calidad y, en su caso, la del reconocimiento del distintivo. En particular, el certificado que acredite que el distintivo declarado y, en su caso, el oficialmente reconocido, están vigentes.

El responsable de la recepción, o la persona en quien delegue, deben comprobar que la designación que figura en el albarán, o en la documentación o, en su caso, en los envases, corresponde al tipo y a la clase de resistencia del cemento especificado en el proyecto o en el pedido. Esto es de especial trascendencia en el caso de usos para los

que se han establecido limitaciones o, incluso, prohibiciones totales.

Esta documentación debe ser registrada, archivada y custodiada por el responsable de la recepción, para cada tipo de cemento suministrado, junto con las actas de toma de muestras.

A los efectos de esta fase, el suministro es conforme cuando el etiquetado y la documentación que deben acompañar a la remesa se corresponden con los del cemento solicitado, están completos y reúnen todos los requisitos establecidos.

- *Control del cemento.*

Segunda fase: inspección visual

Una vez superada la fase de control documental, el responsable de la recepción debe, para la aceptación de la remesa, someter el cemento suministrado a una inspección visual cuando, en función del modo de transporte, o del estado de los envases en el momento de su suministro, estime necesario comprobar que el cemento no ha sufrido alteraciones o mezclas indeseables.

A pesar de la dificultad de evaluar el estado del cemento mediante una inspección visual, la Instrucción RC-08 incluye la realización de este tipo de examen para valorar la presencia de ciertos síntomas debidos, en la mayoría de los casos, a deficiencias en el almacenamiento, la carga o el transporte del cemento ocurridos desde su fabricación hasta su llegada al lugar de recepción.

A los efectos de esta fase, el suministro es conforme cuando el cemento no presenta síntomas de meteorización relevante en relación con el volumen suministrado, no contiene cuerpos extraños y no presenta de manera evidente muestras de heterogeneidad en su aspecto o color. Si la temperatura del cemento al llegar a la obra es superior a 70°C, se debe comprobar también que no tiene tendencia a experimentar falso fraguado.

- *Control del cemento.*

Tercera fase: realización de ensayos

Esta tercera fase de la recepción es potestativa y de aplicación cuando el proyecto así lo establezca o, en cualquier caso, cuando el responsable de la recepción así lo decida por haber obtenido resultados no conformes en las fases anteriores o por haber detectado defectos en el uso de los cementos procedentes de remesas anteriores. Los ensayos se deben realizar de acuerdo con los Anejos 5 y 6 de la Instrucción RC-08.

Los cementos de albañilería no precisan ser sometidos a ensayos de recepción, salvo que así lo indique el pliego de prescripciones técnicas particulares o la dirección facultativa.

En caso de cementos que estén en posesión de un distintivo de calidad de carácter voluntario oficialmente reconocido, como ocurre con aquellos que disponen de la marca AENOR, la dirección facultativa o el responsable de la recepción pueden dispensar de los ensayos que se indican, para cada caso, en la *Instrucción RC-08*.

A los efectos de esta fase, la remesa es conforme cuando el cemento satisface los criterios establecidos en los Anejos 5 y 6 de la Instrucción RC-08.

Control de recepción del mortero

Los morteros industriales deben estar en posesión del marcado CE obligatorio para este tipo de materiales. El control de recepción exige comprobar la etiqueta CE en el saco, albarán o cualquier documento técnico suministrado por el fabricante.

En el caso de morteros hechos en obra es preciso ensayar las características requeridas en su correspondiente norma. Se debe realizar un ensayo de las características generales al inicio de las obras y un ensayo con periodicidad mensual de la resistencia a compresión y la absorción de agua por capilaridad.

3.5.2 Control de ejecución de la fábrica

En el transcurso de la construcción de un elemento de fábrica se deben realizar comprobaciones cuyo número y forma dependen del tipo de edificación, del volumen de la obra y del nivel de control establecido. Los controles a realizar durante la ejecución, el número de los mismos y las condiciones de aceptación o rechazo, tienen como objetivo que las unidades ejecutadas respondan a las especificaciones de proyecto y sean de la calidad suficiente para cumplir las funciones que les son inherentes.

El responsable de calidad debe planificar el control a realizar. La planificación del control es importante porque obliga a definir los puntos de inspección del edificio antes de ejecutar la revisión, evitando así improvisaciones.

Desde el punto de vista del nivel de control de ejecución de las fábricas,

El DB SE-F establecen tres categorías de ejecución: A, B y C, con los requisitos siguientes:

Control de la ejecución de la fábrica: Categoría A:

- Las piezas tienen certificación de sus especificaciones sobre tipo y grupo, dimensiones y tolerancias, resistencia normalizada, succión y expansión por humedad.

- El mortero tiene certificación de su resistencia a la compresión y a la flexotracción a 7 y 28 días.

- La fábrica tiene un certificado de ensayos previos a compresión, a tracción y a corte según las normas UNE vigentes en el momento.

- Durante la ejecución se realiza una inspección diaria de la obra ejecutada, así como el control y la supervisión continuada por parte del constructor.

Control de la ejecución de la fábrica: Categoría B:

- Las piezas tienen las certificaciones correspondientes a la categoría A, excepto en lo que atañe a las propiedades de succión y expansión por humedad.

- El mortero tiene las certificaciones sobre sus resistencias a compresión y a flexotracción a 28 días.

- Durante la ejecución se realiza una inspección diaria de la obra ejecutada, así como el control y la supervisión continuada por parte del constructor.

Control de la ejecución de la fábrica: Categoría C:

- En los casos en los que no se cumpla alguno de los requisitos establecidos para la categoría B.

En los elementos de fábrica armada se debe especificar sólo categorías A ó B. Sólo se admite la mezcla manual del mortero en proyectos con categoría de ejecución C. En cualquier caso, si alguna de las pruebas de recepción de piezas falla o no se dan las condiciones de categoría de fabricación supuesta, o no se alcanza el tipo de control de ejecución previsto en el proyecto, se puede proceder a un recálculo de la estructura a partir de los parámetros constatados y, en su caso, del coeficiente de seguridad apropiado al caso.

Tabla 3.7 Tolerancias de ejecución para elementos de fábrica

Posición		Tolerancia (mm)
Replanteo	Entre ejes parciales	**10**
	Entre ejes extremos	**20**
Planeidad(1)	En 1 m	**5**
	En 10 m	**20**
Desplome	En la altura de piso	**20**
	En la altura total del edificio	**50**
Axialidad		**20**
Horizontalidad de las hiladas	En 1 m	**2**
Altura	Parcial	**15**
	Total	**25**
Espesor de juntas	En tendel	**2**
	En llaga	**4**
Espesor del muro(2)	De la hoja del muro	**25**
	Del muro capuchino	**10**
Aplomado de llagas	En 3 m	**10**
	En toda la altura	**15**

(1) La planeidad se mide a partir de una línea recta que une dos puntos cualesquiera del elemento de fábrica.

(2) Excluyendo el caso en que el espesor de la hoja está directamente vinculada a las tolerancias de fabricación de las piezas (en fábricas a soga o a tizón) se puede llegar al 5% del espesor de la hoja.

Tolerancias de ejecución de las fábricas

Cuando en el proyecto no se definan las tolerancias de ejecución de muros verticales, se pueden emplear los valores de la tabla 3.7, que se consideran tomadas en cuenta en las fórmulas de cálculo.

4. Condiciones

4.1 Condiciones de seguridad en el trabajo 109

4.1.1 Normativa en materia de prevención de riesgos laborales 109
4.1.2 Seguridad y salud en las obras de construcción 113
4.1.3 Medidas de seguridad específicas para la ejecución de las unidades de fábrica 117

4.2 Condiciones de protección del medio ambiente 127

4.2.1 Control del consumo de recursos naturales 128
4.2.2 Control de emisiones contaminantes 128
4.2.3 Gestión de residuos 130

4.3 Condiciones de uso y mantenimiento 133

4.3.1 Condiciones generales de mantenimiento según el Código Técnico 133
4.3.2 Condiciones específicas de mantenimiento de las fachadas de ladrillo 135

GEO HIDROL

4. Condiciones

4.1 Condiciones de seguridad en el trabajo

La gestión de la prevención de riesgos, con independencia del sector al cual pertenezca una empresa, constituye una necesidad indiscutible. Sin embargo, las medidas incorporadas en la normativa en este aspecto no han tenido siempre la eficacia deseable, sobre todo debido a la carencia de modelos existentes en el mercado para potenciar esta gestión, y a que la posición que ocupa la prevención en la escala de prioridades de muchas empresas no está entre los primeros lugares.

En este sentido, la entrada en vigor de la Ley 31/1995 de 8 de noviembre de *"Prevención de riesgos laborales"*[1] marcó un hito en todos los sectores de la actividad laboral. La LPRL no sólo reclama la necesidad de gestionar la prevención sino que además exige la integración de la prevención de riesgos laborales en el conjunto de la actividad y de las personas de la organización empresarial.

El sector de la construcción y, en particular, los trabajos de albañilería, que se caracterizan por la movilidad, temporalidad y provisionalidad, presentan una especial singularidad con relación al resto de los sectores profesionales en el ámbito de la prevención de riesgos laborales.

1. En adelante LPRL.

Sin duda, uno de los principales problemas que actualmente padece el sector de la construcción es el elevado grado de siniestralidad. La actividad constructiva conlleva situaciones de riesgo diferentes de la industria típica que, por su frecuencia y gravedad, presentan peculiaridades que hacen necesaria una aclaración más detallada de los aspectos generales de la LPRL, aplicados a los casos concretos que se plantean cotidianamente en las obras. En esta sección se exponen las condiciones generales de seguridad que afectan a las obras de construcción, haciendo especial hincapié en las condiciones particulares que tienen relevancia en los trabajos de ejecución de fábricas.

4.1.1 Normativa en materia de prevención de riesgos laborales

Los aspectos preventivos de riesgos laborales en el sector de la construcción están recogidos en un conjunto de leyes, decretos y reglamentos, a través de los cuales la administración regula las condiciones de seguridad del proceso edificatorio, con el objeto de garantizar la salud, la integridad física y la vida de los trabajadores de las obras. En la actualidad, este cuerpo normativo está constituido por la siguiente relación, no exhaustiva, de textos legales.

- *Leyes*

  - Ley 31/1995 de 8 de noviembre de *"Prevención de riesgos laborales"* (B.O.E. 269 de 10 de noviembre), modificada por la Ley 54/2003 de 12 de diciembre de *"Reforma del marco normativo de la prevención de riesgos laborales"* (B.O.E. 298 de 13 de diciembre).

  - Ley 50/1998 de 30 de diciembre de *"Medidas fiscales, administrativas y del orden social"* (B.O.E. 313 de 31 de diciembre).

  - Ley 38/1999 de 5 de noviembre de *"Ordenación de la edificación"* (B.O.E. 266 de 6 de noviembre).

  - Ley 32/2006 de 18 de octubre reguladora de la *"Subcontratación en el sector de la construcción"* (B.O.E. 250 de 19 de octubre).

- *Reales Decretos*

  - Real Decreto 1627/1997 de 24 de octubre sobre *"Disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción y obligatoriedad del estudio de seguridad y salud en proyectos de obras"* (B.O.E. 256 de 25 de octubre), y Resolución de 8 de abril de 1999 sobre *"Delegación de facultades en materia de seguridad y salud en las obras de construcción"* (B.O.E. 91 de 16 de abril), que lo complementa.

  - Real Decreto 39/1997 de 17 de enero por el que se aprueba el *"Reglamento de los servicios de prevención de riesgos laborales"* (B.O.E. 27 de 31 de enero), y Real Decreto 780/1998 de 30 de abril (B.O.E. 104 de 1 de mayo) por el que se modifica.

  - Real Decreto 1215/1997 de 18 de julio por el que se establecen las *"Disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo"* (B.O.E. 188 de 7 de agosto), y Real Decreto 2177/2004 de 12 de noviembre (B.O.E. 274 de 13 noviembre) que lo modifica en materia referente a los *trabajos temporales en altura*.

  - Real Decreto 314/2006 de 17 de marzo por el que se aprueba el *"Código técnico de la edificación"* (B.O.E. 74 de 28 de marzo), y Real Decreto 1371/2007 de 19 de octubre (B.O.E. 254 de 23 de octubre), por el que se modifica.

  - Real Decreto 604/2006 de 19 de mayo por el que se modifica el Real Decreto 39/1997 y se aprueba el *"Reglamento de los servicios de prevención"* (B.O.E. 127 de 29 de mayo).

  - Real Decreto 597/2007 de 4 de mayo sobre *"Sanciones por infracciones muy graves en materia de prevención de riesgos laborales"* (B.O.E. 108 de 5 de mayo).

  - Real Decreto 1109/2007 de 24 de agosto (B.O.E. 204 de 25 de agosto) que desarrolla la Ley 32/2006 de 18 de octubre reguladora de la *"Subcontratación en el sector de la construcción"*.

- *Recursos informativos sobre seguridad y salud en la construcción*

  - *Biblioteca electrónica de seguridad y salud en la construcción*. ELCOHS.

  - *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a las obras de construcción*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

  - *Planes y actuaciones de carácter formativo e informativo*. Comisión Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Grupo de Trabajo de Construcción.

  - *Documentación sobre riesgos laborales*. Instituto de Trabajo y Seguridad Social: Normativa y Documentación.

Ley de *Prevención de Riesgos Laborales* (LPRL)

El 11 de febrero de 1996 entró en vigor la Ley 31/1995 de 8 de noviembre de *"Prevención de riesgos laborales"*, en la que se desarrolla una política de protección de la seguridad y la salud de los trabajadores mediante la prevención de los riesgos derivados de su trabajo.

Esta ley vino a suplir la necesidad de un nuevo enfoque normativo cuyos objetivos eran poner término a la falta de visión unitaria de la prevención de riesgos laborales en nuestro país, actualizar regulaciones ya desfasadas, adecuar la legislación española a la legislación comunitaria sobre seguridad y salud en el trabajo y regular situaciones nuevas no contempladas con anterioridad.

La aplicación de la LPRL pretende no sólo la ordenación de las obligaciones y responsabilidades de los agentes relacionados con el hecho laboral, sino fomentar una nueva cultura de prevención. El esfuerzo realizado por el Estado y las Comunidades Autónomas, así como por los agentes sociales, las empresas y los trabajadores en materia de prevención de riesgos laborales, ha dotado a nuestro país de un marco homologable en esta materia a la política común de seguridad y salud de la Unión Europea y a las políticas desarrolladas por sus Estados miembros.

Sin embargo, el aumento de los accidentes de trabajo y la subsistencia de índices de siniestralidad laboral elevados, así como la adecuación de la normativa a las nuevas formas de organización del trabajo, especialmente en las diversas formas de subcontratación que existen el sector de la construcción, dio lugar a un conjunto de medidas refrendadas por el Pleno de la Comisión Nacional de Seguridad y Salud de 29 de enero de 2003 y recogidas en la Ley 54/2003 de 12 de diciembre de *"Reforma del marco normativo de la prevención de riesgos laborales"* (B.O.E. 298 de 13 de diciembre).

Los objetivos básicos de esta ley que reforma a la anterior son los siguientes:

- Combatir de manera activa la siniestralidad laboral.
- Fomentar una cultura de prevención de los riesgos en el trabajo.
- Reforzar la necesidad de integrar la prevención de los riesgos laborales en los sistemas de gestión de empresa.
- Mejorar el control del cumplimiento de la normativa de prevención de riesgos laborales y reforzar la función de vigilancia y control, en el marco de las Comisiones Territoriales de la Inspección de Trabajo y Seguridad Social.

Real Decreto sobre *Disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción*

Los aspectos técnicos de las medidas preventivas establecidas en la LPRL se desarrollan en normas reglamentarias, según se indica en el artículo 6 de dicha Ley. Entre ellas se encuentran las relacionadas con la seguridad y la salud en las obras de construcción.

La aplicación de lo dispuesto en la LPRL a las obras de construcción está regulado por el Real Decreto 1627/1997 de 24 de octubre (B.O.E. de 25/10/97), por el que se establecen las *"Disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción".* Este Real Decreto es una transposición al derecho español de la Directiva Europea 92/57/CEE de 24 de junio, que establece las *"Disposiciones mínimas de seguridad y salud que deben aplicarse en las obras de construcción temporales o móviles".*

El texto del Real Decreto pretende, como es habitual en cualquier transposición de una directiva comunitaria, la integración correcta de los objetivos en las instituciones y normas propias del derecho español.

En primer lugar, el Real Decreto tiene en cuenta la presencia en las obras de construcción de sujetos no habituales en otros ámbitos. Así, la norma se ocupa de las obligaciones del promotor, del proyectista, del contratista, del subcontratista[2] y de los trabajadores autónomos, muy habituales en las obras.

Además, y como consecuencia de lo dispuesto en la Directiva que se traspone, se introduce la figura del *"Coordinador en materia de seguridad y salud"*, que debe designar el promotor siempre que en la elaboración del proyecto intervengan varios proyectistas o cuando en la ejecución de la obra intervenga más de una empresa. En caso de no ser necesaria la figura del coordinador por existir un único proyectista, recae sobre este último la responsabilidad de aplicar al proyecto de obra los principios generales de prevención que establece el Decreto[3].

En segundo lugar, el Real Decreto tiene en cuenta aquellos aspectos que se han revelado de utilidad para la seguridad en las obras y que estaban presentes en el Real Decreto 555/1986 de 21 de febrero, que en cierta manera inspiró el contenido de la Directiva Europea 92/57/CEE. El aspecto fundamental fue formalizar la obligatoriedad de elaborar un *"Estudio de seguridad y salud"* en la fase de redacción de los proyectos de edificación y obras públicas. A diferencia de la normativa anterior, el Real Decreto 1627/1997 incluye en su ámbito de aplicación a cualquier obra, pública o privada, en la que se realicen trabajos de construcción o ingeniería civil.

Por último, el Real Decreto establece los mecanismos específicos para la aplicación de la LPRL y el Real Decreto 39/1997 de 17 de enero, por el que se aprueba el *"Reglamento de los servicios de prevención",* en un sector de actividad tan peculiar como es el relativo a las obras de construcción.

El Real Decreto 1627/1997 se estructura en dos partes, una jurídica y otra técnica. La jurídica incluye el articulado agrupado en cuatro capítulos así como las disposiciones transitoria, derogatoria y finales. La parte técnica se materializa, a su vez, en cuatro anexos; el primero contiene una relación no exhaustiva de las obras de construcción e ingeniería civil; el segundo, una relación de los trabajos que implican riesgos especiales; el tercero recoge el contenido del aviso previo; y el cuarto establece las disposiciones mínimas de seguridad y salud que deben ser aplicadas en las obras de construcción, sobre el que se insistirá más adelante.

4.1.2 Seguridad y salud en las obras de construcción

La aplicación específica de la normativa en materia de prevención de riesgos laborales que afecta a las obras de construcción queda sujeta a lo dispuesto en el último *"Convenio colectivo estatal de la construcción"* para el período comprendido entre 2007 y 2011, publicado en el B.O.E. de 17 de agosto de 2007, y que entró en vigor el 10 de septiembre del mismo año. Y lo hace en virtud de la Ley 32/2006 de *"Subcontratación en el sector de la construcción"* dado que mejora las condiciones expuestas en la LPRL[4].

El Convenio viene a refrendar todas las disposiciones legales anteriormente resumidas y, en particular, la mencionada Ley 32/2006 reguladora de la *"Subcontratación en el sector de la construcción"* y el R.D. 1109/2007 que la desarrolla.

En este sentido, el preámbulo del Convenio afirma que *"... las partes firmantes del presente Convenio manifiestan que son conscientes de la necesidad de llevar a cabo una política operativa en materia de prevención de riesgos profesionales, de adoptar las medidas necesarias para la eliminación o reducción de los factores de riesgo y de la consiguiente disminución de los accidentes del trabajo y de las enfermedades profesionales en las empresas, así como del fomento de la información y formación de los trabajadores y de sus representantes".*

En el artículo 131.4 establece que *"las acciones a elaborar estarán dirigidas prioritariamente al empresario, por ser la figura fundamental en la implantación del sistema de gestión de la prevención y en la formación e información de los trabajadores".*

Principios generales de prevención y seguridad

Los principios generales de prevención en materia de seguridad y salud previstos en el artículo 15 de la LPRL deben ser tomados en consideración por el proyectista en las fases de concepción, estudio y elaboración del proyecto de obra y, en particular, al tomar las decisiones constructivas, técnicas y de organización, y al estimar la duración requerida para las distintas fases del trabajo.

Los principios generales en materia preventiva que figuran en el artículo 15.1 de la LPRL son los siguientes:

a. Evitar los riesgos.

b. Evaluar los riesgos que no se puedan evitar.

c. Combatir los riesgos en su origen.

d. Adaptar el trabajo a la persona, así como a la elección de los equipos y métodos, con miras a atenuar el trabajo monótono y repetitivo y a reducir los efectos del mismo en la salud.

e. Tener en cuenta la evolución de la técnica.

f. Sustituir lo peligroso por lo que entrañe poco o ningún peligro.

g. Planificar la prevención, buscando un conjunto coherente que integre en ella la técnica, la organización y condiciones de trabajo, las relaciones sociales y la influencia de los factores ambientales.

h. Adoptar medidas que antepongan la protección colectiva a la individual.

i. Dar las debidas instrucciones a los trabajadores.

La aplicación de estos principios supone un cambio significativo a la hora de planificar y elaborar los proyectos, ya que implica tomar decisiones sobre la organización y los sistemas de ejecución de la obra. Tradicionalmente estas cuestiones se posponían a la fase de ejecución, siendo resueltas la mayoría de las veces por los propios contratistas. Actualmente, estos aspectos deben quedar recogidos en el *Estudio de Seguridad y Salud* que complementa al proyecto de ejecución, y en el *Plan de Seguridad y Salud*, que desarrolla contratista[5].

2. El *contratista* y, en su caso, el *subcontratista* se consideran los *empresarios* en las obras de construcción.

3. Es aconsejable que el técnico competente que ejerce la dirección facultativa posea conocimientos preventivos, a fin de facilitar un adecuado desarrollo de las obligaciones que se le asignan en el R.D. 1627/97.

4. Al ser la LPRL una *"ley de mínimos"* queda clara la potestad de las normas posteriores para mejorar sus disposiciones.

5. Aunque son complementarios no se deben confundir los dos documentos. *El Estudio de Seguridad y Salud* se refiere a la obra de construcción en particular, mientras que el *Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo* se refiere a la empresa como unidad. Según el presupuesto de la obra y su duración puede ser suficiente un *Estudio Básico de Seguridad y Salud.*

Estudio de Seguridad y Salud

La obligatoriedad de elaborar un *Estudio de Seguridad y Salud* se estableció en la Directiva Europea 92/57/CEE, anteriormente citada. Se debe realizar en la fase de redacción de los proyectos de edificación y obras públicas.

El *Estudio de Seguridad y Salud* de una determinada obra debe ser un documento coherente con el proyecto de ejecución que, formando parte del mismo y partiendo de todos los elementos proyectados y de una hipótesis de ejecución (incluidos los previsibles trabajos posteriores), contiene las medidas de prevención y protección técnica necesarias para la realización de la obra en las condiciones adecuadas de seguridad y salud[6]. Constituye el documento base para que las empresas constructoras, contratistas, subcontratistas y trabajadores autónomos que participen en las obras, antes del comienzo de la actividad en las mismas, puedan elaborar el *Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo.*

Según el artículo 5.2 del Real Decreto 1627/1997 el *Estudio de Seguridad y Salud* debe contener, como mínimo, los siguientes documentos:

- Memoria descriptiva de los procedimientos, equipos técnicos y medios auxiliares que hayan de utilizarse o cuya utilización pueda preverse; identificación de los riesgos laborales que puedan ser evitados, indicando a tal efecto las medidas técnicas necesarias para ello; relación de los riesgos laborales que no puedan eliminarse conforme a lo señalado anteriormente, especificando las medidas preventivas y disposiciones técnicas tendentes a controlar y reducir dichos riesgos y valorando su eficacia, en especial cuando se propongan medidas alternativas.

  Asimismo, se incluirá la descripción de los servicios sanitarios y comunes de que deberá estar dotado el centro de trabajo de la obra, en función del número de trabajadores que vayan a utilizarlos.

  En la elaboración de la memoria habrán de tenerse en cuenta las condiciones del entorno en que se realice la obra, así como la tipología y características de los materiales y elementos que hayan de utilizarse, determinación del proceso constructivo y orden de ejecución de los trabajos.

- Pliego de condiciones particulares en el que se tendrán en cuenta las normas legales y reglamentarias aplicables a las especificaciones técnicas propias de la obra de que se trate, así como las prescripciones que se habrán de cumplir en relación con las características, la utilización y la conservación de las máquinas, útiles, herramientas, sistemas y equipos preventivos.

- Planos en los que se desarrollarán los gráficos y esquemas necesarios para la mejor definición y comprensión de las medidas preventivas definidas en la Memoria, con expresión de las especificaciones técnicas necesarias.

- Mediciones de todas aquellas unidades o elementos de seguridad y salud en el trabajo que hayan sido definidos o proyectados.

- Presupuesto que cuantifique el conjunto de gastos previstos para la aplicación y ejecución del Estudio de Seguridad y Salud.

De lo anterior cabe destacar que el *Estudio de Seguridad y Salud* ha de contener una descripción de los riesgos laborales que pueden ser evitados, indicando a tal efecto las medidas preventivas adecuadas; y la relación de aquellos otros que no se pueden evitar, indicando las protecciones técnicas encaminadas a reducirlos y las medidas preventivas que los controlen. También deben constar explícitamente los tipos y características de los materiales que se vayan a usar, la determinación del proceso constructivo y el orden de ejecución de los trabajos.

Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo

El *Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo* es el documento o conjunto de documentos elaborados por el contratista que, coherentes con el proyecto y partiendo de un Estudio o Estudio Básico de Seguridad y Salud adaptado a su propio sistema constructivo, permite desarrollar los trabajos en las debidas condiciones preventivas. En el *Plan de Seguridad* se analizan, estudian, desarrollan y complementan las previsiones contenidas en el Estudio de Seguridad, en función del propio sistema de ejecución de la obra. Puede recoger las medidas de prevención alternativas que el contratista crea oportunas siempre que se justifiquen técnicamente y que tales cambios no impliquen la disminución de los niveles de prevención previstos[7].

El *Plan de Seguridad y Salud* debe ser aprobado por el Coordinador de Seguridad y Salud en la fase de ejecución de las obras (o por la Dirección Facultativa si no fuere precisa la figura del Coordinador). Puede ser modificado por el contratista en función del proceso de ejecución y de la evolución de los trabajos, de las posibles incidencias o de las modificaciones que pueden surgir a lo largo de la obra, pero siempre con la aprobación expresa del agente que corresponda. Los que intervengan en la ejecución de la obra pueden presentar las sugerencias y alternativas que estimen oportunas. A tal efecto, el *Plan de Seguridad y Salud* debe estar en la obra a disposición permanente de los mismos.

Los contratistas y los subcontratistas son los responsables de la ejecución correcta de las medidas preventivas fijadas en el *Plan de Seguridad y Salud* en lo relativo a las obligaciones que les correspondan a ellos directamente o, en su caso, a los trabajadores autónomos por ellos contratados. Las responsabilidades de los coordinadores, de la dirección facultativa y del promotor no eximen de sus responsabilidades a los contratistas y subcontratistas.

Disposiciones mínimas de seguridad y salud que deben aplicarse en las obras

Las disposiciones mínimas de carácter general que afectan a la seguridad y salud en las obras de construcción constituyen el contenido del Anexo IV del Real Decreto 39/1997.

Este Anexo está dividido en tres partes:

- Parte A: disposiciones mínimas generales relativas a los lugares de trabajo en las obras.
- Parte B: disposiciones mínimas específicas relativas a los puestos de trabajo en las obras en el interior de los locales.
- Parte C: disposiciones mínimas específicas relativas a los puestos de trabajo en las obras en el exterior de los locales.

La parte A del anexo es de aplicación a la totalidad de la obra, incluidos los puestos de trabajo en las obras en el interior y en el exterior de los locales. Las otras dos partes sólo son de aplicación a los puestos de trabajo ubicados en las zonas específicas a las que se refieren.

Se relacionan a continuación los aspectos a los que obligan las disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras, agrupados en las tres categorías que se corresponden con cada una de las tres partes del citado Anexo IV del Real Decreto 39/1997.

6. En este sentido, el *Estudio de Seguridad y Salud* debe contener la totalidad de las actividades que se prevea realizar en la obra, incluidas aquellas para las que administrativamente se exija un proyecto específico, por ejemplo, la instalación de grúa o el montaje e instalación de andamios.

7. Las propuestas de medidas alternativas de prevención deben incluir la valoración económica de las mismas, que no pueden implicar disminución del importe total, de acuerdo con el segundo párrafo del artículo 5.4 del Real Decreto 1627/1997.

- *Disposiciones generales relativas a los lugares de trabajo en la obra:*
  - Estabilidad y solidez
  - Instalaciones de suministro y reparto de energía
  - Vías y salidas de emergencia
  - Detección y lucha contra incendios
  - Ventilación, temperatura e iluminación
  - Exposición a riesgos particulares
  - Puertas y portones
  - Muelles y rampas de carga
  - Dimensiones del espacio de trabajo
  - Primeros auxilios
  - Mujeres embarazadas y madres lactantes
  - Trabajadores minusválidos

- *Disposiciones específicas relativas a los puestos de trabajo en el interior de los locales de la obra:*
  - Estabilidad y solidez
  - Puertas de emergencia
  - Ventilación
  - Suelo, paredes y techo de los locales
  - Ventanas y vanos de iluminación cenital
  - Puertas y portones
  - Vías de circulación
  - Escaleras mecánicas y cintas rodantes
  - Dimensiones y volumen de aire de los locales

- *Disposiciones específicas relativas a los puestos de trabajo en el exterior de los locales de la obra:*
  - Estabilidad y solidez
  - Caída de objetos
  - Caídas de altura
  - Factores atmosféricos
  - Andamios y escaleras
  - Aparatos elevadores
  - Vehículos y maquinaria para movimientos de tierra y manipulación de materiales
  - Instalaciones, máquinas y equipos
  - Instalaciones de distribución de energía
  - Evacuación de escombros

En el siguiente apartado se desarrollan pormenorizadamente algunos de los medios y procedimientos concretos necesarios para llevar a cabo las medidas de prevención mínimas en las partidas correspondientes a la ejecución de las unidades de fábrica.

4.1.3 Medidas de seguridad específicas para la ejecución de las unidades de fábrica

Evaluación de riesgos

La ejecución de las partidas correspondientes a la obra de fábrica entraña riesgos específicos, tanto personales como de daños a terceros, por el peligro que supone la constante manipulación de piezas, la posición del operario durante los trabajos y la posibilidad de caída de personas u objetos desde alturas considerables. Utilizando los métodos y criterios a los que se refieren el artículo 3º y el artículo 5º del Real Decreto 39/1997, cabe hacer la siguiente evaluación de riesgos.

- *Riesgos personales*
  - Caídas de altura
  - Caídas de materiales
  - Heridas punzantes y cortes
  - Golpes y atrapamientos
  - Accidentes debidos a la maquinaria de obra
  - Contactos eléctricos
  - Manejo de cargas
  - Posibles incendios
- *Riesgos de daños a terceros*
  - En el perímetro y accesos a la obra
  - En el interior de la obra producidos por el movimiento de maquinaria y vehículos

Alguno de estos riesgos, como por ejemplo la caída de altura, están citados en la *Relación no exhaustiva de los trabajos que implican riesgos especiales para la seguridad y la salud de los trabajadores*, que constituye el contenido del Anexo II del Real Decreto 39/1997, por las particulares características, los procedimientos aplicados y el entorno del puesto de trabajo que supone la ejecución de las unidades de fábrica.

Medidas mínimas de prevención de riesgos en la ejecución de las unidades de fábrica

- *Previsiones en la fase de proyecto*

Desde la fase de proyecto se debe tener en cuenta la existencia o no de conducciones eléctricas aéreas a fin de solicitar a la compañía correspondiente el desvío, apantallado o descarga que corresponda.

También se debe prever en la fase de proyecto el tipo de protección colectiva contra caídas de altura, así como los puntos de anclaje de las sirgas de desplazamiento y sujeción de los cinturones de seguridad necesarios en la fase de desmontaje de las protecciones.

Se debe tener previsto antes de comenzar los trabajos el procedimiento de suministro de materiales, fundamentalmente del mortero, primando sobre cualquier otro criterio la garantía de la seguridad de los trabajadores al realizar su puesta en obra.

- *Medidas preventivas antes de comenzar los trabajos*

Se debe cercar totalmente el solar con una valla de la altura mínima exigida y con entradas independientes para maquinaria y personal de obra.

Las áreas de posibles riesgos y de las instalaciones existentes deben estar acotadas con un sistema de señalización que ha de permanecer operativo el tiempo necesario, convenientemente afianzado y suficientemente visible, incluso de noche. Si las instalaciones suponen un riesgo elevado, es conveniente desviarlas o anularlas.

Deben estar instaladas, con anterioridad a la ejecución de los trabajos, las medidas de protección colectiva, tales como redes o viseras, que deben permitir en todo momento el desarrollo de los mismos.

Hay que comprobar también que los tajos estén suficientemente iluminados y ventilados, y dispongan en sus inmediaciones de zonas de acopio de materiales apropiadas, seguras y accesibles.

Los caminos de rodadura previstos para la maquinaria se deben señalizar convenientemente y mantener operativos en todo tiempo, posibilitando la evacuación de las aguas procedentes de filtraciones o lluvias.

- *Previsiones al comienzo de la obra*

El coordinador de seguridad y salud, la dirección facultativa conjuntamente con el máximo responsable técnico del contratista a pie de obra deben comprobar previamente a la ejecución de las unidades de fábrica el conjunto de los siguientes aspectos:

- Revisión de los planos del proyecto y de la obra
- Replanteo
- Maquinaria y herramientas adecuadas
- Andamios y apeos
- Colocación de elementos auxiliares recibidos en la estructura
- Condiciones de almacenamiento de los materiales

La dirección facultativa debe informar al constructor de los riesgos y dificultades que, si bien tienen que estar minimizados, no se han podido evitar en la fase de proyecto. A partir del *Estudio de Seguridad y Salud*, el constructor debe presentar para su aprobación el *Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo* en el que debe estar previsto, lo más detalladamente posible, cómo reducir al mínimo estos riesgos.

Se debe comprobar la situación, estado y requisitos de los medios de transporte y elevación de los materiales para la ejecución de estos trabajos (grúas, cabrestantes, uñas portapalés, eslingas, plataformas de descarga, etc.), con antelación a su utilización.

En obra debe estar disponible, para proporcionar en cada caso, el equipo indispensable y necesario para la ejecución de los trabajos, tal como palas, picos, guías, tablones, puntales, y las prendas de protección individual como cascos, gafas, guantes, botas de seguridad homologadas, impermeables y otros medios que puedan servir para eventualidades o socorrer y evacuar a los operarios que se puedan accidentar.

- *Medidas preventivas durante la ejecución de los trabajos*

a. Medidas preventivas relativas a la circulación y accesos de obra

Las medidas preventivas relacionadas con las vías de circulación y zonas peligrosas están indicadas en al artículo 11 del Anexo IV del R.D. 1627/97.

Los accesos de vehículos deben ser distintos de los del personal. En el caso de que se utilicen los mismos se debe dejar un paso de peatones protegido mediante vallas.

En ambos casos los pasos deben ser de superficies regulares, bien compactadas y niveladas. Si fuere necesario realizar pendientes se recomienda que éstas no superen un 11% de desnivel.

Todas las vías deben estar debidamente señalizadas y sometidas a un control y mantenimiento periódico. Si existieran zonas de acceso limitado deben estar equipadas con dispositivos que eviten el paso de los trabajadores no autorizados. El paso de vehículos en el sentido de entrada debe estar señalizado con limitación de velocidad a 10 ó 20 Km/h y *ceda el paso*. En sentido de salida es obligatoria la detención con una señal de *stop* en lugar visible del acceso a la vía pública.

b. Medidas preventivas relativas al entorno de la zona de trabajo

Se debe comprobar al comienzo de cada jornada que están bien colocadas y sólidamente afianzadas todas las medidas de protección colectiva contra caídas de altura que puedan afectar al tajo: barandillas, redes, mallazo de retención, ménsulas y toldos.

La zona de trabajo se debe encontrar en todo momento limpia de puntas, armaduras, maderas y escombros.

La construcción de las fábricas de ladrillo se debe hacer desde andamios tubulares montados en todo el perímetro de la obra. Cuando la construcción de la obra de fábrica no pueda ser ejecutada desde andamios tubulares, y si las circunstancias técnicas lo permiten, se puede efectuar desde el interior de la obra y sobre el forjado, debiendo estar protegidos los operarios contra el riesgo de caída de altura mediante redes horizontales situadas en la planta inmediata inferior o redes verticales sujetas a horcas metálicas. El cerramiento de fachada no se debe realizar nunca desde andamios colgantes con plataforma de tablones sobre liras suspendidas[8].

Los atirantamientos o los arriostramientos de los andamios no se deben suprimir hasta que no se supriman o contrarresten las tensiones que inciden sobre ellos.

No se deben instalar andamios en las proximidades de líneas de tensión. Las distancias de seguridad recomendables son: 3 m para líneas de hasta 5.000 voltios y 5 m para el resto.

Las plataformas de trabajo deben estar dotadas de barandillas perimetrales reglamentarias, escalera de *"gato"* con aros salvavidas o criolina de seguridad a partir de 2 m de altura sobre el nivel del suelo, o escalera de acceso completamente equipada sobre estructura tubular y convenientemente arriostrada.

En andamios de estructura tubular los accesos a los distintos niveles se deben realizar por medio de sus correspondientes escaleras inclinadas interiores, dotadas con trampillas de acceso abatibles en cada plataforma horizontal. Son preferibles las plataformas móviles totalmente equipadas en previsión de vuelco o caídas, accionadas desde la propia plataforma.

Cuando se realicen trabajos en niveles superpuestos, deben estar protegidos los trabajadores de los niveles inferiores con redes, marquesinas rígidas o elementos equivalentes.

En los accesos a los tajos, se deben habilitar zonas de paso mediante pasarelas compuestas por tablones, de 0,60 m de anchura mínima, con objeto de que las personas que circulen no tengan que hacerlo por encima de las piezas o armaduras.

Los huecos horizontales que puedan quedar al descubierto sobre el terreno a causa de los trabajos, cuyas dimensiones puedan permitir la caída de personas a su interior, deben ser condenados al nivel de la cota de trabajo, instalando si es preciso pasarelas completas y reglamentarias para los viandantes o personal de obra.

Las zancas de escalera deben disponer de peldaños integrados, evitando la instalación de patés provisionales de material cerámico. Deben tener barandilla o redes verticales protegiendo el hueco de escalera.

Cuando se tengan que retirar las redes de seguridad, se debe hacer simultaneando este proceso con la colocación de barandillas y rodapiés o clausurando los huecos horizontales, de manera que se evite la exposición a caídas de altura.

Como norma general se deben suspender los trabajos cuando llueva, descienda la temperatura por debajo de 0°C o exista viento con una velocidad superior a 50 Km/h, retirando en este último caso los materiales y herramientas que se puedan desprender.

8. La utilización de andamios colgados tipo góndola también tiene que ser considerada con carácter restrictivo, por el riesgo potencial que comporta su utilización. Su empleo tiene que ser técnica y documentalmente justificado por el compromiso escrito de la dirección facultativa y por la correcta instalación avalada con certificados de mantenimiento preventivo y de control periódico por parte del contratista que tenga adjudicada la realización de esta partida. Asimismo, el personal que trabaje sobre andamios suspendidos debe disponer de una amplia experiencia en su utilización, y siempre utilizando el cinturón de seguridad amarrado mediante dispositivo de retención a una sirga de seguridad y desplazamiento, anclada a la estructura del edificio.

c. Medidas preventivas relativas a la protección de los trabajadores

Cuando los trabajadores requieran la utilización de prendas de protección personal, éstas llevarán el marcado CE y serán adecuadas al riesgo que tratan de paliar, ajustándose en todo a lo establecido en el R.D. 773/97 de 30 de mayo.

Cuando un trabajador tenga que realizar su trabajo en alturas superiores a 2 m y no estén habilitados los sistemas adecuados de protección colectiva, debe estar provisto de cinturón de seguridad (de sujeción o anticaídas, según proceda), en vigencia de utilización (no caducada), con puntos de anclaje no improvisados, sino previstos en proyecto y en la planificación de los trabajos, debiendo acreditar previamente que ha recibido la formación suficiente por parte de sus mandos jerárquicos, para ser utilizado restrictivamente, pero con criterio.

No se debe permitir que las cargas superiores a 25 kg sean manipuladas por un solo trabajador.

d. Medidas preventivas relativas a la caída de objetos

Se debe evitar el paso de personas bajo cargas suspendidas; en todo caso las áreas de trabajo bajo las cargas citadas deben estar debidamente acotadas. También deben estar restringidas al paso de personas mediante señales y balizas, las zonas de vuelo durante las operaciones de abastecimiento de materiales con grúa.

Durante el izado de los palés o máquinas, se debe disponer una sujeción de seguridad (*seguricable*), en previsión de la rotura de los ganchos o ramales de las eslingas de transporte.

El transporte de materiales se debe realizar preferiblemente sobre bateas para impedir el corrimiento de la carga.

En todas aquellas operaciones que conlleven el empleo de aparatos elevadores, es recomendable la adopción de las siguientes normas generales:

- Señalar de forma visible la carga máxima que se puede elevar mediante el aparato utilizado.

- Acoplar adecuados pestillos de seguridad a los ganchos de suspensión de los aparatos elevadores.

- Emplear para la elevación de materiales recipientes adecuados que los contengan o sujeten las cargas, de forma que se imposibilite el desprendimiento total o parcial de las mismas.

- Dotar a las eslingas de una placa de identificación en la que conste la carga máxima para la cual están recomendadas.

- Utilizar, cuando se precisen, cadenas de hierro forjado con un factor de seguridad no inferior a 5 de la carga nominal máxima, libres de nudos y enrolladas en tambores o polichas adecuadas.

- Emplear vigas de reparto de cargas para la elevación y transporte de piezas de gran longitud, de forma que permitan espaciar la luz entre apoyos, garantizando de esta forma la horizontalidad y estabilidad.

- Comprobar el buen funcionamiento de los finales de carrera, antes de iniciar los trabajos. Si durante el funcionamiento de la grúa se observa inversión de los movimientos, hay que dejar de trabajar dando cuenta inmediata a la dirección facultativa de la obra.

e. Medidas preventivas relativas al acopio de materiales

En la medida de lo posible se debe solicitar el suministro de los materiales paletizados, puesto que ello permite mecanizar las manipulaciones de cargas, siendo en sí una medida de seguridad para reducir sobreesfuerzos, lumbagos, golpes y atrapamientos. Sin embargo, también incorporan riesgos derivados de la mecanización. Las medidas de prevención de riesgos son las siguientes:

- Acopiar los palés sobre superficies niveladas y resistentes.
- No afectar los lugares de paso.
- Señalizar mediante cintas las proximidades a los lugares de paso.
- No superar la altura de pilas que designe el fabricante.
- No acopiar en una misma pila palés con diferentes geometrías y contenidos.
- Flejar nuevamente los palés que no se hayan consumido en su totalidad antes de realizar cualquier manipulación.

No se deben efectuar sobrecargas sobre la estructura de los forjados, acopiando preferiblemente en el contorno de los capiteles de pilares, dejando libres las zonas de paso de personas y vehículos de servicio de la obra.

El apilado en altura de los diversos materiales se debe realizar en función de la estabilidad que ofrezca el conjunto.

En lo relativo a las precauciones a tomar en el acopio de cementos, se debe tener en cuenta lo establecido en el Real Decreto 255/2003 de 28 de febrero, sobre clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos, con atención especial a lo mencionado en el articulo 9 (etiquetado del producto) y en el articulo 13 (ficha de datos de seguridad), y en la Orden del Ministerio de la Presidencia PRE/1954/2004 de 22 de Junio de 2004, referente a las limitaciones de cromo VI en el cemento.

Los pequeños materiales se deben acopiar a granel en bateas, cubas o bidones adecuados para que no se diseminen por la obra.

Es recomendable que el aporte a obra de los áridos se realice mediante tolvas, por las ventajas que representan frente al acopio de áridos sueltos en montículo. Si los áridos se van a acopiar sueltos, se debe hacer formando montículos limitados por tablones o tableros que impidan su mezcla accidental, así como su dispersión.

Las tolvas o silos para el acopio de áridos se deben situar sobre terreno nivelado y realizar la cimentación o asiento que determine el suministrador. Si están próximas a lugares de paso de vehículos se protegerá con vallas empotradas en el suelo de posibles impactos o colisiones que hagan peligrar su estabilidad.

Cuando sea previsible el paso de peatones o vehículos junto al borde de los huecos, se debe asegurar el acopio con vallas o palenques móviles debidamente iluminados cada 10 metros.

Equipos de protección colectiva específicos para la ejecución de las unidades de fábrica

Señalización

Los sistemas de señalización de seguridad en una obra tienen que cumplir los siguientes objetivos:

a. Llamar la atención de los trabajadores sobre la existencia de determinados riesgos, prohibiciones u obligaciones.

b. Alertar a los trabajadores cuando se produzca una determinada situación de emergencia que requiera medidas urgentes de protección o evacuación.

c. Facilitar a los trabajadores la localización e identificación de determinados medios o instalaciones de protección, evacuación, emergencia o primeros auxilios.

d. Orientar o guiar a los trabajadores que realicen determinadas maniobras peligrosas.

Los procedimientos de señalización se indican en el Real Decreto 485/1997 de 14 de abril por el que se establecen las *"Disposiciones mínimas de carácter general relativas a la señalización de seguridad y salud en el trabajo"*.

- *Tipos de señales:*

→ Paneles:

- Señales de advertencia: forma triangular; fondo amarillo; color de contraste negro y color de símbolo negro.

- Señales de prohibición: forma redonda; color de fondo blanco; color de contraste rojo y color de símbolo negro.

- Señales de obligación: forma redonda; color de fondo azul y color de símbolo blanco.

- Señales relativas a los equipos de protección contra incendios: forma rectangular o cuadrada; color de fondo rojo y color de símbolo blanco.

- Señales de salvamento o socorro: forma rectangular o cuadrada; color de fondo verde y color de símbolo blanco.

→ Cintas de señalización:

Son cintas de tela o materiales plásticos con franjas alternas oblicuas, inclinadas 45º, de color amarillo y negro, con las que se demarcan las zonas de exposición al riesgo.

→ Cintas de delimitación de zona de trabajo:

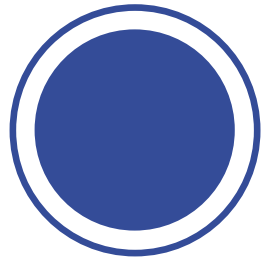
Son cintas de franjas alternas verticales de colores blanco y rojo.

→ Iluminación:

Según el Anexo IV del R.D. 486/97 de 14 de abril, los niveles mínimos de iluminación deben estar comprendidos entre 100 lux y 500 lux en función de la exigencia visual requerida para la tarea que se esté ejecutando. Estos niveles se deben duplicar cuando existan riesgos especiales de caídas, choques u otros accidentes. Los accesorios de iluminación deben ser estancos a la humedad[9], no debiendo utilizarse en ningún caso iluminación de llama.

→ Señales ópticas y acústicas de vehículos de obra:

Las máquinas autoportantes que intervienen en las operaciones de manutención deben disponer de bocina; señales sonoras o luminosas para indicación de marcha atrás; dispositivo rotativo luminoso destellante de color ámbar para alertar de su presencia en circulación viaria; focos de posición y cruce en la parte delantera y dos pilotos luminosos de color rojo detrás; y dispositivo de balizamiento y preseñalización.



Equipos de protección colectiva contra caídas de altura de personas u objetos

El riesgo de caída de altura de personas (precipitación o caída al vacío) es considerado por el Anexo II del R.D. 1627/97 como *riesgo especial* para la seguridad y salud de los trabajadores. Las medidas preventivas específicas adecuadas se relacionan en los artículos 5.6 y 6.2 del mencionado Real Decreto.

• Sistemas provisionales de protección de borde

En general son sistemas de diferentes marcas comerciales, que incorporan una estructura auxiliar de postes a la que se acoplan las correspondientes barandillas y redes de seguridad.

Existen de varios tipos que se describen someramente a continuación. Sea cual sea el sistema utilizado se debe instalar cuando estén realizados la solera de planta baja y un forjado.

→ Sistema con postes y fijados al suelo

Los postes se pueden fijar al suelo con dos tipos de elementos: cartuchos de PVC que se introducen en el hormigón cuando está fresco; o casquillos fabricados con chapa y tupo de acero, que se anclan al soporte (generalmente al forjado) mediante tornillos embebidos en tacos de expansión.

Hay que asegurar los tapones en los cartuchos con el fin de que no se suelten en las manipulaciones posteriores y no entre hormigón en ellos. Los cartuchos se deben introducir verticalmente, a una distancia aproximada de 2 m, cuando el hormigón aun esté fresco. Hay que introducirlos totalmente hasta la zona superior enrasando con el tope.

Los postes se introducen en posición en los cartuchos o casquillos. Después se colocan las barandillas (principal e intermedia), y el plinto o rodapié, según el tipo, en las escuadras del poste, comprobando su ajuste.

→ Sistema con mordazas para forjados (sargentos)

Se diferencia de otros sistemas de protección de borde en los postes. Éstos se fijan al canto del forjado mediante una mordaza a modo de gato, regulable para adaptarse a los distintos cantos de forjado, con una tabla instalada en la parte superior para evitar que resbale.

El poste se realiza con tubo de acero cuadrado. El sistema de apriete puede estar situado junto a la mordaza o en el extremo superior del poste.

→ Redes de seguridad

Deben tener las dimensiones ajustadas al hueco a proteger. Suelen ser de poliamida de alta tenacidad, con luz de malla de 7,5 x 7,5 cm, hilo de 4 mm de diámetros y cuerda de recercado perimetral de 12 mm de diámetro, de conformidad con las normas UNE-EN 1263-1:2004 *"Redes de seguridad. Parte 1: Requisitos de seguridad, métodos de ensayo"* y UNE-EN 1263-2:2004 *"Redes de seguridad. Parte 2: Requisitos de seguridad para los límites de instalación"*.

9. Pueden ser equipos portátiles de alumbrado eléctrico de 24 voltios.

→ Pescantes de sustentación de redes en fachadas

Son horcas metálicas comerciales, homologadas o certificadas por el fabricante respecto a su idoneidad en las condiciones de utilización descritas por él, constituidas por un mástil vertical (de 8 m de longitud, habitualmente) coronado por un brazo acartelado (de 2 m de voladizo, habitualmente), confeccionado con tubo rectangular en chapa de acero de 3 mm de espesor y 5 cm x 10 cm de sección, protegido contra la corrosión y pintado por inmersión.

El conjunto del sistema queda constituido por paños de red de seguridad según colocadas con su lado menor (7 metros) emplazado verticalmente, cubriendo la previsible parábola de caída de personas u objetos desde el forjado superior de trabajo y cuerdas de izado y ligazón entre paños, también de poliamida de alta tenacidad de 10 mm de diámetro, enanos de anclaje y embolsamiento inferior del paño confeccionados con *"caliqueños"* de redondo corrugado de 8 mm de diámetro, embebidos en el canto del forjado para el paso y bloqueo del mástil del pescante. Una vez colocada la horca, se instala un pasador en el extremo inferior para evitar que el brazo pueda girar en sentido horizontal.

Todos los elementos deben estar sólidamente afianzados entre sí, para que el conjunto sea capaz de resistir la retención puntual de un objeto de 1 kN de peso, desprendido de una altura de 6 m por encima de la zona de embolsamiento, a una velocidad de 2 m/s.

• Barandillas de protección

Son necesarias como cerramiento provisional de huecos verticales y perimetrales de plataformas de trabajo, susceptibles de permitir la caída de personas u objetos desde una altura superior a 2 metros. Deben estar constituidas al menos por balaustre, rodapié de 20 cm de alzada, travesaño intermedio y pasamanos superior de 90 cm de altura.

• Pasarelas

Sirven para permitir el paso de personas sobre zanjas, pequeños desniveles u obstáculos originados por los trabajos. Deben ser preferiblemente prefabricadas de metal o, en su defecto, realizadas in situ, de una anchura mínima de 1 metro, dotadas en sus laterales de barandilla de seguridad reglamentaria. La plataforma deber ser capaz de resistir 3 kN de peso y estar dotada de guirnaldas de iluminación nocturna si afecta a la vía pública.

• Escaleras portátiles

Deben ser preferiblemente de aluminio o hierro. Si son de madera, los peldaños deben ir ensamblados, no clavados. Deben disponer de zapatas sujetas en la parte superior, y sobrepasar en 1 metro el punto de apoyo superior. No se pueden disponer escaleras empalmadas.

• Sirgas

Sirven para el desplazamiento y anclaje del cinturón de seguridad.

• Accesos y zonas de paso del personal

Las aperturas de huecos horizontales sobre forjados se deben condenar con un tablero resistente, red, mallazo electrosoldado[10] o elemento equivalente, cuando no se esté trabajando en sus inmediaciones con independencia de su profundidad o tamaño.

• Plataformas de trabajo

Las plataformas de madera tradicionales deben reunir las siguientes características mínimas:

- Anchura mínima 60 cm (tres tablones de 20 cm de ancho).
- Escuadra de espesor no inferior a 7 cm de canto, uniforme y sin alabeos[11].
- Longitud entre apoyo de tablones no superior a 2,50 m.
- Vuelo no superior a cuatro veces su propio espesor ni a 20 cm.
- Madera de buena calidad sin grietas ni nudos. Es preferible la madera de abeto a la de pino.
- Sujeción a la estructura portante mediante lías o sargentos.

Los elementos de madera no pueden montar entre sí formando escalones ni sobresalir en forma de llantas de la superficie lisa de paso sobre las plataformas.

Las zonas perimetrales de las plataformas de trabajo así como los accesos, pasos y pasarelas de las mismas,

susceptibles de permitir caídas de personas u objetos desde más de 2 m de altura deben estar protegidos con barandillas de 90 cm de altura, equipadas con listones intermedios y rodapiés de 20 cm de altura.

La distancia entre el paramento y la plataforma debe ser tal que evite la caída de los operarios. En el caso de que no se pueda cubrir el espacio entre la plataforma y el paramento, se debe cubrir el nivel inferior, sin que en ningún caso supere una altura de 1,80 m.

Para acceder a las plataformas se deben instalar medios seguros. Las escaleras de mano que comuniquen los diferentes pisos del andamio deben salvar cada una la altura de dos pisos seguidos. La distancia máxima a salvar no debe sobrepasar 1,80 m.

Cuando se utilicen andamios móviles sobre ruedas, se deben instalar dispositivos de bloqueo de las mismas que eviten cualquier movimiento. Para evitar la caída de andamios, se deben fijar a la fachada o pavimento con suficientes puntos de amarre; nunca se deben fijar a tubos de gas o a otro material.

- Marquesinas rígidas

Son apantallamientos en previsión de caídas de objetos. Se componen de una estructura de soporte, generalmente metálica, en forma de ménsulas o pies derechos, cuajada horizontalmente de tablones de reparto y tableros, capaces de retener sin colapsarse un objeto del 1 kN de peso desprendido desde una altura de 10 m a una velocidad de 2 m/s.

Protección contra punciones o cortes

Las armaduras o conectores metálicos sobresalientes de las esperas de las mismas se deben cubrir con resguardos tipo *"seta"* o cualquier otro sistema eficaz en previsión de punciones o erosiones del personal que pueda colisionar con ellos.

Equipos de protección individual específicos para la ejecución de las unidades de fábrica

Afecciones en la piel por dermatitis de contacto o quemaduras

- Guantes de protección frente a la abrasión
- Guantes de protección frente a los agentes químicos
- Guantes de protección frente al calor
- Sombreros de paja (aconsejables contra el riesgo de insolación)

Proyecciones de objetos, aplastamientos, atrapamientos y caída de objetos o maquinarias

- Calzado con protección contra golpes mecánicos
- Casco protector de la cabeza contra riesgos mecánicos
- Bolsa portaherramientas

10. Las condenas con mallazo se realizan con mallas electrosoldadas de redondos de 3 mm de diámetro mínimo y 100 mm x 100 mm de tamaño máximo de retícula, embebidas perimetralmente en el zuncho de hormigón. Deben ser capaces de garantizar una resistencia no inferior a 1,5 kN/m^2.

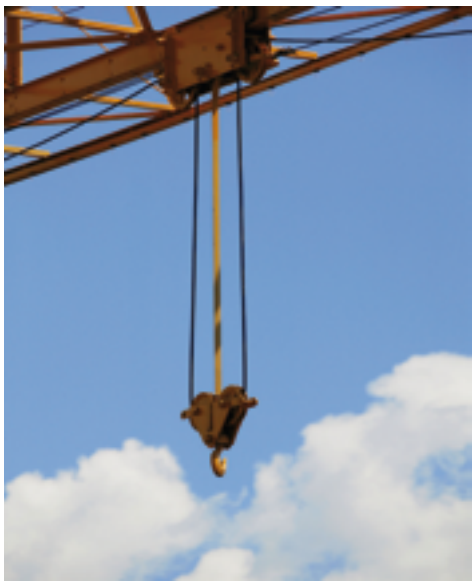
11. Si se utiliza madera de abeto la escuadra puede ser de 5 cm.

Caída o colapso de andamios y caídas de personal a distinto o al mismo nivel

- Cinturón de seguridad anticaídas
- Calzado de protección con suela antiperforante

Ambientes con polvo y atmósferas tóxicas o irritantes

- Equipo de protección de las vías respiratorias con filtro mecánico
- Gafas de seguridad para uso básico (choque o impacto con partículas sólidas)
- Impermeables y trajes de agua
- Mascarilla respiratoria de filtro para humos de soldadura
- Pantalla facial abatible con visor de rejilla metálica, con atalaje adaptado al casco



Equipos de protección especiales

Protecciones y resguardos en máquinas

Toda la maquinaria utilizada durante la obra debe disponer de carcasas de protección y resguardos sobre las partes móviles, especialmente de las transmisiones, que impidan el acceso involuntario de personas u objetos a dichos mecanismos, para evitar el riesgo de atrapamiento.

Mantenimiento preventivo

El articulado y anexos del R.D. 1215/97 de 18 de Julio indica la obligación por parte del empresario de adoptar las medidas preventivas necesarias para que los equipos de trabajo que se pongan a disposición de los trabajadores sean adecuados al trabajo que se deba realizar y convenientemente adaptados al mismo, de forma que garanticen la seguridad y salud de los trabajadores al utilizarlos.

Como mínimo, sólo deben ser utilizados equipos que satisfagan las disposiciones legales o reglamentarias que les sean de aplicación y las condiciones generales previstas en el Anexo I. Además, el constructor debe justificar que todas las máquinas, herramientas y medios auxiliares tienen su correspondiente marcado CE.

Mantenimiento de los elementos de señalización

Los elementos de señalización se deben mantener en buenas condiciones de visibilidad y, en los casos que se considere necesario, se deben reglar las superficies de tránsito para eliminar los ambientes pulvígenos y, con ello, la suciedad acumulada sobre tales elementos.

La instalación eléctrica provisional se debe revisar periódicamente por parte de un electricista, comprobando las protecciones diferenciales, magnetotérmicas, toma de tierra y los defectos del aislamiento.

Mantenimiento de los medios auxiliares

La estabilidad y buena colocación de los andamios, apeos y cables de atirantado, así como el estado de los materiales que los componen, se debe revisar diariamente antes de iniciar los trabajos. Esta precaución es especialmente importante cuando los trabajos hayan estado interrumpidos más de un día o se hayan producido alteraciones atmosféricas de lluvia o helada.

El estado del disco de las sierras circulares se debe comprobar siempre antes de su puesta en marcha, así como el correcto emplazamiento y articulación de sus protectores y resguardos.

Hay que revisar periódicamente el estado de los cables y ganchos utilizados para el transporte de cargas, reparando los deshilachados, roturas o cualquier otro desperfecto que impida el uso de estos cables con total garantía, así como las eslingas.

Los aparatos de elevación deben ser objeto de, al menos, una revisión a fondo trimestralmente, prestando especial atención a cables, frenos, contactos eléctricos y sistemas de mando. El mantenimiento preventivo de la grúa se debe realizar conforme a la ITC-AEM2 sobre *grúas torre*.

4.2 Condiciones de protección del medio ambiente

La problemática medioambiental derivada del sector de la construcción ha sido abordada desde la década de los noventa por la mayoría de las grandes empresas constructoras mediante sistemas de gestión medioambiental basados en la norma ISO 14000[12].

Las normas internacionales ISO 14000 son un conjunto de documentos que afectan a todos los aspectos de la gestión de una empresa relacionados con las responsabilidades ambientales. Los estándares son voluntarios, no tienen obligación legal y no establecen metas cuantitativas relacionadas con los niveles de emisiones o métodos específicos para medirlas. El contenido de las normas ISO 14000 se centra en la organización empresarial, suministrando un conjunto de estándares basados en procedimientos y unas pautas con las que una empresa puede construir y mantener un sistema eficaz de gestión ambiental.

La única norma de requisitos que habilita la posibilidad de emitir un certificado es la ISO 14001. Esta norma se puede implementar en cualquier organización empresarial que desee establecer, documentar, mantener y mejorar continuamente un sistema de gestión ambiental.

Las normas ISO 14000 más utilizadas son las que se refieren a los propios sistemas de gestión ambiental (ISO 14001:2004 *"Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso"*; ISO 14004:2004 *Sistemas de gestión ambiental. Directrices generales sobre principios, sistemas y técnicas de apoyo") y al análisis del ciclo de vida* (ISO 14042 *"Evaluación del impacto del Ciclo de Vida"*). La utilización de etiquetas ambientales también se regula en las normas ISO 14000 (ISO 14020 *"Etiquetado y declaraciones ambientales. Principios generales"*; ISO 14021 *"Etiquetado y declaraciones ambientales. Autodeclaraciones"*).

Las empresas que usan este tipo de normas tienen la ventaja de poder competir en mejores condiciones en muchos más mercados. Sin embargo, la implantación de la ISO 14001, que ya se ha producido en muchas de las pequeñas y medianas empresas que constituyen una buena parte de las subcontratas para las obras de albañilería, no ha surtido todos los resultados que serían deseables.

Ello se debe no sólo a la dificultad económica para las pequeñas empresas de asumir los costes asociados a la implantación de la ISO 14001, sino también a la falta de especialización como consecuencia de la movilidad continua de los trabajadores de un sector que se caracteriza por ser uno de los principales vehículos de integración de la inmigración en nuestro país.

Los Gobiernos, empujados por las directivas europeas, han desarrollado sus propios marcos legislativos; si bien, para que las medidas legales produzcan los efectos deseados es preciso que vayan acompañadas de otras medidas de sensibilización y de cultura medioambiental y, sobre todo, de los medios económicos necesarios para poner en marcha las correspondientes campañas de promoción.

El objetivo de reducir tanto como se pueda el impacto que ocasiona en el medio ambiente la necesidad de construir se puede conseguir incidiendo en tres factores fundamentales: el control del consumo de recursos naturales, como el agua, la energía y los materiales; la reducción de las emisiones contaminantes en el aire, en el agua y en el suelo; y la minimización y correcta gestión de los residuos que se generan a lo largo del proceso.

Los criterios de carácter general aplicables a las obras de construcción en este sentido consisten básicamente en la utilización de materiales y sistemas de construcción duraderos, si es posible con algún tipo de distintivo de calidad ambiental, y productos fabricados con componentes reciclados, con consumo energético bajo, reutilizables o reciclables en el futuro, fácilmente desmontables, estandarizados y de procedencia próxima.

12. La norma ISO 14000 se basa en la norma inglesa BS7750, que fue publicada oficialmente por la British Standards Institution (BSI) previamente a la Reunión Mundial de la ONU sobre Medio Ambiente (ECO 92).

Se indican a continuación los aspectos de estos factores que tienen relación con la construcción de las partidas de la obra relacionadas con las fábricas de ladrillo cerámico.

4.2.1 Control del consumo de recursos naturales

Los recursos naturales que utilizan las obras de construcción son fundamentalmente las materias primas para fabricar los materiales y productos, el agua necesaria para los procesos constructivos y la energía para posibilitar la extracción y transformación de los productos y su distribución a pie de obra.

Los procedimientos para minimizar el consumo de materia prima en la obra consisten en acciones como planificar los pedidos ajustándolos a la medición para que no haya excedentes, reutilizar los recortes de piezas, reciclar los materiales pétreos y reutilizarlos en otras unidades de obra[13], y realizar demoliciones atendiendo a criterios de construcción.

El control en el consumo de agua necesaria en la fabricación y curado de morteros, humectación de ladrillos o limpieza de equipos; así como la limitación de la energía necesaria en el transporte y uso de la maquinaria, no requieren necesariamente escatimar su utilización, sino actuar con responsabilidad en las operaciones que necesiten estos recursos.

Algunas medidas recomendables y fáciles de implementar en la obra para controlar el consumo de agua son: mojar los ladrillos en su palé de origen, preferiblemente por inmersión, en vez de esperar al momento de su colocación; reutilizar el agua de limpieza y de humectación de ladrillos para otros trabajos, cuando se dispone de suficiente espacio en la obra; utilizar mangueras con llave de paso a la entrada y a la salida para el curado de superficies, con objeto de facilitar el cierre y reducir las pérdidas o goteos; y revisar periódicamente la acometida de agua para detectar fugas y evitar consumos por averías y escapes.

El ahorro en el consumo de energía también se puede conseguir con medidas que no suponen perturbación en el proceso de la obra, tales como aprovechar las máximas horas de luz natural; utilizar lámparas, vehículos y maquinaria de bajo consumo y tenerlos en funcionamiento sólo el tiempo imprescindible; y evitar los medios artificiales de secado.

4.2.2 Control de emisiones contaminantes

Las obras constituyen focos de emisiones de contaminantes al aire que pueden añadir determinados gases a la atmósfera y descomponer otros, aumentar el índice de partículas en suspensión desprendidas durante la operación de corte de las piezas y de los compuestos orgánicos volátiles procedentes de los sellantes y adhesivos, o bien aumentar significativamente los niveles de ruido del medio y deteriorar la calidad ambiental del entorno; además de contribuir a la contaminación con las propias emisiones de CO_2 y CO procedentes de la maquinaria y los medios auxiliares.

Las medidas a adoptar en este sentido consisten en adquirir productos próximos a su lugar de procedencia[14],

de origen natural[15] o avalados por algún tipo de etiquetado ecológico; vigilar periódicamente el mantenimiento de los vehículos y maquinaria para mejorar su rendimiento, procurando utilizar combustible biodiesel o gasolina sin plomo; realizar las tareas de corte y lijado de piezas en zonas ventiladas, utilizando sistemas de aspiración y de protección cuando sea necesario; regar abundantemente las superficies y zonas a tratar que levanten polvo[16]; proteger con lonas los materiales y residuos acopiados; utilizar tubos con conexiones estancas entre sí para la evacuación vertical de escombros, protegiendo con lonas el contenedor; y respetar los horarios de trabajo del municipio correspondiente, utilizando máquinas que respeten los límites sonoros establecidos por la ley.

Las emisiones al agua proceden de las operaciones de limpieza y de vertidos de productos contaminantes en desagües o en el suelo. Para contribuir a la calidad del medio ambiente en este aspecto es importante utilizar medios de depuración o decantación de partículas sólidas para mejorar la calidad del agua residual; para ello es importante aspirar o barrer antes de limpiar con agua, con objeto de reducir la cantidad de partículas de lijado, y eliminar de los recipientes los restos de mortero antes de limpiarlos.

También constituye una medida eficaz gestionar adecuadamente el agua de limpieza de cubos, espuertas, amasaderas y otros medios auxiliares, almacenándola provisionalmente para su reutilización en la limpieza de otros elementos. Es importante usar detergentes biodegradables, sin fosfato ni cloro, en la limpieza de los utensilios y equipo de personal.

Las operaciones que tienen mayor riesgo de contaminar, como por ejemplo la limpieza de las fachadas, se deben subcontratar a empresas especializadas, puesto que ofrecen mayor garantía a la hora de gestionar y manipular los residuos de los productos que utilizan.

Los mismos criterios indicados anteriormente son aplicables para reducir la emisión de contaminantes al suelo. El suelo es un recurso no renovable a corto y medio plazo, que se caracteriza por su enorme vulnerabilidad. Los vertidos de combustible o productos procedentes de las operaciones de limpieza pueden desestabilizar su equilibrio natural disminuyendo o aniquilando la capacidad de regeneración de la capa vegetal.

Es conveniente almacenar los materiales peligrosos, especialmente los combustibles, disolventes y otros líquidos, sobre cubetas o superficies impermeabilizadas que permitan recuperar posibles vertidos accidentales. Otra medida adicional en este sentido consiste en conectar los sanitarios provisionales de obra a la red de saneamiento o subcontratar a empresas que utilicen sistemas específicos de depuración.

13. Los restos de materiales pétreos son excelentes componentes de las subbases como material drenante.

14. El coste de transportar los áridos hace que, a más de 40 kilómetros, cueste más el transporte que el material. Por eso las canteras deben estar cerca de los centros de consumo.

15. La producción de materiales de nueva generación y los avances en los sistemas de transporte, aunque tienen mayores prestaciones, tienen el inconveniente de emitir una mayor cantidad de contaminantes a la atmósfera, al agua y al suelo, además de necesitar un elevado consumo de recursos y energía.

16. La inhalación de partículas de cemento puede derivar en enfermedades pulmonares.

4.2.3 Gestión de residuos

Los residuos de las obras de construcción y demolición han constituido tradicionalmente uno de los impactos más significativos en el medio ambiente por su gran volumen y heterogeneidad[17].

Además, los sistemas actuales de producción industrializada han conseguido abaratar los materiales de construcción hasta tal punto que, en muchas ocasiones, los excedentes de las obras no se aprovechan, sino que es más barato convertirlos directamente en residuos destinados a vertedero. Aunque esto constituye la opción más fácil, hoy ya no es una opción alternativa sostenible, y pronto ni siquiera será una opción más ventajosa económicamente.

El volumen de residuos que se genera con las prácticas actuales de construcción acelera el ritmo de colmatación de los vertederos y eleva cada vez más el número de transportes por carretera. Los principios generales para intervenir en este aspecto son los que tienen como objetivo conseguir un buen almacenamiento de los materiales que llegan a obra y posibilitar la reutilización y el reciclaje de los *medios auxiliares* y los *materiales sobrantes* que se empleen en la ejecución[18].

Los residuos de las obras de construcción proceden de las operaciones correspondientes a la propia puesta en obra, del transporte interno de materiales desde la zona de acopio con unas condiciones de almacenaje inadecuadas, de la manipulación y recorte de las piezas para ajustar la geometría y de los embalajes de los productos. Esta heterogeneidad de los tipos dificulta enormemente la valorización de los residuos, incrementando el coste posterior del reciclaje.

El *Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición* (PNRCD) 2001-2006, aprobado por Acuerdo de Consejo de Ministros, de 1 de junio de 2001, propone, entre las medidas instrumentales para el logro de sus objetivos, la elaboración de una normativa específica para este flujo de residuos, basada en los principios de jerarquía de gestión y de responsabilidad del *productor*.

El Real Decreto 105/2008 de 1 de febrero por el que se regula la *"Producción y gestión de los residuos de construcción y demolición"* (B.O.E. 38 de 13 de febrero) define el concepto de *"productor"* de residuos de construcción y demolición, que se identifica, básicamente, con el titular del bien inmueble en quien reside la decisión última de construir o demoler; y el concepto de *"poseedor"* de dichos residuos, que corresponde a quien ejecuta la obra y tiene el control físico de los que se generan en la misma.

Entre las obligaciones que se imponen al *"productor",* destaca la inclusión en el proyecto de obra de un *"Estudio de gestión de los residuos de construcción y demolición"* que se prevea producir. El estudio debe incluir, como mínimo, una aproximación de su cantidad, las medidas genéricas de prevención que se vayan a adoptar, el destino previsto para los residuos, así como una valoración de los costes derivados de su gestión que debe formar parte del presupuesto de proyecto.

El *"poseedor"*, por su parte, está obligado a la presentación a la propiedad de la obra de un *"Plan de gestión de los residuos de construcción y demolición"*, en el que se concrete cómo se aplicará el *Estudio de gestión* del proyecto. Este documento constituye la principal herramienta en cualquier obra de construcción o demolición para facilitar las operaciones de reducción, reutilización y reciclaje.

Clasificación de los residuos

A partir de determinados umbrales, se exige la separación de los residuos de construcción y demolición en obra, para facilitar su valoración posterior[19].

El *Plan de gestión de residuos* anteriormente aludido, además de la valoración aproximada del volumen de los mismos, debe contener la clasificación según su naturaleza y tipos.

La clasificación de los residuos se puede realizar según el *"Catálogo o Lista Europea de Residuos"* (CER), contenida en el Anejo 2 de la Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, en la que están publicadas las operaciones de valoración y eliminación de residuos y la lista europea de los mismos.

Los diferentes tipos de residuos de la lista se clasifican mediante códigos de seis cifras, correspondiendo las cuatro primeras a los capítulos y subcapítulos que identifican la fuente que genera el residuo, y las dos posteriores al índice de peligrosidad. En particular, los residuos de la construcción y demolición de elementos de ladrillos tienen el código 17 01 02, y los de tejas y materiales cerámicos tienen el código 17 01 03. Estos residuos y, en general,

los procedentes de materiales pétreos no presentan ningún riesgo de polución de las aguas y de los suelos por lo que se consideran del tipo *inertes* o *escombros limpios.*

Los restos de papel y cartón procedentes de los sacos de cemento, cajas o papel adhesivo, así como los plásticos, palés, lonas y láminas de polietileno se clasifican dentro del grupo de residuos *no peligrosos*. Sin embargo es conveniente dar preferencia a los proveedores que envasen sus productos con sistemas que tienden a minimizar los residuos, y respetar el tipo de separación selectiva previsto para la obra en curso, ubicando cada residuo en el contenedor que le corresponda, según las señalizaciones de admisión de cada uno de ellos. Constituye una buena práctica devolver los palés al suministrador.

Los residuos *peligrosos* corresponden a los restos de aditivos del mortero, de los productos limpiadores de las superficies y detergentes, de los desengrasantes, disolventes y tratamientos saneadores de superficies, de los sellantes, de aceite, combustibles y grasas, y a sus correspondientes envases[20]. Debe existir en la obra una zona específica, protegida de la lluvia o impermeabilizada, para el almacenamiento de estos residuos, con diferentes contenedores etiquetados según el tipo de residuo peligroso que pueden aceptar, y se deben almacenar siempre atendiendo a las indicaciones de la etiqueta que lo acompaña.

Reducción, reciclaje y reutilización de residuos

Residuos procedentes de los materiales pétreos (residuos inertes)

Los residuos de construcción y demolición están constituidos principalmente por material pétreo. Más de la mitad del material en peso de los materiales que se necesitan para construir una vivienda son áridos.

En la construcción convencional son muy abundantes los residuos procedentes de los materiales de pequeño formato, tales como los ladrillos, cuyo origen principal resulta de los recortes y roturas de las piezas. Los sobrantes cerámicos son los residuos más comunes en algunas fases de la obra.

El criterio fundamental para reducir el volumen de residuos procedente de los ladrillos es utilizar, en la medida de lo posible, piezas completas. Los recortes se deben reservar para solucionar detalles que necesiten piezas de dimensiones más pequeñas, evitando así romper nuevos ladrillos. Para ello es importante delimitar en la obra un área accesible por los operarios para depositar los recortes de estos materiales. Si no se requieren en la propia obra, se pueden reutilizar en otra.

La observancia de los criterios indicados en relación con una correcta coordinación modular del proyecto y con las precauciones en el acopio de los ladrillos constituye también una buena medida para reducir el corte o la rotura innecesaria de piezas.

17. En este sentido hay que puntualizar que el abandono de prácticas ancestrales y la desaparición de los muros masivos como por ejemplo la pared de tapia gruesa, capaces de incorporar una cantidad importante de residuos, han marcado un hito importante.

18. Se entiende por *medios auxiliares* los productos y materiales que son necesarios para la ejecución de la obra y que no quedan incorporados en ella, como por ejemplo los andamios o los encofrados. Se entiende por *materiales sobrantes* los que originan los embalajes de los productos y los restos de los materiales utilizados en la obra.

19. Concretamente, se exige la separación de los residuos generados por ladrillos, tejas y materiales cerámicos cuando, en el total de la obra, la cantidad prevista supere las 80 toneladas, en obras iniciadas con posterioridad al 14 de agosto del 2008. Para las obras que se inicien con posterioridad al 14 de febrero de 2010 la exigencia se extiende a previsiones que superen las 40 toneladas.

20. Los residuos que contienen amianto están considerados especialmente peligrosos y se deben gestionar por transportistas y personal autorizado. La manipulación de materiales que contienen fibras de amianto está supeditada a una serie de permisos que otorga la autoridad laboral competente y que es necesario prever con antelación.

No obstante, si en la obra no se encuentra la manera de reutilizar los residuos sobrantes de la ejecución de las fábricas y tampoco es posible reutilizarlos en otra obra próxima, se puede machacarlos y reciclarlos como rellenos de la propia obra. En este sentido puede ser necesario disponer de una pequeña machacadora para obtener áridos del tamaño necesario[21].

En el caso de optar por el reciclaje de los materiales pétreos para su reutilización en la propia obra, es necesario señalizar los contenedores de *escombro limpio* y realizar controles periódicos de los mismos para posibilitar la correcta clasificación y la calidad del árido resultante[22].

Las fibras minerales utilizadas como material aislante están compuestas principalmente por sílice, que es considerado como *inerte*. Sin embargo, pueden contener resinas o incluso llevar adheridas capas de aluminio o papel, por lo que se deben gestionar como residuos *no peligrosos*. Incluso es recomendable consultar la ficha de datos de seguridad y la etiqueta de estos productos por si contienen algún tipo de aglomerante considerado *peligroso.*

Residuos procedentes de los embalajes

La gestión de los restos de papel y plásticos, aunque se catalogan como residuos *no peligrosos*, supone una gran dificultad por tratarse de elementos de poco peso y gran volumen, ya que los contenedores destinados a ellos almacenan y transportan fundamentalmente aire[23].

Para posibilitar el reciclado de los materiales plásticos es importante evitar que entren en contacto con materiales de otra naturaleza, consultando siempre a los proveedores si ofrecen algún tipo de gestión específica.

Los envases y productos que generan residuos peligrosos se deben mantener separados, sobre todo si proceden de materiales incompatibles. Es importante tapar los contenedores para evitar la emisión de gases y la generación de olores, y respetar el tiempo límite de almacenamiento.

Evacuación de escombros

La evacuación de escombros no se debe realizar nunca por *"lanzamientos libres"* de los mismos desde niveles superiores hasta el suelo. Se deben emplear cestas, bateas en el caso de realizarse con grúa, aunque es preferible el uso de tubos de descarga por su economía e independencia de la grúa.

Cuando la evacuación de escombros se realiza mediante tubos de descarga, se debe tener la precaución de fragmentar los trozos de escombro de grandes dimensiones, con objeto de no producir atascos en el tubo; y situar un contenedor en el punto de descarga final que facilite la evacuación y disminuya la dispersión del acopio; delimitando y señalizando siempre el riesgo de caída de objetos en las inmediaciones del punto de descarga.

4.3 Condiciones de uso y mantenimiento

Todo edificio tiene un determinado período de vida útil, a lo largo del cual puede ser necesario llevar a cabo diversas acciones para su reparación y conservación. Con este fin, los materiales empleados deben ser particularmente duraderos en relación con el uso previsto, y resistentes a las acciones destructivas del hielo, el agua de lluvia, las infiltraciones capilares y las variaciones de temperatura.

El hecho de llevar a cabo un adecuado mantenimiento de los edificios, revisando periódicamente los elementos constructivos y las instalaciones, contribuye además al uso sostenible y lo hará más eficiente[24].

La utilización de materiales cerámicos permite llevar a cabo operaciones más simples de mantenimiento que las necesarias cuando los materiales son de otra naturaleza. Especialmente, el uso de ladrillos cara vista, ya sea para el interior o el exterior del edificio, supone una notable disminución de los gastos periódicos de pintura y restitución de los colores originales.

4.3.1 Condiciones generales de mantenimiento según el Código Técnico

El DB SE-F establece las condiciones mínimas de mantenimiento aplicables a los elementos de fábrica de los edificios, relacionadas fundamentalmente con las exigencias de estabilidad y seguridad estructural que se deben garantizar en todo momento. Transcribimos a continuación las condiciones fundamentales de uso y mantenimiento de las fábricas que se citan en el mencionado documento.

DB SE-F, artículo 1.3
"Condiciones particulares para el cumplimiento del DB SE-F":

Párrafo 3:

a. *"En el plan de mantenimiento se destacará que la inspección debe prestar atención a fisuras, humedades, cejas o movimientos diferenciales, alteraciones superficiales de dureza, textura o colorido, y en su caso a signos de corrosión de armaduras y el nivel de carbonatación del mortero;*

b. *cuando algún componente posea una durabilidad menor que la supuesta para el resto de la obra gruesa, se establecerá un seguimiento específico de su envejecimiento en el plan de mantenimiento y se dispondrán medidas constructivas que faciliten su sustitución;*

c. *cuando se utilicen materiales que deban estar protegidos... se establecerá un programa específico para revisar dichas protecciones"*.

21. Es suficiente una pequeña machacadora de obra, con un costo y gasto de energía muy pequeño y con un nivel bajo de ruido, para reducir la fracción pétrea de los residuos que se van generando hasta alcanzar un volumen del orden de la tercera parte del inicial. Los áridos que se generan se pueden utilizar en la misma obra como rellenos granulares o como áridos para hormigones de bajas prestaciones.

22. La mezcla de los escombros con restos de escayola o de yeso los inhabilita para muchas aplicaciones.

23. Es conveniente disponer en obra de una pequeña máquina compactadora para tratar los restos de papel y plástico, fundamentalmente las hojas de polietileno.

24. Generalmente es más eficaz hacer un uso responsable en un edificio convencional que un mal uso en un edificio construido con muchas y costosas medidas de ahorro de energía y agua.

DB SE-F, capítulo 9 "Mantenimiento":

1. *"El plan de mantenimiento establece las revisiones a que debe someterse el edificio durante su periodo de servicio.*

2. *Tras la revisión se establecerá la importancia de las alteraciones encontradas, tanto desde el punto de vista de su estabilidad como de la aptitud de servicio.*

3. *Las alteraciones que producen pérdida de durabilidad requieren una intervención para evitar que degeneren en alteraciones que afectan a su estabilidad.*

4. *Tras la revisión se determinará el procedimiento de intervención a seguir, bien sea un análisis estructural, una toma de muestras y los ensayos o pruebas de carga que sean precisos, así como los cálculos oportunos.*

5. *En el proyecto se debe prever el acceso a aquellas zonas que se consideren más expuestas al deterioro, tanto por agentes exteriores, como por el propio uso del edificio (zonas húmedas), y en función de la adecuación de la solución proyectada (cámaras ventiladas, barreras antihumedad, barreras anticondensación).*

6. *Debe condicionarse el uso de materiales restringidos... al proyecto de medios de protección, con expresión explicita del programa de conservación y mantenimiento correspondiente.*

7. *Las fábricas con armaduras de tendel, que incluyan tratamientos de autoprotección deben revisarse al menos, cada 10 años. Se sustituirán o renovarán aquellos acabados protectores que por su estado hayan perdido su eficacia.*

8. *En el caso de desarrollar trabajos de limpieza, se analizará el efecto que puedan tener los productos aplicados sobre los diversos materiales que constituyen el muro y sobre el sistema de protección de las armaduras en su caso".*

4.3.2 Condiciones específicas de mantenimiento de las fachadas de ladrillo

Además de las condiciones de mantenimiento establecidas con carácter general en el DB SE-F, se indican otras, de carácter particular, para su aplicación a los elementos de fábrica de ladrillo.

La propiedad debe conservar en su poder la documentación técnica relativa a los elementos de fábrica de ladrillo, en los que deben figurar los siguientes datos:

- El uso y destino previsto para los locales que delimitan las fábricas.
- Las acciones horizontales previstas para los muros de cerramiento.
- La indicación de los sistemas de arriostramiento.

Cualquier alteración en la forma de trabajo de los cerramientos o en sus condiciones de sustentación, incluso la apertura de huecos en fachada o rozas de profundidad superior a la sexta parte del espesor del muro, se debe realizar con el correspondiente proyecto suscrito por un técnico competente.

Las fábricas de ladrillo se deben mantener protegidas de la humedad permanente, denunciando cualquier fuga observada en las canalizaciones de suministro o de evacuación de agua.

Cada diez años, y siempre que se observe una anomalía, se debe realizar una inspección de los elementos de fábrica. Cualquier alteración apreciable, como fisuras de retracción, de expansión por humedad, o debidas a asientos, desplomes o envejecimiento indebido debe ser analizada por un técnico competente que dictaminará sobre su importancia y peligrosidad y, en su caso, las reparaciones oportunas.

Cuando se precise la limpieza de las fábricas de ladrillo cara vista, se deben lavar preferentemente con cepillo y agua, o con una solución de ácido adecuado.

Se debe aprovechar cualquier obra de reforma en la que sea necesario romper las fábricas para comprobar el estado de las armaduras, los elementos de anclaje y demás elementos ocultos.

Protección contra el *graffiti*

El *graffiti* es una acción a la que están expuestas las fachadas cerámicas, ya que su ubicación exterior hace de ellas un excelente escaparate para este género de arte.

Aunque existen productos específicos[25] que se califican de eficaces ante el *anti-graffiti,* se ha observado que las fachadas protegidas con estos productos no conservan ni el color ni el brillo de la cerámica original. Por ello, es aconsejable el empleo de disolventes neutros para la limpieza de las fachadas cerámicas ante este tipo de agresión. El *graffiti* se elimina con mayor facilidad del material cerámico vidriado que de las juntas.

Mantenimiento de las juntas

La durabilidad de las fachadas cerámicas depende fundamentalmente de la adecuada conservación del material de las juntas, así como de su diseño, ejecución y mantenimiento. No se debe olvidar que las juntas son el punto crítico de las superficies cerámicas, en el que comienza la mayor parte de los procesos de degradación.

Las actuaciones preventivas, entre las que se incluyen el diseño adecuado de las juntas y la planificación de su mantenimiento, constituyen la estrategia más adecuada para evitar la degradación de los cerramientos cerámicos durante su vida útil, tanto desde el punto de vista técnico como desde el punto de vista económico.

La limpieza periódica de las juntas asegura su permeabilidad al vapor de condensación, característica que es esencial para el intercambio gaseoso.

La limpieza se debe efectuar con productos preferentemente neutros, evitando las sustancias fuertemente alcalinas o ácidas, o las que contienen sulfatos en su composición. Este tipo de compuestos es uno de los principales agentes que causan el deterioro del material de las juntas.

25 Son productos compuestos básicamente de un barniz y algún tipo de silicona hidrófuga.

5. Requisitos

5.1 Requisito de seguridad estructural 139

5.1.1 Descripción de los tipos estructurales de referencia 139
5.1.2 Cerramiento confinado 142
Ejemplo 1 148
Ejemplo 2 152
Ejemplo 3 154
Ejemplo 4 160
Ejemplo 5 178
5.1.3 Cerramiento anclado 183
Ejemplo 6 189
Ejemplo 7 192

5.2 Requisito de estanquidad 199

5.2.1 Tipos de humedades 200
5.2.2 Medidas de prevención contra las humedades 204
5.2.3 Solución de fachada con cámara ventilada 214

5.3 Requisito de ahorro de energía 217

5.3.1 Valores de diseño que definen las prestaciones energéticas 218
5.3.2 Conceptos básicos sobre la transmisión del calor y del vapor de agua 220
5.3.3 Materiales aislantes 226
5.3.4 Normativa sobre ahorro de energía 232
5.3.5 Requisitos del DB HE 1 para los cerramientos 236
Ejemplo 8 240
5.3.6 Puentes térmicos 247
5.3.7 Posición del material aislante 249

5.4 Requisito de protección contra el ruido 251

5.4.1 Conceptos básicos sobre la transmisión del sonido 252
5.4.2 Normativa sobre protección contra el ruido 266
5.4.3 Comportamiento de las fachadas de ladrillo cara vista frente al ruido 269
5.4.4 Resultados de ensayos en fachadas ventiladas de ladrillo cara vista 269

5.5 Requisito de protección contra incendio 291

5.5.1 Aplicación del DB SI a los cerramientos de fachada 292

GEO HIDROL

5. Requisitos

Los *requisitos básicos de la edificación* fueron establecidos en la Ley 38/1999 de 5 de noviembre de *"Ordenación de la Edificación"* (LOE) con el fin de garantizar la seguridad de las personas, el bienestar de la sociedad y la protección del medio ambiente.

Los requisitos mencionados en la LOE, que constituye el núcleo central de la regulación del C.T.E., abarcan aspectos relativos a la funcionalidad (utilización, accesibilidad y acceso a los servicios de telecomunicación, audiovisuales y de información), relativos a la seguridad (estructural, en caso de incendio y de utilización) y relativos a la habitabilidad (higiene, salud y protección del medio ambiente, protección contra el ruido, ahorro de energía y aislamiento térmico).

El Código Técnico desarrolla en los correspondientes Documentos Básicos, según se indica en la LOE, los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad, dejando los de funcionalidad para otros órganos competentes.

El Código está planteado con un enfoque moderno denominado *"por objetivos o prestaciones"* que son las exigencias que han de cumplir, tanto el edificio como cada una de sus partes, y las características de los materiales, productos o sistemas. Este enfoque por objetivos es semejante al adoptado en el ámbito de la Unión Europea y también se alinea con el denominado *"enfoque basado en prestaciones"*, propugnado por las principales organizaciones internacionales relacionadas con los códigos de edificación en los que España participa activamente, tales como el Consejo Internacional para la Investigación e Innovación de la Edificación y Construcción (CIB), o el Comité Interjurisdiccional de Colaboración Reglamentaria (IRCC).

La creciente tendencia en el mundo de introducir códigos basados en prestaciones es fundamental para mejorar la competitividad y eficiencia en el sector de la construcción. Al fomentar la innovación y la flexibilidad en general, los códigos de la edificación basados en prestaciones potencian el uso de nuevas técnicas y prácticas constructivas, aumentando considerablemente la eficiencia del proceso.

Esta sección está dedicada a la descripción de los requisitos básicos relacionados con las prestaciones de los edificios que afectan a los cerramientos de fachada, y a la exposición pormenorizada de los procedimientos y parámetros a utilizar para verificar su cumplimiento, cuando se utilizan soluciones convencionales con ladrillo cerámico cara vista. En secciones posteriores se analiza la eficiencia de otras soluciones no convencionales en el cumplimiento de los requisitos que aquí se detallan.

5.1 Requisito de seguridad estructural

Este apartado está dedicado fundamentalmente a la descripción del comportamiento mecánico de las fábricas de ladrillo cerámico, cuando se utilizan con la única función de cerramiento, y en la presentación de los modelos de análisis disponibles para la verificación de los requisitos de seguridad estructural exigidos por el Código Técnico de la Edificación.

Los modelos de análisis que se presentan son los que se refieren a la justificación del cumplimiento de los *estados límite últimos* (condiciones de estabilidad y resistencia) frente a las acciones de naturaleza mecánica que inciden en los cerramientos, fundamentalmente peso propio y acción horizontal de viento o sismo; incluyendo los efectos de segundo orden.

Los aspectos relacionados con el control de fisuración se tratan sólo desde el punto de vista de prevención de riesgos, ya que no existen modelos establecidos para proceder a su cuantificación; si bien, en cada caso planteado se indican los factores que intervienen en la valoración del riesgo de fisuración, y los procedimientos recomendados para prevenirlo.

5.1.1 Descripción de los tipos estructurales de referencia

La primera condición esencial de carácter mecánico que debe cumplir el cerramiento, como cualquier otro elemento constructivo, es su estabilidad.

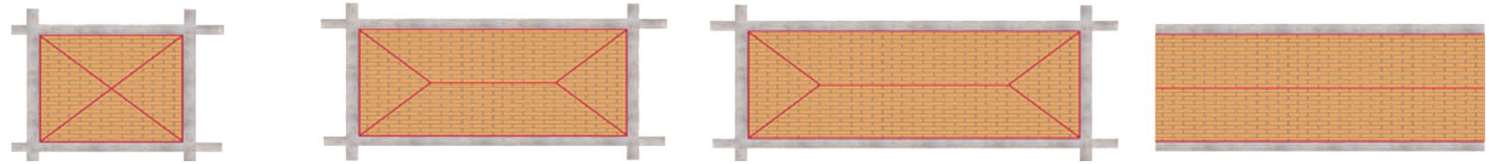
Verificar la estabilidad de un elemento supone encontrar una situación posible de equilibrio estable frente a las agresiones de tipo mecánico (acciones y reacciones) que inciden sobre él. Esta situación de equilibrio se debe conseguir a costa de tensiones soportables por el material, cuyo análisis constituye el objetivo de la verificación de los requisitos resistentes; y, además, en condiciones aceptables para la función que debe desempeñar el elemento, cuyo control es el objetivo de la comprobación de las condiciones de servicio.

La forma convencional de construir la hoja exterior de un cerramiento de fábrica de ladrillo cerámico consiste en sustentarlo en la estructura portante del edificio, generalmente constituida por pórticos de hormigón o acero y forjados de hormigón. Las acciones fundamentales a las que debe hacer frente el cerramiento son de dos tipos: gravitatorias, originadas al menos por su propio peso; y horizontales, debidas a la acción de viento o sismo[1]. Las reacciones necesarias para contrarrestar estas acciones deben ser suministradas por los elementos de sustentación, que pueden ser horizontales (caso de cerramientos sustentados en base y cabeza por los forjados) o verticales (tales como cerramientos sustentados en soportes, muros o pilastras).

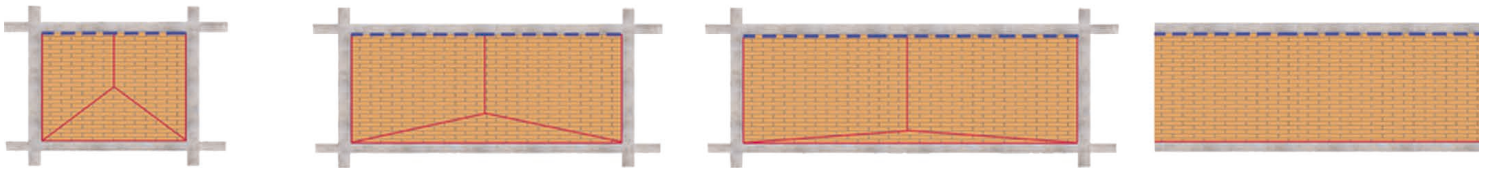
En estas condiciones, el tipo estructural en el que se pueden incluir los cerramientos de fachada para su análisis es el de *"placa"* sustentada en los bordes. En general, la solicitación predominante es de flexión, combinada en mayor o menor medida con solicitación axil de compresión. Sin embargo, el esfuerzo de compresión procedente de la acción gravitatoria no suele ser condicionante para el dimensionado, puesto que debido a que el material que nos ocupa es de carácter pétreo, en la mayoría de los casos se trata de una acción *"estabilizante"* y, por tanto, favorable para el comportamiento mecánico[2].

Los esfuerzos fundamentales que se generan en los cerramientos sustentados en una estructura porticada corresponden, por tanto, al traslado de la fuerza ocasionada por el viento o sismo, a través del paño o celda comprendida entre los elementos estructurales (soportes y vigas de fachada o zunchos de borde de forjado). La flexión producida en un elemento superficial por este traslado de fuerzas de dirección perpendicular al elemento es de carácter bidireccional, con predominio de flexión en una u otra dirección, según las proporciones del paño y las condiciones de sustentación en los bordes.

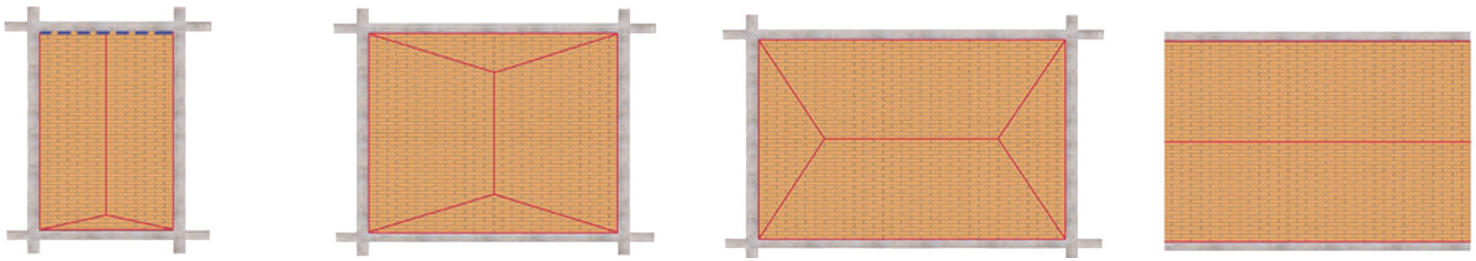
En general, la distancia entre forjados en edificios convencionales suele estar comprendida en una horquilla de valores relativamente estrecha, mientras que la distancia entre soportes



Paño sustentado en cuatro bordes. Altura igual o menor que longitud.



Paño sustentado en tres bordes (con junta horizontal de movimiento). Altura igual o menor que longitud.



Paño sustentado en tres, cuatro o dos bordes. Altura igual o mayor que longitud.

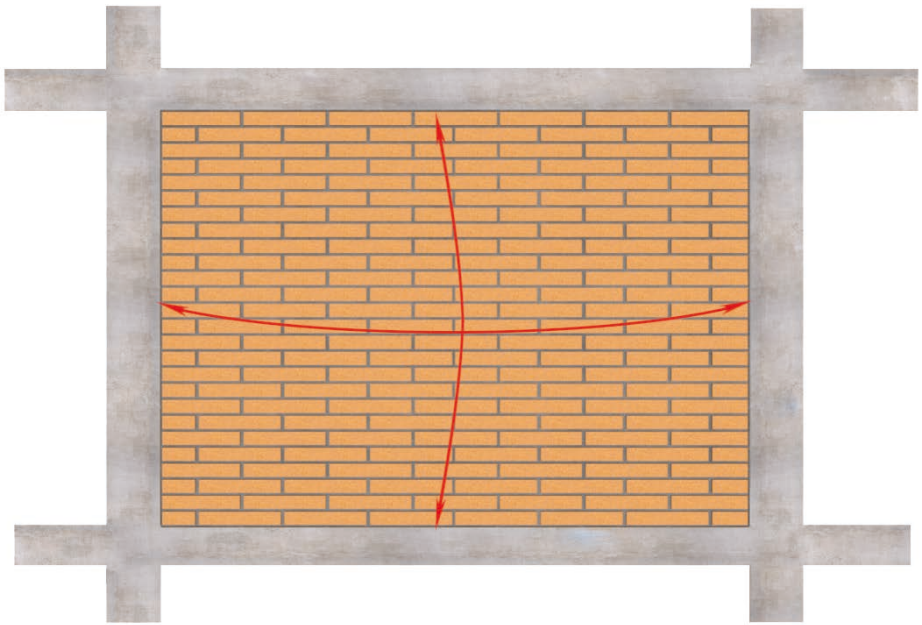
Funcionamiento en "*placa*" de los paños de cerramiento. Patrones de rotura.

oscila entre valores muy dispersos; pudiendo, incluso, no existir soportes en el plano de fachada.

En los casos en los que no existan soportes disponibles para la sustentación del cerramiento, o en los que la distancia entre ellos sea muy superior a la altura libre de planta, el comportamiento anteriormente descrito deviene en flexión vertical (unidireccional) entre forjados, con plano de rotura paralelo a los tendeles.

Análogamente, si se destruye la conexión del cerramiento con los forjados, el comportamiento deviene en flexión horizontal (unidireccional) entre soportes, siendo imprescindible la presencia de los mismos para el funcionamiento mecánico[3].

En un análisis en agotamiento de un material no isótropo, como es el caso de la fábrica de ladrillo, la parte de carga que se transmite por flexión en una u otra dirección, no sólo depende de la proporción de dimensiones y número de bordes sustentados, sino además de la relación entre las distintas capacidades resistentes de la fábrica. Ello supone evaluar un prorrateo de resistencias para realizar el análisis correspondiente[4].



Paño sustentado en cuatro bordes. Flexión en dos direcciones.

1 Existen acciones de otra naturaleza, como son los impactos, explosiones, etc., que no se incluyen por quedar fuera del alcance de este capítulo.

2 Sólo en determinadas situaciones y ante esfuerzos no deseados generados por condiciones impuestas en la sustentación, la solicitación de compresión con la flexión asociada que implica el pandeo, se puede convertir en solicitación fundamental para determinar el dimensionado.

3 Pueden existir situaciones intermedias. Por ejemplo, el caso del cerramiento de una nave con cubierta de chapa o panel sándwich, sustentado en la base pero no en cabeza. En este caso, el comportamiento sería el de placa sustentada en tres bordes (bidireccional).

4 Esta circunstancia supone, además, que se puede modificar el comportamiento interviniendo únicamente en la capacidad resistente de la propia fábrica, sin alterar el resto de condiciones; por ejemplo, a base de incorporar armadura en los tendeles se puede aumentar notablemente la resistencia a flexión horizontal, llegando incluso a ser despreciable la componente de flexión vertical entre forjados.

5.1.2 Cerramiento confinado

El primer tipo constructivo que se expone para presentar los procedimientos de análisis y verificación de estabilidad y resistencia, es el que hemos definido *a priori* como *solución convencional*, y en la situación más sencilla posible que corresponde a la de cerramiento confinado entre forjados, sin presencia de soportes.

Se ha elegido este caso como punto de partida por varias razones. En primer lugar, los forjados siempre existen, entendiendo que estamos hablando de cerramientos convencionales de edificios de pisos; incluso los edificios industriales, tales como naves, sin forjado propiamente dicho en cubierta, suelen tener vigas de coronación en los pórticos perimetrales.

La sustentación de los paños en los forjados o en vigas de borde siempre es posible, mientras que la presencia de soportes en fachada no es tan general como sería deseable, al menos con luces de dimensión parecida a la altura libre de plantas. Lo normal es que, si existen soportes estructurales disponibles en la fachada del edificio, las luces entre ellos sean del orden del doble de la altura entre plantas, por lo que su presencia tiene poca trascendencia en este análisis.

Además, la consideración de *"confinamiento"* requiere, como condición imprescindible, que se puedan contrarrestar *"empujes"* en las sustentaciones. Los empujes son reacciones perpendiculares a las acciones, por lo que aparecen en parejas, de valor igual y signo contrario, en cada una de las sustentaciones. Contra los forjados, por el hecho de estar cargados, el contrarresto del empuje se produce de forma natural; mientras que, contra los soportes, no se puede garantizar la presencia de la reacción necesaria, sobre todo en el soporte extremo del pórtico, que carece de contrarresto.

Con el cerramiento confinado sólo entre forjados, sin considerar los soportes, se puede hacer un análisis plano muy sencillo. El comportamiento mecánico del muro corresponde al caso de elemento solicitado fundamentalmente a flexión vertical, con luz de flexión igual a la altura libre entre plantas. Se trata de la situación más fácilmente generalizable y, por otra parte, la más sencilla de analizar y ejecutar.

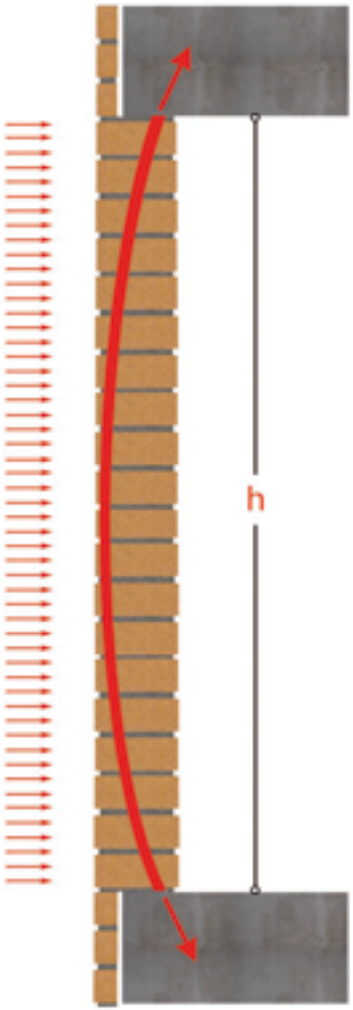
La acción fundamental para verificar los requisitos de resistencia y estabilidad corresponde a la acción de viento. La acción gravitatoria, cuando procede únicamente del propio peso del paño entre forjados, no tiene entidad suficiente para producir tensiones elevadas y, en cualquier caso, combinada con la acción horizontal de viento tendría efecto favorable; razón por la cual, en los casos habituales, se puede despreciar[5].

Verificar el requisito de estabilidad supone comprobar que no existe posibilidad de vuelco. Para evitar el vuelco ante la acción gravitatoria no se precisa ninguna condición especial en el apoyo, puesto que el propio movimiento de vuelco genera un efecto de acodalado que lo imposibilita. Si la dimensión del apoyo en la base fuera extremadamente reducida, el acodalamiento se tiene que producir a costa de tensiones de compresión elevadas, pero bastan escasos milímetros de apoyo para conseguir resistir con suficiente seguridad esta acción.

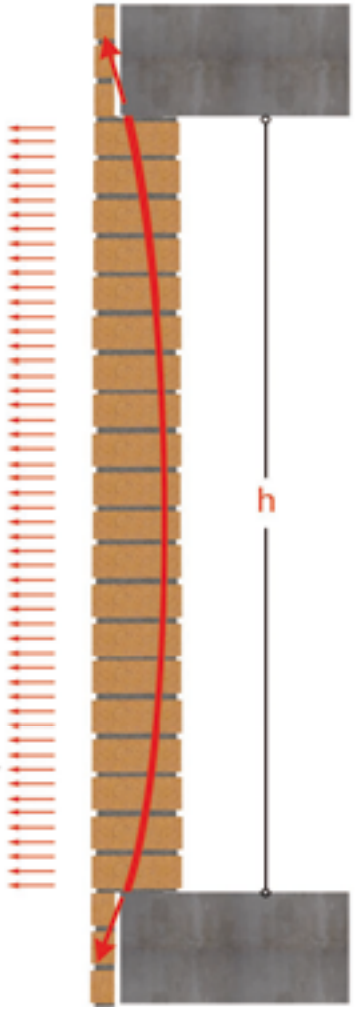
Queda, por tanto, estudiar el comportamiento ante la acción horizontal. Aunque, efectivamente, el traslado de esta acción a los extremos en los que se sustenta el cerramiento supone una solicitación de flexión, sin embargo, debido a que el cerramiento es un elemento extenso cuyas secciones extremas están confinadas, el trabajo estructural se puede conseguir prescindiendo de las tracciones en el material, a costa de la generación de *"empujes"*. Para ello es suficiente que sea posible encajar, en el espesor del cerramiento, un arco que reproduzca el *antifunicular* de la carga, siempre que los extremos estén suficientemente coaccionados para poder generar la reacción oblicua correspondiente.

Este funcionamiento para el traslado de cargas, con solicitación exclusivamente de compresión, es el conocido como *"efecto arco"*; y se desarrolla en los materiales pétreos siempre que las condiciones de sustentación y la geometría del elemento (en este caso, la relación entre el espesor y la altura del muro) lo permitan, puesto que se trata del funcionamiento estructural más rentable energéticamente en materiales que tienen muy mermada la posibilidad de resistir tracciones. Puesto que no está materializado el *"tirante"* del arco, es imprescindible que se puedan contrarrestar las correspondientes reacciones oblicuas en los extremos.

5 El modelo de análisis que presenta el DB SE-F y las fórmulas a las que conduce están deducidos suponiendo cerramiento *sin peso*, a favor de la seguridad.

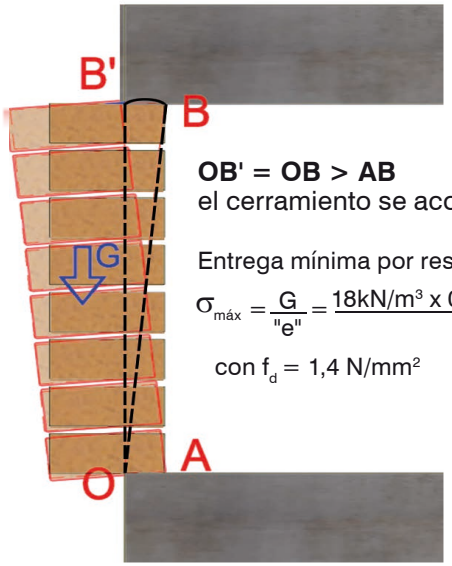


Presión de viento.



Succión de viento.

Cerramiento confinado. Estabilidad frente a acción horizontal



OB' = OB > AB
el cerramiento se acodala

Entrega mínima por resistencia:

$$\sigma_{máx} = \frac{G}{"e"} = \frac{18kN/m^3 \times 0{,}115m \times 3{,}00m}{"e"} < f_d$$

con $f_d = 1{,}4\ N/mm^2$ $\quad e_{mín} = 5mm$

Cerramiento confinado. Estabilidad frente a acción gravitatoria

Cerramiento confinado: Funcionamiento en arco

Los *"antifuniculares"* que se pueden formar en el espesor del cerramiento para equilibrar una acción horizontal uniformemente distribuida son infinitos, puesto que se trata de arcos parabólicos con el valor de la *"sagita"* o altura sin determinar. Los arcos muy peraltados conducen a valores elevados del canto de la sección resistente, pero con bielas comprimidas muy reducidas y, por consiguiente, muy tensas. Por el contrario, los arcos más rebajados, conducen a cantos menores de la sección resistente, pero con bielas comprimidas más amplias.

El principio del *"mínimo trabajo de deformación"* permite deducir la geometría particular del arco que se origina realmente, mediante un sencillo cálculo de mínimos.

Si suponemos que el brazo mecánico de la sección o altura del arco *"z"*, es una fracción *"α"* del espesor de cálculo *"t_d"*, se tiene:

- brazo mecánico de la sección:
  $z = \alpha \cdot t_d$
- ancho de la biela comprimida:
  $b = (1 - \alpha) \cdot t_d$
- deformación o "flecha" del arco:

$$\delta = \frac{\varepsilon}{4 \cdot z} \cdot h^2$$

siendo:

- ε → la deformación unitaria = σ / E
- σ → la tensión de la biela comprimida = U / b
- U → la resultante de fuerzas de compresión en la biela = M_{Sd} / z
- M_{sd} → el valor de cálculo de momento flector debido a la acción horizontal = $q_d \cdot h^2 / 8$
- q_d → el valor de cálculo de la acción horizontal
- E → el módulo de elasticidad de la fábrica
- h → la altura libre del paño

Sustituyendo los valores indicados, se tiene:

- resultante de fuerzas de compresión en la biela:
  $U = M_{Sd} / z = (q_d \cdot h^2 / 8) / (\alpha \cdot t_d)$
- tensión de la biela comprimida:
  $\sigma = U / b = M_{Sd} / (z \cdot b) = (q_d \cdot h^2 / 8) / [\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot t_d^2]$
- deformación unitaria:
  $\varepsilon = \sigma / E = (q_d \cdot h^2 / 8) / [\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot t_d^2 \cdot E]$
- flecha del arco:
  $\delta = \varepsilon \cdot h^2 / (4 \cdot z) = q_d \cdot h^4 / [32 \cdot \alpha^2 \cdot (1 - \alpha) \cdot t_d^3 \cdot E]$

Derivando el valor de la flecha "δ" respecto de α, e igualando a cero, se tiene el valor de α que corresponde al valor mínimo de la deformación:

$$\frac{d\delta}{d\alpha} = 0 \rightarrow \frac{1}{\alpha^2} \cdot \frac{1}{(1-\alpha)^2} - \frac{1}{(1-\alpha)} \cdot \frac{2}{\alpha^3} = 0$$

$$\frac{1}{(1-\alpha)} - \frac{2}{\alpha} = 0 \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{2}{3}$$

Según lo anterior, de todos los arcos posibles, el que realmente se forma es el que tiene una altura de valor igual a 2/3 del espesor de cálculo del cerramiento[6].

Cerramiento confinado: Procedimiento de análisis y dimensionado

- *Análisis en primer orden*

El procedimiento de verificación del requisito de resistencia consiste esencialmente en obtener la máxima solicitación producida por la acción horizontal y compararla con la capacidad resistente del cerramiento convertido en *"arco estribado en sus extremos"*, comprobando que se cumple la inecuación siguiente sin superar el valor de cálculo de la resistencia a compresión de la fábrica:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

siendo:

- M_{Sd} → el valor de cálculo de la solicitación producida por la acción horizontal
- M_{Rd} → el valor de cálculo de la capacidad resistente del cerramiento por efecto arco

El momento flector máximo producido por la acción horizontal, tiene el valor definido anteriormente:

$$M_{Sd} = q_d \cdot h^2 / 8$$

siendo:

- q_d → el valor de cálculo de la acción horizontal (presión o succión) = $q_e \ \gamma_Q$
  con:
  - q_e → el valor característico de la acción horizontal
  - γ_Q → el coeficiente de seguridad de la acción horizontal
  - h → la altura libre de planta entre forjados

La capacidad resistente del cerramiento tiene el valor:

$$M_{Rd} = U \cdot z = f_d \cdot b \cdot z = f_d \cdot (1 / 3) \cdot t_d \cdot (2 / 3) \cdot t_d = (2 / 9) \cdot f_d \cdot t_d^2$$

siendo:

- U_{cd} → la capacidad resistente de la biela comprimida = $f_d \cdot b = (f_k / \gamma_M) \cdot (1 / 3) \cdot t_d$
  con:
  - f_d → el valor de cálculo de la resistencia a compresión de la fábrica = f_k / γ_M
  - f_k → el valor característico de la resistencia a compresión de la fábrica
  - γ_M → el coeficiente de seguridad del material
  - b → el ancho de la biela comprimida = $(1 / 3) \cdot t_d$
  - t_d → el espesor de cálculo del cerramiento (el espesor real, a presión; el ancho de entrega, a succión)
  - z → el brazo mecánico de la sección (altura del arco) = $(2 / 3) \cdot t_d$

6 Este resultado está recogido en la última versión del DB SE-F, artículo 5.4.4 *"Arco estribado en sus extremos"*.

Sustituyendo en la inecuación de resistencia se tiene:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \rightarrow q_d \cdot h^2 / 8 \leq (2 / 9) \cdot f_d \cdot t_d^2 \rightarrow q_d \cdot h^2 \leq (16 / 9) \cdot f_d \cdot t_d^2$$

Según lo anterior, la verificación del requisito de resistencia, expresado en función de la esbeltez, tiene la expresión siguiente:

$$q_d \cdot (h / t_d)^2 \leq (16 / 9) \cdot f_d \rightarrow \lambda^2 \leq (16 / 9) \cdot (f_d / q_d)$$

siendo:

- λ → la esbeltez del cerramiento = h / t_d

Para un valor habitual de presión de viento de 0,8 kN/m²; con una resistencia de la fábrica de 4,0 N/mm²; y coeficientes de seguridad $\gamma_M = 2,5$ y $\gamma_Q = 1,5$; se obtiene que la condición de resistencia a presión de viento de un cerramiento confinado, en primer orden, se cumple para valores de esbeltez no superiores a 48.

La comprobación resistente está planteada en términos de sección, comparando la solicitación contra la capacidad resistente. El estado de tensiones en cada punto del bloque comprimido no queda reflejado explícitamente en la comprobación aunque, por tratarse de un análisis lineal, se puede deducir de forma inmediata el valor máximo de la tensión normal, por si fuere necesario introducir tensiones adicionales procedentes de otras causas.

Si la tensión normal máxima y el momento flector máximo están relacionados linealmente, se tiene:

$$M_{Sd} / M_{Rd} = \sigma_{d, máx} / f_d$$

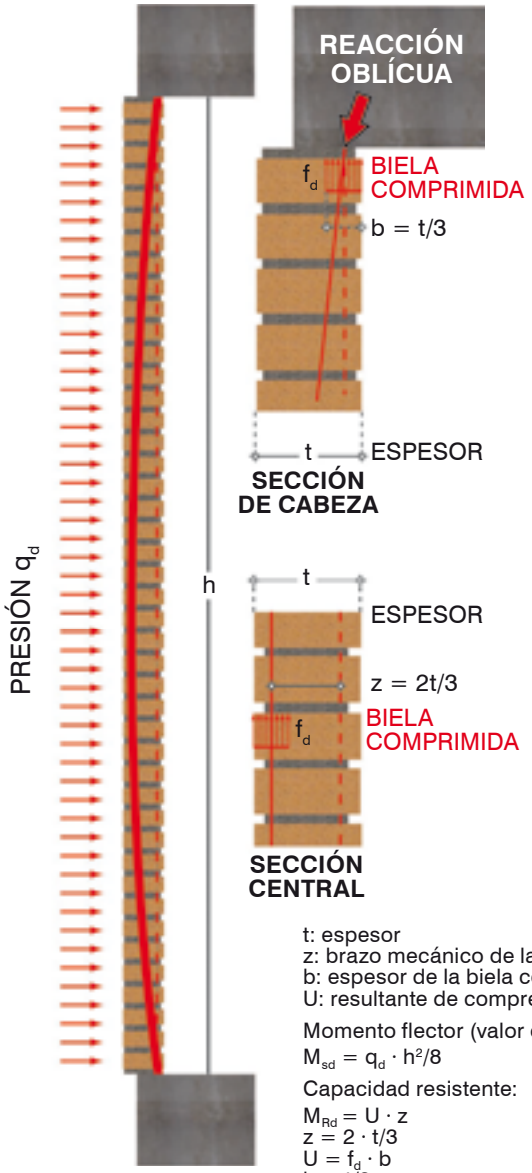
Por tanto, el valor de cálculo de la máxima tensión normal producida por la acción horizontal es:

$$\sigma_{d, máx} = f_d \cdot M_{Sd} / M_{Rd}$$

siendo:

- $\sigma_{d, máx}$ → el valor de cálculo de la tensión máxima de compresión
- f_d → el valor de cálculo de la resistencia a compresión de la fábrica = f_k / γ_M
- f_k → el valor característico de la resistencia a compresión de la fábrica
- γ_M → el coeficiente de seguridad del material
- M_{Sd} → el valor de cálculo del momento flector máximo que solicita la sección
- M_{Rd} → el valor de cálculo de la capacidad resistente de la sección

El esquema resistente y los parámetros fundamentales que intervienen, así como las fórmulas de aplicación se ilustran en la figura adjunta.



t: espesor
z: brazo mecánico de la sección
b: espesor de la biela comprimida
U: resultante de compresión en la biela

Momento flector (valor de cálculo):

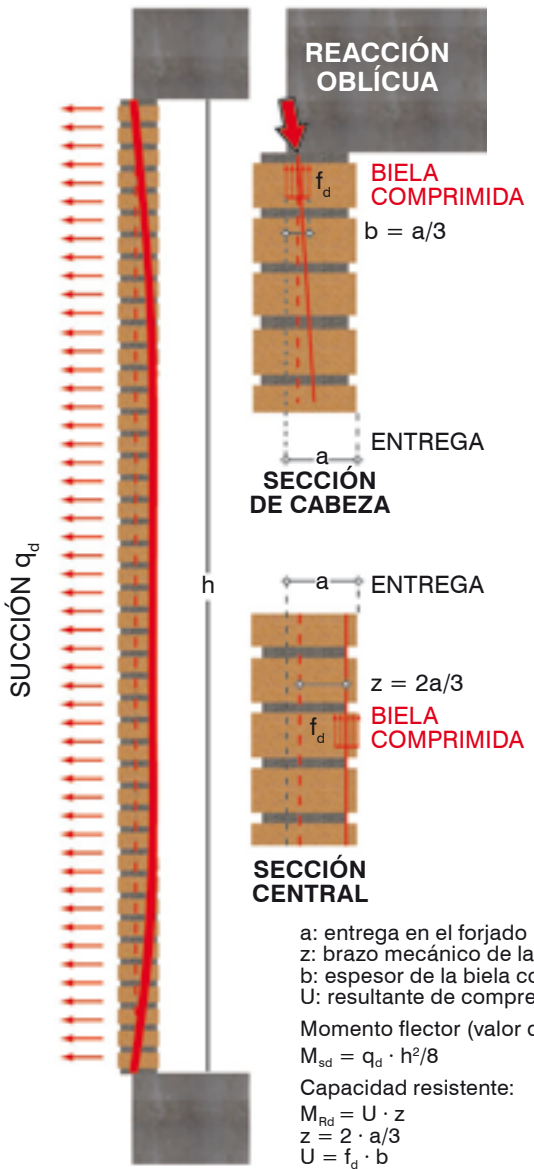
$M_{sd} = q_d \cdot h^2/8$

Capacidad resistente:

$M_{Rd} = U \cdot z$
$z = 2 \cdot t/3$
$U = f_d \cdot b$
$b = t/3$
$M_{Rd} = 2 \cdot f_d \cdot t^2/g$

Comprobación resistente:

$M_{Sd} < M_{Rd}$
$(h/t)^2 < 16 \cdot f_d / 9 \cdot q_d$



a: entrega en el forjado
z: brazo mecánico de la sección
b: espesor de la biela comprimida
U: resultante de compresión en la biela

Momento flector (valor de cálculo):

$M_{sd} = q_d \cdot h^2/8$

Capacidad resistente:

$M_{Rd} = U \cdot z$
$z = 2 \cdot a/3$
$U = f_d \cdot b$
$b = a/3$
$M_{Rd} = 2 \cdot f_d \cdot a^2/g$

Comprobación resistente:

$M_{Sd} < M_{Rd}$
$(h/a)^2 < 16 \cdot f_d / 9 \cdot q_d$

Cerramiento confinado. Análisis en primer orden a presión y succión.

Se desarrolla a continuación un ejemplo práctico para facilitar la aplicación del procedimiento de comprobación a viento de un cerramiento confinado entre forjados, eligiendo un caso que puede ser representativo de las situaciones habituales y cuyas características geométricas se mantendrán en los ejemplos posteriores.

EJEMPLO 1

Cerramiento confinado entre forjados
Análisis en primer orden. Entrega 8 cm

Características geométricas:

- Cerramiento de ladrillo confinado entre forjados sin soportes en fachada
- Altura libre de planta: → h = 2,70 m
- Espesor del muro (½ pie formato castellano): → t = 115 mm
- Ancho de la entrega en forjados → a = 80 mm

Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de las piezas: $f_b = 10\ N/mm^2$
- Resistencia a compresión del mortero (M 5): $f_m = 5\ N/mm^2$
- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4\ N/mm^2$ (7)
- Valor característico de la acción de viento: (8)
  - Presión: $q_{e,\,presión} = 0{,}5\ kN/m^2 \cdot 2{,}0 \cdot 0{,}8 = 0{,}8\ kN/m^2$ (9)
  - Succión: $q_{e,\,succión} = 0{,}5\ kN/m^2 \cdot 2{,}0 \cdot 0{,}5 = 0{,}5\ kN/m^2$ (10)
- Coeficiente de seguridad de la fábrica: $\gamma_M = 2{,}5$ (11)
- Coeficiente de seguridad de acciones: $\gamma_Q = 1{,}50$ (12)

7 Según DB SE-F, tabla 4.4 *"Resistencia característica a la compresión de fábricas usuales f_k (N/mm²)".*

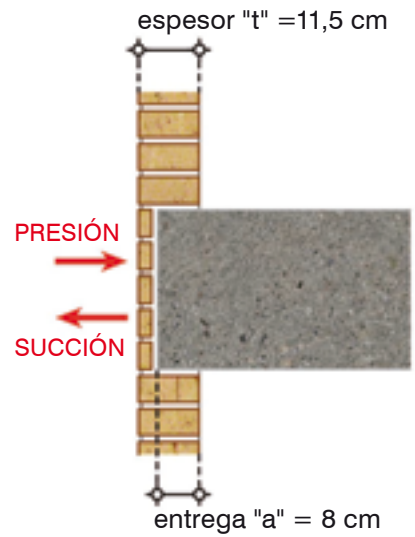
8 Según DB SE-AE, artículo 3.2.2 *"Acción de viento"*, para edificios urbanos de hasta ocho plantas.

9 Según DB SE-AE, tabla 3.5 *"Coeficiente eólico en edificios de pisos"*, para edificios de esbeltez mayor de 0,50 en el plano paralelo al viento.

10 Según DB SE-AE, tabla 3.5 *"Coeficiente eólico en edificios de pisos"*, para edificios de esbeltez mayor de 0,50 en el plano paralelo al viento.

11 Según DB SE-F, tabla 4.8 *"Coeficientes parciales de seguridad γ_M"*, para categoría del control de fabricación II y categoría de la ejecución B.

12 Según DB SE, tabla 4.1 *"Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones"*, tomando el que corresponde a acción variable de efecto desfavorable.



Análisis:

Comprobación a presión:

- Valor de cálculo del momento flector máximo: $M_{Sd,\ presión} = q_{e,\ presión} \cdot \gamma_Q \cdot h^2 / 8$ = 1,09 m·kN / m
- Espesor de cálculo: $t_{d,\ presión} = t$ (ver esquema) = 115 mm
- Ancho de la biela comprimida: $b_{presión} = (1 / 3) \cdot t_{d,\ presión}$ = 38,3 mm
- Capacidad resistente de la biela comprimida: $U_{cd} = f_d \cdot b_{presión} = (f_k / \gamma_M) \cdot b_{presión}$ = 61,3 kN / m
- Brazo eficaz de la sección resistente (altura del arco): $z_{presión} = (2 / 3) \cdot t_{d,\ presión}$ = 0,077 m
- Capacidad resistente a momento flector: $M_{Rd,\ presión} = U_{cd} \cdot z_{presión}$ = 4,70 m·kN / m
- Comprobación de resistencia: $M_{Sd,\ presión} \leq M_{Rd,\ presión}$

$M_{Sd,\ presión} = 0{,}8\ kN/m^2 \cdot 1{,}50 \cdot (2{,}70\ m)^2 / 8 = 1{,}09\ m{\cdot}kN / m\ <\ M_{Rd,\ presión} = 61{,}3\ kN/m \cdot 0{,}077\ m = 4{,}70\ m{\cdot}kN / m$. VALE

Comprobación a succión:

- Valor de cálculo del momento flector máximo: $M_{Sd,\ succión} = q_{e,\ succión} \cdot \gamma_Q \cdot h^2 / 8$ = 0,68 m·kN / m
- Espesor de cálculo: $t_{d,\ succión} = a$ (ver esquema) = 80 mm
- Ancho de la biela comprimida: $b_{succión} = (1 / 3) \cdot t_{d,\ succión}$ = 26,7 mm
- Capacidad resistente de la biela comprimida: $U_{cd} = f_d \cdot b_{succión} = (f_k / \gamma_M) \cdot b_{succión}$ = 42,7 kN / m
- Brazo eficaz de la sección resistente (altura del arco): $z_{succión} = (2 / 3) \cdot t_{d,\ succión}$ = 0,053 m
- Capacidad resistente a momento flector: $M_{Rd,\ succión} = U_{cd} \cdot z_{succión}$ = 2,28 m·kN / m
- Comprobación de resistencia: $M_{Sd,\ succión} \leq M_{Rd,\ succión}$

$M_{Sd,\ succión} = 0{,}5\ kN/m^2 \cdot 1{,}50 \cdot (2{,}70\ m)^2 / 8 = 0{,}68\ m{\cdot}kN / m\ <\ M_{Rd,\ succión} = 42{,}7\ kN/m \cdot 0{,}053\ m = 2{,}28\ m{\cdot}kN / m$. VALE

El comportamiento frente a la presión de viento no es siempre simétrico al comportamiento frente a la succión, debido a las condiciones particulares de entrega en los forjados. Por esta razón, se ha calculado el mismo cerramiento para ambas situaciones.

Observando las variables que intervienen en cada caso debe notarse que, frente a la presión, el sólido capaz en el que puede inscribirse el arco es el espesor total del cerramiento; mientras que, frente a la succión, sólo contabiliza el ancho de la entrega en el forjado. Como contrapartida, la succión de viento suele tener valores inferiores a la succión. Por todo ello, en principio, la verificación de resistencia requiere el análisis para los dos sentidos.

La esbeltez interviene en el análisis elevada al cuadrado, mientras que el valor de la carga interviene linealmente. Ello supone que, salvo en los casos de entrega completa o casi completa, es la succión la acción que resulta pésima para el cerramiento, a pesar de tener valores menores que la presión, puesto que interviene con valores de esbeltez más elevados.

En cualquier caso, el parámetro fundamental que determina un correcto comportamiento es la *entrega*[13] del cerramiento en el forjado. El otro parámetro fundamental es la *altura libre* de planta que, generalmente, viene impuesta por las características del proyecto. Con

13 Nótese que se dice *"entrega"* y no *"apoyo"*, para dar una idea del papel estructural de este parámetro en el tipo constructivo de cerramiento que se está analizando.

mayor rigor, es la razón entre la entrega y la altura, es decir, la *esbeltez*, el parámetro que determina los límites de un posible funcionamiento por efecto arco; nunca la razón entre la entrega y el espesor total, como se establece en algunos manuales al uso[14].

También es importante destacar que la esbeltez, principal determinante de la validez del comportamiento, es un parámetro *geométrico*, lo que coincide con el criterio tradicional del análisis de fábricas. Aunque en el proceso de comprobación figura como variable el valor de la resistencia a compresión de la fábrica, este parámetro de naturaleza mecánica tiene poca trascendencia en el análisis y, además, oscila entre una horquilla de valores relativamente estrecha, por lo que se puede considerar, en la práctica, como un invariante.

• *Análisis en segundo orden*

De las inecuaciones de comprobación resistente utilizadas en el ejemplo, se puede deducir la máxima altura libre que admite el cerramiento en esas condiciones de entrega; o bien, la entrega mínima admisible en esas condiciones de altura; o cualquier combinación viable entre ambas.

Con una sencilla operación se deduce que, para la entrega especificada de 8 cm, se podría llegar a una altura de planta de 4,92 m. O bien, que para la altura de 2,70 m bastaría una entrega de 44 mm. Con una entrega de 6 cm, aproximadamente la mitad del espesor del cerramiento, se podría llegar hasta 3,69 m de altura, y si la entrega en el forjado es total, la altura de planta podría ser de 5,60 m.

De este sencillo cálculo se deduce que, incluso en un análisis en primer orden, los cerramientos confinados son extremadamente sensibles a la condición de entrega en los forjados. Efectivamente, existe una fuerte restricción al funcionamiento por efecto arco de los cerramientos, cuando la entrega en los forjados se realiza parcialmente; algo que, por otra parte es necesario para poder chapar el frente de los mismos con plaquetas si se desea conseguir un aspecto de continuidad de la fachada.

Esta restricción, fundamentalmente relativa a la esbeltez, es todavía mayor si se tienen en cuenta los efectos de segundo orden, que no han sido considerados en el ejemplo anterior, y que se deben incluir en el análisis siempre que la esbeltez supere el valor 25, tal como indica el DB SE-F, artículo 5.4.4 *"Arco estribado en sus extremos"*, párrafo 3.

En el cómputo de la esbeltez, de igual forma que se ha hecho para la comprobación de resistencia, se debe tomar como espesor de cálculo el canto del sólido capaz en donde puede inscribirse el arco (DB SE-F, artículo 5.4.4 *"Arco estribado en sus extremos"*, párrafo 2), pues es ésta la variable que interviene en el análisis a todos los efectos. Prácticamente todos los cerramientos de ladrillo con entrega parcial en los forjados superan la esbeltez 25, por consiguiente es necesario considerar los efectos de segundo orden siempre que se adopte esta solución constructiva[15].

Considerar los efectos de segundo orden supone analizar el elemento con la geometría que le corresponde tras la deformación. La acción horizontal, actuando sobre el cerramiento, lo deforma; de manera que el brazo eficaz considerado inicialmente se reduce, disminuyendo en la misma proporción la capacidad resistente. El análisis en segundo orden supone un proceso iterativo que no siempre converge. Y la variable fundamental que lo determina no es la resistencia del material sino que, también en este caso, se trata de la esbeltez.

Cuando la esbeltez es pequeña (menor de 25), los efectos de segundo orden no alteran significativamente los resultados y, como se ha visto en el ejemplo anterior, la verificación de las condiciones resistentes para las situaciones habituales se consigue con suficiente margen o, dicho de otro modo, en esas situaciones el elemento no necesita exhibir su capacidad resistente a compresión. Cuando la esbeltez es elevada el proceso no converge, y el fallo se produce por inestabilidad, de forma similar al fallo por pandeo de una pieza comprimida con esbeltez superior a la esbeltez crítica[16]; en esta situación el elemento tampoco llega a exhibir su capacidad resistente a compresión porque la rotura se debe a una deformación imparable. Por ello, también ahora la resistencia a compresión de la fábrica tiene poca trascendencia en el análisis.

El proceso iterativo de análisis en segundo orden consiste en comprobar la capacidad resistente con la altura del arco corregida, deduciendo del canto total el valor de la flecha inicial δ_0 resultado de un primer análisis. Con el canto corregido se realiza un segundo análisis para obtener un nuevo valor de flecha δ_1, que implica una nueva corrección del canto, y así sucesivamente. El proceso sólo finaliza si es convergente, es decir, si los sucesivos valores de flecha son cada vez menores.

El análisis en este caso requiere calcular la tensión (para poder deducir la flecha) y la comprobación se puede realizar en cada iteración comparando la máxima tensión del bloque comprimido con el valor de la resistencia de cálculo de la fábrica, y verificando el cumplimiento de la inecuación siguiente:

$$\sigma_d < f_k / \gamma_M$$

siendo:

- $\sigma_d \rightarrow$ la tensión normal de cálculo en la biela comprimida
- $f_k \rightarrow$ la resistencia de cálculo a compresión de la fábrica
- $\gamma_M \rightarrow$ el coeficiente de seguridad del material

A continuación se desarrolla el mismo ejemplo anterior, analizando sólo la succión con los efectos de segundo orden.

Con objeto de que el ejemplo pueda servir para constatar la trascendencia que tiene en el análisis una modificación de las condiciones de sustentación, se analiza el mismo ejemplo para dos valores diferentes de entrega en el forjado, en previsión de que, a pesar de que se trata de la variable que se manifiesta más sensible en el comportamiento, sin embargo, es la que puede presentar mayores oscilaciones respecto a la especificación de proyecto debido al proceso de ejecución.

14 Ello significa que, si en la obra se produce la circunstancia de que el ancho de entrega disponible en el forjado para el cerramiento es inferior a lo especificado en proyecto, esto no implica necesariamente la invalidez de las condiciones de *"entrega"* (mal llamadas *"condiciones de apoyo"*); implica solamente la necesidad de rehacer el cálculo con la nueva dimensión real.

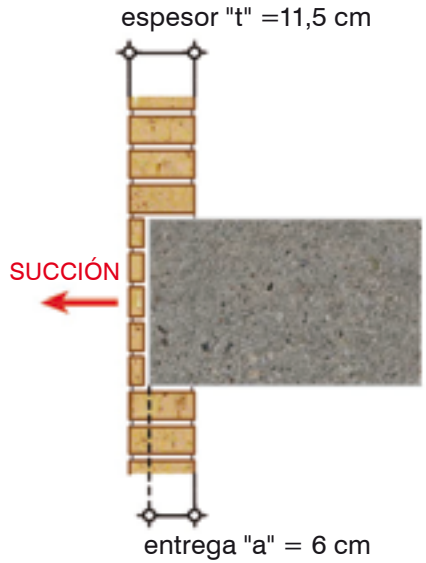
15 Para una entrega en el forjado de 8 cm, la esbeltez 25 se obtiene con una altura libre de 2 m.

16 Un fallo por inestabilidad supone una situación mucho más peligrosa que un fallo por resistencia, porque se produce súbitamente, sin previo aviso.

EJEMPLO 3

Cerramiento confinado entre forjados. Análisis en segundo orden. Entrega 6 cm

19 Las características anteriores son las mismas que las definidas en el ejemplo 2.



Características geométricas:

- Cerramiento de ladrillo confinado entre forjados sin soportes en fachada
- Altura libre de planta: $h = 2{,}70$ m
- Espesor del muro (½ pie formato castellano): $t = 115$ mm
- Ancho de la entrega en forjados: $a = 60$ mm

Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de las piezas: $f_b = 10$ N/mm²
- Resistencia a compresión del mortero (M5): $f_m = 5$ N/mm²
- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4$ N/mm²
- Valor característico de la acción de viento:
  - Succión: $q_{e,\,succión} = 0{,}5 \text{ kN/m}^2 \cdot 2{,}0 \cdot 0{,}5 = 0{,}5 \text{ kN/m}^2$
- Coeficiente de seguridad de la fábrica: $\gamma_M = 2{,}5$
- Coeficiente de seguridad de acciones: $\gamma_Q = 1{,}50$
- Módulo de elasticidad de la fábrica: $E = 1.000 \cdot f_k = 4.000 \text{ N/mm}^2$ (19)

Análisis:

Comprobación a succión:

- Valor de cálculo del momento flector máximo: $M_{Sd,\,succión} = q_{e,\,succión} \cdot \gamma_Q \cdot h^2 / 8$ = 0,68 m·kN / metro
- Ancho inicial de la biela comprimida: $b_0 = (1/3) \cdot t_d = (1/3) \cdot a$ = 20 mm
- Brazo eficaz inicial de la sección resistente: $z_0 = (2/3) \cdot t_d = (2/3) \cdot a$ = 0,040 m
- Resultante de la fuerza de compresión: $U_0 = M_{Sd} / z_0$ = 17,09 kN / metro
- Valor de la tensión inicial: $\sigma_{d,\,0} = U_0 / b_0$ = 0,854 N/mm²

- Valor de la deformación unitaria inicial: $\varepsilon_0 = \sigma_{d,0} / E = 0{,}854 / 4.000$ $= 0{,}214$ ‰
- Valor de la flecha inicial: $\delta_0 = \varepsilon_0 \cdot h^2 / (4 \cdot z_0)$ $= 9{,}73$ mm
- Corrección del valor de b: $b_1 = (1 / 3) \cdot (a - \delta_0)$ $= 16{,}8$ mm
- Corrección del valor de z: $z_1 = (2 / 3) \cdot (a - \delta_0)$ $= 0{,}034$ m
- Corrección del valor de fuerza de compresión: $U_1 = M_{Sd} / z_1$ $= 20{,}39$ kN / metro
- Corrección del valor de la tensión: $\sigma_{d,1} = U_1 / b_1$ $= 1{,}22$ N/mm²
- Valor de la nueva deformación unitaria: $\varepsilon_1 = \sigma_{d,1} / E = 1{,}22 / 4.000$ $= 0{,}304$ ‰
- Valor de la nueva flecha: $\delta_1 = \varepsilon_1 \cdot h^2 / (4 \cdot z_1)$ $= 16{,}55$ mm
- Incremento de flecha: $\delta_1 - \delta_0 = 16{,}55 \text{ mm} - 9{,}73 \text{ mm}$ $= 6{,}82$ mm

Segunda iteración:

- Corrección del valor de b: $b_2 = (1 / 3) \cdot (a - \delta_1)$ $= 14{,}5$ mm
- Corrección del valor de z: $z_2 = (2 / 3) \cdot (a - \delta_1)$ $= 0{,}029$ m
- Corrección del valor de fuerza de compresión: $U_2 = M_{Sd} / z_2$ $= 23{,}59$ kN / metro
- Corrección del valor de la tensión: $\sigma_{d,2} = U_2 / b_2$ $= 1{,}63$ N/mm²
- Valor de la nueva deformación unitaria: $\varepsilon_2 = \sigma_{d,2} / E = 1{,}63 / 4.000$ $= 0{,}407$ ‰
- Valor de la nueva flecha: $\delta_2 = \varepsilon_2 \cdot h^2 / (4 \cdot z_2)$ $= 25{,}62$ mm
- Incremento de flecha: $\delta_2 - \delta_1 = 25{,}62 \text{ mm} - 16{,}55 \text{ mm}$ $= 9{,}07$ mm

El incremento de flecha ha aumentado. El análisis no converge.

- Comprobación de la máxima tensión de cálculo: $\sigma_d \leq f_d = f_k / \gamma_M$ $= 1{,}60$ N/mm²

$\sigma_d = 1{,}63$ N/mm² > $f_d = 1{,}60$ N/mm². NO VALE

El ejemplo anterior pone de manifiesto lo indicado anteriormente, acerca de la enorme sensibilidad que tienen los cerramientos confinados a las condiciones de entrega en los forjados[20]. Con una entrega de 8 cm el cerramiento se halla en perfectas condiciones de estabilidad (converge rápidamente) y de resistencia (tiene un margen de seguridad tres veces superior al requerido). Con una pequeñísima variación de la entrega (de 8 cm a 6 cm) el valor de la flecha no converge y se supera el valor de la resistencia en la segunda iteración. En la quinta iteración, el canto del arco resulta negativo, por lo que la comprobación de resistencia sería inviable[21].

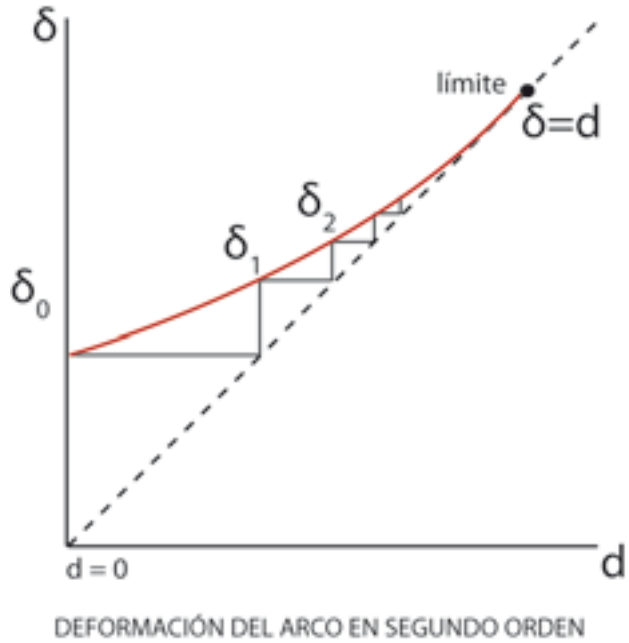
Los efectos de segundo orden suponen una penalización o disminución del canto disponible del arco, siempre y cuando el proceso sea convergente, como se ha visto en el ejemplo 2. Esta penalización está establecida en el DB SE-F artículo 5.4.4 *"Arco estribado en sus extremos"*, párrafo 3; donde se indica que resulta a favor de la seguridad adoptar como deformación del arco un valor igual a la cuarta parte del espesor de cálculo del cerramiento.

Esta regla simplifica mucho el análisis, porque elude todo el proceso iterativo, aunque conviene indicar la siguiente matización. El valor de deformación máxima establecido ($t_d/4$) es el que corresponde a la *esbeltez límite por estabilidad*[22], por consiguiente resulta conservador en todos los casos en los que la esbeltez es inferior. En el ejemplo 2 se ha obtenido, por cálculo iterativo, un valor de deformación total del arco en torno a 5 mm, mientras que ($t_d/4$) supondría una penalización de 20 mm (cuatro veces superior). Por el contrario, en los casos en los que se supera la esbeltez límite, no es posible establecer una penalización en términos de reducción del canto porque el fenómeno no converge y la deformación es imparable (sería infinita, nunca $t_d/4$).

Los resultados de los ejemplos 2 y 3 permiten concluir que la regla del DB SE-F es muy conservadora en unos casos, y sin embargo no conduce a comprobaciones seguras en otros. Falta una regla adicional que permita establecer el valor de la *esbeltez límite* por inestabilidad, puesto que este parámetro marca una frontera insuperable para la validez de la solución constructiva que se está analizando. De nuevo queda de manifiesto que el problema no es tanto la comprobación de resistencia, como la comprobación de estabilidad en términos geométricos.

A continuación se deduce el valor de la esbeltez límite, por debajo de la cual es aplicable (a favor de la seguridad) la penalización impuesta por el DB SE-F para eludir el engorroso proceso iterativo; y por encima de la cual no resulta viable la solución de cerramiento confinado a menos que se recurra a elementos auxiliares de retención

Según se ha expuesto en los ejemplos anteriores, el procedimiento de análisis en segundo orden consiste en corregir sucesivamente la altura del arco, deduciendo del canto total el valor de las flechas sucesivas δ_i. El proceso termina cuando la flecha "δ" es igual a la deformación "*d*" *(véase la figura adjunta).*



Deformación del arco en segundo orden

En la primera parte de este capítulo se ha obtenido que el valor de la flecha del arco para un espesor de cálculo inicial t_d tiene la siguiente expresión:

$$\delta = q_d \cdot h^4 / [32 \cdot \alpha^2 \cdot (1 - \alpha) \cdot t_d^3 \cdot E]$$

siendo:

- $q_d \rightarrow$ el valor de cálculo de la acción horizontal
- $h \rightarrow$ la altura libre del cerramiento
- $\alpha \rightarrow$ la relación entre el brazo eficaz y el espesor de cálculo (= 2/3)
- $t_d \rightarrow$ el espesor de cálculo del cerramiento
- $E \rightarrow$ el módulo de elasticidad de la fábrica (= $1000 \cdot f_k$)

Según esto, y para el valor de espesor t_d (sin deformación inicial) se obtiene un primer valor de flecha δ_0. Posteriormente se calcula un segundo valor δ_1, con el espesor reducido:

$$\delta_1 = q_d \cdot h^4 / [32 \cdot \alpha^2 \cdot (1 - \alpha) \cdot (t_d - \delta_0)^3 \cdot E]$$

Y así sucesivamente. En el límite, la flecha δ, debe coincidir con la deformación total d. Sustituyendo e igualando, se tiene:

$$\delta = q_d \cdot h^4 / [32 \cdot \alpha^2 \cdot (1 - \alpha) \cdot (t_d - d)^3 \cdot E] = d$$

La función δ - d se obtiene introduciendo en la expresión anterior el valor de α obtenido anteriormente (= 2 / 3):

$$\delta = 27 \cdot q_d \cdot h^4 / [128 \cdot (t_d - d)^3 \cdot E] = d \qquad (1)$$

En el límite, δ es igual a d, por consiguiente, basta igualar a la unidad la derivada de la función δ respecto de d, para hallar la deformación total en la situación de espesor límite.

Derivando δ respecto a "d" e igualando a 1, se tiene:

$$\delta' = 3 \cdot 27 \cdot q_d \cdot h^4 / [128 \cdot (t_d - d)^4 \cdot E] = 1 \qquad (2)$$

Según (1) se tiene:

$$d = 27 \cdot q_d \cdot h^4 / [128 \cdot (t_d - d)^3 \cdot E]$$

Sustituyendo en (2):

$$\delta' = 3 \cdot d / (t_d - d) = 1 \quad ; \quad 3 \cdot d = t_d - d \quad ; \quad \mathbf{d = t_d / 4}$$

20 Nótese que de nuevo se dice *"entrega"* en el forjado y no *"apoyo"* en el forjado. Los ejemplos analizados dan idea de la verdadera función que tiene este requisito, que es *"retener"*, nunca *"apoyar"*.

21 El cerramiento "*se daría la vuelta*" como en un columpio.

22 La procedencia de esta fórmula se deduce más adelante.

En la situación límite la deformación total del arco es igual a la cuarta parte del espesor de cálculo del cerramiento. Este valor coincide con el que indica el DB SE-F que se puede adoptar *"a favor de la seguridad"*, aunque, como se ha dicho, resulta conservador en situaciones de esbeltez inferiores al valor límite.

El valor de la esbeltez límite se obtiene sustituyendo en (2) el valor obtenido $d = t_d / 4$:

$$3 \cdot 27 \cdot q_d \cdot h^4 = 128 \cdot (3 / 4)^4 \cdot t_d^4 \cdot E$$

$$(h / t_d)^4 = 128 \cdot (3 / 4)^4 \cdot E / (3 \cdot 27 \cdot q_d)$$

$$(h / t_d)^4 = 0{,}5 \cdot E / q_d$$

$$\lambda_{límite}^4 = 0{,}5 \cdot E / q_d$$

Si la esbeltez del cerramiento supera el valor de la esbeltez límite para la acción considerada, el problema no converge, y ello significa que el fallo se produce inevitablemente por inestabilidad, sin que la fábrica tenga oportunidad de exhibir su resistencia; por el contrario, si la esbeltez es inferior a la esbeltez límite, el problema converge, pero es preciso verificar la condición de resistencia con un espesor igual a las tres cuartas partes del espesor real (o de la entrega, si la comprobación es a succión), lo cual equivale a considerar (a favor de la seguridad) los efectos de segundo orden[23].

En la hoja gráfica que se adjunta, se ilustra el esquema resistente en segundo orden, así como las fórmulas para la obtención de los parámetros que intervienen.

Según lo anterior, el proceso para verificar la validez de un cerramiento confinado entre forjados, con esbeltez superior a 25, que requiere la consideración de los efectos de segundo orden, comprende los siguientes pasos:

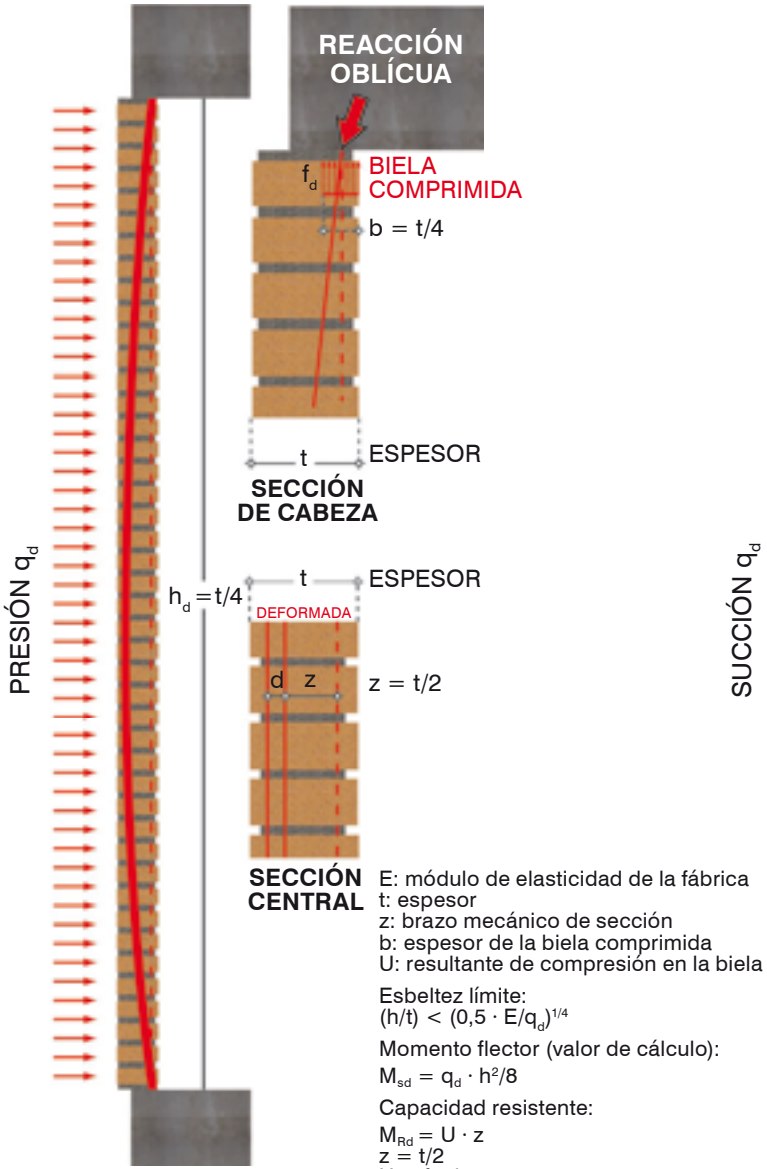
- Verificar que la esbeltez es inferior a su valor límite:

$$\lambda = h / t_d \leq (0{,}5 \cdot E / q_d)^{1/4}$$

siendo:

- λ → la esbeltez del cerramiento $= h / t_d$
- h → la altura libre del cerramiento
- t_d → el espesor de cálculo (espesor total, para presión; entrega, para succión)
- E → el módulo de elasticidad de la fábrica $= 1000 \cdot f_k$
- f_k → el valor característico de la resistencia a compresión de la fábrica
- q_d → el valor de cálculo de la acción horizontal

23 El valor de *esbeltez límite* obtenido no está recogido en el DB SE-F, que no impone ningún requisito de limitación a la esbeltez, aunque sí se ha incorporado en el *"Documento de Aplicación a Vivienda: Fábricas"*, editado por el Consejo Superior de los Arquitectos de España 24 Las características anteriores son las mismas que las definidas en los ejemplos 2 y 3.



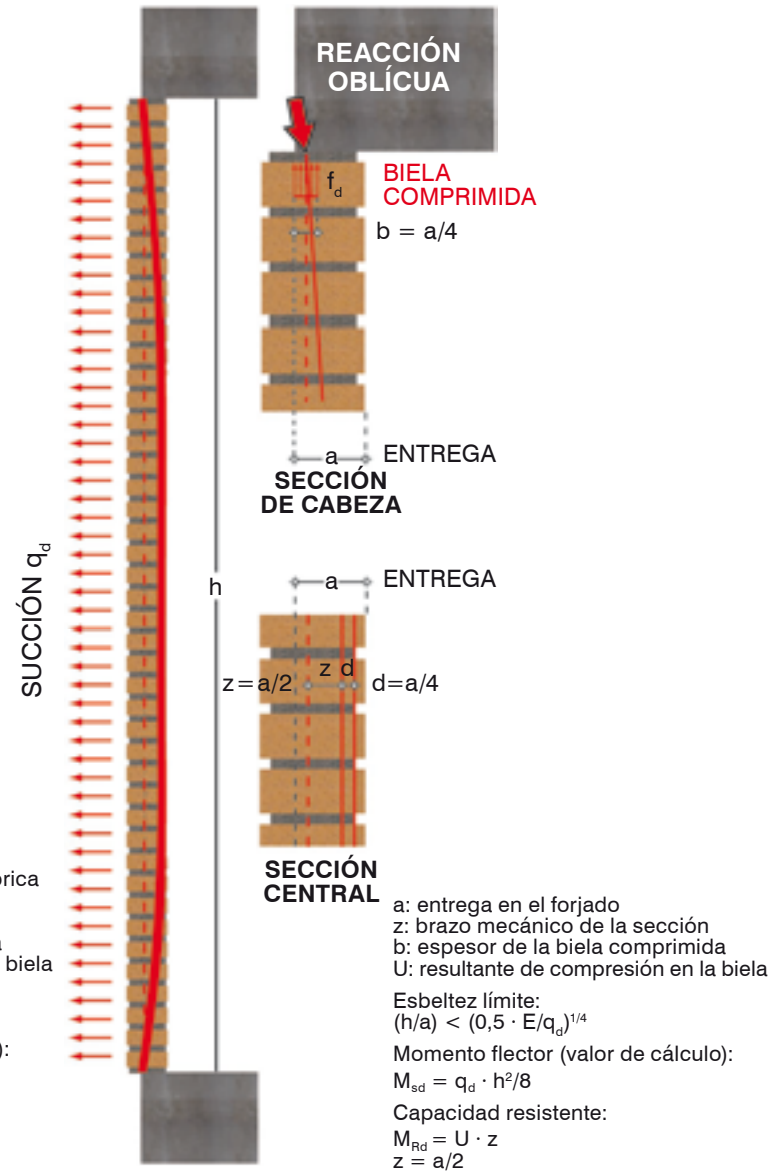
E: módulo de elasticidad de la fábrica
t: espesor
z: brazo mecánico de sección
b: espesor de la biela comprimida
U: resultante de compresión en la biela

Esbeltez límite:
$(h/t) < (0{,}5 \cdot E/q_d)^{1/4}$

Momento flector (valor de cálculo):
$M_{sd} = q_d \cdot h^2/8$

Capacidad resistente:
$M_{Rd} = U \cdot z$
$z = t/2$
$U = f_d \cdot b$
$b = t/4$
$M_{Rd} = f_d \cdot t^2/8$

Comprobación resistente:
$M_{Sd} < M_{Rd}$
$(h/t)^2 < f_d / q_d$



a: entrega en el forjado
z: brazo mecánico de la sección
b: espesor de la biela comprimida
U: resultante de compresión en la biela

Esbeltez límite:
$(h/a) < (0{,}5 \cdot E/q_d)^{1/4}$

Momento flector (valor de cálculo):
$M_{sd} = q_d \cdot h^2/8$

Capacidad resistente:
$M_{Rd} = U \cdot z$
$z = a/2$
$U = f_d \cdot b$
$b = a/4$
$M_{Rd} = f_d \cdot a^2/8$

Comprobación resistente:
$M_{Sd} < M_{Rd}$
$(h/a)^2 < f_d / q_d$

Cerramiento confinado. Análisis en segundo orden a presión y succión.

• Verificar la comprobación de resistencia a presión y succión, con un espesor o una entrega, respectivamente, reducidos a las tres cuartas partes de sus valores reales por los efectos de segundo orden: $M_{Sd} \leq M_{Rd}$

$$M_{Sd} = q_d \cdot h^2 / 8$$

$$M_{Rd} = U_c \cdot z = \left[f_d \cdot (1/3) \cdot (3/4) \cdot t_d\right] \cdot \left[(2/3) \cdot (3/4) \cdot t_d\right] = f_d \cdot t_d^2 / 8$$

$$q_d \cdot h^2 / 8 \leq f_d \cdot t_d^2 / 8 \rightarrow q_d \cdot h^2 \leq f_d \cdot t_d^2 \rightarrow \lambda = h / t_d \leq (f_d / q_d)^{1/2}$$

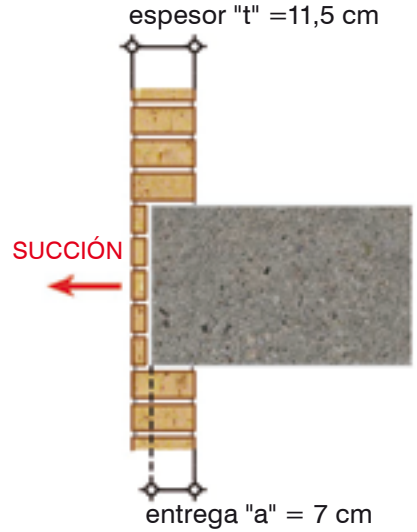
siendo:

- λ → la esbeltez del cerramiento = h / t_d
- h → la altura libre del cerramiento
- t_d → el espesor de cálculo (espesor total, para presión; entrega, para succión)
- f_d → el valor de cálculo de la resistencia a compresión de la fábrica
- q_d → valor de cálculo de la acción horizontal

El proceso de comprobación indicado para verificar la validez de un cerramiento confinado, incluyendo los efectos de segundo orden, se ilustra con el siguiente ejemplo.

EJEMPLO 4

Cerramiento confinado entre forjados. Análisis en segundo orden. Entrega 7 cm



Características geométricas:

- Cerramiento de ladrillo confinado entre forjados sin soportes en fachada
- Altura libre de planta: $h = 2{,}70$ m
- Espesor del muro (½ pie formato castellano): $t = 115$ mm
- Ancho de la entrega en forjados: $a = 70$ mm

Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de las piezas: $f_b = 10$ N/mm²
- Resistencia a compresión del mortero (M5): $f_m = 5$ N/mm²
- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4$ N/mm²
- Valor característico de la acción de viento:
  - Succión: $q_{e,\,succión} = 0{,}5$ kN/m² · 2,0 · 0,5 = 0,5 kN/m²
- Coeficiente de seguridad de la fábrica: $\gamma_M = 2{,}5$
- Coeficiente de seguridad de acciones: $\gamma_Q = 1{,}50$
- Módulo de elasticidad de la fábrica: $E = 1.000 \cdot f_k = 4.000$ N/mm² (24)

Análisis:

24 Las características anteriores son las mismas que las definidas en losl ejemplos 2 y 3.

Comprobación de la estabilidad a succión:

- Esbeltez del cerramiento a succión: $\lambda = h / a = 2{,}70\ m / 0{,}070\ m = 38{,}57$
- Valor de cálculo de la succión de viento: $q_d = q_{e,\,succión} \cdot \gamma_Q = 0{,}5\ kN/m^2 \cdot 1{,}50 = 0{,}75\ kN/m^2$
- Esbeltez límite a succión: $\lambda_{lím} = (0{,}5 \cdot E / q_d)^{1/4} = 40{,}41$
- Comprobación en términos de esbeltez: $\lambda \leq \lambda_{lím}$

$$\lambda = 38{,}57 < \lambda_{lím} = 40{,}41.\ \text{VALE}$$

Comprobación de la resistencia a succión:

- Valor de cálculo del momento flector máximo: $M_{Sd,\,succión} = q_{e,\,succión} \cdot \gamma_Q \cdot h^2 / 8 = 0{,}68\ m \cdot kN / metro$
- Entrega (reducida por efectos de segundo orden): $a_{red} = (3 / 4) \cdot a = (3 / 4) \cdot 70\ mm = 52{,}5\ mm$
- Ancho de la biela comprimida: $b_{succión} = (1 / 3) \cdot a_{red} = 17{,}5\ mm$
- Capacidad resistente de la biela comprimida: $U_{cd} = f_d \cdot b_{succión} = f_k \cdot b_{succión} / \gamma_M = 28{,}0\ kN / metro$
- Brazo eficaz de la sección resistente: $z_{succión} = (2 / 3) \cdot a_{red} = 0{,}035\ m$
- Capacidad resistente a momento flector: $M_{Rd,\,succión} = U_{cd} \cdot z_{succión} = 0{,}98\ m \cdot kN / metro$
- Comprobación de resistencia: $M_{Sd,\,succión} \leq M_{Rd,\,succión}$

$$M_{Sd,\,succión} = 0{,}5\ kN/m^2 \cdot 1{,}50 \cdot (2{,}70\ m)^2 / 8 = 0{,}68\ m \cdot kN / m < M_{Rd,\,succión} = 28{,}0\ kN / m \cdot 0{,}035\ m = 0{,}98\ m \cdot kN / m.\ \text{VALE}$$

- Valor de cálculo de la tensión normal máxima: $\sigma_{d,\,succión} = M_{Sd,\,succión} / (z_{succión} \cdot b_{succión}) = 1{,}11\ N/mm^2$

(queda disponible el 31 % de la resistencia para comprobaciones adicionales)

En el ejemplo analizado anteriormente, con un valor de cálculo de la resistencia de la fábrica de 1,6 N/mm², un módulo de elasticidad de 4.000 N/mm² y un valor de cálculo de la acción de viento de 1,20 kN/m² a presión y 0,75 kN/m² a succión, se obtienen las siguientes relaciones geométricas que condicionan la validez del cerramiento confinado:

- A presión: $\rightarrow h / t = \lambda \leq 36{,}52$ (por resistencia)

  $\rightarrow h / t = \lambda \leq 35{,}93$ (por estabilidad)

- A succión: $\rightarrow h / a = \lambda \leq 46{,}19$ (por resistencia)

  $\rightarrow h / a = \lambda \leq 40{,}41$ (por estabilidad)

Ello supone que un cerramiento convencional de ladrillo perforado de ½ pie de espesor, confinado entre forjados, en las condiciones del ejemplo anterior, con una entrega de 6 cm, sería estable para una altura libre de planta no mayor de 2,42 m (según las ordenanzas municipales, nunca en plantas de pisos). Si la entrega aumenta a 8 cm, la altura de planta puede llegar hasta 3,23 m (según las ordenanzas municipales, para uso de vivienda es una altura libre con bastante margen); y si la entrega es total, la altura máxima puede aumentar a 4,65 m (válida para otros usos, aparte de vivienda, como oficinas, comercio, etc.). En todos los casos, la condición de resistencia se cumple sobradamente.

Para el ejemplo elegido, si en proyecto se ha especificado una entrega de 7 cm, sólo queda disponible una tolerancia de menos de 1 cm para poder justificar el correcto comportamiento mecánico del cerramiento. Evidentemente, la tolerancia es muy pequeña. No obstante, si por diversas razones, que no se pueden preveer en la fase de proyecto, esta tolerancia resulta sobrepasada en obra, no significa necesariamente que haya que invalidar la solución. Tampoco parece sensato utilizar en proyecto soluciones desproporcionadamente caras en *"previsión de imprevistos"* (valga el juego de palabras) que, como tales, no se puede saber si tendrán lugar ni en qué sentido pueden afectar a lo proyectado.

Si existe una desviación en obra respecto a lo especificado en proyecto, la actitud razonable es adoptar medidas correctoras que resulten adecuadas para suplir las condiciones que han sido alteradas. Casi siempre es el resultado del análisis el que indica cuál es la condición insuficiente, en cuánta medida y en qué sentido. En el comportamiento descrito, las condiciones fundamentales que se deben controlar son las condiciones de *entrega* en el forjado, íntimamente relacionadas con la altura libre de planta, por lo que carece de sentido establecer prescripciones o exigencias en términos absolutos o en términos referidos al espesor total.

Cerramiento confinado: Cálculos adicionales

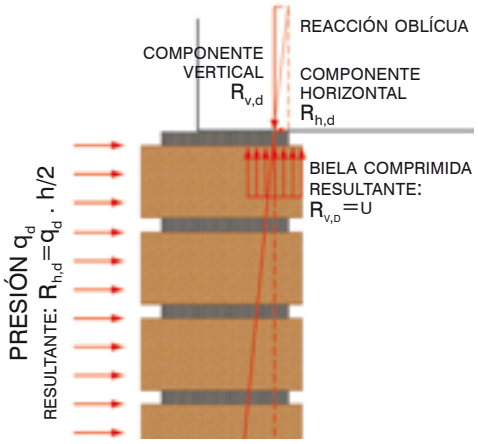
El modelo de funcionamiento en arco precisa determinados requisitos para un correcto comportamiento. El requisito fundamental es la condición de entrega, deducida mediante el análisis, que se debe prescribir en proyecto en términos de mínimos, y que debe ser objeto de comprobación en obra.

Sin embargo, en el análisis expuesto anteriormente se han dado por supuestas determinadas condiciones, cuyo cumplimiento es necesario verificar en la fase de proyecto, puesto que son determinantes para el análisis. Se indican a continuación las fundamentales.

Comprobación de la reacción en cabeza

Consiste en la verificación de la condición de equilibrio en las sustentaciones y se debe realizar en la fase de proyecto.

El funcionamiento como arco sólo es posible si se pueden generar las reacciones correspondientes en los extremos. La característica del *"modelo arco"* es la posibilidad de resistir *"empujes"*. Si uno de los extremos no tiene impedido eficazmente el movimiento y puede desplazarse libremente, el funcionamiento en arco no es posible, y el elemento debe resistir las acciones exteriores según un *"modelo viga"*. La trascendencia que ello tiene en el análisis de los elementos de fábrica



Componentes de la reacción en cabeza

es importante, puesto que el funcionamiento como viga supone la presencia de tracciones, imprescindibles para el equilibrio[25].

En el modelo de análisis expuesto en el apartado anterior se ha supuesto que existe equilibrio entre acciones y reacciones. Las reacciones que se precisan tienen componente horizontal y vertical, es decir, se trata de *reacciones oblicuas* respecto de la acción a resistir, que sólo tiene componente horizontal. Esta es la esencia del funcionamiento como arco de los cerramientos, y la característica que lo diferencia del funcionamiento como viga.

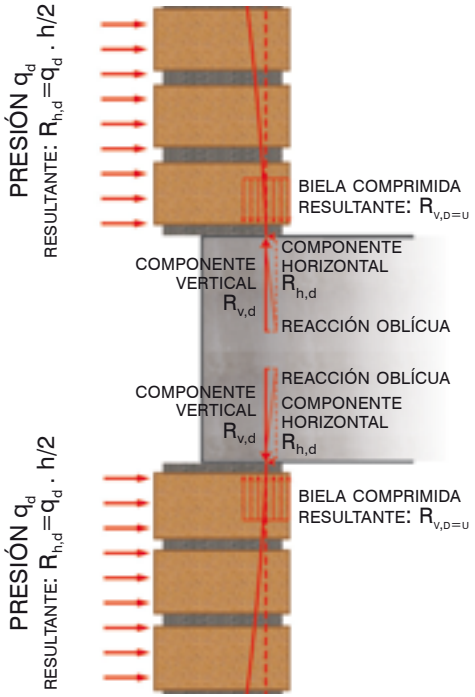
La *oblicuidad* de la reacción en los extremos está determinada por la directriz del arco. El vector reacción tiene su punto de aplicación exactamente en el centro de la biela comprimida, y tiene la dirección de la tangente del arco en el extremo. Se trata, por tanto, de una reacción conocida en la jerga estructural como *articulación,* puesto que pasa por un punto fijo, y cuya magnitud y dirección deben respetar el equilibrio, razón por la cual, en algunos textos, el modelo se denomina *"arco articulado"*[26].

Es preciso comprobar que existe capacidad suficiente en el sistema para que se puedan generar las dos componentes de la reacción.

- *Componente vertical de la reacción*

Para respetar la condición de equilibrio, la componente vertical de la reacción debe tener el mismo valor que la resultante del esfuerzo de compresión en la biela:

$$R_{Vd} = U_d = M_{Sd} / z$$



Compensación de la reacción vertical

siendo:

- R_{Vd} → la componente vertical de la reacción
- U_d → la resultante de compresión en la biela
- M_{Sd} → el valor de cálculo del momento flector debido a la acción horizontal = $q_d \cdot h^2 / 8$
- z → el brazo eficaz de la sección resistente = $(2/3) \cdot t_d$

  donde:

  - q_d → es el valor de cálculo de la acción horizontal
  - h → es la altura libre planta
  - t_d → es el espesor de cálculo (espesor para presión, entrega para succión; en segundo orden debe tomarse $^3/_4 \cdot t_d$)

Sustituyendo los valores de M_{Sd} y z, se tiene:

$$R_{Vd} = (q_d \cdot h^2 / 8) / [(2 / 3) \cdot (3 / 4) \cdot t_d] = 0{,}25 \cdot q_d \cdot h^2 / t_d$$

25 En los arcos atirantados las tracciones están materializadas en el *"tirante"*, cuya función es precisamente eliminar los empujes en los apoyos. Puede haber situaciones híbridas; de hecho, las vigas funcionan como tales en el vano, pero en las proximidades del apoyo se realiza la transmisión de cargas por efecto arco; por eso en las vigas simplemente apoyadas no se precisa canto en el extremo sino entrega o armadura de tracción suficientemente anclada.

26 En el DB SE-F, figura 5.10 *"Comportamiento del muro como arco rebajado"*, los arcos se representan con articulaciones en los extremos.

Este valor coincide con el valor de cálculo del *empuje máximo,* suministrado por el DB SE-F en el artículo 5.4.4 *"Arco estribado en sus extremos"*, párrafo 4, a efectos de comprobar la *"capacidad de respuesta de los estribos"*.

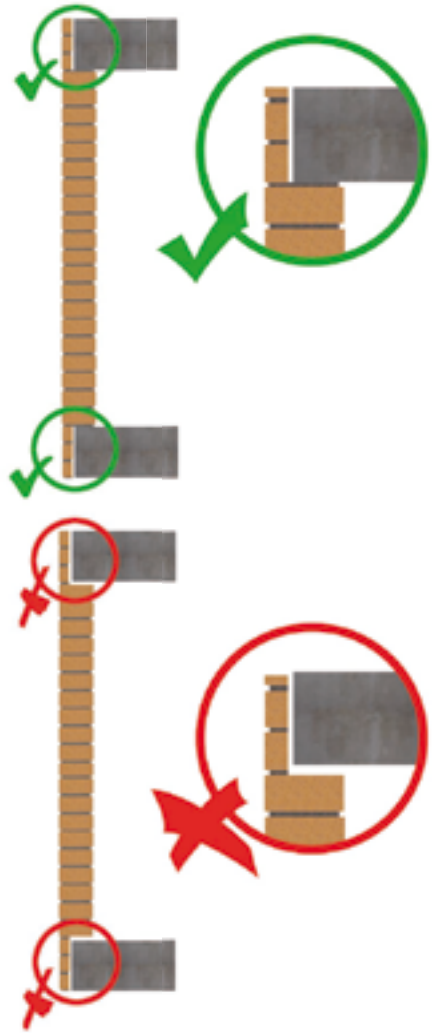
Para los valores de acción de viento, altura de planta y espesor utilizados en el último ejemplo, la componente vertical de la reacción o empuje máximo se obtiene como sigue:

- Acción de viento (valor de cálculo):
  - Presión: $q_{d,\ presión} = 1{,}20\ kN/m^2$
  - Succión: $q_{d,\ succión} = 0{,}75\ kN/m^2$
- Altura libre de planta $h = 2{,}70\ m$
- Espesor de cálculo:
  - Presión: $t_d = t = 115\ mm$ (espesor total)
  - Succión: $t_d = a = 70\ mm$ (entrega)
- Reacción vertical o empuje máximo:
  - Presión: $R_{Vd\ (presión)} = 0{,}25 \cdot 1{,}20\ kN/m^2 \cdot (2{,}70\ m)^2 / 0{,}115\ m =$ **19,02 kN / metro**
  - Succión: $R_{Vd\ (succión)} = 0{,}25 \cdot 0{,}75\ kN/m^2 \cdot (2{,}70\ m)^2 / 0{,}070\ m =$ **19,53 kN / metro**

La componente vertical de la reacción en los cerramientos confinados se ejerce contra los forjados. Si las condiciones en plantas consecutivas son similares, la reacción vertical en cabeza de cada planta se compensa con la reacción vertical en base de la planta inmediata superior, puesto que tienen una magnitud similar y signo contrario[27]. Sólo es necesario realizar la comprobación en cabeza de la última planta. Debido a que todos los edificios tienen *última planta*, es importante controlar este aspecto.

La reacción vertical en cabeza, tanto a presión como a succión, es de signo negativo (hacia abajo); es decir, debe ser suministrada por la acción gravitatoria sobre el forjado. Debido a que la carga gravitatoria es favorable, para comprobar que existe reacción suficiente sólo se debe contabilizar la carga permanente[28].

En el ejemplo se ha obtenido un valor de cálculo de la reacción vertical en cabeza del orden de 20 kN / metro, tanto para contrarrestar la presión como la succión. Si la dirección del forjado es perpendicular al cerramiento, basta con comprobar que la viga de borde tiene una carga lineal permanente no inferior a ese valor. Si el forjado transcurre en dirección paralela al cerramiento, y el confinamiento se produce contra el zuncho de borde, el sistema se equilibra contra los soportes, produciendo una descompresión en los mismos. En este caso el equilibrio se consigue a nivel global, aunque en el tramo entre soportes se produce un destensado del arco que puede invalidar su funcionamiento. El recurso habitual en estas situaciones es disponer un peto lo más pesado posible en cubierta.



Condición de retacado para garantizar la reacción en cabeza.

- *Componente horizontal de la reacción*

El valor de la componente horizontal de la reacción también se obtiene por equilibrio. En este caso, la obtención es inmediata, puesto que la reacción horizontal debe equilibrar a la acción.

$$R_{Hd} = q_d \cdot h / 2$$

siendo:

- R_{Hd} → el valor de cálculo de la componente horizontal de la reacción
- q_d → el valor de cálculo de la acción horizontal
- h → la altura libre de planta

Para los valores de acción de viento y altura de planta utilizados en el último ejemplo la componente horizontal de la reacción se obtiene como sigue:

- Acción de viento (valor de cálculo):
  - Presión: $q_{d,\ presión} = 1{,}20\ kN/m^2$
  - Succión: $q_{d,\ succión} = 0{,}75\ kN/m^2$
- Altura libre de planta: $h = 2{,}70\ m$
- Reacción horizontal:
  - Presión: $R_{Hd\ (presión)} = 1{,}20\ kN/m^2 \cdot 2{,}70\ m / 2 =$ **1,62 kN / metro**
  - Succión: $R_{Hd\ (succión)} = 0{,}75\ kN/m^2 \cdot 2{,}70\ m / 2 =$ **1,01 kN / metro**

La componente horizontal de la reacción en los cerramientos confinados también se ejerce contra los forjados. Ello es posible siempre que exista suficiente resistencia al corte. La condición a comprobar, por tanto, es la siguiente:

$$R_{Hd} \leq V_{Rd}$$

donde:

- $V_{Rd} = f_{vd} \cdot t_d$ → es la capacidad resistente al corte de la fábrica

  siendo:
  - f_{vd} → el valor de cálculo de la resistencia al corte de la fábrica
  - t_d → el espesor de cálculo (espesor de contacto con mortero)

Sustituyendo valores, se tiene:

$$R_{Hd} = q_d \cdot h / 2 \leq f_{vd} \cdot t_d$$

$$\mathbf{h / t_d = \lambda \leq 2 \cdot f_{vd} / q_d}$$

siendo:

$\lambda = h / t_d$ → la esbeltez del paño

27 Es el mismo efecto de contrarresto que aparece en una sucesión de arcos yuxtapuestos.

28 Por primera vez en este estudio aparece la carga gravitatoria como acción favorable para los cerramientos de fábrica. Como se verá más adelante, en todas las soluciones constructivas, la carga gravitatoria sobre las fábricas siempre es beneficiosa.

EJEMPLO 2

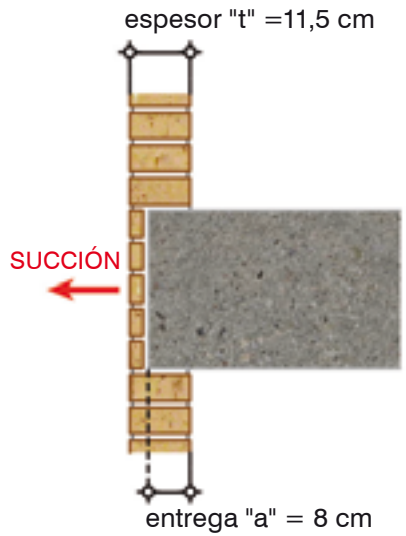
Cerramiento confinado entre forjados. Análisis en segundo orden. Entrega 8 cm

17 Las características anteriores son las mismas que las definidas en el ejemplo 1.

18 Según el DB SE-F, artículo 4.6.5 *"Deformabilidad"*, párrafo 2.

Características geométricas:

- Cerramiento de ladrillo confinado entre forjados sin soportes en fachada
- Altura libre de planta: $h = 2{,}70$ m
- Espesor del muro (½ pie formato castellano): $t = 115$ mm
- Ancho de la entrega en forjados: $a = 80$ mm



Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de las piezas: $f_b = 10$ N/mm²
- Resistencia a compresión del mortero (M5): $f_m = 5$ N/mm²
- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4$ N/mm²
- Valor característico de la acción de viento:
  - Succión: $q_{e,\,succión} = 0{,}5 \text{ kN/m}^2 \cdot 2{,}0 \cdot 0{,}5 = 0{,}5 \text{ kN/m}^2$
- Coeficiente de seguridad de la fábrica: $\gamma_M = 2{,}5$
- Coeficiente de seguridad de acciones: $\gamma_Q = 1{,}50$ (17)
- Módulo de elasticidad de la fábrica: $E = 1.000 \cdot f_k = 4.000 \text{ N/mm}^2$ (18)

Análisis:

Comprobación a succión:

• Valor de cálculo del momento flector máximo:	$M_{Sd,\,succión} = q_{e,\,succión} \cdot \gamma_Q \cdot h^2 / 8$	$= 0{,}68$ m·kN / metro
• Ancho inicial de biela comprimida:	$b_0 = (1 / 3) \cdot t_d = (1 / 3) \cdot a$	$= 26{,}7$ mm
• Brazo eficaz inicial de la sección resistente:	$z_0 = (2 / 3) \cdot t_d = (2 / 3) \cdot a$	$= 0{,}053$ m
• Resultante de la fuerza de compresión en la biela:	$U_0 = M_{Sd} / z_0$	$= 12{,}81$ kN / metro
• Valor de la tensión inicial:	$\sigma_{d,\,0} = U_0 / b_0$	$= 0{,}481$ N/mm²

- Valor de la deformación unitaria inicial: $\varepsilon_0 = \sigma_{d,0} / E = 0{,}481 / 4.000$ $= 0{,}120$ ‰
- Valor de la flecha inicial: $\delta_0 = \varepsilon_0 \cdot h^2 / (4 \cdot z_0)$ $= 4{,}11$ mm
- Corrección del valor de b: $b_1 = (1 / 3) \cdot (a - \delta_0)$ $= 25{,}3$ mm
- Corrección del valor de z: $z_1 = (2 / 3) \cdot (a - \delta_0)$ $= 0{,}051$ m
- Corrección del valor de la fuerza de compresión: $U_1 = M_{Sd} / z_1$ $= 13{,}51$ kN / metro
- Corrección del valor de la tensión: $\sigma_{d,1} = U_1 / b_1$ $= 0{,}534$ N/mm²
- Valor de la nueva deformación unitaria: $\varepsilon_1 = \sigma_{d,1} / E = 0{,}534 / 4.000$ $= 0{,}133$ ‰
- Valor de la nueva flecha: $\delta_1 = \varepsilon_1 \cdot h^2 / (4 \cdot z_1)$ $= 4{,}81$ mm
- Incremento de flecha: $\delta_1 - \delta_0 = 4{,}81$ mm - 4,11 mm $= 0{,}7$ mm

El proceso se debe repetir sucesivamente hasta que se estabiliza, es decir, hasta que el incremento de flecha es prácticamente nulo. En este caso, en la quinta iteración el incremento de flecha es de 0,001 mm, por lo que se puede considerar nulo.

Los resultados finales, después de cinco iteraciones, son los siguientes:

- Valor de la flecha total: δ_5 $= 4{,}98$ mm
- Ancho final de biela comprimida: $b = (1 / 3) \cdot (a - \delta_5)$ $= 25{,}0$ mm
- Brazo eficaz final de la sección resistente: $z = (2 / 3) \cdot (a - \delta_5)$ $= 0{,}050$ m
- Valor de la resultante final de compresión: $U = M_{Sd} / z$ $= 13{,}66$ kN / metro
- Valor de la tensión final: $\sigma_d = U / b$ $= 0{,}546$ N/mm²
- Comprobación de la máxima tensión de cálculo: $\sigma_d \leq f_d = f_k / \gamma_M$ $= 1{,}60$ N/mm²

$\sigma_d = 0{,}546$ N/mm² < $f_d = 1{,}60$ N/mm². VALE

La expresión obtenida indica una nueva condición que limita la esbeltez de los cerramientos, esta vez por razones de resistencia al corte, para respetar la condición de equilibrio en las sustentaciones. En este caso, la esbeltez interviene linealmente; mientras que en la limitación por resistencia a compresión intervenía al cuadrado, y en la limitación por estabilidad la esbeltez intervenía elevada a la cuarta potencia. La comprobación de esta condición, en situaciones habituales, siempre se cumple con mucho margen.

Para los valores utilizados en los ejemplos, con ancho de contacto con mortero (entrega en el forjado) 70 mm, esta comprobación se haría como sigue:

- Acción de viento (valor de cálculo):
  - Presión: $q_{d,\ presión}$ $= 1{,}20\ kN/m^2$
  - Succión: $q_{d\ succión}$ $= 0{,}75\ kN/m^2$
- Altura libre de planta h $= 2{,}70\ m$
- Espesor de cálculo td $= 70\ mm$
- Resistencia al corte[29] f_{vd} $= f_{vko} / \gamma_M = 0{,}2\ N/mm^2 / 2{,}5 = 80\ kN/m^2$
- Esbeltez: λ $= h / t_d = 2{,}70\ m / 0{,}070\ m = 38{,}57$
- Comprobación: $2 \cdot f_{vd} / q_{d\ presión}$ $= 2 \cdot 80\ kN/m^2 / 1{,}20\ kN/m^2 = 133$

$\lambda = 23{,}48 < 133$. VALE

Comprobación de las variaciones de dimensión en altura

Las variaciones de dimensión de los cerramientos confinados pueden modificar su comportamiento mecánico, por lo que es preciso controlar los aspectos relacionados con este fenómeno. Alguno de estos aspectos se puede verificar mediante el análisis, como una comprobación adicional en la fase de proyecto; y otros deben ser objeto de cláusulas específicas en el pliego de prescripciones técnicas y de medidas de precaución en la fase de obra.

Las variaciones de dimensión en altura producen efectos contrarios en función del signo que tenga el incremento. Un acortamiento en altura produce un destensado del arco que reduce el valor de la reacción en los extremos, pudiendo llegar a anularla; es el efecto más peligroso, puesto que incide en la condición de equilibrio. Por el contrario, un alargamiento en altura produce una tensión adicional de compresión, incidiendo en la condición de resistencia, pero no invalida el funcionamiento en arco; este efecto se puede introducir en el análisis, aunque no suele ser determinante para el dimensionado debido a la reserva de resistencia a compresión que siempre suele existir en los cerramientos confinados.

- *Acortamientos debidos a la retracción*

La causa fundamental del acortamiento en altura de las fábricas es la retracción y el asentamiento del mortero. El procedimiento de comprobación de este fenómeno no es fácil. Depende de la plasticidad del mortero de agarre y del coeficiente de deformabilidad de la fábrica por retracción, en dirección ver-

tical. El DB SE-F, en la tabla 4.7 *"Deformabilidad de las fábricas"* suministra los valores de retracción que corresponden a fábricas ejecutadas con diferentes materiales, y sólo tiene un valor significativo para piezas de hormigón de árido ligero. Para las fábricas de piezas cerámicas no indica ningún valor, probablemente porque el fenómeno de expansión por humedad, que se describe a continuación, lo contrarresta. Por ello, la comprobación adicional del acortamiento en altura debido a la retracción no hay que hacerla en los cerramientos construidos con piezas cerámicas.

La posibilidad que tienen los cerramientos de ladrillo de experimentar un acortamiento en altura se debe fundamentalmente al asentamiento del mortero en la fase de ejecución. En este sentido, las fábricas son muy sensibles a la plasticidad del mortero utilizado, y a la altura de las hiladas; aunque el efecto no se puede introducir en el análisis, puesto que la normativa no suministra el modelo para ello. Sin embargo se puede y se debe controlar en los cerramientos confinados durante las primeras semanas desde su ejecución.

Para evitar la incidencia de este efecto en el comportamiento mecánico, basta con adoptar determinadas precauciones en obra, que deben estar explícitamente indicadas en la memoria o en el pliego de prescripciones técnicas del proyecto. Una buena práctica, sencilla de llevar a cabo, consiste en ejecutar las últimas hiladas de la fábrica una vez haya transcurrido un tiempo prudencial para el asentamiento.

Una precaución especial a tener en cuenta es el control de las condiciones de puesta en obra del *"retacado"* del cerramiento contra el forjado superior. La utilización de morteros no adecuados puede suponer tensiones adicionales con riesgo de colapso por pandeo. Por el contrario, la falta de contacto efectivo entre el cerramiento y el forjado, puede impedir que se desarrolle la reacción en cabeza imprescindible para el funcionamiento supuesto. El procedimiento de ejecución de la unidad de obra correspondiente al cerramiento, cuando la estabilidad se confía a su conexión con los forjados por contacto, sin elementos auxiliares, debe ser objeto de una minuciosa relación de especificaciones en el pliego de prescripciones técnicas del proyecto, y de un exhaustivo control en la fase de ejecución.

- *Alargamientos debidos a la expansión por humedad*

Las fábricas de material cerámico, a largo plazo, experimentan un aumento de sus dimensiones debido al fenómeno de expansión por humedad de las piezas. Ello produce una modificación del comportamiento mecánico de los cerramientos confinados, que tiene consecuencias similares a las producidas por la dilatación térmica.

El efecto de la expansión por humedad en un elemento de fábrica que tiene impedido el movimiento en los extremos supone un incremento de la tensión de compresión. Si se conoce el índice de expansión, este efecto se puede evaluar en la fase de proyecto, mediante una comprobación adicional de resistencia[30].

Sin embargo, los efectos debidos a la expansión por humedad se manifiestan fundamentalmente produciendo grietas verticales, que son más aparatosas en los muros largos y en las zonas próximas a los bordes coaccionados (esquinas y encuentros con soportes), pero sólo si el borde coaccionado es vertical. Ello es indicio de que el fenómeno de expansión sólo se produce, con consecuencias notorias, en sentido horizontal. La fisuración sistemática con grietas verticales en muros largos indica la necesidad de juntas de movimiento a determinadas distancias, que están perfectamente establecidas en la tabla 2.1 *"Distancia entre juntas de movimiento de las fábricas sustentadas"* del DB SE-F. Pero sólo se refiere a juntas verticales en muros largos.

En muros *altos* no existe un proceso patológico sistemático de fisuración horizontal que indique la necesidad de disposición de juntas. El índice de expansión por humedad de las piezas cerámicas para fábricas se refiere a variaciones de dimensión en longitud, no en altura. La normativa no hace referencia a la necesidad de disposición

29 Según el DB SE-F. tabla 4.5 "Resistencia característica a cortante para fábricas de mortero ordinario", suponiendo un mortero M5 y un coeficiente de seguridad del material $\gamma_M = 2{,}5$. Si el cerramiento tuviera carga en cabeza, el valor de resistencia al corte se incrementa significativamente. De nuevo, la carga gravitatoria resulta favorable para el comportamiento. Se supone, a favor de la seguridad, que el cerramiento sólo tiene la carga debida a su propio peso, por lo que la sección más desfavorable es la sección de cabeza, con carga gravitatoria nula.

30 Debe recordarse que, en la mayoría de los casos, el dimensionado del cerramiento está limitado por estabilidad, lo que supone una reserva de resistencia a compresión, disponible para efectos no considerados en el análisis.

de juntas horizontales de movimiento por esta u otras causas[31].

Por ello, la comprobación adicional que se indica a continuación sólo tiene un carácter ilustrativo del procedimiento a seguir, para tener una idea del orden de magnitud del efecto que podría suponer la expansión por humedad en un cerramiento confinado, y disipar las incertidumbres y reservas que pudieran existir acerca de la solución constructiva que se está analizando. En ningún caso se trata de una comprobación que se deba justificar en el proyecto para cumplir la normativa vigente.

Como se ha indicado anteriormente, la expansión por humedad produce una tensión adicional de compresión en los elementos confinados. Los parámetros que intervienen para su cuantificación son el índice de expansión por humedad; la proporción de tendeles, relacionada directamente con el canto de las piezas, y la deformabilidad a largo plazo de la fábrica.

Suponiendo un índice de expansión por humedad de 0,5 mm/m; una fábrica con piezas de 5cm de canto y tendeles de 1 cm de espesor; y una deformabilidad de la fábrica a largo plazo de 0,6 ‰[32], el incremento de tensión por expansión se puede obtener como sigue:

$$\Delta\sigma = \rho \cdot \varepsilon \cdot E$$

siendo:

- $\rho = 5 / 6 \rightarrow$ la proporción de material cerámico (descontando el espesor de tendeles)
- $\varepsilon = 0{,}5$ ‰ $\rightarrow$ la deformación unitaria por expansión
- $E = 600 \cdot f_d \rightarrow$ el módulo de elasticidad de la fábrica para deformaciones a largo plazo

donde:

- $f_d \rightarrow$ es la resistencia a compresión de la fábrica para estados límite de servicio

Sustituyendo los valores indicados, se tiene:

$$\Delta\sigma = (5 / 6) \cdot 0{,}5 \text{ ‰} \cdot 600 \cdot f_d = 0{,}25 \cdot f_d$$

Es decir, el incremento de tensión por expansión supone un 25% del valor de cálculo de la resistencia a compresión de la fábrica[33]. Si se rehacen los cálculos de los ejemplos anteriores con el valor de resistencia mermado en un 25% se puede constatar que este efecto no tiene trascendencia en el comportamiento mecánico.

Análisis local de huecos

En todos los procedimientos de análisis indicados anteriormente se ha supuesto un modelo plano, en el que el cerramiento es un paño de longitud ilimitada, cuyo comportamiento se describe en sección, y es idéntico a lo largo de la longitud del muro.

La presencia de huecos en fachada supone una perturbación en el comportamiento, que exige un análisis local para verificar la posibilidad de transmisión de esfuerzos a los bordes de los mismos. Normalmente los cargaderos y carpinterías desempeñan un papel no despreciable en esta transmisión.

El análisis local en huecos está condicionado fundamentalmente por la geometría y proporciones de los mismos. En líneas generales, los huecos en fachada pueden ser de tres tipos diferentes, que requieren distintos procedimientos de verificación.

- *Tipo 1. Huecos rasgados en vertical*

Esta situación no requiere ninguna comprobación adicional. El análisis descrito en capítulos anteriores sirve para verificar el comportamiento mecánico de los entrepaños. El hueco como tal precisará una carpintería adecuada para transmitir la acción de viento a los elementos estructurales en los que se sustente, pero el cálculo de la misma no afecta en absoluto al cerramiento de fábrica.

- *Tipo 2. Huecos rasgados en horizontal*

Si el paño entre forjados está interrumpido por la presencia de un hueco corrido en horizontal, lógicamente no se puede utilizar el modelo de cerramiento confinado entre forjados.

En esta situación existen dos paños diferentes de fábrica a comprobar: el faldón que está por encima del hueco y el antepecho.

Para la comprobación del paño de fábrica que está por encima del hueco, se puede utilizarse el modelo *"arco"* suponiendo que el confinamiento se produce entre el cargadero corrido del hueco y el forjado.

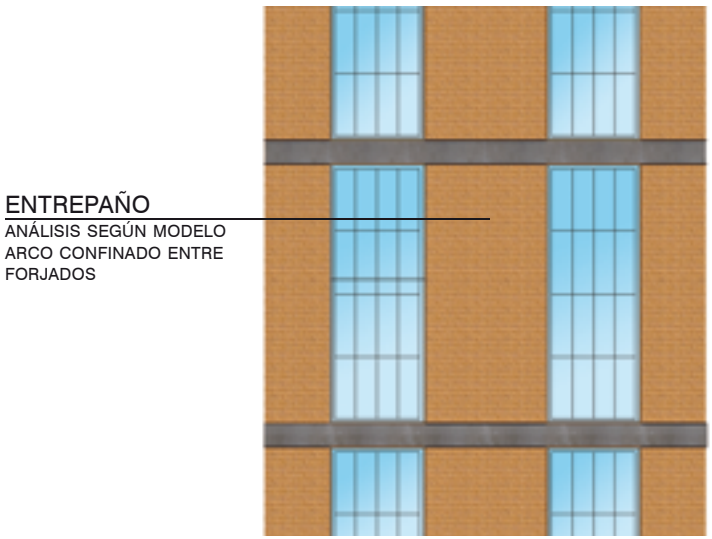
En este caso, se trata de un paño con una altura muy pequeña, por lo que las condiciones de entrega, resistencia y esbeltez se consiguen siempre con suficiente margen. Sólo hay que tener la precaución de introducir las dos componentes de la reacción oblicua que se genera en el cargadero, para el dimensionado del mismo.

Una práctica errónea, aunque bastante habitual, es dimensionar el cargadero considerando únicamente *"el peso"* del cerramiento. No se debe olvidar que el cargadero debe transmitir siempre flexiones horizontales producidas por la acción de viento y además, en los casos en los que el centro de gravedad de la carga no coincide con la vertical que pasa por el eje del perfil, éste debe tener suficiente rigidez a torsión para que el cerramiento no *"cabecee"*, produciendo la típica *"ceja"* en el encuentro con el forjado e, incluso, el desprendimiento de las plaquetas. Además, si el cargadero es demasiado deformable, se destruye el efecto de *"confinamiento"*. El recurso

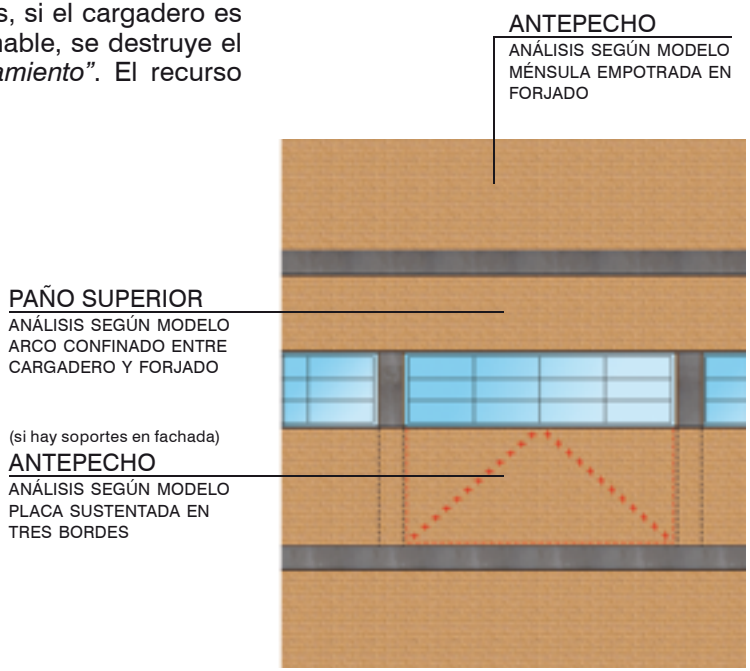
31 En los muros de carga no se limita el número de plantas y, lógicamente, no es viable disponer juntas horizontales de movimiento.

32 Según el DB SE-F, artículo 4.6.5 *Deformabilidad*, párrafo 2.

33 Es importante destacar que el fenómeno de expansión por humedad actualmente es suficientemente conocido, y las piezas cerámicas suelen tener índices más bajos que el utilizado en el ejemplo.



Hueco rasgado en vertical.



Hueco rasgado en horizontal.

más rentable es sujetar el cargadero en puntos suficientemente próximos con elementos que impidan tanto el movimiento vertical como el giro, por lo que no son eficaces los redondos o *tirantillas* colgados del forjado; pueden servir para este fin los tubos de acero con resistencia a flexión, si los soportes del edificio están muy distantes. El procedimiento de dimensionado se indica en la sección de *Sistemas no convencionales*.

El elemento de fábrica que constituye objeto de comprobación o dimensionado es el antepecho corrido. Este elemento funciona como un peto con carga horizontal en cabeza, procedente de las acciones sobre el hueco transmitidas a través de la carpintería. Su trabajo estructural es en *"ménsula"*, empotrado en la base con la capacidad de empotramiento que permite su propio peso y la resistencia a tracción de la fábrica, y suelto en cabeza. En estas condiciones y para la altura habitual de los antepechos no es posible resolver el elemento con espesor de medio pie.

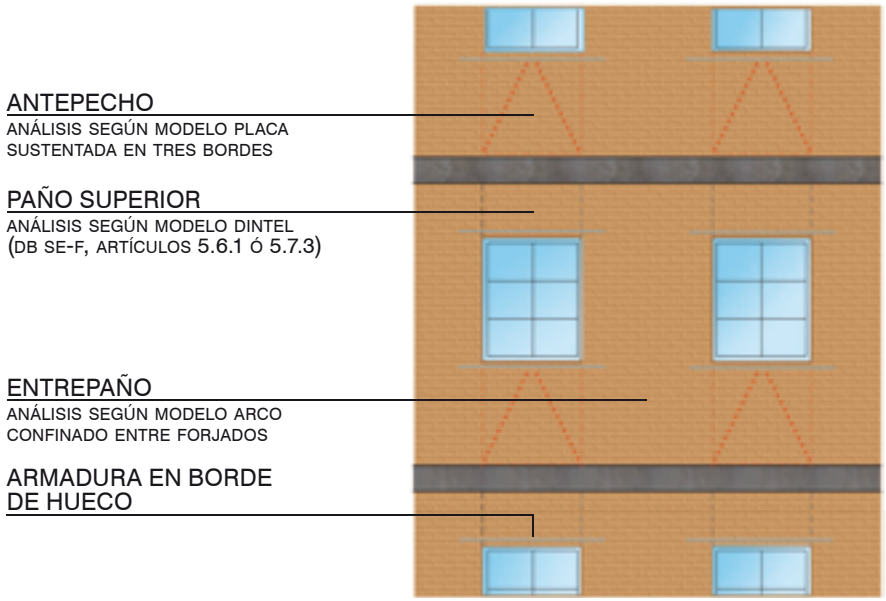
Una situación muy distinta se produce si existen soportes en fachada a los que se pueda conectar el antepecho. En esta situación, el trabajo estructural de la fábrica corresponde al de *"placa"* sustentada en tres bordes, con una de las dimensiones (la altura) relativamente modesta, cuyo procedimiento de análisis se expone también en secciones posteriores.

- *Tipo 3. Huecos cuadrados o rectangulares*

Este tipo es un híbrido de los otros dos indicados anteriormente. El entrepaño vertical comprendido entre huecos se puede analizar por el procedimiento general; la zona del hueco requiere un análisis local, que supone la comprobación de dos elementos, el dintel y el antepecho que, si el hueco es cuadrado o rectangular, están conectados mediante traba o aparejo con el resto del paño[34].

El dimensionado del dintel se puede hacer utilizando un cargadero específico para ello, o bien conformando el mismo con la propia fábrica provista de la correspondiente armadura de tracción. El procedimiento de dimensionado, está indicado en el DB SE-F, artículos 5.6 *"Fábrica armada a flexión"*. Se indica aquí que, para las dimensiones habituales de los dinteles en edificios de pisos, es suficiente incorporar una o dos hiladas armadas sobre el hueco, puesto que la cuantía de armadura requerida es ridícula; lo fundamental es que exista suficiente espacio en el machón para que la armadura tenga suficiente entrega.

La comprobación del antepecho se debe hacer según el modelo *"placa"* sustentada en tres bordes. Dada la configuración del hueco (de longitud limitada, en cualquier caso inferior a la distancia entre soportes) y la dimensión habitual de los antepechos (de altura limitada, en cualquier caso inferior a la altura libre de planta) la comprobación de este elemento puntual suele cumplir siempre, incluso para los valores máximos de la acción de viento, y los valores mínimos de espesor de cerramiento.



Huecos puntuales.

Interacción del cerramiento con la estructura

Además de las comprobaciones adicionales indicadas anteriormente, es preciso conocer y evaluar las posibles implicaciones que tiene en el cerramiento el hecho de confinarlo entre la estructura portante del edificio, con objeto de poder controlar y evaluar los efectos secundarios.

El principal efecto del confinamiento, por su propia naturaleza, es provocar tensiones adicionales de compresión en el elemento confinado. Este efecto no se puede introducir de forma directa en el análisis del cerramiento, porque depende de factores ajenos al mismo, fundamentalmente de la rigidez de los forjados en los que se confina y, sobre todo, de la rigidez del elemento sobre el que arranca. Sin embargo, este efecto no tiene por qué ser necesariamente desfavorable para el propio muro.

Como ya se ha visto en apartados anteriores, y se verá más adelante al analizar otros tipos constructivos de cerramientos, los esfuerzos de compresión suelen resultar favorables para el comportamiento mecánico de las fábricas. En muy raras ocasiones las fábricas llegan a exhibir la totalidad de su capacidad resistente a compresión, porque los parámetros que condicionan su dimensionado son fundamentalmente la excentricidad de las cargas y la esbeltez del elemento.

Nunca se ha cuestionado el papel estructural de las fábricas como muros de carga. De hecho, hasta la aparición del C.T.E. esa era su única función estructural reconocida por la normativa de obligado cumplimiento. Un muro de ladrillo de ½ pie, con suficiente rigidización transversal, resiste sin dificultad la carga correspondiente a su propio peso más tres plantas de forjado, con luces, alturas y sobrecargas típicas de vivienda. Si el muro fuera exterior podría resistir la carga de los forjados correspondiente a seis plantas, lo que equivale sólo en propio peso, a dieciocho plantas de altura.

El problema que tienen los cerramientos, tal y como se construye actualmente con estructuras porticadas, es precisamente la falta de peso para contrarrestar la flexión a la que están sometidos.

Basta observar lo que hay construido para constatar que los procesos patológicos en los cerramientos confinados nunca proceden del exceso de carga. Los indicios de mal comportamiento aparecen próximos a los huecos y esquinas; y se inician en las plantas altas, lo cual no supone en absoluto un síntoma de sobrepeso sino más bien de todo lo contrario; las lesiones se manifiestan precisamente en las zonas más desprotegidas del efecto beneficioso de la acción gravitatoria. No existen antecedentes de cerramientos arruinados por el *"aplastamiento"* ni de las piezas ni del mortero. La acción gravitatoria es estable y persistente; el fracaso de un cerramiento por su causa se produciría mientras se construye o inmediatamente finalizada su construcción; y esto nunca ocurre. Los cerramientos confinados fracasan por una paulatina pérdida de estabilidad, casi siempre provocada por una condición de entrega insuficiente en los forjados, que es exactamente el efecto contrario al sobrepeso.

34 Para prevenir el riesgo de fisuración diagonal en las esquinas, esta conexión se puede materializar con la incorporación de armadura de tendel en las hiladas contiguas a los bordes superior e inferior del hueco.

35 Hay que destacar que el fenómeno indicado es exactamente el contrario al que se produce por la excesiva deformabilidad o flecha diferida de la viga de fachada cuando se interrumpe la continuidad del cerramiento. Si se interrumpe la continuidad, se interrumpe el proceso de acumulación de carga; sin embargo, el efecto secundario suele ser mucho más aparatoso para el cerramiento, porque podría quedarse sin apoyo en el centro del vano al no poder acompañar a la viga en su deformación.

Estas y otras muchas razones, además de los resultados del análisis, vienen a confirmar lo que ha sido tradicionalmente la regla de oro para el dimensionado de fábricas: *"cuanto más cargadas, mejor"*. No obstante, y con objeto de tener controlados los efectos que pueden surgir de la implicación de la estructura en un cerramiento confinado, se indica en el siguiente apartado el procedimiento a seguir para su evaluación.

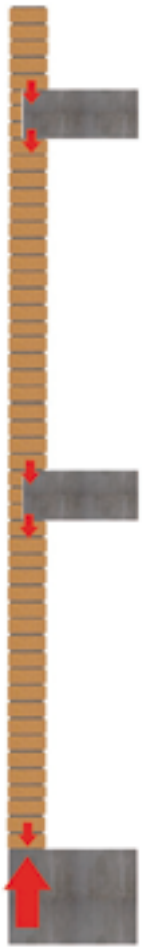
- *Proceso de acumulación de carga*

El efecto más destacado de la interacción entre el cerramiento y la estructura es la posible acumulación de carga hacia las plantas bajas a través de la fachada, por la imposibilidad de flexión de las vigas o zunchos de borde en los que se confina.

Ello ocurre siempre que el cerramiento arranca de un elemento muy rígido, como puede ser una solera, una viga de cimentación o la cabeza de un muro de sótano[35]. En esta situación es posi-

ble que la sección de arranque tenga que soportar, no sólo el peso debido a una planta, sino el correspondiente a todas las plantas conectadas[36].

El DB SE-AE tiene previsto este efecto en el artículo 2.1 *"Peso propio",* párrafo 5, en el que dice, textualmente: *"El peso de las fachadas y elementos de compartimentación pesados, tratados como acción local, se asignará como carga a aquellos elementos que inequívocamente vayan a soportarlos... En caso de continuidad con plantas inferiores, debe considerase, del lado de la seguridad del elemento, que la totalidad de su peso gravita sobre sí mismo."*



Proceso de acumulación de carga

Si las vigas de borde sobre las que gravita el cerramiento son de carga, y el arranque se produce sobre un elemento no flectado, tal como la cabeza del muro de sótano, la acumulación puede afectar también a las acciones procedentes del forjado, que descenderán por el elemento más rígido; en este caso, el cerramiento convertido inevitablemente en muro de carga.

Aunque este efecto pudiera parecer calamitoso, en realidad no tiene trascendencia desde el punto de vista resistente. Ello se debe a que el efecto de *"pandeo"* ante la acción gravitatoria, para la cual el cerramiento no ha sido dimensionado, acude en defensa del mismo, reduciendo drásticamente su rigidez, y obligando a la carga a volver a la estructura para la cual ha sido dimensionada. En realidad el pandeo es la defensa que tienen los elementos esbeltos comprimidos para desviar carga hacia otros más robustos, siempre que estén disponibles.

Si, como es de suponer, existe estructura suficiente para resistir la acción gravitatoria de los forjados, la verificación de la condición de resistencia del cerramiento no requiere comprobaciones adicionales por el efecto de un trasvase de carga.

El problema está en que el proceso de desvío de carga por deformación excesiva del cerramiento puede suponer un riesgo de fisuración para el elemento.

Debido a que no existe un modelo establecido para verificar las condiciones de aptitud al servicio de las fábricas (deformación y fisuración), el procedimiento a seguir para evitar posibles efectos no deseados en los cerramientos confinados se debe plantear en términos de prevención de riesgos.

La primera precaución se debe tomar en la fase de proyecto, y afecta al dimensionado de la estructura. Con carácter general, constituye una norma de buena práctica dotar a las vigas de fachada de la mayor rigidez posible. Ello se puede lograr disponiendo vigas de canto o, si no se desea renunciar al tipo estructural de *"viga plana"*, se puede conseguir mayor rigidez simplemente disminuyendo la luz entre los soportes en los pórticos de fachada[37].

La segunda recomendación se refiere al proceso de ejecución, por lo que se debe tener en cuenta en la fase de obra. Constituye también una regla de buena práctica ejecutar los elementos de fábrica del edificio una vez transcurrido el mayor tiempo posible desde la ejecución de la estructura. Con ello se consigue que las vigas en las que se confinará el cerramiento hayan adquirido una buena parte de la deformación diferida que corresponde a las cargas permanentes, con lo cual el proceso de acumulación queda reducido a las sobrecargas, que suponen sólo una pequeña fracción del peso total y no producen deformación diferida.

Otra recomendación que se cita en los manuales al uso consiste en ejecutar el cerramiento comenzando por las plantas altas, construyendo en último lugar el que corresponde a la planta de arranque. Otra regla, en el mismo sentido

que la anterior, recomienda construir el cerramiento en plantas alternas. Lo cierto es que estas precauciones no se suelen tener en cuenta porque origina conflictos de tipo logístico en la organización de la obra; y sólo se consigue con ello evitar la acumulación de carga debida al propio peso del cerramiento, que no supone situación de riesgo, incluso para un elevado número de plantas, como se verá más adelante.

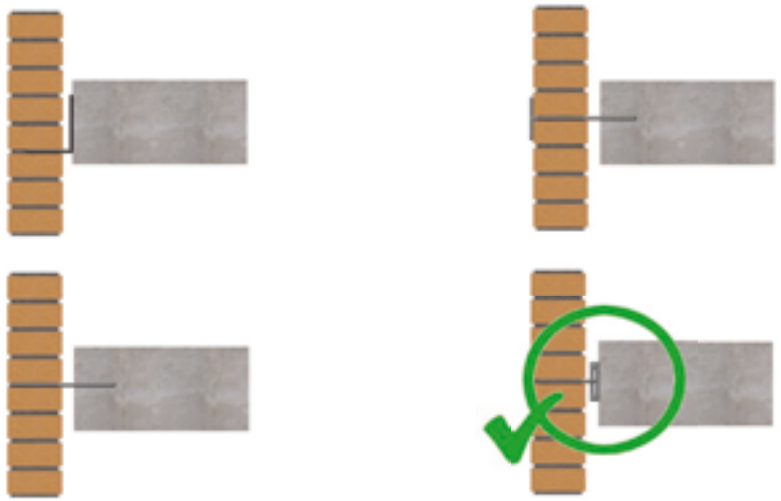
Si el forjado transcurre en dirección paralela a la fachada, y el cerramiento se confina contra un zuncho de borde no cargado, el efecto de acumulación sólo afecta al peso propio del muro, y produce consecuencias diferentes según de qué planta se trate.

En plantas altas, el peso propio supone una tensión adicional de compresión que no suele tener trascendencia e, incluso, cuando las condiciones de sustentación son insuficientes, puede tener un efecto beneficioso[38].

En plantas intermedias, la compresión en aumento convierte paulatinamente la flexión debida a la acción de viento en compresión compuesta. Si el número de plantas es elevado, se puede llegar a resistir sin tracciones en las plantas bajas la totalidad de flexión debida al viento; en este caso, no por *"efecto arco"* sino por el *"efecto pináculo"* que produce el peso de las plantas superiores.

Ello supone una sustancial mejora en el comportamiento mecánico del cerramiento. Si se consigue que todas las fibras de la sección más solicitada del muro estén comprimidas mediante contrapeso, se elimina total y gratuitamente el riesgo de fisuración por otras causas[39]. Además, deja de ser crítica la restricción que supone las condiciones de entrega en los forjados para aplicar el funcionamiento en arco.

Lógicamente, existe una limitación impuesta por la capacidad resistente a



Sistema de conexión a forjado recomendada

36 Si, además, la conexión entre el forjado y el cerramiento se realiza interponiendo un angular (como se recomienda en algunos manuales que han estado al uso hasta hace poco tiempo) unido mediante fijaciones rígidas a los forjados (sin libertad de movimiento vertical), el proceso de acumulación de carga hacia las plantas bajas no sólo es probable, sino que es inevitable.

37 En estructuras de vigas planas y luces importantes, un procedimiento muy rentable para aumentar significativamente la rigidez del pórtico de fachada sin aumentar el canto de las vigas, cosiste en intercalar *"maineles"* o pilastras entre los soportes estructurales de las plantas de piso. Ello convierte el pórtico en una gran *viga Vierendel*, lo que supone un sustancial aumento de rigidez.

38 La tensión adicional debida al peso propio de una planta de 2,70m de altura, para un cerramiento de ½ pie, que pese a razón de 15 kN/m^3, supone $\sigma_d = 15 kN/m^3 \times 1,35 \times 2,70m = 55 kN/m^2 = 0,055$ N/mm^2, en valor de cálculo, menos del 4% de la tensión soportable por el material.

39 Se consigue el mismo efecto que produce la acción de pretensado en los elementos de hormigón. La principal mejora en el comportamiento es reducir e incluso evitar totalmente el riesgo de fisuración.

compresión de la fábrica; y una restricción debida al fenómeno del pandeo provocado por la acción gravitatoria. En este caso cabría pensar que los cerramientos habituales (de ½ pie de espesor) son demasiado esbeltos para una altura de planta normal. Sin embargo, en la determinación de la esbeltez a pandeo frente a las acciones gravitatorias, en un paño de fábrica sustentado en los bordes, intervienen las dos dimensiones (altura y longitud); de manera que se puede disminuir sustancialmente la penalización por pandeo sin necesidad de incrementar el espesor, simplemente conectando a soportes o elementos verticales situados a distancias suficientemente cortas.

El procedimiento de verificación de la capacidad resistente de un cerramiento sometido a acciones gravitatorias de valor considerable, bien por posible efecto de acumulación de carga de plantas sucesivas, o bien porque la propia solución constructiva así lo exige (por ejemplo, en el caso de cerramientos *autoportantes*) difiere sustancialmente del que corresponde al funcionamiento en arco y será detallado pormenorizadamente en la sección de *Sistemas no convencionales.*

Cerramiento confinado: Prescripciones de proyecto y controles de obra

Las condiciones para poder utilizar el recurso de funcionamiento en arco de los cerramientos confinados son dos, ambas de índole geométrica, que se deben cumplir simultáneamente:

- Condición de espesor mínimo, en función de la altura de planta, determinada por la presión de viento.

- Condición de entrega mínima en el forjado, también en función de la altura de planta, determinada por la succión de viento.

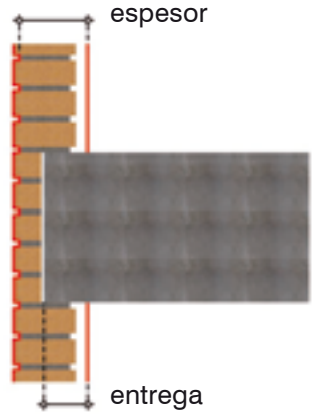
Como siempre ocurre en las fábricas, es la esbeltez el parámetro fundamental que condiciona su comportamiento.

El espesor del cerramiento se puede y se debe especificar en la fase de proyecto, y no hay ninguna razón para que las exigencias mínimas se vean alteradas por imprevistos en obra. Sólo hay que controlar en obra que las piezas tengan el espesor definido en proyecto, y que las resistencias, tanto de las piezas como del mortero, no sean inferiores a las especificadas[40].

Es importante aclarar que, según el DB SE-F, artículo 4.6.6 *"Sección de cálculo"*, párrafo 1, en el espesor de cálculo se contabiliza, tanto el rehundido de la llaga (que se debe restar), como el espesor de los revestimientos que tengan carácter permanente y se definan como tales en el proyecto y en el plan de mantenimiento (que se puede sumar). El rehundido de la llaga sólo disminuye el valor del espesor, que no suele ser el parámetro determinante en las soluciones de cerramiento con entrega parcial en los forjados. Por el contrario, el revestimiento interior de la cámara aumenta el valor de la entrega que suele ser, generalmente, el parámetro deficitario.

Es posible que exista alguna reticencia en considerar permanente un revestimiento de la cara exterior del muro, pero no cabe duda de que el enfoscado de la cámara que se ejecuta por la cara interior se puede considerar, sin ningún tipo de reserva, como revestimiento permanente. Además, el revestimiento exterior sólo se podría contabilizar para el cálculo a presión, que no suele ser determinante; por el contrario, el revestimiento interior de la cámara se puede contabilizar tanto a presión como a succión; es decir, incrementa a efectos de cálculo, tanto el espesor como la entrega. En situaciones muy apuradas, el espesor del revestimiento será, también, un parámetro a especificar en proyecto y a controlar en obra.

En cuanto a la entrega del cerramiento en el forjado, no cabe duda de que también se trata de un parámetro que se puede y se debe especificar en proyecto.



"*Espesor de cálculo*" según DB SE-F

Sin embargo, las exigencias mínimas relacionadas con esta condición son más difíciles de conseguir en obra; en primer lugar, porque tienen muy poco margen, como se ha puesto de manifiesto en los ejemplos anteriores y, en segundo lugar, porque dependen de factores ajenos al propio proceso de construcción del cerramiento, y de tolerancias de elementos estructurales que se rigen con otros criterios no relacionados con el aspecto que se está analizando.

La entrega del cerramiento queda determinada en obra por la posición exacta de la tabica del borde del forjado respecto del borde exterior de la fachada. El plano de fachada debe mantener el plomo en toda su altura y, sin embargo, la tabica del forjado puede tener desviaciones, respecto de su posición teórica, superiores a la pequeña tolerancia que admite el análisis del cerramiento[41], sobre todo si el edificio en cuestión tiene un elevado número de plantas, con la probabilidad que ello supone de acumulación de errores de plantas sucesivas en el mismo sentido.

Es importante aclarar aquí que la insuficiencia en la condición de entrega de los cerramientos no siempre se debe a errores en obra, a tolerancias excesivas en el replanteo de los forjados o al resultado de una mala calidad de ejecución. Puede ocurrir que la propia solución constructiva del cerramiento impida confinarlo, por ejemplo, en el caso de fachadas con cámara continua ventilada. Hay situaciones en las que ni siquiera existe forjado en el que confinar, por ejemplo, el caso de revestimientos de túneles; o estancias de doble altura en las que el forjado no llega al plano de fachada, o casetones de escalera con altura de planta atípica. En todos estos caso, el *"apoyo"* en plantas intermedias no se cuestiona; es la *"entrega"* lo que hace falta restituir.

También es importante indicar aquí que la condición de entrega es particular para cada caso concreto del proyecto, y se debe determinar mediante el análisis. Por eso, no se puede y no se debe formular reglas genéricas[42] para justificar o descalificar sistemáticamente determinadas situaciones que se presentan con frecuencia.

Por ejemplo, una regla que se ha usado antes de la entrada en vigor del Código Técnico predicaba que un cerramiento está en buenas condiciones si la entrega en el forjado es superior a los dos tercios de su ¡¡espesor!! De hecho, existen detalles constructivos en manuales y códigos, en los que esa relación está acotada como el único parámetro a controlar en obra. Pues bien, la regla está mal formulada, porque la relación que interviene es la entrega contra la *"altura",* nunca contra el espesor total.

En un cerramiento de ½ pie con formato castellano, la regla anterior conduce a una entrega mínima en torno a 8 cm. Como se ha visto en el ejemplo, este valor es suficiente, e incluso resulta holgado para una altura libre entre forjados de 2,70 m; pero resultaría peligrosamente escaso para un centro comercial de 6,00 m de altura libre de planta. Por el contrario, si se decide poner un cerramiento de ½ pie con formato catalán, la regla anterior descalificaría, sin ningún motivo razonable, la misma entrega de 8 cm, incluso para edificios domésticos de altura de planta inferior a 2,70 m; sólo porque 8 cm es menor que dos tercios del espesor de un formato catalán.

40 La resistencia a compresión de la fábrica tiene poca trascendencia en el comportamiento por efecto arco. Recuérdese que, si se cumple la condición de estabilidad, la resistencia no llega a exhibirse en su totalidad. La resistencia a compresión de la fábrica interviene indirectamente, en la comprobación de estabilidad, mediante el módulo de elasticidad; pero, mientras éste aparece en la fórmula linealmente, la esbeltez aparece elevada a la cuarta potencia. Se puede especificar en proyecto un mortero de poca resistencia para evitar engorrosos ensayos de resistencia en obra.

41 La tolerancia es pequeña sólo en situaciones muy ajustadas, como corresponde al caso de los cerramientos de ½ pie castellano con altura de planta superior a la habitual. En estos casos no se puede prescribir una entrega muy holgada, para poder tener una tolerancia mayor, porque ello implica la consiguiente reducción del espesor de las plaquetas de chapado del forjado, pudiendo quedar en precario la estabilidad de las mismas.

42 Son reglas, en general, mal denominadas *"de buena práctica"* cuando en realidad sólo pretenden suplir a un *"buen análisis"*.

La regla anterior, no sólo está mal formulada, sino que conduce a situaciones absurdas, como descalificar un determinado valor de la entrega, sólo porque el espesor del cerramiento es generoso; y, por el contrario, validarlo si el espesor es deficitario; sin que la altura intervenga como variable en ningún caso.

Si alguna de las condiciones de esbeltez deducidas del análisis no se puede cumplir o, por algún imprevisto, resultara deficitaria para la situación particular del proyecto, ello no significa necesariamente la invalidez del cerramiento confinado como solución constructiva, sólo significa que hay que

adoptar medidas correctoras o renunciar al *modelo arco* para justificar la validez ante la acción de viento.

Y es el resultado del análisis el que debe indicar la medida correctora más adecuada, o el recurso adicional más idóneo, de los disponibles en el mercado. Con el resultado del análisis, además, se puede cuantificar la solución y, por consiguiente, optimizar su coste.

Cerramiento confinado: Soluciones para restituir la condición de entrega

El primer recurso es obvio y, además, el más barato. Si las condiciones de entrega en obra son diferentes de las especificadas en proyecto, se puede intentar rehacer el cálculo con las condiciones reales.

Los resultados del ejemplo desarrollado parecen indicar que existe muy poco margen de maniobra en el funcionamiento por efecto arco, incluso sin tener en cuenta los efectos secundarios. Lo cierto es que las hipótesis de partida se han elegido algo forzadas, con objeto de utilizarlo como pretexto para exponer el procedimiento a seguir cuando el análisis en segundo orden condiciona el problema.

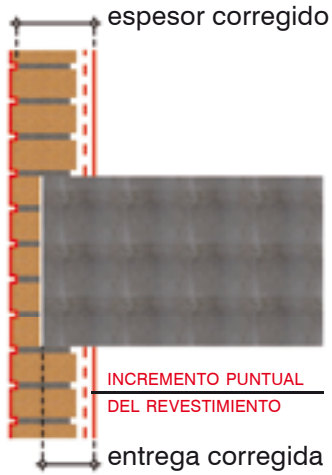
Los edificios de dimensiones domésticas que, por otra parte, constituyen el campo de aplicación más habitual del tipo constructivo de cerramiento que aquí se estudia, en general tienen valores de altura libre entre forjados algo inferiores a 2,70 m. A poco que se reduzca la altura libre, el margen disponible para el ancho de entrega en los forjados se desahoga suficientemente.

Si las exigencias mínimas de entrega no se cumplen en alguna zona puntual del cerramiento se puede recurrir a las soluciones que se indican a continuación. La elección de la solución más adecuada en cada caso está en función del rango de la desviación respecto de las exigencias mínimas.

Solución 1: Aumento del espesor del revestimiento

Si la desviación de la entrega disponible para el cerramiento en obra es pequeña (algunos milímetros) respecto de lo determinado en proyecto por el análisis, no es preciso renunciar al funcionamiento en arco, basta con incrementar su valor aumentando el espesor del revestimiento de la cámara. Esta situación se puede presentar en obra por ligeras desviaciones en el replanteo de las tabicas de los forjados.

Aunque es un problema habitual que los frentes de forjados de plantas sucesivas no mantengan el plomo, o que, incluso el frente del forjado de una planta no mantenga el plano en toda su longitud, sin embargo produce desviaciones puntuales de pequeño valor y que, en ningún caso, son sistemáticas[43]. En este sentido, la solución indicada permite correcciones puntuales sin apenas incrementar el coste.



Aumento del revestimiento

Solución 2: Aumento del formato de las piezas

Esta solución se debe adoptar en la fase proyecto y es recomendable siempre que el dimensionado resulte excesivamente ajustado para la altura de planta del edificio en cuestión. No se trata, en realidad, de una medida correctora, sino de una decisión de proyecto para poder disponer de margen suficiente en la dimensión disponible para la entrega, y evitar la necesidad de otros recursos que suponen un coste adicional en elementos auxiliares[44].

Si se observan las variables que intervienen en el análisis, los cerramientos confinados son extraordinariamente sensibles a la esbeltez, y muy poco sensibles a la resistencia. De todas las decisiones de proyecto (resistencia, categoría y espesor de las piezas, tipo de mortero, categoría de la ejecución, etc.) la única que tiene trascendencia realmente en el modelo de análisis expuesto es el espesor de la pieza base. Utilizar el formato catalán supone obtener mayor margen para la entrega del cerramiento en los forjados sin dejar en precario la estabilidad de las plaquetas de revestimiento.

Solución 3: Análisis según el modelo arco horizontal

Esta solución no requiere, necesariamente, coste adicional en dispositivos auxiliares. Se trata sencillamente de un recurso del análisis que puede servir para justificar la validez del cerramiento en situaciones puntuales, en las que la insuficiente entrega en los forjados se debe a imprevistos en obra de la naturaleza indicada anteriormente.

El recurso consiste en rehacer el análisis, utilizando el modelo de funcionamiento en *arco horizontal*, es decir, confinando también entre soportes.

El modelo de análisis es exactamente el mismo; los límites de esbeltez por resistencia y estabilidad son idénticos a los obtenidos para el funcionamiento en arco vertical, con la salvedad de que ahora la esbeltez está referida a la luz libre entre soportes, en lugar de estar referida a la altura libre de planta.

Para utilizar este recurso en el análisis es imprescindible la presencia de soportes en el plano de fachada. También es imprescindible que el cerramiento esté conectado eficazmente a los soportes, de manera que se pueda generar la reacción oblicua necesaria para el funcionamiento.

La conexión del cerramiento a los soportes de fachada mediante el retacado con mortero, aunque se puede utilizar en el análisis, no constituye una buena práctica constructiva, debido a que existe una indeterminada pero importante incompatibilidad de movimientos verticales entre ambos elementos constructivos, que puede ser origen de fisuración vertical y dejar en precario la conexión supuesta[45]. Si los soportes son metálicos, además de incompatibilidad de movimientos procedentes del trabajo estructural, existe incompatibilidad de movimientos por efectos térmicos. El recurso constructivo recomendable es la utilización de dispositivos de anclaje, que desarrollen reacciones de forma selectiva y controlada[46].

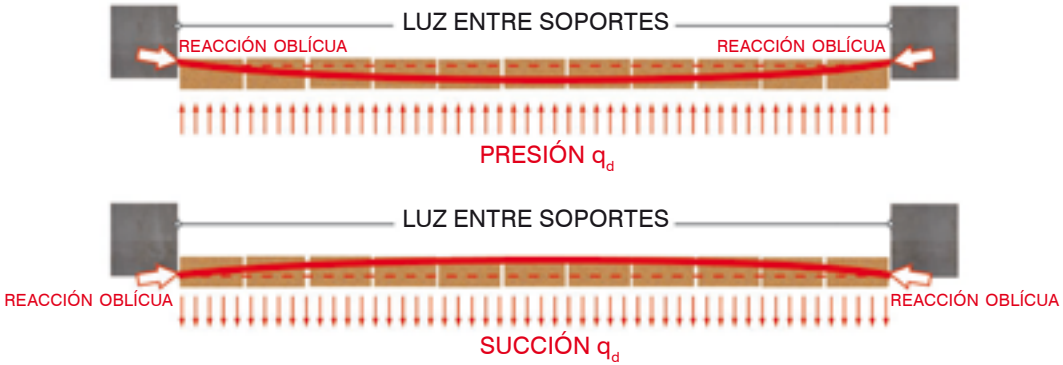
Otra reserva al modelo de *arco horizontal* viene impuesta por la posibilidad de contrarrestar los empujes generados contra el soporte del extremo. Mientras que el confinamiento contra los forjados permite contar con la carga gravitatoria de la última planta, si el confinamiento se produce contra

43 Las normas, cada vez más exigentes, de seguridad en el trabajo, recomiendan un entablado horizontal continuo previo a la construcción del forjado. Esta práctica permite replantear con absoluta precisión la tabica que limita el frente del forjado, por lo que, si se adoptan las medidas adecuadas, no deberían existir desviaciones importantes respecto de su posición teórica definida en proyecto.

44 Aumentar el formato de las piezas supone un coste adicional de las propias piezas y de la superficie disponible en planta. En el cómputo económico de la solución es necesario sopesar todos los factores, y esa es una tarea que se debe realizar en la fase de proyecto.

45 El problema de la fisuración del cerramiento en su encuentro con los soportes es grave, no sólo por el aspecto indecoroso que origina, sino porque una vez que se desconectan los dos elementos, las condiciones de estabilidad quedan en precario, puesto que el proceso de fisuración es irreversible.

46 El funcionamiento en arco requiere reacciones muy importantes en la dirección perpendicular al esfuerzo, para contrarrestar los empujes. Por ello, si se decide utilizar dispositivos de anclaje como conexión, suele ser más rentable utilizar el *modelo placa* para el análisis, aun a costa de tener que resistir tracciones.



Cerramiento confinado entre soportes. Funcionamiento en arco horizontal.

los soportes, no existe ninguna acción exterior que lo contrarreste en el tramo extremo[47]. Por ello, es importante destacar aquí que este recurso no es recomendable cuando las condiciones deficitarias de entrega se producen en los tramos próximos a las esquinas.

Desde el punto de vista del análisis, la utilización del modelo arco horizontal tiene otra importante restricción que, en la mayoría de los casos, lo convierte en inviable para ser utilizado en la fase de proyecto. La restricción viene impuesta por el valor de las luces entre soportes en las estructuras porticadas habituales.

Mientras que la altura libre de planta de un edificio convencional suele ser inferior a los 3,00 m; la luz entre soportes puede ser del orden del doble. Si la condición de esbeltez en vertical conduce a situaciones ajustadas, la esbeltez en horizontal suele conducir a situaciones inviables cuando se trata de resistir la totalidad de la acción de viento que fija la normativa.

Sin embargo, es perfectamente lícito utilizar el recurso del funcionamiento en arco horizontal, como suplemento adicional, combinado con el funcionamiento en arco vertical, para justificar la validez del cerramiento en situaciones puntuales de tramos no extremos, donde la condición de entrega haya quedado ligeramente mermada por algún imprevisto en obra.

El procedimiento a seguir para justificar la validez del comportamiento mecánico del cerramiento consiste en calcular el valor de la acción máxima de viento que se puede resistir con la entrega *real* disponible en los forjados, y verificar que el excedente de carga se puede resistir confinando entre los soportes[48].

Para ilustrar el procedimiento, se desarrolla a continuación el mismo ejemplo y en las mismas condiciones utilizadas en apartados anteriores. Recordemos que se trata de un cerramiento de ½ pie castellano que, para la altura libre de planta (h = 2,70 m) y la succión de viento ($q_{d,succión}$ = 0,75 kN/m²), requería una entrega mínima de 67 mm en los forjados. Supongamos que, al paso por un forjado, para mantener el plomo de la fachada, la entrega se queda reducida a 60 mm. Si existen soportes disponibles en el plano de fachada, el proceso de verificación se indica en el siguiente ejemplo.

EJEMPLO 5

Cerramiento confinado entre forjados y soportes. Análisis en segundo orden. Entrega 6 cm

Características geométricas:

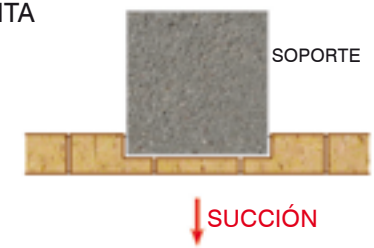
- Cerramiento de ladrillo confinado entre forjados con soportes en fachada
- Altura libre de planta: $h = 2{,}70$ m
- Espesor del muro (½ pie formato castellano): $t = 115$ mm
- Ancho de la entrega en forjados: $a_{forjado} = 60$ mm

Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4{,}0$ N/mm²
- Valor característico de la succión de viento: $q_{e,\,succión} = 0{,}5$ kN/m²
- Coeficiente de seguridad de la fábrica: $\gamma_M = 2{,}5$
- Coeficiente de seguridad de acciones: $\gamma_Q = 1{,}50$
- Valor de cálculo de la succión de viento: $q_{d,\,succión} = q_{e,\,succión} \cdot \gamma_Q = 0{,}75$ kN/m²
- Módulo de elasticidad de la fábrica: $E = 1.000 \cdot f_k = 4.000$ N/mm²[49]

SECCIÓN

PLANTA



Análisis:

Cálculo de la carga límite a SUCCIÓN por arco vertical:

- Esbeltez límite a succión:

$$\lambda_{lím} = (0{,}5 \cdot E / q_d)^{1/4} = 40{,}41$$

- Esbeltez real del cerramiento a succión (en vertical):

$$\lambda_{real,\ vertical} = h / a_{forjado} = 2{,}70\ m / 0{,}060\ m = 45{,}00 > \lambda_{lím,\ vertical}$$

- Carga límite con la esbeltez real:

$$q_{d,\ lím} = 0{,}5 \cdot E / \lambda_{real}^{\ 4} = 0{,}488\ kN/m^2$$

Comprobación de la resistencia a SUCCIÓN por arco vertical, para la carga límite:

- Valor de cálculo del momento flector máximo:

$$M_{Sd} = q_{d,\ lím} \cdot h^2 / 8 = 0{,}44\ m{\cdot}kN / metro$$

- Entrega (reducida por efectos de segundo orden):

$$a_{red} = (3 / 4) \cdot a_{forjado} = (3 / 4) \cdot 60\ mm = 45\ mm$$

- Ancho de biela comprimida:

$$b = (1 / 3) \cdot a_{red} = (1 / 3) \cdot 45\ mm = 15\ mm$$

- Capacidad resistente de la biela comprimida:

$$U_{cd} = f_d \cdot b = f_k \cdot b / \gamma_M = 24{,}0\ kN / metro$$

- Brazo eficaz de la sección resistente:

$$z = (2 / 3) \cdot a_{red} = 0{,}030\ m$$

- Capacidad resistente a momento flector:

$$M_{Rd} = U_{cd} \cdot z = 0{,}72\ m{\cdot}kN / metro$$

- Comprobación de resistencia:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

$M_{Sd} = q_{d,\ lím} \cdot h^2 / 8 =$ 0,44 m·kN / m < M_{Rd} = 0,72 m·kN / m. VALE

47 Esta situación se conoce como *"empuje al vacío"*.

48 El procedimiento de resistir cargas exteriores combinando varios modelos resistentes está avalado por DB SE-F, en el artículo 5.4.2 *"Análisis de solicitaciones en flexión"*. En el primer párrafo dice textualmente: *"Es aceptable el uso de cualquier procedimiento que dé como resultado un conjunto de esfuerzos en equilibrio con las acciones consideradas"*.

49 Las características geométricas y mecánicas son las mismas que las definidas en el ejemplo 3.

Comprobación a SUCCIÓN incluyendo arco horizontal entre soportes:

- Excedente de carga a resistir por arco horizontal:

$$\Delta q_d = q_d - q_{d,\,lím} = 0{,}75\ kN/m^2 - 0{,}488\ kN/m^2 = 0{,}262\ kN/m^2$$

- Esbeltez límite a succión (en horizontal):

$$\lambda_{lím,\,horizontal} = (0{,}5 \cdot E / \Delta q_d)^{1/4} = 52{,}56$$

- Luz máxima entre soportes:

$L_{máx} = \lambda_{lím,\,horizontal} \cdot a_{soporte}$ (siendo "$a_{soporte}$" la entrega en soportes)

  - Con entrega total

    ($a_{soporte}$ = 115 mm): $L_{máx} = 52{,}56 \cdot 0{,}115\ m = 6{,}04\ m$

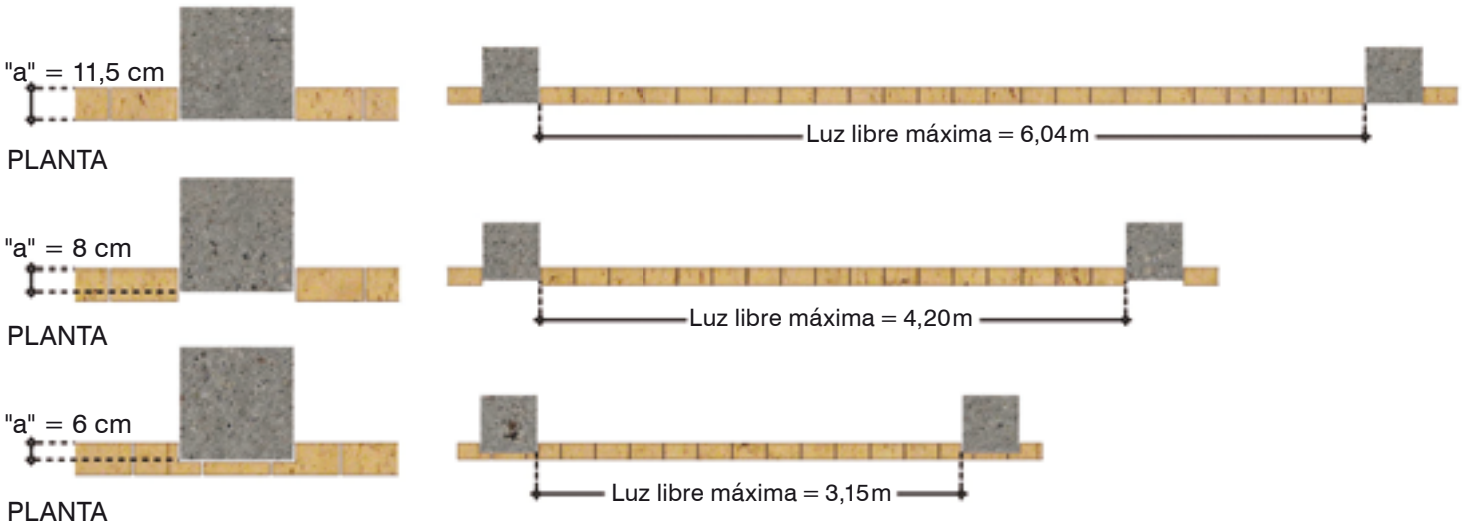
  - Con entrega parcial

    ($a_{soporte}$ = 80 mm): $L_{máx} = 52{,}56 \cdot 0{,}080\ m = 4{,}20\ m$

  - Con entrega parcial

    ($a_{soporte}$ = 60 mm): $L_{máx} = 52{,}56 \cdot 0{,}060\ m = 3{,}15\ m$

Es importante destacar que el recurso que se ha analizado en este apartado supone *no renunciar* al modelo de funcionamiento en arco; es decir, no renunciar a que el cerramiento esté *totalmente comprimido*, a pesar de tener que resistir flexiones. Por ello, no debe extrañar que con el modelo de arco horizontal se obtenga un incremento de resistencia relativamente limitado; por lo que sólo sirve para corregir pequeñas desviaciones puntuales de la esbeltez real, respecto del valor especificado en proyecto.



Solución 4: Sustitución del confinamiento por anclajes a soportes y forjados

Cuando la esbeltez del cerramiento es notablemente superior al valor límite establecido por cálculo, no es viable el modelo de funcionamiento en arco, aunque sí se pueden utilizar como recurso adicional los dispositivos de anclaje a la estructura. En estos casos el modelo de funcionamiento debe ser en *placa*, que produce resultados con un margen mucho más amplio en lo que se refiere a las condiciones de entrega, pero tiene como contrapartida la presencia inevitable de tracciones en la fábrica. Este modelo se analizará en los apartados siguientes.

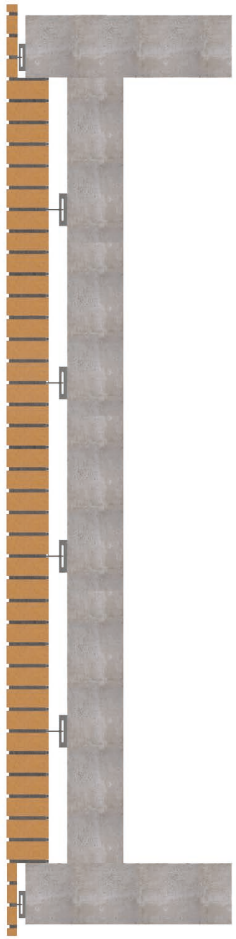
Los dispositivos de anclaje deben suministrar, de modo selectivo, las reacciones precisas según la función que se les asigne. En este sentido, el diseño del anclaje debe estar específicamente estudiado para transmitir determinados esfuerzos y liberar otros. Los funcionamientos en *arco* y en *placa* generan reacciones diferentes, por lo que no es adecuado utilizar indiscriminadamente cualquier modelo de anclaje para cualquier situación.

Como se ha visto en los ejemplos anteriores, la reacción oblicua generada por un funcionamiento en arco, tanto horizontal como vertical, produce esfuerzos de compresión de valor considerable, que no se generan en un funcionamiento en placa. Contra los soportes, el esfuerzo de compresión es horizontal, lo cual no supone conflicto con el trabajo estructural al que generalmente están sometidos. Sin embargo, contra los forjados, el esfuerzo de compresión es vertical. Para que el dispositivo de anclaje pueda transmitir el esfuerzo, debe tener eficazmente impedido el movimiento en esa dirección; y ello sí supone un conflicto entre cerramiento y estructura, que puede tener como consecuencia el trasvase de carga gravitatoria del forjado a la fachada por la enorme diferencia de rigidez.

Este efecto ocurre cuando se utiliza un angular en el frente de forjado para restituir la condición de entrega. Aunque los tacos de fijación del angular al forjado pudieran suministrar la reacción necesaria por cortante, como contrapartida existe un riesgo de trasvase de carga gravitatoria del forjado al cerramiento, a través del angular; de manera que se produce un efecto de acumulación de carga hacia la planta de arranque, no sólo de la debida al propio peso de la fachada, sino también de la debida al peso de los forjados. Si la fachada arranca en planta baja de un apoyo firme, y se conecta rígidamente a los forjados mediante angulares, no es la fachada la que está *mejor apoyada* en los forjados, sino que son los forjados los que resultan *mejor apoyados* en la fachada.

La solución, muy frecuente en antiguos manuales, de restituir la *entrega*[50] con angulares conectados al forjado mediante tacos a cortante, constituye un recurso desproporcionadamente caro en acero estructural si se compara con su eficacia. La misma función puede ser desempeñada por una platabanda o simplemente por las *garras* de los dispositivos de anclaje. En todos los casos, sólo contabiliza la reacción del taco, el acero interpuesto no interviene en el comportamiento.

50 Nótese que siempre decimos *"entrega"* para producir confinamiento. El *"apoyo"* del cerramiento en la planta de arranque no se cuestiona en este modelo.

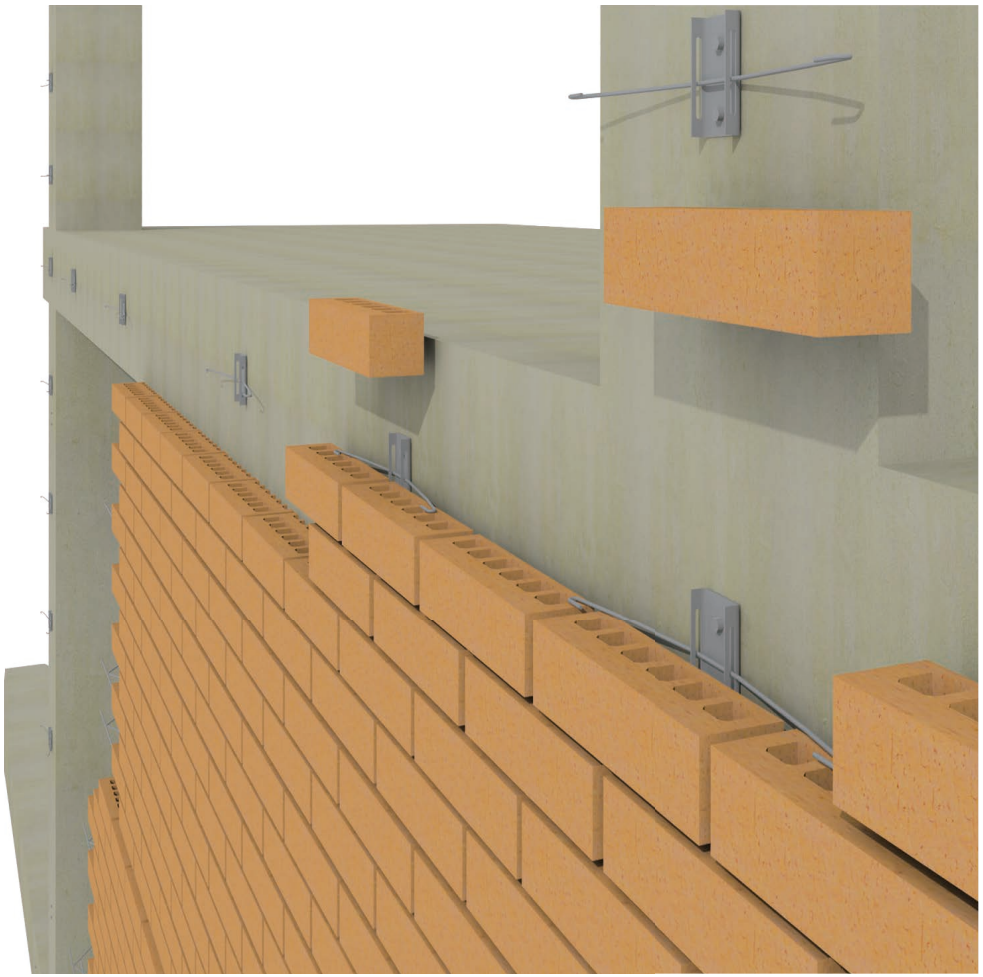


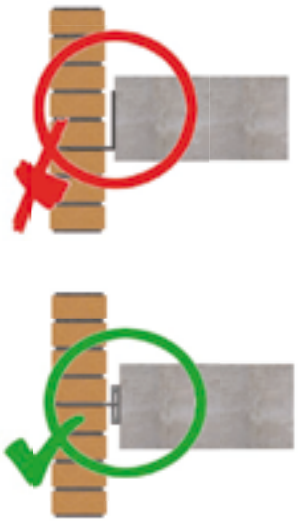
Anclajes para restituir la entrega

Por la razón indicada anteriormente, cualquier elemento de fijación de la fachada a la estructura debe tener libertad de movimiento vertical. Ello supone destruir la componente del *empuje* necesario para que se produzca un comportamiento en arco vertical.

La solución con anclajes a forjados, cuando los anclajes tienen libertad de movimiento vertical, supone un cambio en el modelo de análisis del comportamiento mecánico del cerramiento. Al ser destruido el *empuje*, el arco se convierte en viga, y la flexión producida por las acciones horizontales se debe resistir a costa de tracción en la fábrica.

En cambio, como se ha visto en el apartado anterior, en la solución con anclajes a soportes, aunque los anclajes tuvieran libertad de movimiento vertical, no se destruye el *empuje*, por lo que se puede mantener el modelo de funcionamiento en arco horizontal.





Anclajes a forjado con libertad de movimiento vertical

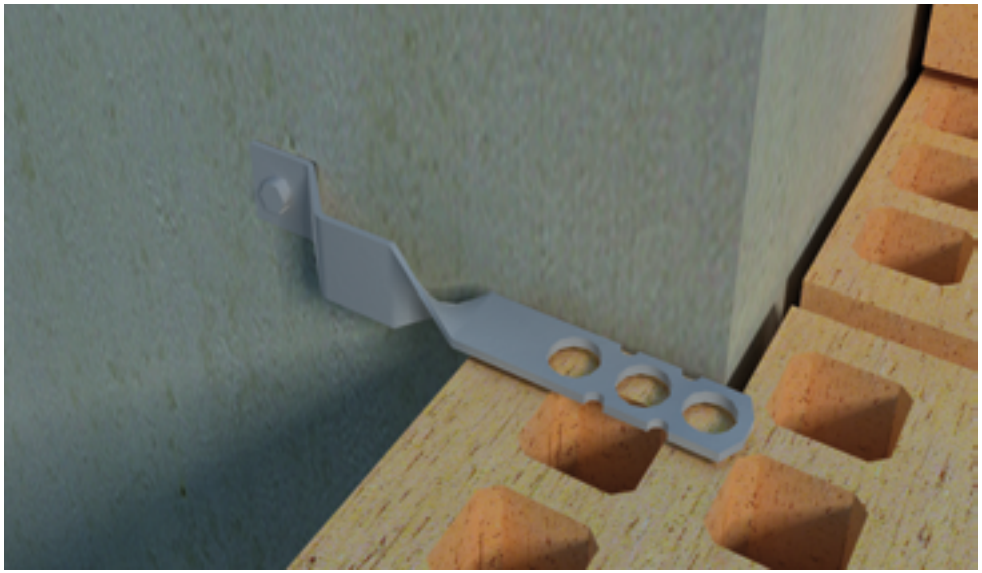
5.1.3 Cerramiento anclado

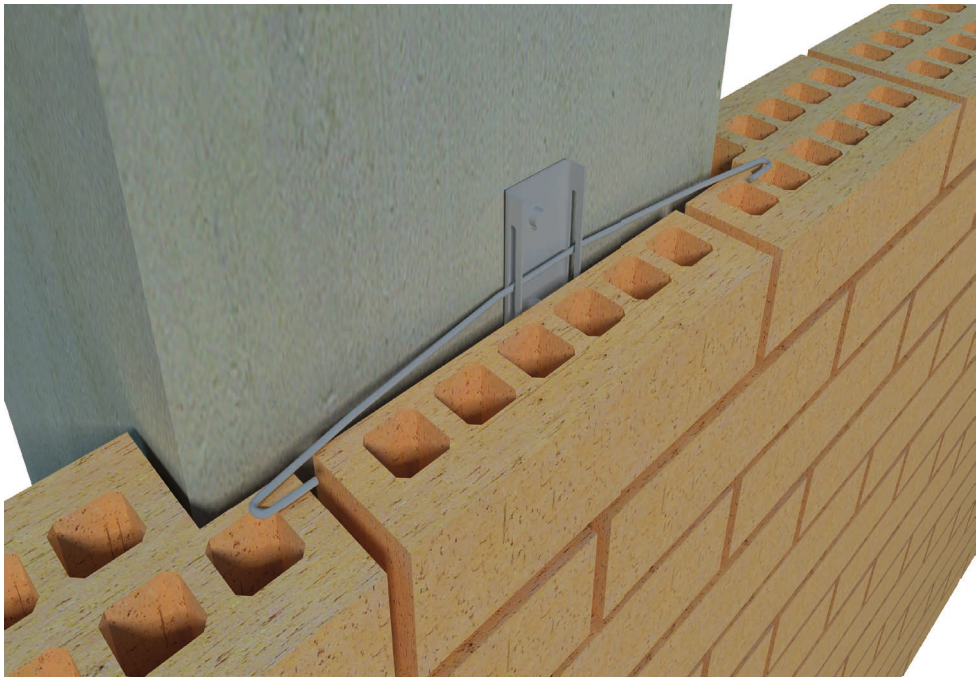
El cerramiento anclado corresponde al procedimiento constructivo que consiste en sujetarlo a la estructura del edificio, o a elementos auxiliares si la estructura no está presente en el plano de fachada, mediante dispositivos de anclaje que liberan determinados movimientos e impiden otros, con objeto de transmitir sólo los esfuerzos ocasionados por las acciones horizontales.

Si el cerramiento en los edificios de estructuras porticadas se concibe como una piel que no forma parte del sistema estructural previsto para la transmisión de cargas gravitatorias, el hecho de confinarlo en el sistema supone realizar una serie de comprobaciones adicionales para verificar que cada elemento del conjunto se comporta de la forma prevista. Y estas comprobaciones no siempre son fáciles de realizar.

Es indudable que el cerramiento se tiene que sustentar en la estructura del edificio, como cualquier otro elemento constructivo, pero no es menos cierto que la estructura no está siempre donde uno quiere o ha previsto en el análisis. En las primeras fases de carga, para los valores de servicio, las acciones no se canalizan por los elementos más resistentes, sino por los elementos más rígidos, y precisamente los muros, tanto si son de hormigón como si son de fábrica, constituyen los puntos más rígidos del edificio.

Ningún elemento estructural lineal flectado (viga o soporte) puede competir en rigidez contra un muro de fábrica, si éste no puede moverse libremente. Si se introdujeran en un modelo de análisis elástico compatible los cerramientos confinados en los pórticos de fachada,





Anclajes a soportes: fijos y con libertad de movimiento vertical

sería difícil distinguir, para niveles bajos de carga, cuáles son realmente los elementos sustentantes y cuáles los sustentados.

Esto no sería grave si no fuera porque los elementos de fábrica, por ser menos resistentes a determinados esfuerzos que los elementos estructurales, llegan antes a valores de tensión insoportables por el material. Sólo después de la acomodación del elemento de fábrica, que intenta liberarse de tensiones que no puede resistir, el sistema estructural acaba siendo el previsto inicialmente. Este aspecto ya se ha comentado al analizar el riesgo de pandeo por posible acumulación de carga.

Por todo ello, es importante que las condiciones de sustentación de los cerramientos en la estructura sean claras, precisas y selectivas, no sólo para prevenir procesos patológicos, sino para poder utilizar modelos de análisis que reproduzcan el comportamiento real.

Las condiciones de sustentación son las que determinan la rigidez de un elemento. En contra de lo que pudiera parecer, no es el módulo de elasticidad, ni el espesor, ni siquiera el canto lo que confiere rigidez. Frente a un determinado esfuerzo, la rigidez viene determinada por la imposibilidad de moverse en la dirección del mismo; y en los cerramientos, esta imposibilidad de movimiento debe ser selectiva.

El procedimiento de sustentar los paños de cerramiento mediante anclajes a la estructura del edificio, diseñados a tal efecto, permite seleccionar las reacciones que realmente se desea transmitir, liberar tensiones indeseadas por coacciones al movimiento y poder analizar y dimensionar, tanto la fábrica, como los elementos de sustentación, para cumplir satisfactoriamente las condiciones de estabilidad y resistencia con el margen de seguridad deseado.

Cerramiento anclado: Funcionamiento en placa

Los paños de fachada reciben directamente las acciones horizontales, fundamentalmente la acción del viento que incide según la dirección perpendicular a su plano, y deben transmitirlas a la estructura del edificio que, si se trata de una estructura porticada, esta en los bordes de los paños (soportes y vigas de borde de forjados).

Si no existe confinamiento en los bordes, la transmisión es necesariamente por flexión, con tracciones inevitables

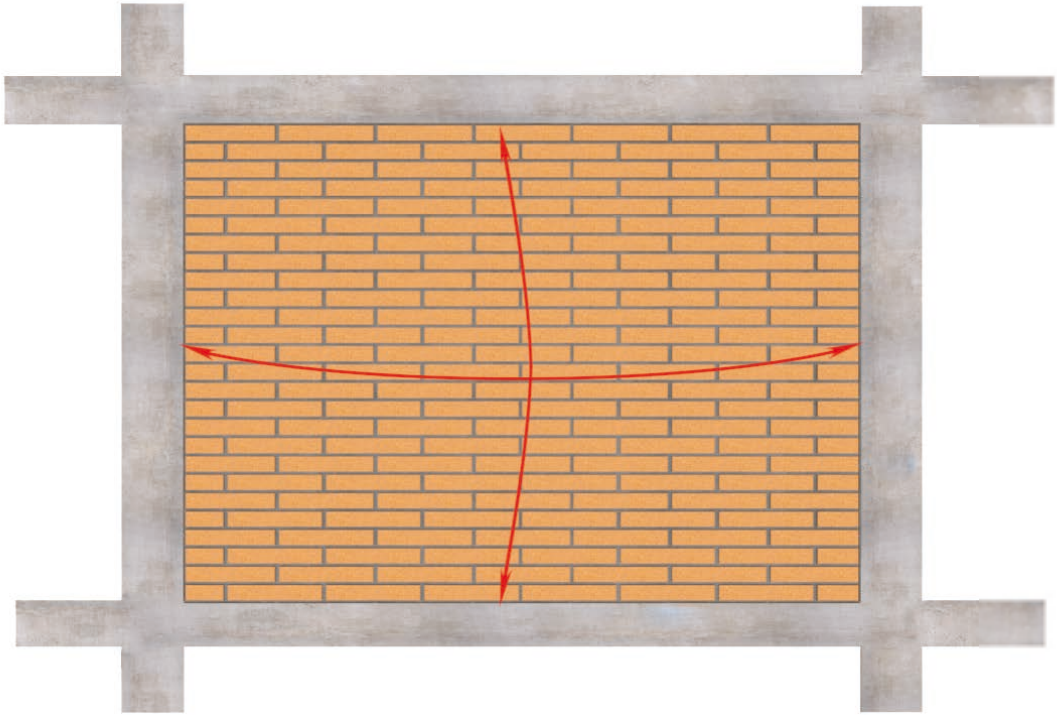
Anclajes fijo a soporte

en la fábrica, puesto que sólo el propio peso del cerramiento de cada paño no es suficiente para contrarrestarlas.

El tipo estructural de referencia corresponde al modelo de *placa sustentada en bordes*, sometida a acciones perpendiculares a su plano, y la transmisión de esfuerzos se realiza por flexión bidireccional, que puede devenir en un funcionamiento en viga (horizontal o vertical) en función de las dimensiones del paño y de la relación de resistencias a flexión de la fábrica en cada dirección.

Si el *"modelo arco"* requiere únicamente tensiones de compresión para resistir las acciones horizontales (la tracción se sustituye por el *"empuje"* en las reacciones), el *"modelo placa"* implica la presencia de tracciones en la fábrica. El DB SE-F, en la tabla 4.6 *"Resistencia a flexión de la fábrica",* reconoce explícitamente la capacidad resistente a flexión con tracciones en las dos direcciones de un muro, aunque con valores muy pequeños[51]. La posibilidad de utilizar este modelo de análisis para los valores habituales de acción horizontal y dimensiones razonables de los paños de cerramiento, está condicionada a la posibilidad de utilizar recursos adicionales para conseguir suficiente resistencia a flexión en la fábrica.

51 La reserva que hace el DB SE-F en el artículo 4.6.4 *"Resistencia a flexión"*, párrafo 4, a la consideración de resistencia a flexión vertical de las fábricas, se refiere textualmente a los casos en los que *"la rotura de la fábrica por flexión origine el colapso o la pérdida de estabilidad del edificio o alguna de sus partes, o en caso de acción sísmica"*; la acción de viento se exceptúa explícitamente de este reserva. Es obvio que la objeción se refiere a los muros estabilizantes de una estructura, cuyo equilibrio depende de ellos, nunca a muros que deben soportarse a sí mismos, sin otra función estructural asignada. En el apartado 5.4 *"Muros con acciones laterales locales"*, el citado DB SE-F utiliza la resistencia a flexión de las fábricas, tanto horizontal como vertical, sin ningún tipo de reserva.



Funcionamiento en placa sustentada en cuatro bordes

Cerramiento anclado: *Procedimiento de análisis y dimensionado*

Los procedimientos de análisis para la determinación de esfuerzos son, en general, los establecidos por la Mecánica Estructural y, en particular, por la teoría de placas. El procedimiento de análisis debe tener la posibilidad de incluir las diferentes propiedades de la fábrica en las dos direcciones ortogonales, por lo que debe estar adaptado para su aplicación a materiales ortótropos.

El DB SE-F, en el artículo 5.4.2 *"Análisis de solicitaciones en flexión"*, párrafo 6, cita explícitamente el *método de las líneas de rotura* como un procedimiento aceptable para la obtención de esfuerzos. Aunque es la primera vez que se cita en la normativa, este método tiene un precedente cercano en la norma UNE-ENV 1996-1-3:2000 *"Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica. Parte 1-3: Reglas generales para edificios. Reglas detalladas para acciones laterales"*[52]. Los coeficientes de flexión que suministra la citada norma en la tabla 4.1 son idénticos a los que aparecen en el Anejo G *"Coeficientes de flexión"* del DB SE-F, y se comprueba fácilmente que están deducidos aplicando un cálculo en rotura adaptado a materiales ortótropos[53].

El método en rotura tiene la ventaja, frente a otros procedimientos, de su extraordinaria simplicidad para realizar comprobaciones de resistencia en elementos previamente dimensionados. Sin embargo, en la fase de proyecto, su aplicación no es directa; requiere tanteos previos puesto que el dimensionado de los elementos y la estrategia y criterios para conseguir capacidad resistente influyen decisivamente en los resultados de las solicitaciones. Precisamente por esta razón es un método de difícil implementación en programas informáticos, aunque extraordinariamente potente para comprobaciones manuales, incluso con geometrías complicadas, presencia de huecos o perturbaciones locales, donde no es posible la extrapolación de las formulaciones deducidas de los métodos elásticos clásicos.

Sin embargo, es importante destacar que el método de las líneas de rotura sólo constituye un procedimiento para determinar si la capacidad resistente resulta suficiente o escasa respecto a la demanda necesaria exclusivamente por equilibrio con las acciones exteriores en el momento de la rotura; en ningún caso aporta información acerca del comportamiento real de las fábricas a flexión en estado de servicio.

El método supone que el agotamiento de un paño no se produce hasta que lleguen a plastificar todas las secciones situadas sobre las líneas de rotura. Ello implica ductilidad infinita, y en las fábricas la ductilidad es, cuando menos, dudosa. Sin embargo, también es discutible la ductilidad del hormigón, y el método en rotura, como aproximación para la obtención de esfuerzos en determinados casos está aceptado implícitamente, aunque no esté citado de forma explícita en la normativa.

Actualmente ya existe una cierta tradición contrastada experimentalmente del comportamiento de las fábricas. En particular, la fábrica armada homogéneamente con armadura de tendel tiene un comportamiento a flexión horizontal similar al del hormigón armado, por lo que es posible aplicar, sin ningún tipo de reserva, los mismos modelos que están reconocidos para este material compuesto. Así lo establece DB SE-F en el artículo 5.6.2 *"Capacidad resistente"*, párrafo 1, que dice textualmente: *"En todo lo que afecta a las armaduras... y modelos de capacidad resistente de la sección, se seguirán, en lo que no se contradiga aquí, las prescripciones de la norma de hormigón vigente."*

DB SE-F aún va más allá, y no sólo permite utilizar los mismos modelos de capacidad de respuesta utilizados para las secciones de hormigón armado, sino que permite utilizar modelos plásticos de redistribución de esfuerzos sin ningún tipo de reserva ni restricción, bien entendido que sólo para el caso de muros no estructurales, sometidos a acciones laterales locales; es decir, sólo para el caso de cerramientos, petos, vallas y tabiques.

- *Método de las líneas de rotura (método del DB SE-F)*

El método de las líneas de rotura implica que el material tiene posibilidad de redistribuir los esfuerzos de flexión en las secciones de un paño, de manera que el agotamiento no se produce hasta que se alcanza simultáneamente la capacidad resistente en las dos direcciones (horizontal y vertical) a todo lo largo de las líneas de rotura.

Ello supone que los esfuerzos en cada dirección, en la situación de rotura, son proporcionales a las respectivas capacidades resistentes. El resto de variables que intervienen en la determinación de esfuerzos son: la intensidad de la acción horizontal, las dimensiones del paño y las condiciones de sustentación en los bordes.

Los esfuerzos de flexión correspondientes a cada dirección, debidos a la acción horizontal, se obtienen con las expresiones siguientes:

- Flexión vertical (plano de rotura paralelo a los tendeles):

$$M_{Sd1} = \mu \cdot \alpha \cdot \gamma_Q \cdot q_e \cdot L^2$$

- Flexión horizontal (plano de rotura perpendicular a los tendeles):

$$M_{Sd2} = \alpha \cdot \gamma_Q \cdot q_e \cdot L^2 = M_{Sd1} / \mu$$

siendo:

- M_{Sd1}; M_{Sd2} → momentos de flexión vertical y horizontal, respectivamente
- α → coeficiente de flexión horizontal
- γ_Q → coeficiente de seguridad de la acción horizontal
- q_e → valor característico de la acción horizontal por unidad de superficie
- L → longitud del paño entre ejes de sustentaciones verticales
- μ → razón de capacidades resistentes = M_{Rd1} / M_{Rd2}
- M_{Rd1}; M_{Rd} → capacidades resistentes a flexión vertical y horizontal, respectivamente

El Anejo G *"Coeficientes de flexión"* del DB SE-F suministra tablas con los valores del coeficiente de flexión horizontal *"α"* para seis casos diferentes de sustentación en los bordes, en función de *"μ"* (razón entre las capacidades resistentes a flexión vertical y horizontal), y la razón entre las dimensiones del paño (h / L). Los valores del coeficiente de flexión vertical se deducen directamente de los anteriores, sin más que multiplicarlos por el coeficiente *"μ"*.

Aplicando las expresiones anteriores se determina el valor de cálculo de los momentos máximos que solicitan al muro y se comparan con sus respectivas capacidades resistentes. Para obtener el coeficiente *"μ"* es preciso tener dimensionado el muro previamente, incorporando los recursos adicionales que se haya previsto utilizar.

Si no se prevé la utilización de armadura, los únicos parámetros que determinan el coeficiente *"μ"* son los respectivos valores de resistencia a flexión en cada una de las dos direcciones, *"f_{xk1}, flexión vertical con rotura paralela a los tendeles,"* y *"f_{xk2}, flexión horizontal con rotura perpendicular a los tendeles"*. Estos valores figuran en el DB SE-F, tabla 4.6 *"Resistencia a flexión de la fábrica"*, en función del tipo de mortero utilizado.

52 En adelante, EC-6.

53 Desgraciadamente EC-6 no cita la procedencia ni el método utilizado para la obtención de los coeficientes de flexión que suministra, lo que contribuye a mantener una cierta reticencia para aplicar métodos plásticos a materiales de ductilidad discutible. Afortunadamente, DB SE-F cita explícitamente el método de las *líneas de rotura*, lo que permite aplicarlo en situaciones no tabuladas, como pueden ser muros con huecos o con geometría no rectangular.

El proceso general de comprobación comprende los siguientes pasos:

- Determinar la capacidad resistente a flexión de la fábrica en cada dirección, a partir de las resistencias f_{xk1} y f_{xk2}, dadas en la tabla 4.6 del DB SE-F.

- Obtener la razón entre ambas $\mu = M_{Rd1} / M_{Rd2.}$

- Obtener el coeficiente de flexión "α", que depende de μ, de las condiciones de sustentación y continuidad en los bordes, y de la relación de dimensiones altura / longitud del paño. Se pueden utilizar las tablas del Anejo G "*Coeficientes de flexión"* del DB SE-F.

- Comparar el valor de cálculo del momento flector correspondiente a cada dirección con las respectivas capacidades resistentes de la fábrica.

Las ecuaciones de comprobación son las siguientes:

- Flexión vertical (plano de rotura paralelo a los tendeles):

$$M_{Sd1} = \mu \cdot \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 \leq M_{Rd1} = f_{xk1} \cdot Z / \gamma_M$$

- Flexión horizontal (plano de rotura perpendicular a los tendeles):

$$M_{Sd2} = \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 \leq M_{Rd2} = f_{xk2} \cdot Z / \gamma_M$$

siendo:

- $\alpha \rightarrow$ el coeficiente de flexión (DB SE-F, Anejo G)
- $\mu \rightarrow$ la razón de resistencias a flexión $= f_{xk1} / f_{xk2}$
- $L \rightarrow$ la longitud del muro entre sustentaciones verticales
- $q_e \rightarrow$ el valor característico de la acción horizontal
- $\gamma_Q \rightarrow$ el coeficiente de seguridad de la acción horizontal
- $Z \rightarrow$ el módulo resistente de la sección de muro por unidad de longitud o altura $= t^2 / 6$
- $t \rightarrow$ el espesor del muro
- $f_{xk1} \rightarrow$ el valor característico de la resistencia de la fábrica a flexión vertical
- $f_{xk2} \rightarrow$ el valor característico de la resistencia de la fábrica a flexión horizontal
- $\gamma_M \rightarrow$ el coeficiente de seguridad de la fábrica

Si el muro está cargado, aunque sólo sea con la carga debida a su propio peso, se puede incrementar la resistencia a flexión vertical f_{xk1}, por efecto de la tensión de compresión producida por la carga vertical permanente. Esta modificación influye en el valor del coeficiente μ que, a su vez, interviene en la obtención del coeficiente de flexión α. Según el DB SE-F, artículo 5.4.3 *"Capacidad resistente"*, cuando existe tensión normal de compresión, se puede tomar el siguiente valor como capacidad resistente de la fábrica a flexión vertical:

$$M_{Rd1} = (f_{xd1} + \sigma_d) \cdot Z = (f_{xk1} / \gamma_M + \sigma_d) \cdot Z$$

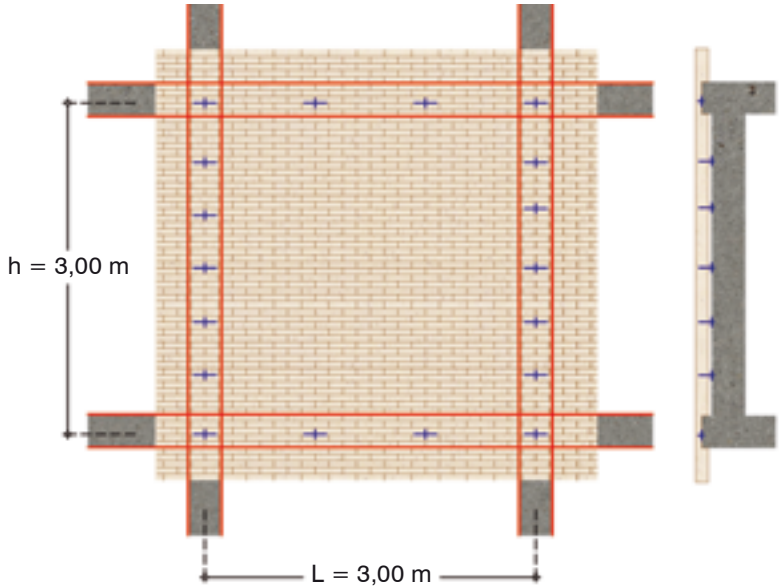
donde:

$\sigma_d \rightarrow$ es el valor de cálculo de la tensión media de compresión del muro.

En el ejemplo siguiente se ilustra la aplicación práctica del procedimiento. El ejemplo es el mismo que el utilizado para verificar el comportamiento por efecto arco, pero ahora suponiendo la existencia de soportes en fachada, a los que se puede conectar el cerramiento con anclajes distribuidos uniformemente en toda la altura. El anclaje a los forjados puede ser mediante retacado con mortero o con anclajes distribuidos uniformemente en toda la longitud. Notese que las distancias de cálculo ahora son las distancias entre ejes de anclajes

EJEMPLO 6

Cerramiento anclado a estructura
Altura entre forjados 3,00 m. Luz entre soportes 3,00 m



Características geométricas:

- Paño sustentado en cuatro bordes con laterales en continuidad (DB SE-F tabla G.3)
- Altura entre forjados: $h = 3{,}00$ m
- Luz entre soportes: $L = 3{,}00$ m
- Espesor del muro (½ pie formato castellano): $t = 115$ mm

Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4$ N/mm² (54)
- Resistencia a flexión paralela a los tendeles: $f_{xk1} = 0{,}10$ N/mm²
- Resistencia a flexión perpendicular a los tendeles: $f_{xk2} = 0{,}40$ N/mm² (55)
- Módulo resistente por unidad de longitud / altura: $Z_1 = Z_2 = t^2 / 6 = 2204$ mm²·m / metro
- Valor característico de la acción de viento: $q_e = 0{,}8$ kN/m²
- Coeficiente de seguridad de la fábrica: $\gamma_M = 2{,}5$
- Coeficiente de seguridad de acciones: $\gamma_Q = 1{,}50$ (variables desfavorables)
  $\gamma_G = 0{,}8$ (permanentes favorables) (56)
- Peso específico de la fábrica: $\rho = 18$ kN/m³

54 Obtenida en el ejemplo 1. En este análisis no interviene.

55 Valores obtenidos de la tabla 4.6 *"Resistencia a flexión de la fábrica"* del DB SE-F.

56 Según DB SE tabla 4.1 *"Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones"*. La acción de viento se considera *variable desfavorable*, y la acción gravitatoria se considera *permanente favorable*.

Análisis:

- Tensión normal debida a peso propio (a media altura): $\sigma_d = \rho \cdot \gamma_G \cdot h / 2 = 0{,}0194$ N/mm²
- Capacidad resistente a flexión vertical: $M_{Rd1} = Z \cdot (f_{xk1} / \gamma_M + \sigma_d) = 0{,}131$ m·kN / metro
- Capacidad resistente a flexión horizontal: $M_{Rd,2} = Z \cdot f_{xk2} / \gamma_M = 0{,}353$ m·kN / metro
- Razón entre capacidades resistentes $\mu = M_{Rd1} / M_{Rd2} = 0{,}371$
- Razón entre dimensiones: $h / L = 1{,}00$
- Coeficiente de flexión (DB SE-F tabla G.3): $\alpha = 0{,}0316$
- Valor de cálculo del momento flector vertical:

$$M_{Sd1} = \mu \cdot \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 = 0{,}371 \cdot 0{,}0316 \cdot 0{,}8 \text{ kN/m}^2 \cdot 1{,}50 \cdot (3{,}00 \text{ m})^2 = 0{,}126 \text{ m·kN / metro de longitud}$$

- Valor de cálculo del momento flector horizontal:

$$M_{Sd2} = \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 = 0{,}0316 \cdot 0{,}8 \text{ kN/m}^2 \cdot 1{,}50 \cdot (3{,}00 \text{ m})^2 = 0{,}341 \text{ m·kN / metro de altura}$$

- Comprobación de resistencia: $M_{Sd} \leq M_{Rd}$

M_{Sd1} = 0,126 m·kN / metro < M_{Rd1} = 0,131 m·kN / metro. VALE

M_{Sd2} = 0,341 m·kN / metro < M_{Rd2} = 0,353 m·kN / metro. VALE

Tabla G.3

μ	h/L 0,3	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2
1	0,004	0,009	0,015	0,021	0,026	0,030	0,033	0,036
0,9	0,004	0,010	0,016	0,022	0,027	0,031	0,034	0,037
0,8	0,005	0,010	0,017	0,023	0,028	0,032	0,035	0,038
0,7	0,005	0,011	0,019	0,025	0,030	0,033	0,037	0,039
0,6	0,006	0,013	0,020	0,026	0,031	0,035	0,038	0,041
0,5	0,007	0,014	0,022	0,028	0,033	0,037	0,040	0,042
0,4	0,008	0,016	0,024	0,031	0,035	0,039	0,042	0,044
0,35	0,009	0,017	0,026	0,032	0,037	0,040	0,043	0,045
0,3	0,010	0,019	0,028	0,034	0,038	0,042	0,044	0,046
0,25	0,011	0,021	0,030	0,036	0,040	0,043	0,046	0,048
0,2	0,013	0,023	0,032	0,038	0,042	0,045	0,047	0,050
0,15	0,016	0,026	0,035	0,041	0,044	0,047	0,049	0,051
0,1	0,020	0,031	0,039	0,044	0,047	0,050	0,052	0,054
0,05	0,027	0,038	0,045	0,049	0,052	0,053	0,055	0,056

En el ejemplo se puede observar que, a pesar de que la luz entre soportes tiene un valor muy modesto, el cumplimiento de las condiciones resistentes es estricto. Las estructuras de pórticos de hormigón o acero tienen, frecuentemente, luces entre soportes superiores a 3,00 m.

Con valores habituales de luces y alturas, si se desea mantener el espesor de ½ del cerramiento, es preciso utilizar algún recurso adicional con objeto de dotar a la fábrica de suficiente resistencia a flexión para resistir la acción de viento. Se indican a continuación algunos procedimientos.

Un recurso elemental consiste en disponer perfiles intercalados entre los soportes existentes, a modo de pilastras, consiguiendo luces no superiores a las máximas deducidas del análisis. Los perfiles son elementos resistentes sólo a flexión, y pueden colocarse, bien exteriores al muro invadiendo la cámara de aire, o bien embutidos en la fábrica; conectando, en ambos casos, con los correspondientes anclajes. Es recomendable utilizar la primera disposición, con objeto de estrangular lo mínimo posible la sección del muro.

Otro recurso es la incorporación de armadura en los tendeles, que incrementa la capacidad resistente de la fábrica a flexión horizontal. La cuantía de armadura se puede ajustar en función de la luz máxima entre los soportes existentes, respetando, en cualquier caso, la condición de cuantía mínima exigida a la fábrica armada (0,03% de la sección de muro).

La combinación de ambos recursos permite resolver cualquier situación habitual de luces entre soportes y de altura de planta; incluso permite la posibilidad de resistir la acción de viento por flexión en los casos en los que no existen soportes estructurales en el plano de fachada[57].

El procedimiento de análisis exige un dimensionado previo de la armadura, puesto que las distintas capacidades resistentes a flexión intervienen en la determinación de los esfuerzos.

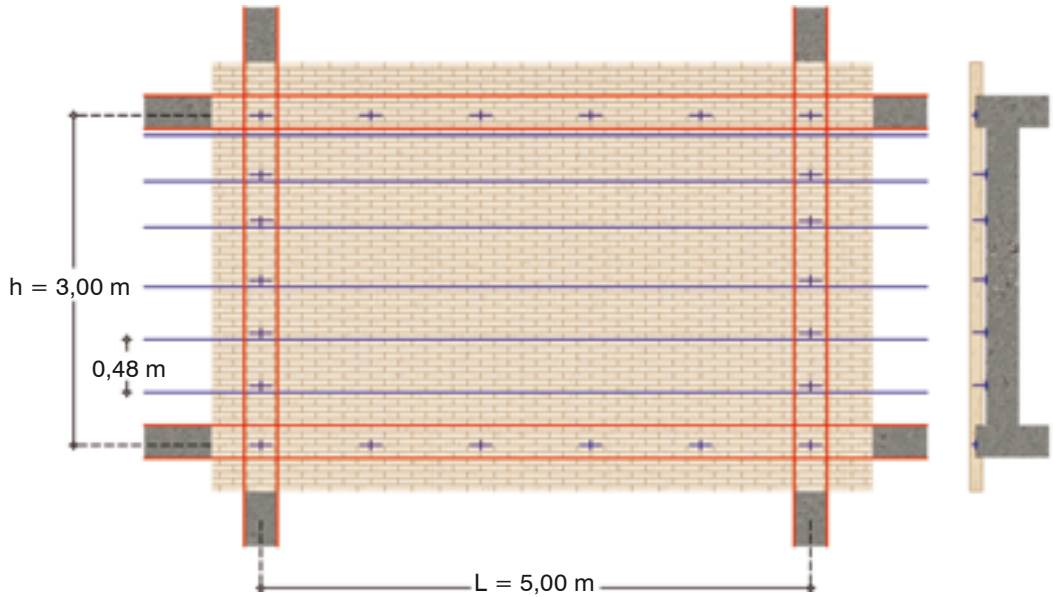
Lo habitual, y más rentable, consiste en dimensionar la armadura de tendel según requisitos constructivos o de cuantía mínima, y verificar el cumplimiento de las condiciones resistentes, intercalando perfiles adicionales, en los casos en los que se supere la luz de flexión horizontal limitada por el análisis.

Con objeto de ilustrar el método y dar una idea del orden de magnitud de los resultados, se analiza el mismo ejemplo anterior, con armadura de tendel dispuesta con cuantía media (cada 8 hiladas), y con luces entre soportes de 5,00 m; que representa una situación habitual en edificios de estructuras porticadas.

57 Si no existen soportes en fachada, los perfiles verticales desempeñan, además, una función estructural fundamental, porque conectan los forjados en voladizo de plantas sucesivas, obligando a todas las plantas a deformarse conjuntamente, y evitando que el muro de fachada deba trabajar como puntal o como tirante por las diferencias de flecha en plantas consecutivas.

EJEMPLO 7

Cerramiento anclado a estructura
Altura entre forjados 3,00 m. Luz entre soportes 5,00 m



Características geométricas:

- Paño sustentado en cuatro bordes con laterales en continuidad (DB SE-F tabla G.3)
- Altura entre forjados: $h = 3{,}00$ m
- Luz entre soportes: $L = 5{,}00$ m
- Espesor del muro (½ pie formato castellano): $t = 115$ mm
- Armadura de tendel (FISUFOR® 4080/G): Φ 4 mm, separados 80 mm, cada 48 cm

Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4$ N/mm² (58)
- Resistencia a flexión paralela a los tendeles: $f_{xk1} = 0{,}10$ N/mm² (59)
- Resistencia a tracción de la armadura (B-500S): $f_{yk} = 500$ N/mm²

58 Obtenida en el ejemplo 1. En este análisis no interviene.

59 Valor obtenidos de la tabla 4.6 *"Resistencia a flexión de la fábrica"* del DB SE-F.

- Área de la armadura de tendel (Φ 4 mm cada 0,48 m): $A_s = 26{,}18\ mm^2$ / metro de altura
- Brazo mecánico de la armadura: $z_s = 0{,}080$ m
- Módulo resistente por unidad de longitud: $Z_1 = t^2 / 6 = 2204\ mm^2 \cdot m$ / metro
- Valor característico de la acción de viento: $q_e = 0{,}8\ kN/m^2$
- Coeficiente de seguridad de la fábrica: $\gamma_M = 2{,}5$
- Coeficiente de seguridad de acciones: $\gamma_Q = 1{,}50$ (variables desfavorables)

  $\gamma_G = 0{,}8$ (permanentes favorables)
- Coeficiente de seguridad del acero: $\gamma_s = 1{,}15$
- Peso específico de la fábrica: $\rho = 18\ kN/m^3$

Análisis:

- Tensión normal debida a peso propio (a media altura): $\sigma_d = \rho \cdot \gamma_G \cdot h / 2$ $= 0{,}0216\ N/mm^2$
- Capacidad resistente a flexión vertical: $M_{Rd1} = Z \cdot (f_{xk1} / \gamma_M + \sigma_d)$ $= 0{,}136$ m·kN / metro
- Capacidad resistente a flexión horizontal: $M_{Rd2} = A_s \cdot f_{yk} \cdot z_s / \gamma_s$ $= 0{,}911$ m·kN / metro
- Razón entre resistencias: $\mu = M_{Rd1} / M_{Rd2}$ $= 0{,}149$
- Razón entre dimensiones: h / L $= 0{,}600$
- Coeficiente de flexión (DB SE-F tabla G.3): α $= 0{,}0303$
- Valor de cálculo del momento flector vertical:

$$M_{Sd1} = \mu \cdot \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 = 0{,}149 \cdot 0{,}0303 \cdot 0{,}8\ kN/m^2 \cdot 1{,}50 \cdot (5{,}00\ m)^2 = 0{,}135\ m \cdot kN \text{ / metro de longitud}$$

- Valor de cálculo del momento flector horizontal:

$$M_{Sd2} = \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 = 0{,}0303 \cdot 0{,}8\ kN/m^2 \cdot 1{,}50 \cdot (5{,}00\ m)^2 = 0{,}909\ m \cdot kN \text{ / metro de altura}$$

- Comprobación de resistencia: $M_{Sd} \leq M_{Rd}$

$M_{Sd1} = 0{,}135$ m·kN / metro $<$ $M_{Rd1} = 0{,}136$ m·kN / metro. VALE

$M_{Sd2} = 0{,}909$ m·kN / metro $<$ $M_{Rd2} = 0{,}911$ m·kN / metro. VALE

En general, para situaciones habituales de altura de planta en torno a los 3,00 m; con un cerramiento de ½ pie de espesor de ladrillo cara vista, anclado a forjados y soportes, se puede resistir la acción de viento disponiendo armadura de tendel FISUFOR® cada 8 hiladas (48 cm) con una luz de flexión, en tramos interiores, comprendida entre 5,00 m y 6,00 m.

Cerramientos anclados: Influencia de la presencia de huecos

En un paño de cerramiento funcionando como placa, la presencia de huecos reduce la capacidad resistente a flexión y, sin embargo, no reduce las solicitaciones.

El DB SE-F no suministra explícitamente las pautas para modificar el análisis cuando se produce esta circunstancia, aunque sí lo hace implícitamente al proponer como procedimiento el método de las líneas de rotura.

En efecto, este método se basa en realizar un balance energético entre el trabajo de las cargas exteriores al recorrer un desplazamiento virtual compatible con el patrón de rotura, y el trabajo interno de la estructura necesario para que ese desplazamiento virtual se produzca. El método permite realizar el cómputo energético del trabajo interno de la estructura *"por reducción al contorno"*. La presencia de huecos supone una reducción de la capacidad resistente en la misma medida que supone una reducción del *contorno* computable a efectos de determinar dicha capacidad resistente.

En función del tipo de sustentación de los bordes, la influencia de un hueco en un paño es diferente. Un borde con condición de continuidad computa dos veces en el cálculo de la capacidad resistente, puesto que contribuye a momentos positivos y negativos; un borde sin condición de continuidad computa sólo una vez; y un borde libre no computa.

Un hueco practicado en el interior de un paño, más o menos centrado en su superficie, supone eliminar la capacidad resistente a momentos positivos a lo largo de sus bordes, por consiguiente es fácil determinar su influencia en el análisis, estableciendo una proporción entre el contorno total (a positivos y negativos, si los hubiere) y el contorno que resulta descontando la proyección del hueco (sólo a positivos).

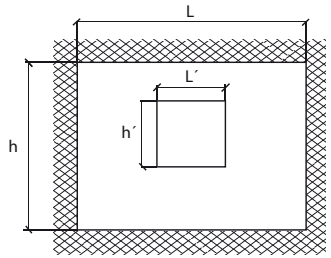
A continuación se dan las expresiones de la capacidad resistente en un paño con hueco, en función de las dimensiones del paño y del hueco, para los distintos casos de sustentación del cerramiento.

- ***Paños con continuidad en cabeza y base (plantas intermedias):***

Capacidad resistente:

A flexión vertical: $M_{Rd1}' = M_{Rd1} \cdot (4 \cdot L - 2 \cdot L') / 4 \cdot L$

A flexión horizontal: $M_{Rd2}' = M_{Rd2} \cdot (4 \cdot h - 2 \cdot h') / 4 \cdot h$

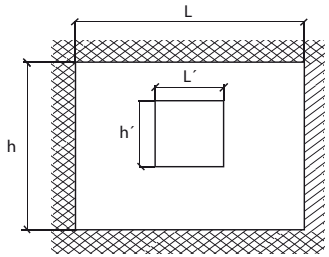


Paño con los cuatro bordes en continuidad (Tramo interior)

Capacidad resistente:

A flexión vertical: $M_{Rd1}' = M_{Rd1} \cdot (4 \cdot L - 2 \cdot L') / 4 \cdot L$

A flexión horizontal: $M_{Rd2}' = M_{Rd2} \cdot (3 \cdot h - 2 \cdot h') / 3 \cdot h$

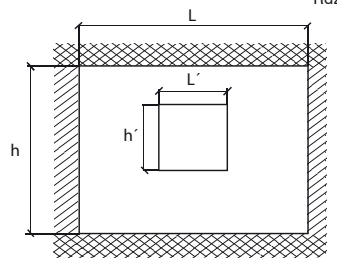


Paño con un borde lateral sin continuidad (Tramo extremo)

Capacidad resistente:

A flexión vertical: $M_{Rd1}' = M_{Rd1} \cdot (4 \cdot L - 2 \cdot L') / 4 \cdot L$

A flexión horizontal: $M_{Rd2}' = M_{Rd2} \cdot (h - h') / h$



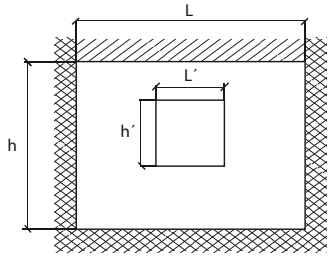
Paño con bordes laterales sin continuidad (Tramo aislado)

- ***Paños sin continuidad en cabeza (última planta):***

Capacidad resistente:

A flexión vertical: $M_{Rd1}' = M_{Rd1} \cdot (3 \cdot L - 2 \cdot L') / 3 \cdot L$

A flexión horizontal: $M_{Rd2}' = M_{Rd2} \cdot (4 \cdot h - 2 \cdot h') / 4 \cdot h$

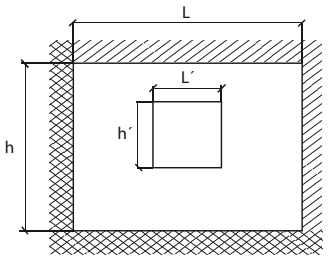


Paño con bordes laterales en continuidad (Tramo interior de última planta)

Capacidad resistente:

A flexión vertical: $M_{Rd1}' = M_{Rd1} \cdot (3 \cdot L - 2 \cdot L') / 3 \cdot L$

A flexión horizontal: $M_{Rd2}' = M_{Rd2} \cdot (3 \cdot h - 2 \cdot h') / 3 \cdot h$

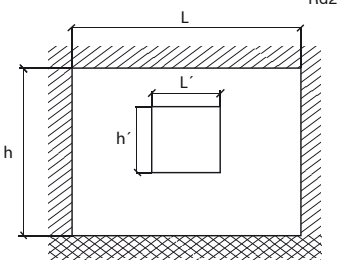


Paño con un borde lateral sin continuidad (Tramo extremo de última planta)

Capacidad resistente:

A flexión vertical: $M_{Rd1}' = M_{Rd1} \cdot (3 \cdot L - 2 \cdot L') / 3 \cdot L$

A flexión horizontal: $M_{Rd2}' = M_{Rd2} \cdot (h - h') / h$



Paño con bordes laterales sin continuidad (Tramo aislado de última planta)

En todos los casos M_{Rd1}' y M_{Rd2}' son las capacidades resistentes a flexión vertical y horizontal, respectivamente, del paño con huecos; y M_{Rd1} y M_{Rd2} son las capacidades resistentes del paño sin huecos.

Cálculos adicionales

El único cálculo adicional que requiere esta solución se refiere al dimensionado de los elementos auxiliares, tales como los anclajes a los forjados y soportes existentes y, en caso de ser necesarios, los perfiles verticales intercalados entre los mismos.

Dimensionado de los anclajes

Los anclajes deben suministrar la totalidad de la reacción que equilibre la fuerza horizontal del viento. Ante la presión de viento trabajan a compresión, en caso de succión, la solicitación es de tracción.

El cómputo de la totalidad de anclajes por paño es inmediato. Si cada anclaje resiste un esfuerzo F_{Rd}, el total de anclajes debe resistir la resultante de la fuerza horizontal del paño, F_{Sd}.

- Fuerza resultante debida a la acción del viento: $F_{Sd} = q_e \cdot \gamma_Q \cdot h \cdot L$
- Número de unidades de anclajes por paño: $N = q_e \cdot \gamma_Q \cdot h \cdot L / F_{Rd}$

siendo:

- q_e $\rightarrow$ el valor característico de la acción de viento (presión o succión)
- γ_Q $\rightarrow$ el coeficiente de seguridad de la acción horizontal = 1,50
- h, L $\rightarrow$ la altura y la longitud del paño, respectivamente

Anclajes a elementos estructurales

Para determinar qué porcentaje de la totalidad de anclajes se debe disponerse en los forjados y qué porcentaje le corresponde a los soportes, es preciso calcular la fracción de acción de viento que se resiste en cada una de las dos direcciones.

El reparto de la resultante total de la acción de viento, entre sustentaciones horizontales y verticales, se obtiene a partir de las solicitaciones de flexión obtenidas del análisis anterior, teniendo en cuenta que se trata de un cálculo de placa en rotura.

Las reacciones correspondientes a una placa no son, en rigor, constantes a lo largo de los bordes, sin embargo la distancia entre anclajes debe ser uniforme para facilitar la puesta en obra.

La única condición resistente que impone la normativa a los elementos de anclajes, según el DB SE-F, artículo 5.5 *"Llaves"*, se refiere a la solución constructiva de muros capuchinos, en la que el muro de cerramiento se ancla al muro interior, habitualmente de carga. El requisito que impone es que la totalidad de anclajes tengan capacidad para resistir la totalidad de la acción lateral (del paño), indicando una fórmula de dimensionado que supone, implícitamente, un reparto uniforme de los mismos.

Cuando la sustentación se realiza en los bordes del paño, es posible calcular la reacción a transmitir en cada borde, suponiendo una distribución uniforme, aunque discriminando entre bordes verticales (soportes) y bordes horizontales (forjados), prorrateando la acción horizontal total a partir de los resultados del análisis.

Si el paño tiene todos los bordes en continuidad, el reparto de la acción de viento en cada una de las dos direcciones se puede suponer directamente proporcional a las respectivas solicitaciones (M_{Sd1} y M_{Sd2}) e inversamente proporcional al cuadrado de las respectivas dimensiones (h y L). Si los bordes no tienen todos ellos la misma condición de sustentación (por ejemplo, un paño de extremo) el reparto, además, será inversamente proporcional a los coeficientes 8, 12 ó 16; que corresponden a 0, 1 ó 2 bordes en continuidad, respectivamente.

Para el ejemplo anterior, las reacciones en los bordes, a resistir por los anclajes, a presión de viento, se obtendrían con las siguientes expresiones:

Reacción en forjados:

- Tipo de sustentación del paño: empotrado – empotrado
- Carga equivalente a flexión vertical: $q_{d1} = q_e \cdot \gamma_Q \cdot 16 \cdot M_{Sd1} / [h^2 \cdot (16 \cdot M_{Sd2} / L^2 + 16 \cdot M_{Sd1} / h^2)] = 0{,}40$ kN/m²
- Luz del tramo (altura de planta): $h = 2{,}70$ m
- Reacción en el borde (procedente de dos paños consecutivos):

$$R_{d,\ forjados} = q_{d1} \cdot h = 0{,}40\ kN/m^2 \cdot 2{,}70\ m = 1{,}08\ kN / metro\ de\ longitud$$

Reacción en soportes:

- Tipo de sustentación del paño: empotrado – empotrado
- Carga equivalente a flexión horizontal: $q_{d2} = q_e \cdot \gamma_Q \cdot 16 \cdot M_{Sd2} / [L^2 \cdot (16 \cdot M_{Sd2} / L^2 + 16 \cdot M_{Sd1} / h^2)] = 0{,}80$ kN/m²
- Luz del tramo (longitud entre soportes): $L = 5{,}00$ m
- Reacción en el borde (procedente de dos paños consecutivos):

$$R_{d,\ soportes} = q_{d2} \cdot L = 0{,}80\ kN/m^2 \cdot 5{,}00\ m = 4{,}00\ kN / metro\ de\ altura$$

Comprobación de equilibrio:

- Reacción total en bordes: $R_{d,\ total} = R_{d,\ forjados} \cdot L + R_{d,\ soportes} \cdot h = 1{,}08\ kN/m \cdot 5{,}00\ m + 4{,}00\ kN/m \cdot 2{,}70\ m = 16{,}20\ kN$
- Acción de viento total en el paño: $Q_{d,\ total} = q_d \cdot L \cdot h = 0{,}80\ kN/m^2 \cdot 1{,}50 \cdot 5{,}00\ m \cdot 2{,}70\ m = 16{,}20\ kN$

Es importante destacar que, cuando se utiliza el recurso de la armadura de tendel para incrementar la capacidad resistente a flexión horizontal, la mayor parte de la reacción corresponde a los bordes verticales. El resultado del análisis indica que, si todos los anclajes tienen la misma capacidad resistente, se deben disponer los anclajes a soportes con un intervalo menor que el correspondiente a los anclajes a frentes de forjado.

Lo habitual, desde el punto de vista práctico, es prever una determinada distribución de anclajes por criterios constructivos y proceder, posteriormente, a la comprobación de los mismos. Con el valor de las reacciones obtenido en el apartado anterior, la comprobación de la capacidad resistente mínima que se requiere para los dispositivos de anclaje es inmediata.

Si los anclajes se disponen a una distancia s, determinada por razones constructivas, la capacidad resistente mínima de cada uno de ellos, debe ser:

- A compresión (para la presión de viento):

$$N_{Rd,\ compresión} \geq R_d \cdot s$$

- A tracción (para la succión de viento):

$$N_{Rd,\ tracción} \geq R_d \cdot s \cdot q_{e.\ succión} / q_{e,\ persión}$$

(siendo R_d el valor de la reacción en forjado o soportes, según el caso, obtenida anteriormente)

En el ejemplo anterior la capacidad resistente mínima que se debe exigir a los anclajes es la siguiente:

Anclajes a frentes de forjado:

- Separación máxima recomendada: $s = 1{,}00$ m
- Reacción en borde: $R_{d,\ forjados} = 1{,}08$ kN / metro
- Capacidad resistente a compresión: $N_{Rd,\ compresión} = 1{,}08$ kN/m $\cdot$ 1,00 m $= 1{,}08$ kN / anclaje
- Capacidad resistente a tracción: $N_{Rd,\ tracción} = 1{,}08$ kN/m $\cdot$ 0,5 kN/m^2 / 0,8 kN/m^2 $= 0{,}68$ kN / anclaje

Anclajes a soportes:

- Separación recomendada: $s = 0{,}48$ m (cada 8 hiladas, el mismo intervalo que la armadura)
- Reacción en borde: $R_{d,\ soportes} = 4{,}00$ kN / metro
- Capacidad resistente a compresión: $N_{Rd,\ compresión} = 4{,}00$ kN/m $\cdot$ 0,48 m $= 1{,}92$ kN / anclaje
- Capacidad resistente a tracción: $N_{Rd,\ tracción} = 1{,}92$ kN $\cdot$ 0,5 kN/m^2 / 0,8 kN/m^2 $= 1{,}20$ kN / anclaje

Dimensionado de los perfiles verticales auxiliares

Los perfiles auxiliares intercalados entre los soportes deben transmitir la reacción a los forjados, asimilada a una carga lateral con distribución uniforme.

La solicitación es, por tanto, de flexión simple. En función de las condiciones de sustentación en los extremos, el momento flector máximo de los perfiles será:

- Perfil simplemente apoyado (con placas en cabeza y base a forjados):

$$M_{Sd} = R_{d,\ soportes} \cdot h^2 / 8$$

- Perfil en continuidad (con una sola placa al frente del forjado):

$$M_{Sd} = R_{d,\ soportes} \cdot h^2 / 16$$

En el ejemplo anterior, para la situación más desfavorable de perfil simplemente apoyado en forjado, mediante placas de anclaje, el momento flector máximo tiene el valor:

$$M_{Sd} = 4{,}00 \text{ kN/m} \cdot (2{,}70 \text{ m})^2 / 8 = 3{,}65 \text{ m} \cdot \text{kN}$$

Si el perfil es de acero estructural, tipo S 275, necesita un módulo resistente mínimo de 14 cm^3. En general, cualquier perfil estructural en tubo cuadrado hueco suele ser suficiente. Por razones constructivas, para permitir una correcta soldadura del anclaje, es conveniente utilizar un tubo de 60 mm de lado mínimo.

5.2 Requisito de estanquidad

El aspecto que requiere mayor atención, desde el punto de vista de los requisitos funcionales de los cerramientos, es la protección contra la humedad, sobre todo si se tiene en cuenta que las fachadas son, junto con las cubiertas, las unidades constructivas responsables de la estanquidad del edificio en la gran mayoría de los casos. Las normas referentes a la protección del edificio contra las agresiones de la intemperie son cada vez más exigentes, y esta función está encomendada fundamentalmente a los cerramientos.

En general, los cerramientos tienen dos maneras de evitar la entrada de agua. Un procedimiento, que se podría llamar *tradicional*, se fundamenta en dar grosor al muro, de manera que la masa absorbente sea suficiente para evitar que el agua llegue al interior antes de que comience el período de secado. Para que el agua de lluvia, unida a la permeabilidad del ladrillo, ocasione la aparición de manchas de humedad en el intradós de un muro, se precisan períodos de exposición relativamente prolongados[60].

Sin embargo, el efecto del agua sobre las fachadas puede producir procesos patológicos incluso aunque no llegue a penetrar en el interior del edificio. Aunque la estanquidad esté garantizada por el espesor del muro, la humedad puede ocasionar manchas en las fábricas vistas o afectar a la adherencia con el recubrimiento en las fábricas revestidas.

El procedimiento habitual para garantizar la estanquidad del edificio frente a la humedad procedente del exterior, utilizado por los nuevos sistemas de cerramientos con materiales discontinuos y propiedades específicas para cada requisito, en los que el espesor no juega un papel importante, consiste en colocar drenajes perimetrales y disponer en los puntos delicados de los cerramientos barreras impermeables. En los cerramientos de fábrica de ladrillo la estanquidad se resuelve habitualmente disponiendo una cámara que trasdosa la primera hoja y evacua el agua por la parte inferior.

Sin embargo, la medida más eficaz para mejorar las condiciones de estanquidad, en el sentido de prevenir los riesgos de procesos patológicos por este concepto, es intervenir en las condiciones de diseño y ejecución de las fachadas. Para ello, es importante conocer la procedencia de la humedad que puede penetrar en el edificio a través de los cerramientos, con objeto de adoptar las medidas adecuadas para prevenir su aparición, tanto en la fase de proyecto como en las fases de ejecución y mantenimiento.

La procedencia de las humedades que pueden penetrar en el edificio a través de los cerramientos está explícita en el CTE. El Documento Básico HS Sección 1: *"Salubridad: Protección frente a la humedad"*[61] reproduce textualmente en la Introducción la exigencia básica de *"Protección frente a la humedad"* que se establece en el C.T.E., Parte I, artículo 13: *"Se limitará el riesgo previsible de presencia inadecuada de agua o humedad en el interior de los edificios y en sus cerramientos como consecuencia del agua procedente de precipitaciones atmosféricas, de escorrentías, del terreno o de condensaciones, disponiendo medios que impidan su penetración o, en su caso permitan su evacuación sin producción de daños".*

60 Para que el agua de lluvia penetre en un muro de ladrillo de 50 cm, sería necesaria una exposición continua durante 14 días.

61 En adelante DB HS 1.

62 Esta es la razón por la que los materiales aislantes pierden considerablemente su función específica cuando absorben agua.

Los daños que produce la penetración de humedad en los edificios no sólo se refieren al deterioro del ambiente y los espacios interiores, sino que también provoca lesiones en los propios paramentos por los que penetra.

En particular, la presencia de humedad en los muros de fábrica propicia la aparición de eflorescencias y aumenta el riesgo de corrosión de los elementos metálicos embutidos.

Si se producen heladas, las partes impregnadas de agua aumentan su volumen produciendo deterioros que reducen su durabilidad e, incluso, pueden poner en peligro la estabilidad del elemento.

Un efecto añadido es la consiguiente pérdida de calor y la necesidad de consumo extra de combustible. Cuando se impregna de humedad un material, el aire es expulsado de los poros y en su lugar aparece agua que, además, sufre un proceso de evaporación. El agua tiene una conductividad térmica 25 veces mayor que el aire, por eso la saturación de humedad aumenta la conductividad del material y disminuye la protección térmica[62].

5.2.1 Tipos de humedades

Según la vía de acceso y la procedencia del agua causante de las humedades en los edificios, éstas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

Humedades de ejecución

Se llaman también humedades de construcción o de obra. Son las que aparecen durante el proceso de ejecución de la unidad constructiva, manifestándose en la superficie de las fábricas en forma de manchas o eflorescencias.

Este tipo de humedades tiene su origen en el agua utilizada durante el proceso constructivo, que puede proceder de la aportada en el amasado y curado de los morteros; de la utilizada en la humectación previa de las piezas cerámicas; o de la lluvia que recibe el edificio durante su construcción.

El agua de obra tiende a desaparecer en un proceso natural de secado, transfiriéndose por evaporación a la atmósfera hasta alcanzar, en situaciones normales, una situación de equilibrio (equilibrio húmedo).

El problema surge si, antes de finalizar el proceso de secado, se limita la evaporación de agua al exterior, como puede ser, por ejemplo, con la ejecución de acabados superficiales (revestimientos y pinturas), de tal forma que no se pueda eliminar la humedad sobrante hasta alcanzar el equilibrio.

En este caso, el agua queda atrapada en el interior de la unidad constructiva, pudiendo llegar a ejercer fuertes presiones osmóticas que deriven, a corto o medio plazo, en diferentes lesiones, como son ampollas o desprendimientos del revestimiento, eflorescencias o erosiones físicas.

En algunos casos pueden ser confundidas con humedades de condensación o de capilaridad. Para determinar con exactitud el tipo de humedad existente, se debe realizar un secado de la unidad constructiva, bien por aireación natural o forzada, y llevar un seguimiento del contenido de humedad de la misma.

Humedades de fachada

Son las producidas por la penetración, infiltración o absorción del agua exterior a través de cualquiera de los materiales constituyentes de la fachada (piezas, morteros o carpinterías). Se manifiestan en forma de manchas y regueros sobre los materiales de revestimiento o acabado, tanto en el interior como en el exterior del cerramiento.

La mayor parte del agua que penetra en los edificios procede del exterior. El agua puede acceder a la masa del muro por causa de dos fenómenos: capilaridad y presión.

El primero, que se describirá más adelante, se asocia con el movimiento del fluido en el seno del material por la presencia de microfisuras de tamaño capilar en su estructura interior. El agua tiende a ascender por estos vasos debido al efecto de su tensión superficial.

El segundo se origina por la presión hidrostática que propicia el flujo del agua a través de la masa del mortero. El agua escurre a través de discontinuidades o poros que, al estar intercomunicados, favorecen su avance. El agua de lluvia puede salpicar y penetrar en el muro con cierta presión debida al efecto combinado con el viento. La velocidad de penetración depende de la permeabilidad del material, del espesor del muro, de la presión del agua pero, sobre todo, de la velocidad del viento incidente sobre la fachada[63].

Habitualmente no es en la masa del mortero donde se localizan las principales vías de penetración de humedad, sino en la superficie de contacto con las piezas. El agua sigue la línea de menor resistencia y, si existen intersticios en la junta ejecutada, éstos se convierten en pequeñas vías de acceso que sumadas originan una filtración aparente. Por ello, para asegurar la estanquidad es primordial garantizar un contacto absoluto del mortero con las piezas, y de ahí se deduce la relación directa de la estanquidad con la adherencia, propiedad esta última condicionada especialmente por la capacidad de retención de agua del mortero[64].

Otro aspecto que ayuda a favorecer la estanquidad en relación con la adherencia del mortero es aumentar la cantidad de cemento y la utilización de aditivos hidrofugantes. Sin embargo, si la cantidad de cemento es excesiva, aumenta también la retracción de fraguado, y se pueden producir fisuras provocando nuevamente el problema de filtraciones que se desea evitar. La aportación de cal hidratad proporciona una mayor estanquidad al agua de lluvia sin mermar la permeabilidad al vapor de agua[65].

Otro punto de atención es el agua procedente del terreno. Puede tener presión o carga hidráulica, lo que explica la penetración de aguas procedentes del nivel freático, de corrientes, bolsas, redes, etc. Pero también el agua sin

presión puede penetrar a través de los muros debido a la propia succión del material por fenómenos derivados de la tensión superficial. Incluso por encima del nivel que delimita el estrato capilar hay una zona en la que el agua en estado de vapor se mueve por difusión, buscando la superficie por donde evaporar.

Las causas que provocan la entrada de agua en un edificio a través de las fachadas varían en función del punto por donde se producen. Los puntos críticos, por donde se puede producir la entrada de agua, son los siguientes:

Penetración de agua en el arranque de los cerramientos

El agua, generalmente de lluvia, que salpica sobre el arranque del cerramiento, favorecida por la acción del viento, puede penetrar por las grietas y oquedades existentes, o por los fallos de la impermeabilización, causando la aparición de manchas de humedad en los encuentros de los paramentos interiores con el suelo.

Penetración de agua en los paños ciegos

La entrada de agua por los paños ciegos de los cerramientos se produce por la existencia de grietas, fisuras u oquedades en las juntas, o por la excesiva permeabilidad de las piezas o el mortero.

Incluso cuando se utilizan ladrillos klínker o hidrofugados, con una succión muy baja, pueden aparecer problemas de humedades si el mortero es más permeable que el ladrillo al paso de agua.

En las fábricas no vistas, el revestimiento empleado (enfoscado pintado, mortero monocapa, etc.) es el responsable de la estanquidad del muro; por ello, cualquier fallo de este revestimiento provocará la entrada de agua al interior.

Penetración de agua en los encuentros con el forjado

La disposición en estos puntos de elementos de fachada como relieves y salientes (molduras, impostas, balcones, etc.), pueden constituir verdaderas plataformas horizontales, en las que se acumula el agua facilitando su filtración hacia el interior.

Por otra parte, cualquier tipo de deformación o movimiento estructural del forjado puede ocasionar la aparición de grietas en la fábrica por las que puede penetrar el agua.

Las lesiones con la forma típica de mancha de humedad, que aparecen en el interior de los edificios, en el encuentro del suelo con los paramentos verticales, tienen su origen en el agua que, entrando por cualquier punto de la fachada, escurre por la cámara de aire del cerramiento. Cuando se interrumpe la cámara de aire por el forjado, si no está ventilada, el agua filtrada queda acumulada en estos puntos, y se manifiesta en el interior del edificio en forma de las manchas descritas.

Penetración de agua en los huecos de fachada

El agua puede penetrar en la fachada a través de los huecos, por el dintel superior, cuando carece de goterón; por el vierteaguas, cuando no tiene pendiente o es muy escasa; o por la propia carpintería, cuando tiene un deficiente sellado en su unión con el cerramiento.

63 Los resultados de estudios realizados para la cuantificación de ambos mecanismos indican que las aportaciones causadas por la presión hidrostática son sensiblemente superiores a las originadas por capilaridad.

64 La capacidad de retención de agua del mortero permite evitar la exudación, fenómeno por el cual los componentes de la masa con menor peso específico se elevan y los más pesados se sedimentan en la capa inferior, comprometiendo la adherencia.

65 La aportación de cal hidratada permite que el mortero seque de dentro hacia fuera por lo que, si existe agua sobrante, ésta se evapora sin generar humedades.

Por otra parte, la forma de resolver la evacuación de agua de balcones con tubos o gárgolas directas al exterior, que atraviesan las albardillas realizadas con muretes de fábrica, pueden ocasionar problemas de filtración cuando se obstruyen, bien por tener una sección, pendiente o vuelo insuficientes en caso de lluvias torrenciales, o bien por falta de limpieza y mantenimiento.

Penetración de agua en la coronación de muros

En los remates superiores de los cerramientos de fachada, la entrada de agua se puede producir por la existencia de dos errores muy comunes.

Uno de ellos es la disposición de albardillas o vierteaguas poco adecuados a la función que deben desempeñar; por ejemplo, de materiales muy permeables, con escaso vuelo sobre la fábrica, con juntas muy abiertas, o carentes de pendiente o goterón; lo que

facilita la entrada de agua por los bordes y juntas de las piezas, o que ésta escurra por la fachada, con el consiguiente riesgo de filtración al interior.

Otro error es la inexistencia de aleros o la disposición de los mismos con insuficiente vuelo o sin canalones de recogida de las aguas de cubierta, lo que provoca la escorrentía de agua por la fábrica.

Humedades de capilaridad

La capilaridad es el fenómeno físico que consiste en la ascensión del agua por una red de tubos o poros muy finos en el sentido contrario al de la gravedad. Se trata de un fenómeno de difusión, ya que se produce en cualquier dirección.

En el caso particular de los muros de fábrica, el ascenso capilar de agua desde el terreno se ve favorecido por el mortero, debido a su estructura porosa. La humedad debida a esta causa se manifiesta en la superficie de los paramentos en forma de manchas y, en ocasiones, en forma de eflorescencias, por la presencia de sales en el terreno o en los materiales que constituyen el muro, que son arrastradas por el agua en su ascensión.

La degradación que puede provocar la humedad de ascenso capilar, a largo plazo, puede llegar a ser muy importante, puesto que algunas de las sales que cristalizan en el paramento presentan una elevada higroscopicidad, con lo que la superficie del muro tiende a humedecerse siempre que el aire esté húmedo, creándose así un círculo vicioso. Al existir un flujo prácticamente continuo y persistente de agua, el proceso degenerativo del muro es constante e irreversible.

Las humedades de los muros que tienen su causa en el fenómeno de capilaridad son permanentes cuando el nivel freático del terreno se encuentra muy alto; cuando están relacionadas con las condiciones meteorológicas suelen ser humedades temporales o accidentales.

Las humedades en los muros por esta causa se reconocen por la altura hasta la que asciende el agua. El tratamiento de prevención, para que sea eficaz, se debe aplicar por debajo de esa cota.

La altura que alcanza la humedad suele estar en torno a 1,50 m ó 2,00 m y normalmente se mantiene uniforme en todo el muro, disminuyendo en las esquinas al existir en estas zonas una mayor evaporación. La altura indicada puede variar en más o en menos en función de los siguientes parámetros: tamaño, forma y estructura de los capilares de las piezas y el mortero, presión atmosférica, velocidad de evaporación de la superficie y espesor del muro. Cuanto menor sea el tamaño del poro de los materiales, mayor es la altura alcanzada por la humedad, aunque la velocidad de ascenso sea menor[66]. A mayor velocidad de evaporación de la superficie del muro, menor altura alcanza la mancha de humedad. A mayor espesor del muro, mayor es la altura de humedad porque necesita mayor superficie para evaporar.

La evaporación tiene una influencia decisiva en el proceso de formación de humedades por ascensión capilar. Por tanto, en la medida en que se dificulte la evaporación superficial del agua por el empleo de revestimientos, tales como enfoscados o pinturas impermeabilizantes, sin eliminar la causa que provoca su aparición, la altura que alcanza la mancha de humedad será mayor.

La causa de aparición de humedades por ascenso capilar se debe a tres errores de ejecución bastante frecuentes.

Uno de ellos es apoyar las fábricas, en el arranque, directamente sobre la cimentación o en contacto con el terreno, sin colocar ningún tipo de barrera o drenaje que impida el ascenso de agua.

Otro error es la ejecución de revestimientos continuos sin respetar la discontinuidad de la barrera de impermeabilización, con lo que se forman puentes de ascenso para las humedades.

El tercer fallo se debe a la ejecución incorrecta de canalizaciones de agua, saneamiento, arquetas o pozos.

Humedades de condensación

La humedad procedente del interior, o humedad de condensación, tiene su origen en el agua en forma de vapor que existe en un cerramiento. La diferencia de presiones entre los ambientes interior y exterior puede originar un desplazamiento de este vapor de agua por difusión.

Las humedades de condensación se pueden producir en el interior o en la superficie de los cerramientos por el paso a estado líquido del vapor de agua contenido en el aire[67].

El fenómeno se debe al gradiente de temperatura y humedad que existe en régimen de invierno entre el espacio interior, generalmente calefactado, y el espacio interior, más frío. En el aire interior existe un porcentaje de vapor de agua que se llama *humedad relativa;* si

el espacio está a 20°C el contenido de humedad relativa normal es del orden del 75%. A medida que aumenta este porcentaje de vapor de agua el aire se va saturando hasta que encuentra una superficie cuya temperatura es inferior *al punto de rocío*[68], entonces se condensa y aparece la humedad.

La zona del cerramiento en la que se produce la condensación depende del lugar en el que se alcance el *"punto de rocío"*. Según esto, las condensaciones se pueden producir en la superficie del cerramiento (*condensaciones superficiales*) como, por ejemplo, sucede en los vidrios de las ventanas cuando existe una gran diferencia de temperatura entre el espacio interior y el exterior; o se pueden producir en las hojas interiores del mismo (*condensaciones intersticiales*), sobre todo por la ausencia o mala colocación del aislamiento.

El riesgo de condensación está determinado por diversos factores.

El primero es la humedad relativa del aire existente en el interior del edificio. El riesgo de condensación disminuye ventilando y renovando con aire exterior. Para prevenir el riesgo de aparición de las humedades de condensación, la humedad relativa del aire debe oscilar entre el 35% y el 85%.[69]

Otro factor importante es el gradiente de temperatura entre el ambiente interior y exterior. La temperatura del interior debe oscilar entre 22° en verano y 20° en invierno, con una ventilación suficiente. El aislamiento térmico y la posición relativa de los materiales aislantes desempeñan un papel primordial en este punto, puesto que determinan la temperatura de las diferentes capas que constituyen el cerramiento. Un buen soleamiento de los locales disminuye el riesgo de condensaciones.

También constituye un factor a considerar la respuesta térmica del edificio, es decir, la mayor o menor velocidad con la que se calienta o se enfría ante las variaciones de temperatura ambiental[70].

Estos factores determinan las zonas de riesgo más comunes en las que suelen aparecer las humedades de condensación. Estas zonas suelen ser las más propensas a la existencia de puentes térmicos (radiadores, cajas de persiana, encuentro de muros con forjados) y las zonas mal ventiladas.

Las humedades de condensación se manifiestan de distinta forma según el tipo de superficie afectada. Sobre materiales impermeables o cualquier superficie pulida y brillante, se presentan en forma de gotas. En el caso de superficies mates, la apariencia es en forma de veladuras apreciables al tacto. Sobre los revocos producen erosiones localizadas principalmente en las partes bajas de los paramentos y en los rodapiés, y manchas negruzcas formadas por colonias de mohos, de olor característico, concentradas en las zonas más frías y de menor ventilación.

Humedades accidentales

Se deben a roturas o fallos puntuales de las conducciones del propio edificio o de los colindantes, por lo que es la humedad más fácilmente identificable.

El resultado de estas humedades suele ser una mancha circular alrededor del punto de rotura, o alargada, siguiendo el recorrido del conducto afectado.

66 Estudios realizados sobre los mecanismos de permeabilidad en muros de fábrica revelan que la contribución atribuible a la capilaridad sólo es considerable si existen capilares de diámetro inferior a 0,5mm. Por el contrario, la permeabilidad derivada de la presión hidrostática resulta más acusada cuanto mayor sea el diámetro de los canales, en cualquier caso superiores a 0,5mm. (D. Faundez y P. Luna *"Estudio teórico – experimental de las propiedades de los materiales de junta para albañilería"*).

67 Según datos de las compañías de seguros, estas humedades suponen una tercera parte de los procesos patológicos que se presentan en los muros de fábrica.

68 Se define *punto de rocío* como la temperatura a la cual el vapor de agua pasa a estado líquido, en un ambiente con unas condiciones de humedad y presión determinadas. En realidad el fenómeno de condensación en una superficie con aire en reposo, se produce cuando existe una diferencia superior a 2°C entre la temperatura de rocío y la superficie fría.

69 En este factor incide la ocupación del local. La humedad del aire interior aumenta con el número de personas (entre 50 y 80 gramos de vapor de agua por hora y por persona). También las estufas de butano aportan una cantidad de agua al ambiente (del orden de 500 gramos por kilogramo de combustible consumido).

70 Este aspecto y todos los anteriores se analizan cuantitativamente en el apartado de *"Requisito de ahorro de energía"*.

5.2.2 Medidas de prevención contra las humedades

La mejor medida de prevención contra el riesgo de aparición de humedades es intervenir en su punto de origen. Cada tipo de los enunciados anteriormente requiere unas precauciones específicas en el proceso de ejecución, además de un diseño y dimensionado adecuado de los elementos que constituyen o están en contacto con los cerramientos.

Prevención contra las humedades de ejecución

La recomendación fundamental para evitar la aparición de este tipo de humedades es permitir el secado natural de las unidades de obra, sobre todo antes de la aplicación de capas de revestimiento y pinturas que dificultarían este proceso.

El tiempo de secado depende de diferentes factores, como son: el espesor de la fábrica, las condiciones climatológicas (temperatura, humedad y velocidad del viento) y el grado de exposición del elemento a secar (ventilación y aireación).

En general, suele ser suficiente un secado natural y, sólo en circunstancias excepcionales con condiciones climáticas muy adversas, se puede recurrir a secados artificiales mediante calefactores o deshumidificadores.

Una recomendación de carácter general para evitar la aparición de humedades de obra es proteger de los agentes meteorológicos las unidades ejecutadas, con láminas de polietileno o cualquier otro material impermeable.

Además es importante evitar la acumulación de áridos, escombros u otros materiales que puedan tener un contenido en agua más o menos alto, cerca de la unidad de obra ejecutada que, además, impiden la adecuada aireación y secado natural de ésta.

En cualquier caso, una vez terminada la construcción, es inevitable que se haya acumulado en el interior de los muros una gran cantidad de agua. Por ello, es conveniente, una vez cubierto el edificio, mantener durante los tres primeros meses una ventilación constante y, en ningún caso, habitar prematuramente una habitación.

Prevención contra las humedades de fachada

En los cerramientos de fábrica de ladrillo, sobre todo en los de cara vista, resulta imposible impedir totalmente que penetre el agua de lluvia en su interior. Los factores que influyen en la penetración del agua a través de las fachadas son de dos tipos: los que dependen de las características del edificio y los que dependen de las condiciones de exposición.

Entre los factores del primer tipo, son determinantes la dirección de los planos de fachada del edificio y su grado de exposición a la lluvia, sobre todo a la lluvia impulsada por el viento. Influyen también las cualidades impermeables de los materiales, de las juntas y de los elementos constructivos que componen la fachada. Otros factores son los mecanismos de transporte del agua en el interior del cerramiento y la morfología porosa de los materiales que lo constituyen.

En relación con las condiciones de exposición, influyen fundamentalmente la dirección dominante del viento y la lluvia, y la intensidad de la exposición de la fachada, en función de la topografía que rodea el edificio y de su geometría y detalles de encuentro.

Con carácter general, la estanquidad del cerramiento depende primordialmente de una adecuada unión entre el ladrillo y mortero. Una buena parte de las condiciones de estanquidad del cerramiento quedan garantizadas si se ejecutan y rellenan correctamente las juntas, especialmente las verticales, con un mortero de dosificación y plasticidad estudiadas para las condiciones particulares de la obra, y si se respeta la práctica de humedecer las piezas cerámicas antes de su colocación, excepto las de baja succión[71].

Además de las recomendaciones anteriores, que se deben observar en cualquier caso, existen otras medidas adicionales para incrementar las prestaciones de estanquidad de las fachadas, que constituyen prescripciones con distinto nivel de exigencia en función de la agresividad del medio en el que se ubica el edificio.

Los requisitos de estanquidad mínimos exigidos a las fachadas frente a la penetración de las precipitaciones se definen en el DB HS-1, artículo 2.3.1 *"Grado de impermeabilidad",* en función de la *zona pluviométrica* de promedios y del *grado de exposición al viento* correspondientes a la ubicación y altura del edificio. El territorio nacional está dividido en cinco zonas pluviométricas delimitadas en el mapa de la figura 2.4 *"Zonas pluviométricas de promedios en función del índice*

pluviométrico anual" del DB HS 1. Existen tres grados posibles de exposición al viento, en función de la altura del edificio y de la zona eólica y la aspereza o clase del entorno definidos en el Documento Básico: *Seguridad Estructural.*

Según esto, el grado de impermeabilidad mínimo exigido a las fachadas oscila entre uno y cinco. Las condiciones exigidas a cada solución constructiva en función de la existencia o no de revestimiento exterior y del grado de impermeabilidad se explicitan en la tabla 2.7 *"Condiciones de las soluciones de fachada"* del DB HS 1.

Con carácter orientativo indicamos aquí las exigencias que corresponden a las condiciones menos restrictivas (fachadas con revestimiento exterior y grado de impermeabilidad uno o dos) y más restrictivas (fachadas sin revestimiento exterior y grado de impermeabilidad cinco).

En el primer caso sólo se exige que el revestimiento exterior tenga una resistencia media a la filtración[72] y que la hoja principal sea de espesor medio (½ pie de ladrillo cerámico) o de espesor alto (1 pie de ladrillo cerámico) en cerramientos de una sola hoja.

Las condiciones más restrictivas, para fachadas no revestidas y grado de impermeabilidad cinco, se consiguen con un cerramiento de doble hoja, con la hoja principal de espesor medio (½ pie de ladrillo cerámico), y la interposición entre ambas de una barrera de resistencia *muy alta* a la filtración[73].

En situaciones intermedias, por ejemplo en fachadas sin revestimiento *exterior* y grado de impermeabilidad cuatro, la barrera puede ser de resistencia *alta* a la filtración[74]; y para los grados de impermeabilidad dos y tres, basta que la barrera sea de resistencia *media* a la filtración. Estos casos se pueden resolver con cámara de aire sin ventilar pero entonces, y siempre que la fachada carezca de revestimiento exterior, se requiere un revestimiento intermedio en la cara interior de la hoja principal.

Para las fachadas de ladrillo cara vista, los requisitos anteriores suponen que, si no se dispone una cámara de aire ventilada, es imprescindible enfoscar con mortero de cemento el intradós de la hoja exterior o adoptar una solución equivalente. El enfoscado se debe realizar transcurridas al menos 48 horas desde la ejecución del muro, sobre todo si se han empleado ladrillos hidrofugados. Alternativamente, las condiciones de resistencia a la filtración también se pueden conseguir utilizando un material aislante que sea, a su vez, barrera impermeable, es decir, con un reducido coeficiente de absorción.

Además de conseguir el grado de impermeabilidad de la fachada adecuado a las condiciones particulares del edificio, se debe prestar especial atención al proyecto y ejecución de los siguientes puntos singulares, puesto que constituyen las zonas más propensas a la filtración de agua por alguna de las diversas causas indicadas anteriormente.

71 Las piezas de "*baja succión*" son las que tienen un coeficiente de succión menor de 0,05 g/(cm²·min).

72 La resistencia *media* a la filtración se consigue con un revestimiento continuo de espesor comprendido entre 10 y 15 mm o con un revestimiento discontinuo rígido pegado con piezas de lado menor de 30 cm.

73 La resistencia *muy alta* a la filtración se consigue con un revestimiento continuo con estanquidad suficiente para impedir el paso del agua de filtración, o una cámara de aire ventilada y drenada de espesor comprendido entre 3 cm y 10 cm colocada por el lado exterior del aislante, que debe ser no hidrófilo.

74 La resistencia *alta* a la filtración se consigue con un revestimiento discontinuo rígido fijado mecánicamente.

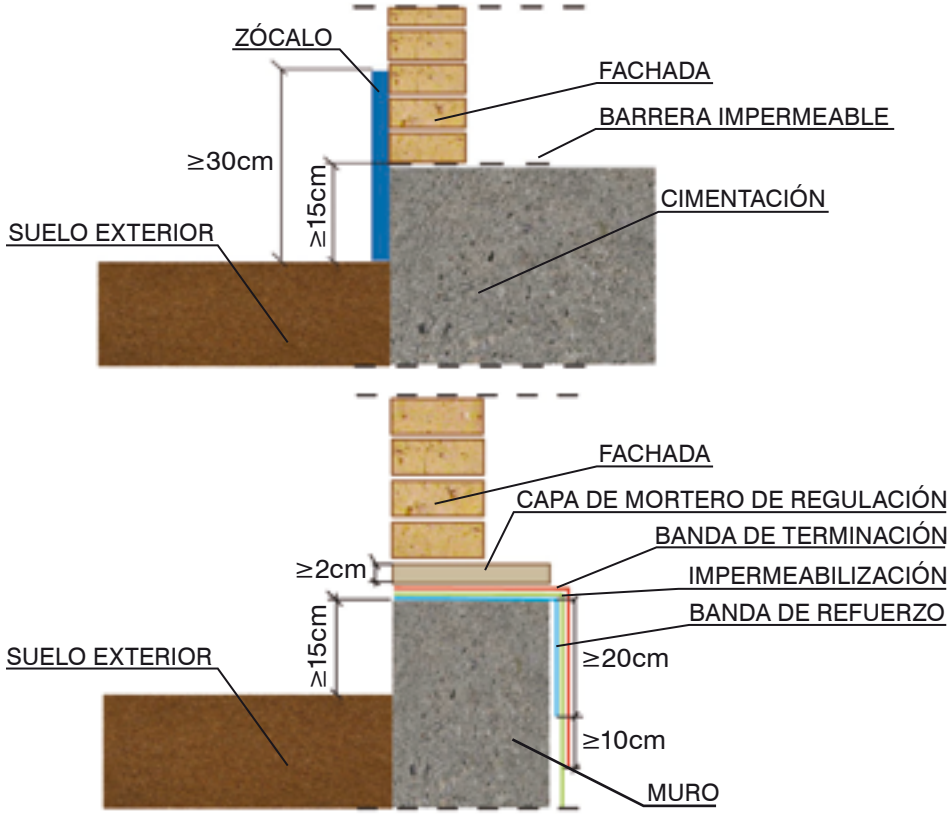
Prevención de humedades en el arranque de la fachada

El arranque de las fachadas constituye un punto crítico que se debe detallar y ejecutar con minuciosidad, ya que la reparación de las lesiones que se pueden producir por humedades en estas zonas es complicada y costosa.

Con carácter general, los procedimientos constructivos del arranque de las fachadas, relacionados con el requisito de estanquidad, tienen el objetivo de impedir la penetración del agua en el edificio por el fenómeno de ascensión capilar. Se fundamentan en la disposición de una barrera impermeable horizontal que cubra todo el espesor del muro en el arranque, situada por encima de la cota del terreno y por debajo de la cota de ascenso capilar del agua.

La barrera debe ser de un material que resista la carga del cerramiento sin que sus propiedades impermeables se vean afectadas. Puede ser una lámina sándwich de polietileno y betún, o una lámina de PVC, introducida en el tendel de la fábrica, entre dos capas de mortero fresco, con la superficie rugosa o granular para mejorar la adherencia. Si la barrera es de tipo bituminoso debe tener un mínimo de 2,7 kg/m^2. Los solapes deben ser generosos (7 cm como mínimo) para mantener su continuidad en toda la superficie.

El ancho de la barrera debe ser ligeramente superior al espesor del muro para asegurar que se impide el ascenso del agua y evitar concentraciones de tensión que desprendan el mortero descascarillando los ladrillos.



Detalles de arranque de fachada

- *Solución de arranque sobre cimentación*

La solución de arranque de la fachada desde la cimentación está descrita en el DB HS 1, artículo 2.3.3.2 *"Arranque de la fachada desde cimentación"*. Consiste en disponer una barrera impermeable que cubra todo el espesor del muro a más de 15 cm por encima del nivel del suelo exterior para evitar el ascenso de agua por capilaridad u otra solución que produzca el mismo efecto.

Cuando la fachada esté constituida por un material poroso, para proteger las partes bajas de posibles salpicaduras se debe disponer un zócalo de un material cuyo coeficiente de absorción sea menor que el 3 %, de más de 30 cm de altura sobre el nivel del suelo exterior que cubra la barrera impermeable dispuesta en el arranque de la fachada, y sellar la unión en su parte superior.

- *Solución de arranque sobre muro de sótano*

Los muros de sótano en contacto con el terreno deben estar provistos de un adecuado drenaje en todo el perímetro de la edificación y de su propia barrera de impermeabilización alojada en el

interior o en el exterior del mismo. En el encuentro con el arranque de la fachada es imprescindible garantizar la continuidad de la barrera y prolongarla en horizontal por debajo de la cota de ascenso capilar. La solución constructiva está descrita en el DB HS 1, artículo 2.1.3.1 *"Encuentros del muro con las fachadas"*.

Cuando el muro se impermeabilice por el interior, en el arranque de la fachada sobre el mismo, el impermeabilizante se debe prolongar sobre el muro en todo su espesor a más de 15 cm por encima del nivel del suelo exterior, sobre una banda de refuerzo del mismo material que la barrera impermeable utilizada que, a su vez, debe prolongarse hacia abajo 20 cm como mínimo, a lo largo del paramento del muro. Sobre la barrera impermeable se debe disponer una capa de mortero de regularización de 2 cm de espesor como mínimo.

En el mismo caso, cuando se impermeabilice con lámina, entre el impermeabilizante y la capa de mortero, se debe disponer una banda de terminación adherida del mismo material que la banda de refuerzo, y se debe prolongar verticalmente a lo largo del paramento del muro hasta 10 cm, como mínimo, por debajo del borde inferior de la banda de refuerzo.

Cuando el muro se impermeabilice por el exterior, en el arranque de la fachada sobre el mismo, el impermeabilizante se debe prolongar más de 15 cm por encima del nivel del suelo exterior, y el remate superior del impermeabilizante se debe realizar mediante alguno de los procedimientos indicados en el apartado siguiente o disponiendo un zócalo similar al indicado en el apartado anterior.

- *Solución de arranque sobre la cubierta*

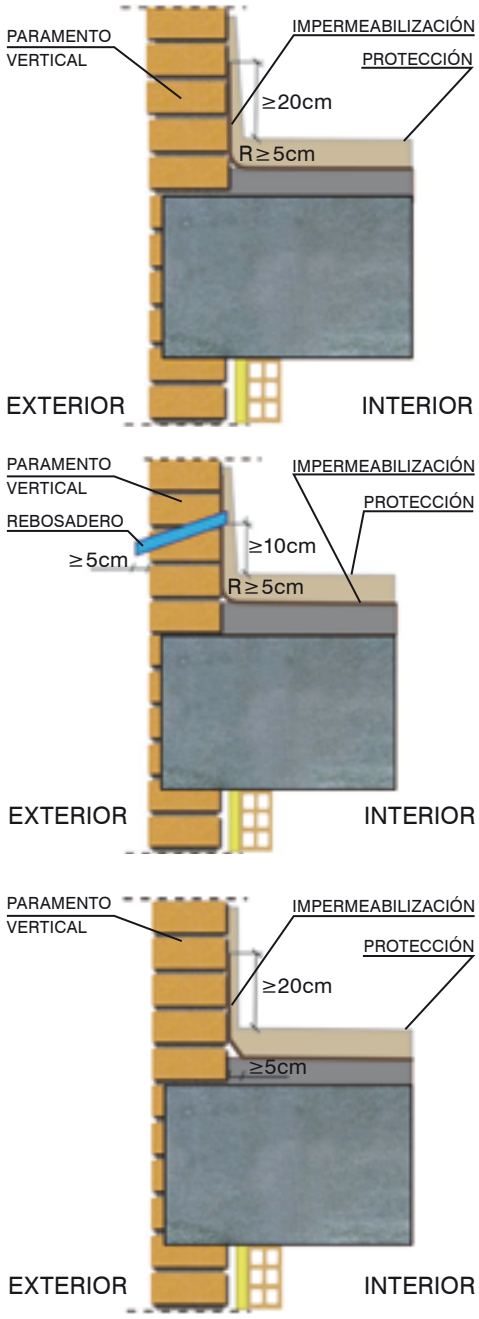
El encuentro del peto con la cubierta requiere un estudio particular en cada caso concreto, puesto que las soluciones son diferentes si se trata de una cubierta plana o inclinada, transitable o no, etc. Las recomendaciones que aquí se indican son generales para todos los casos.

A pesar de los elementos de protección, que se tratarán más adelante, los petos sobre la cubierta se mojan más que el resto de los muros porque están expuestos a la lluvia por ambos lados.

El grado de exposición puede hacer que el aspecto del peto desde el exterior sea diferente al resto del muro. Este efecto se puede reducir si se realiza con doble hoja en lugar de ser macizo. En cualquiera de los dos casos, es recomendable impermeabilizar el peto hacia el lado de la cubierta.

En el encuentro de la fábrica con el último forjado del edificio puede ocurrir que la fachada sea continua, o que se encuentre interrumpida por el vuelo del forjado, cuando éste dispone de un alero. En cualquiera de los dos casos, existe un encuentro de la fábrica hacia el interior de la cubierta. La solución se describe en el DB HS 1, artículo 2.4.4.1.2 *"Encuentro de la cubierta con un paramento vertical"*.

Este encuentro debe estar protegido por varias láminas impermeables, ya que en él los aportes de agua son continuos. Es conveniente que la escuadra formada por el muro y la cubierta se remate con una pieza a 45° o con una amplia media caña, para que no sufra



Detalles de coronación

el material impermeable en el ángulo al pasar del plano vertical al horizontal.

La impermeabilización de la cubierta se debe prolongar por el muro hasta una altura de 20 cm como mínimo por encima de la última capa de protección de la cubierta, para proteger el encuentro en caso de embalsamiento. El encuentro del plano vertical con el horizontal se debe realizar, según el sistema de impermeabilización, redondeado con un radio de curvatura de 5 cm aproximadamente o achaflanado con una medida análoga de chaflán.

Para que el agua de lluvia o la que se deslice por el muro no se filtre por el remate superior de la impermeabilización, dicho remate se debe realizar de alguna de las formas siguientes o de otra cualquiera que produzca el mismo efecto:

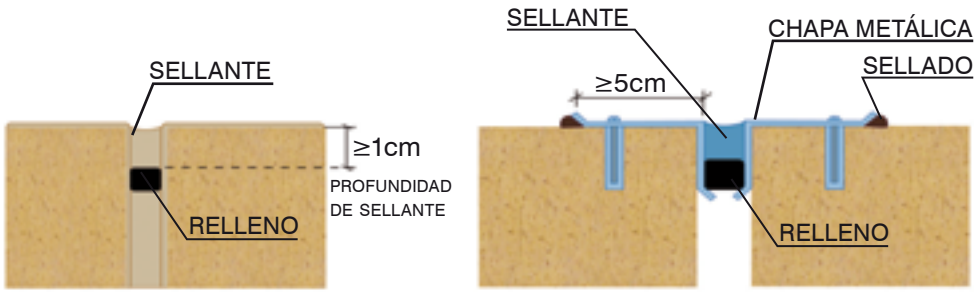
a. Introduciendo el extremo superior de la lámina en una roza de 3 x 3 cm como mínimo practicada en la fábrica. La lámina debe ir recibida con mortero en bisel formando un ángulo de 30º con la horizontal y redondeando la arista del muro.

b. Mediante un retranqueo con profundidad mayor de 5 cm respecto a la superficie extrema del muro y altura mayor de 20 cm respecto a la última capa de protección de la cubierta.

c. Protegiendo la lámina en su parte superior con un perfil metálico inoxidable provisto de una pestaña, que se debe introducir en el tendel de la fábrica y que sirve de base a un cordón de sellado entre le perfil y el muro. Si en la parte inferior no lleva pestaña, la arista debe ser redondeada para evitar que se pueda dañar la lámina.

Otro aspecto importante que se debe tener en cuenta al desarrollar el detalle constructivo, es la dilatación de los materiales que forman la pendiente de la cubierta. Para evitar que la fábrica sufra directamente los empujes de dichos materiales, se debe colocar un elemento elástico que los proteja.

La misma solución descrita sirve para solucionar el arranque de los paños de fachada sobre elementos salientes del forjado, tales como impostas, cornisas o aleros. Además de disponer una membrana impermeable en el encuentro, es importante cuidar que estos salientes estén provistos de goterón y tengan suficiente pendiente hacia el exterior.



Detalles de remate de juntas verticales de movimiento

Prevención de humedades en las juntas de movimiento

Las distancias horizontales máximas entre juntas de movimiento contiguas figuran en el DB SE-F, tabla 2.1 *"Distancia entre juntas de movimiento de fábricas sustentadas"*. Cuando la fábrica es de ladrillo cerámico, las distancias máximas se establecen en función del coeficiente de expansión por humedad de las piezas. Las condiciones para garantizar la estanquidad de las juntas de movimiento figuran en el DB HS 1, artículo 2.3.3.1 *"Juntas de dilatación"*.

La solución constructiva consiste en colocar un sellante sobre un relleno introducido en la junta. Los materiales del sellante y relleno deben tener una elasticidad y una adherencia suficientes para absorber los movimientos de la hoja previstos y deben ser impermeables y resistentes a los agentes atmosféricos.

La profundidad del sellante debe ser de 1 cm como mínimo y la relación entre su espesor y su anchura debe estar comprendida entre 0,5 y 2.

Si las juntas de movimiento se rematan con chapas metálicas, éstas deben cubrir una banda de muro de 5 cm como mínimo a ambos lados de la junta y cada chapa se debe fijar mecánicamente en dicha banda sellando el extremo correspondiente.

Prevención de humedades en el encuentro con las carpinterías de huecos

Los huecos constituyen uno de los puntos débiles del cerramiento, muy propenso a las filtraciones de agua y viento. En ellos se producen encuentros de materiales constructivos diferentes, generalmente poco compatibles en cuanto a sus movimientos y uniones entre sí. Su estanquidad debe estar resuelta tanto en la propia carpintería como en la unión de ésta con la fábrica.

Para que la carpintería cumpla debidamente las funciones de estanquidad debe tener:

- Cierre con doble tope
- Cámara de descompresión
- Recogida de filtraciones
- Vierteaguas en la junta horizontal inferior
- Sellado de ingletes
- Correcta unión con la fábrica

En relación con el último punto, se indican aquí algunas soluciones y recomendaciones que, sin ser las únicas, resuelven o eliminan los problemas de estanquidad.

Es recomendable que la instalación de la carpintería se realice con precerco, para poder absorber fácilmente las tolerancias y las condiciones de compatibilidad con los sistemas de juntas que, en todo caso deben ser aportadas por los fabricantes.

Otro factor importante, que se debe decidir en la fase de proyecto, es la posición del plano de la carpintería en relación con el espesor del cerramiento. Se puede colocar a haces interiores, exteriores o en el medio.

Las soluciones más fáciles de resolver son aquéllas en las que el plano de la carpintería está retranqueado respecto de la línea exterior de la fachada, es decir, a haces interiores o en el medio, debido a que en esta situación se dificulta la posibilidad de que el agua de lluvia se infiltre entre la fachada y el cerco.

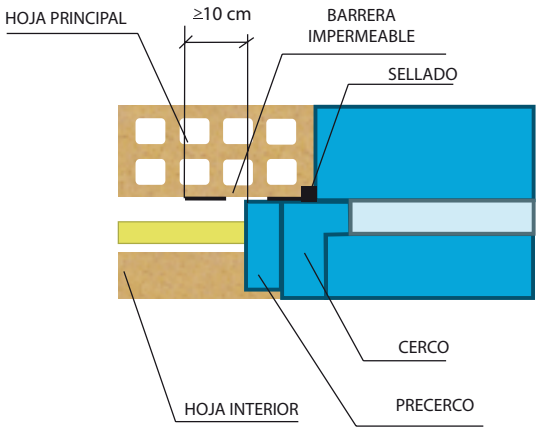
Además, si la mocheta[75] es interna, se puede colocar la carpintería desde el interior. En muros de dos hojas, con la carpintería a haces interiores es fácil obtener la mocheta sin necesidad de cortar las piezas, retranqueando ligeramente la hoja interna.

Cuando la carpintería se coloca a haces exteriores, para configurar la mocheta es preciso cortar las piezas, generando un punto débil en la fachada.

75 La *mocheta* es un rebaje en forma de ángulo entrante que se practica en el perímetro de un hueco con el fin de encajar el cerco y el precerco de la ventana. La función de la mocheta es proteger la junta entre la fábrica y el cerco frente a la lluvia y el viento.

Si se elimina la mocheta es más difícil conseguir una solución estanca y duradera, puesto que se complica el acoplamiento del precerco o cerco en la fábrica y la posibilidad de absorber movimientos diferenciales.

La colocación de los elementos que constituyen el hueco (cerco, carpintería, ventana) y una correcta unión con la fábrica son factores fundamentales para conseguir los requisitos de estanquidad.



Detalle de impermeabilización de la jamba

La colocación de la ventana debe cumplir las exigencias de la norma UNE 85-219-86 *"Ventanas, colocación en obra"*, que recoge, entre otros aspectos, los relativos a resistencia mecánica, compatibilidad de materiales, estanquidad al aire y al agua, comportamiento térmico y acústico, y antivibraciones.

Lo habitual es que la ventana salga del taller totalmente montada, con sus tratamientos de acabado incorporados, de tal forma que la colocación en obra sólo suponga su fijación a la fábrica.

Una instalación adecuada de los componentes de un hueco requiere, en primer lugar, realizar el hueco de acuerdo con las medidas de la ventana proyectada, teniendo en cuenta que las mochetas interiores suelen tener 5 ó 6 cm de ancho, y deben quedar situadas a una distancia de la línea exterior de fachada de ½ pie como mínimo, para no tener que cortar el ladrillo.

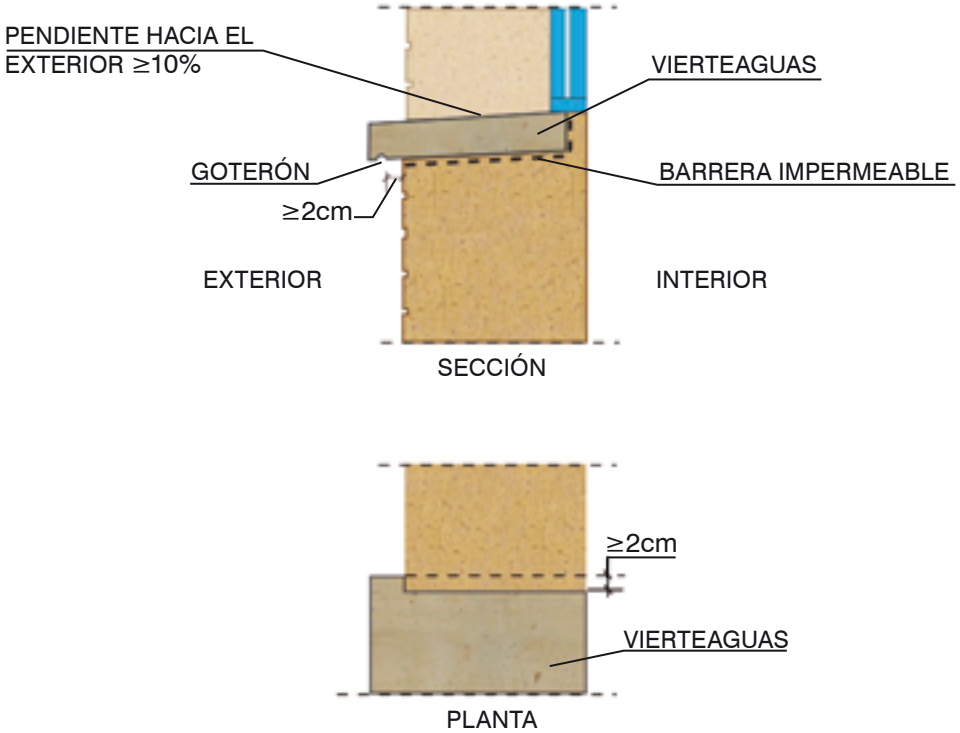
El DB HS 1, en el artículo 2.3.3.6 *"Encuentro de la fachada con la carpintería"*, indica que cuando el grado de impermeabilidad exigido sea cinco, si las carpinterías están retranqueadas respecto del paramento exterior de la fachada, se debe disponer precerco.

El precerco se aloja en la mocheta y se fija a la hoja interior recibiendo las patillas; posteriormente se rellenan las juntas con un material que tenga suficiente elasticidad para absorber las dilataciones diferenciales, logrando una unión no rígida.

A continuación se coloca el cerco sobre el precerco, sujetándolo y sellando la junta entre ambos de manera que sea totalmente estanca. El precerco queda oculto al exterior, apareciendo sólo la junta entre el cerco y la fábrica. Esta junta se debe sellar con un cordón, que puede ser de silicona neutra, introducido en un llagueado practicado en el muro, de forma que quede encajado entre dos bordes paralelos.

La operación de sellado de junta es la que tiene mayor trascendencia en el comportamiento del cerramiento en los aspectos relacionados con la estanquidad. Por ello, es importante destacar los objetivos que se deben conseguir con esta operación.

El material de sellado debe mantener la estanquidad ante los movimientos producidos por las dilataciones térmicas entre el día y la noche, y las solicitaciones mecánicas debidas al viento, vibraciones, movimiento, uso, etc. También debe ser duradero, resistiendo el envejecimiento ante la intemperie y con una adherencia suficiente sobre los elementos constructivos que le sirven de soporte para realizar una junta estanca. El suministrador de la ventana debe indicar la dilatación de la misma para poder dimensionar la junta, conociendo previamente los datos de los materiales con los que está en contacto. Para que el cordón sea efectivo y penetre bien en la junta, debe tener un grueso de 8 mm como mínimo.



Detalle de impermeabilización del vierteaguas

Las superficies sobre las que se aplica el sellante deben estar limpias y libres de cualquier material que obstaculice la adhesión, garantizando una unión elástica en diferentes condiciones de temperatura, y consiguiendo una barrera efectiva al paso del agua, aire y polvo. No son recomendables los sellados con masillas, puesto que tienden a endurecerse y perder elasticidad a lo largo del tiempo. Es preferible utilizar silicona neutra.

Los cordones de sellado deben ser revisados periódicamente para comprobar que continúan siendo efectivos y, en caso de no serlo, sustituirlos.

Las jambas deben llevar una barrera impermeable entre la hoja principal y el precerco o, en su caso, el cerco, de manera que no exista transmisión de humedad entre la hoja exterior y la interior. La barrera impermeable nunca debe ser atravesada por elementos de fijación y se debe prolongar dentro de la cámara de aire 10 cm sobre la hoja exterior, hacia el interior del muro.

Si el hueco tiene caja de persiana también es preciso impermeabilizar este punto, sobre todo cuando la caja tiene conexión directa con la cámara de aire. Para ello, se debe colocar una lámina impermeable desde el forjado hasta el final del dintel, protegiendo la caja de persiana, para desviar las posibles filtraciones de agua hacia el exterior de la cámara. Además, la propia caja debe ser resistente a la humedad, y su unión con la fábrica debe ser estanca. El dintel tiene que ir provisto de goterón para evitar que el agua de lluvia discurra por la parte interior del dintel hacia la carpintería.

Otro punto débil de los elementos del hueco, desde el punto de vista de la estanquidad, lo constituye el alféizar. La conexión de la carpintería con el alféizar es propensa a acumular defectos funcionales debidos al diferente coeficiente de dilatación de los materiales que la componen y a su situación expuesta, que contribuyen a la aparición de fisuras con las consiguientes filtraciones de agua.

El alféizar cumple su función cuando el agua es evacuada rápidamente sin obstáculos que lo impidan. El diseño y la unión del alféizar con el cerco y las jambas son muy importantes para esta función, siendo necesarias medidas adicionales, además del sellado, para conseguir la estanquidad en estos puntos. Algunas de estas medidas se indican a continuación.

El encuentro del alféizar con el cerco se debe resolver solapando la unión. Es recomendable que el cerco esté provisto de su propio vierteaguas que aleje el agua de dicho punto.

Cuando la carpintería esté retranqueada respecto del paramento exterior de la fachada, se debe rematar el alféizar con un vierteaguas para evacuar hacia el exterior el agua de lluvia que llegue a él y evitar que alcance la parte de la fachada inferior al mismo. Debe contar con rebordes laterales suficientemente altos y con huida hacia los bordes.

El vierteaguas debe tener una pendiente hacia el exterior de 10º como mínimo, debe ser impermeable o disponerse sobre una barrera impermeable fijada al cerco o al muro, que se prolongue por la parte trasera y por ambos lados del vierteaguas y que tenga una pendiente hacia el exterior de 10º como mínimo. Debe penetrar en las jambas, con una entrega lateral de 2 cm como mínimo. Se debe renunciar a las juntas a tope en estos puntos.

El agua recogida en el vierteaguas tiende a discurrir por la fachada, ya que la tensión superficial hace que se adhiera a la superficie y no se desprenda hasta descargar por gravedad. Para evitar la escorrentía de agua sobre la fachada, el vierteaguas debe tener suficiente vuelo y debe ir provisto de un goterón en la cara inferior del saliente, separado del paramento exterior de la fachada al menos 2 cm.

Si el vierteaguas está constituido por más de una pieza, las juntas deben ser estancas y reproducir la forma del goterón para no crear a través de ellas un puente hacia la fachada.

Las medidas de prevención de humedades en los huecos indicadas anteriormente deben complementarse con un dimensionado adecuado de los elementos de desagüe, sobre todo en terrazas, jardineras y balcones.

Otro punto a tener en cuenta es la colocación de los radiadores. Cuando éstos se empotran en el muro, bajo los huecos de ventana, y la sección del muro se reduce quedando sólo el ½ pie exterior, es necesario aplicar un material impermeable a la cara interna del cerramiento para no penalizar la estanquidad.

En esta situación, es posible que aparezcan fisuras al exterior que parten de las aristas del hueco, originadas por las dilataciones térmicas. Con huecos muy grandes puede ser necesario disponer juntas verticales de movimiento en el antepecho.

Prevención de humedades en los elementos de coronación

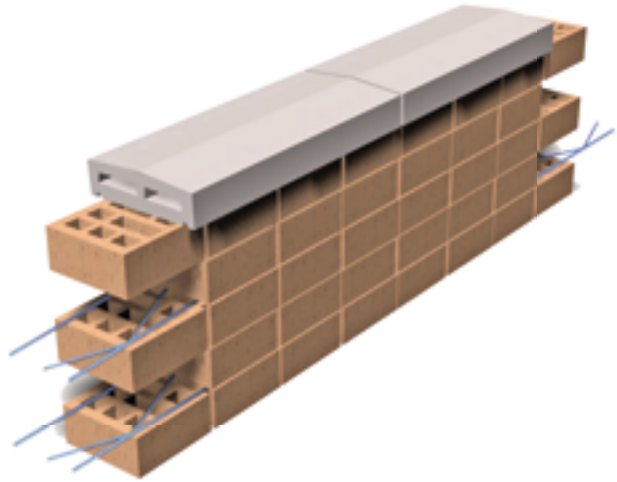
Los petos y, en general, todos los muros en su coronación, deben contar con los elementos de protección necesarios para evitar el aporte excesivo de agua sobre la fachada.

Los elementos de remate de los muros generalmente son albardillas. Pueden ser de diferentes materiales, siendo las albardillas metálicas las que requieren mayor atención, sobre todo si tienen una longitud importante, por problemas de dilatación térmica. Si el material que constituye la albardilla no es impermeable, se debe disponer sobre una barrera impermeable que tenga una pendiente hacia el exterior de 10º como mínimo. El material impermeable debe sobresalir hacia ambos lados del muro, garantizando de esta manera que no se producen filtraciones de agua a través del mortero.

Las prescripciones de diseño de las albardillas para garantizar unas adecuadas condiciones de estanquidad están descritas en el DB HS 1, artículo 2.3.3.7 *"Antepechos y remates superiores de las fachadas"*.

En cualquier caso es fundamental que tengan un vuelo de 4 cm como mínimo, a ambos lados del muro, provisto de los respectivos goterones en la cara inferior de los salientes hacia los que discurre el agua, separados de los paramentos correspondientes del antepecho al menos 2 cm.

Su diseño debe permitir una rápida evacuación del agua evitando zonas de embalse. A este efecto deben tener una inclinación de 10º como mínimo y es recomendable incluir algún sistema de drenaje para la junta que se produce entre las piezas.



Peto con albardilla

Si los elementos de remate son piezas de fábrica, se deben recibir con mortero hidrófugo M5, cuidando que las piezas que los constituyen estén perfectamente alineadas unas con otras, y respetando siempre las juntas de movimiento previstas en la fachada. Se deben disponer juntas de dilatación cada dos piezas cuando sean de piedra o prefabricas y cada 2,00 m cuando sean de material cerámico.

Al ser elementos de protección discontinuos, al agua puede filtrarse a través de las uniones, por este motivo se deben sellar las juntas o disponer una lámina impermeable con un acabado rugoso o granular, recibida con mortero, y situada entre la albardilla y la fábrica, sin que la estabilidad de la albardilla se vea perjudicada.

Una práctica habitual consiste en ejecutar la albardilla con ladrillos colocados a sardinel. En este caso, los ladrillos se deben recibir con mortero hidrófugo y junta enrasada, colocándose con la inclinación necesaria para evitar que el agua pueda quedar embalsada.

Prevención contra las humedades de capilaridad

Las medidas más eficaces para evitar los problemas de capilaridad son medidas encaminadas a impedir que el agua procedente del terreno o del exterior llegue a los paramentos. Una buena medida para alejar el agua del subsuelo de las cimentaciones es realizar zanjas de drenaje y pozos absorbentes.

En la fase de ejecución de la fachada los principales puntos singulares en los que hay que extremar las pre-

cauciones por este concepto son las zonas de encuentro del arranque con otros elementos constructivos. Las soluciones de encuentro ya se han analizado en apartados anteriores.

Además de estos puntos singulares, se recomienda específicamente la incorporación de barreras impermeables (de caucho, butilo o polipropileno) en las situaciones que se indican a continuación, que constituyen otros puntos críticos del edificio desde el punto de vista del riesgo de aparición de humedades:

- Bajo el nivel del zuncho perimetral del forjado de planta baja, si éste está apoyado sobre muros de fábrica.

- Sobre la cara superior del zuncho perimetral del forjado de planta baja, si éste es solidario con un muro de hormigón.

- Por encima del nivel de la cara superior de la solera, en el caso de no existir forjado de planta baja.

- En los antepechos, bajo el vierteaguas, sobre todo si éste está constituido por varias piezas con juntas entre ellas.

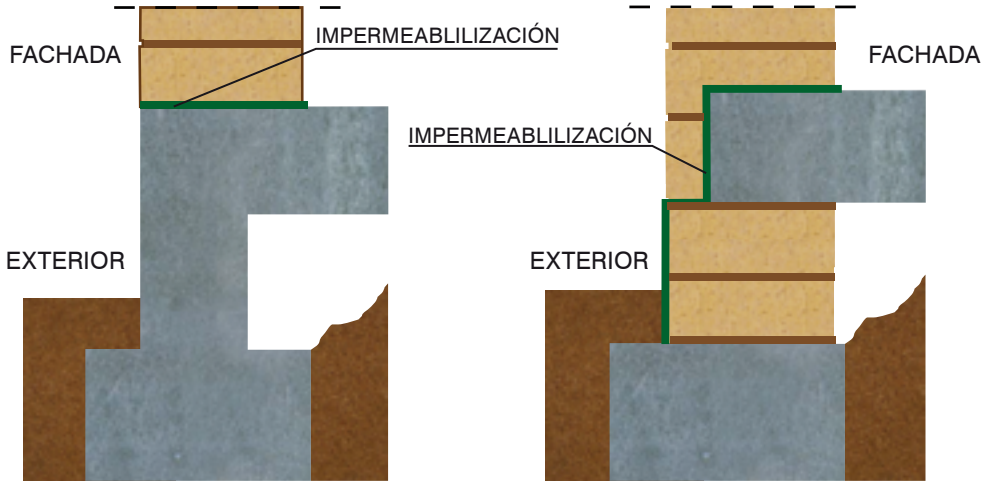
- En encuentros de los elementos de cubierta con la fábrica (chimeneas, hastiales, etc.).

En las situaciones de alto riesgo, por estar muy alta la capa freática, se puede recurrir a la utilización de un mortero *macroporoso* que sea transpirable y tenga propiedades de retención al paso del agua.

El tratamiento posterior, una vez que las humedades se han manifestado, es complicado. Un procedimiento para conseguir el bloqueo del fenómeno de capilaridad y eliminar los problemas del agua que penetra desde el terreno consiste en la inyección de resinas en la base del edificio. Otra solución más sofisticada es la denominada *electro-ósmosis*, que consiste en un dispositivo electrónico que invierte la polaridad existente entre el suelo y el muro, y hace que el agua descienda a través de éste al subsuelo, eliminando la humedad.

Prevención contra las humedades de condensación

Los procedimientos para evitar la aparición de humedades por condensación requieren un estudio de los gradientes de temperatura, en función de los materiales a emplear en un cerramiento y de las condiciones ambientales interiores y exteriores más extremas. Las medidas de prevención de este tipo de humedades se refieren en mayor medida a la fase de proyecto de los elementos que constituyen el cerramiento, sobre todo a una adecuado diseño y cálculo de los sistemas de calefacción y ventilación del edificio.



Barreras de capilaridad

Es importante disminuir el gradiente de temperatura entre el interior y el exterior, y reducir en lo posible la humedad relativa del aire interior. Esto se consigue ventilando las estancias, al renovar el aire interior con aire exterior, que tiene menor contenido en vapor de agua.

Además es fundamental la precaución de evitar los puentes térmicos y procurar que el dimensionado del espesor del material aislante no sea deficitario. El procedimiento para realizar un estudio detallado del comportamiento higrotérmico del cerramiento está descrito en el apartado *"Requisito de ahorro de energía"*.

La colocación adecuada de la barrera de vapor, cuando ésta es necesaria en la cámara, juega un papel fundamental en la prevención de riesgos de humedades por condensación. Para conseguir un gradiente térmico idóneo del cerramiento, la posición idónea de la barrera de vapor es en el plano más caliente del aislamiento.

Otra medida de prevención consiste en proteger con coquillas las tuberías que vayan a estar embutidas en la hoja interior del cerramiento, puesto que por tener menor temperatura, son elementos muy propensos a inducir condensaciones en su superficie.

Prevención contra las humedades accidentales

Para evitar que se produzcan daños en el edificio por humedad con origen en la rotura accidental de conductos, las medidas a adoptar están orientadas a la prevención de riesgos.

En el caso de recibir tuberías de agua o calefacción en el interior de los muros de fábrica, se deben colocar envueltas en coquillas aislantes, para evitar su rotura por exceso de presión en los conductos o por las acciones mecánicas transmitidas por el propio muro. Además, las tuberías deben estar protegidas por un adecuado aislamiento térmico que evite la condensación superficial, impidiendo el proceso de corrosión.

Un adecuado mantenimiento de las cubiertas, bajantes y redes de evacuación e instalaciones de agua y calefacción, es primordial para evitar atascos u obstrucciones que deriven en roturas de los conductos.

Especificación del mortero según los requisitos del DB SH 1

El DB HS 1 indica explícitamente los requisitos mínimos de cada uno de los materiales constitutivos de los cerramientos de fachada para el cumplimiento de la exigencia básica de protección contra la humedad, en función del grado de impermeabilidad que se exige al elemento. Así, en el artículo 1.2 *"Procedimiento de verificación"* indica que las características constructivas de las fachadas deben corresponder con las especificadas en el apartado 2.3.2 según el grado de impermeabilidad exigido en el apartado 2.3.1.

En el caso particular de los cerramientos de ladrillo cara vista la mayoría de los requisitos tienen una estrecha relación con las características del mortero utilizado, bien en las juntas de la fábrica o bien en el revestimiento de la cámara de aire. A continuación se resumen estos requisitos indicando el nombre con el que se designa el material en el DB HS 1 y su correspondencia con la pertinente norma europea UNE-EN, el texto literal relativo a las diferentes prestaciones a evaluar en la fachada, y la clase de mortero recomendada según la designación y características conforme a las normas UNE-EN.

5.2.3 Solución de fachada con cámara ventilada

Desde el punto de vista de la estanquidad, la solución de interponer una cámara de aire ventilada entre las dos hojas del cerramiento tiene como principal objetivo prevenir el riesgo de humedades por condensación intersticial. Si la cámara es estanca, la posible filtración de agua a través del muro también se evapora por el intradós de la hoja exterior, y puede llegar a saturar el aire de la cámara; al sobrepasar la presión de saturación, el agua se condensa y puede llegar a escurrir por el intradós de la hoja exterior. La disipación de la humedad por ventilación de la cámara previene el riesgo de saturación del aire.

La ventilación se puede conseguir fácilmente dejando llagas sin rellenar en la base y coronación de la hoja exterior. Es suficiente dejar una llaga sin rellenar cada 1,00 m de longitud de fachada.

Tanto en el arranque de la fachada como en las situaciones en las que la cámara de aire quede interrumpida por un forjado o por un dintel, se debe disponer un sistema de drenaje para la recogida y evacuación hacia el exterior del agua filtrada o condensada en la cámara, para evitar que se pueda acumular en la base y penetre a través del forjado hacia el interior del edificio.

Tabla 5.1. Condiciones de los componentes de la fachada según DB HS 1

REVESTIMIENTOS CONTINUOS: ENFOSCADOS			
Condiciones de las fachadas		Prestación según DB HS 1	Morteros de revoco y enlucido Norma UNE-EN 998-1
	N	**Resistencia a la filtración del revestimiento intermedio en la cara interior de la hoja principal**	**Designación del mortero**
Revestimiento intermedio	**N1**	Se debe utilizar al menos un revestimiento de resistencia media a la filtración. Se considera como tal un enfoscado de mortero con un espesor mínimo de 10 mm.	**CS III W1** ó **CS IV W1** Resistencia a compresión: CS III (3,5 - 7,5 N/mm²) CS IV (≥ 6 N/mm²) Absorción de agua por capilaridad: W1 (c ≤ 0,40 kg / (m²•min^{0,5}))
	N2	Se debe utilizar un revestimiento de resistencia alta a la filtración. Se considera como tal un enfoscado de mortero con aditivos hidrofugantes con un espesor mínimo de 15 mm o un material adherido, continuo, sin juntas e impermeable al agua del mismo espesor.	**CS III W2** ó **CS IV W2** Resistencia a compresión: CS III (3,5 - 7,5 N/mm²) CS IV (≥ 6 N/mm²) Absorción de agua por capilaridad: W2 (c ≤ 0,20 kg / (m²•min^{0,5}))

MORTEROS DE JUNTAS			
Condiciones de las fachadas		Prestación según DB HS 1	Morteros de albañilería Norma UNE-EN 998-2
	C	**Composición de la hoja principal**	**Designación del mortero**
Juntas de fábrica revestida	**C1**	Se debe utilizar al menos una hoja principal de espesor medio. Se considera como tal una fábrica cogida con mortero de: ▪ ½ pie de ladrillo cerámico, que debe ser perforado o macizo cuando no exista revestimiento exterior o cuando exista un revestimiento exterior discontinuo o un aislante exterior fijados mecánicamente. ▪ 12 cm de bloque cerámico, bloque de hormigón o piedra natural.	**M 5** ó **M 7,5** M: resistencia a compresión (N/mm²)
	C2	Se debe utilizar una hoja principal de espesor alto. Se considera como tal una fábrica cogida con mortero de: ▪ 1 pie de ladrillo cerámico, que debe ser perforado o macizo cuando no exista revestimiento exterior o cuando exista un revestimiento exterior discontinuo o un aislante exterior fijados mecánicamente. ▪ 24 cm de bloque cerámico, bloque de hormigón o piedra natural.	**M 5** ó **M 7,5** M: resistencia a compresión (N/mm²)

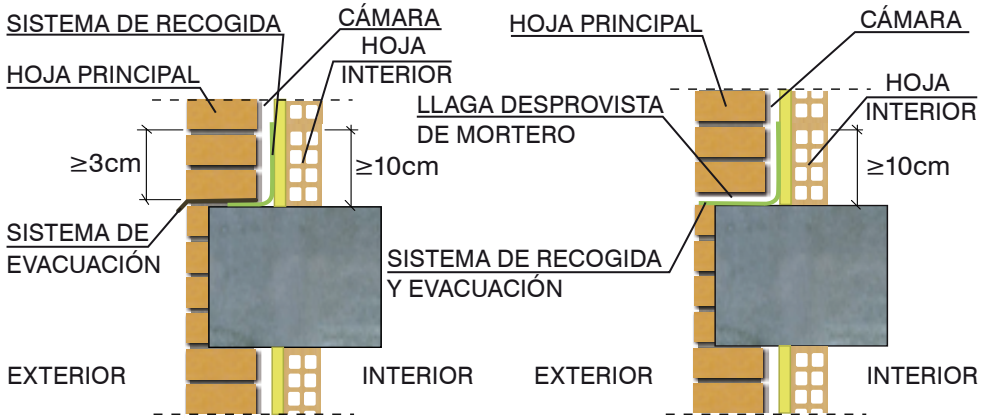
	J	Resistencia a la filtración de las juntas entre las piezas que componen la hoja principal	Designación del mortero
Juntas de fábrica vista	J1	Las juntas deben ser al menos de resistencia media a la filtración. Se consideran como tales las juntas de mortero sin interrupción excepto, en el caso de las juntas de los bloques de hormigón, que se interrumpen en la parte intermedia de la hoja.	**M 5 ó M 7,5** c ≤ 0,40 kg / (m^2•$min^{0,5}$) M: resistencia a compresión (N/mm^2) Absorción de agua por capilaridad (UNE-EN 998-1): W1 (c ≤ 0,40 kg / (m^2•$min^{0,5}$))
	J2	Las juntas deben ser de resistencia alta a la filtración. Se consideran como tales las juntas de mortero con adición de un producto hidrófugo, de las siguientes características: ▪ sin interrupción excepto, en el caso de las juntas de los bloques de hormigón, que se interrumpan en la parte intermedia de la hoja. ▪ juntas horizontales llagueadas o de pico de flauta. ▪ cuando el sistema constructivo así lo permita con un rejuntado de un mortero más rico.	**M 5 ó M 7,5** c ≤ 0,20 kg / (m^2•$min^{0,5}$) M: resistencia a compresión (N/mm^2) Absorción de agua por capilaridad (UNE-EN 998-1): W2 (c ≤ 0,20 kg / (m^2•$min^{0,5}$))

*Fuente: *"Boletín de Fachadas"*. Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero

La solución de este punto singular está descrita en el DB HS 1, artículo 2.3.3.5. *"Encuentro de la cámara de aire ventilada con los forjados y los dinteles"*.

Como sistema de recogida de agua se debe utilizar un elemento continuo (lámina o perfil especial) dispuesto a lo largo del fondo de la cámara, con inclinación hacia el exterior, de tal forma que su borde superior esté situado como mínimo a 10 cm del fondo y al menos 3 cm por encima del punto más alto del sistema de evacuación. Si se dispone una lámina, ésta se debe introducir en la hoja interior en todo su espesor.

Para la evacuación se puede dispone un conjunto de tubos de material estanco que conduzcan el agua al exterior, separados 1,50 m como máximo; o pueden servir las propias llagas de ventilación de la primera hilada desprovistas de mortero, a lo largo de las cuales se prolonga hasta el exterior el elemento de recogida dispuesto en el fondo de la cámara.



Detalle de ventilación y drenaje de fachada

5.3 Requisito de ahorro de energía

Desde hace más de un siglo el desarrollo económico de los países más avanzados se ha basado en la disposición de fuentes de energía abundantes y baratas proporcionadas por los combustibles fósiles.

La crisis energética mundial, iniciada por la *crisis de petróleo* de 1973 y alimentada por la creciente demanda de los últimos 50 años, ha obligado a un replanteo profundo de todos los sectores con objeto de racionalizar el consumo de la energía. Además del temor por el agotamiento de los combustibles, coincide la creciente sensibilidad por la incidencia en el medio ambiente que acarrea su combustión, en particular por la emisión de gases contaminantes que conlleva un aumento del *efecto invernadero* sobre la superficie terrestre, y el consiguiente *calentamiento global* del planeta.

La creciente preocupación por las consecuencias ambientales, sociales y económicas del cambio climático quedó reflejada en los compromisos derivados de los acuerdos alcanzados en Kyoto. El *Protocolo de Kyoto* sobre el *Cambio Climático* compromete a las naciones que lo ratificaron a conseguir una reducción del 5% de sus emisiones de gases de efecto invernadero en el período comprendido entre 2008 y 2012, respecto a las existentes en el año 1990. El hecho de que la producción y el consumo de energía son los principales responsables de las emisiones de gases con efecto invernadero, hacen que el sector energético sea clave para alcanzar estos objetivos. Los principales instrumentos para conseguirlo son la eficiencia energética y el desarrollo de energías renovables.

En lo que respecta a nuestro continente, el uso racional de la energía es una de las cuatro prioridades del *Plan de Acción para el Medio Ambiente*, puesto en marcha en enero del año 2001 por la Unión Europea para el período 2001-2010.

El consumo medio del sector de la edificación en la Unión Europea representa en torno al 40% de la energía final. Por esta razón es obvio que el fomento de la eficiencia energética es uno de los principales instrumentos para restablecer la proporción de gases de efecto invernadero a un nivel compatible con el equilibrio medioambiental deseable para el planeta y constituye, por tanto, una parte importante del conjunto de políticas y medidas necesarias para cumplir lo dispuesto en el protocolo de Kyoto.

Las actuaciones para la mejora de la eficiencia energética en el sector residencial se basan tanto en la mejora del equipamiento de los electrodomésticos como en las mejoras de la propia edificación, que se pueden clasificar en tres grandes grupos: mejoras en la envolvente del edificio, mayor rendimiento de las instalaciones de calefacción y aire acondicionado, y mayor rendimiento de los equipos de iluminación.

La calefacción es el uso que absorbe un mayor porcentaje de los consumos de energía de una vivienda, en torno al 40 %, mientras que el agua caliente representa alrededor del 20 % del total. Los consumos de calefacción vienen registrando un aumento significativo y representan un porcentaje creciente del total de consumos del sector. Por ello, una medida fundamental para reducir el consumo es mejorar el rendimiento de las instalaciones de calefacción con una buena regulación y puesta a punto de los quemadores.

En cuanto a las fuentes de energía utilizadas en el sector de la edificación, la electricidad es la más consumida actualmente, además se prevé que siga aumentando en los próximos años. El gas natural es otra fuente que también se espera que experimente un fuerte crecimiento en un futuro próximo.

El fomento del ahorro energético a través de medidas pasivas y activas, la búsqueda de nuevas fuentes alternativas y la promoción del uso de fuentes de energía renovable ha producido resultados dignos de mención. Una vivienda construida hoy en día consume la mitad de energía que una vivienda realizada a principios de los años sesenta.

Aun así, la calefacción y la producción de agua caliente representan hoy una cuarta parte de la energía consumida en Europa y contribuyen en igual medida a la producción de emisiones CO_2. Estudios realizados en Estados Unidos en el año 1973 sobre el problema energético, ya arrojaban cifras similares; estos estudios demostraron que el 25% del consumo total de energía, en sus diversas formas, se utilizaba para la climatización de los edificios. Los mismos estudios consideraban factible reducir el consumo por este concepto en un 50%, consiguiendo unas condiciones interiores adecuadas para las viviendas, sin afectar a la calidad de las condiciones de confort para los usuarios.

En los edificios conviene integrar los aspectos energéticos y medioambientales durante su diseño y construcción, ya que ello condiciona el consumo energético durante muchas décadas. Sin embargo el establecimiento de requisitos mínimos de eficiencia energética en edificios nuevos (o en la existente cuando sean objeto de reformas importantes) afecta todavía a un reducido porcentaje del parque de viviendas y edificios no residenciales, por lo que se traduce en unos ahorros de energía relativamente reducidos en relación con el total de los consumos del sector. Es de esperar que la aplicación del nuevo C.T.E., del nuevo RITE y de la Certificación Energética de Edificios suponga ahorros significativos en nuestro país.

5.3.1 Valores de diseño que definen las prestaciones energéticas

Los agentes climáticos tales como la lluvia, la radiación solar, la temperatura del aire, etc, antes de afectar a las condiciones interiores de un edificio, se ven modificados por la envolvente del mismo. Un adecuado diseño, desde el punto de vista térmico, de los cerramientos, contribuye a conseguir un microclima que asegura las condiciones de confort, con ventajas económicas en cuanto al consumo de la energía necesaria para alcanzar las situaciones aconsejables.

Principios bioclimáticos

Los principios bioclimáticos fueron utilizados tras la primera crisis del petróleo. Se emplearon esencialmente en la vivienda unifamiliar, y basan su efectividad en la elección de la forma del edificio, en su implantación, en la disposición de los espacios y en la orientación según las características del lugar: clima, vientos dominantes, calidad del suelo, topografía, radiación solar e iluminación.

Entre los años sesenta y ochenta despuntó una primera generación de casas bioclimáticas construidas con estructura de madera, en Francia y otros países de Europa. Actualmente, el diseño se orienta al aprovechamiento de los aportes solares gratuitos, gracias a superficies vidriadas de altas prestaciones en función de la orientación, a un aumento del aislamiento de muros y cubiertas y al aprovechamiento de la inercia térmica que proporcionan los elementos macizos de obra de fábrica, actuando como acumuladores de calor.

Principios bioclimáticos relativos a la optimización de la radiación solar

El hecho de valorar la energía pasiva aumenta la autonomía del edificio y disminuye el consumo de energía sin sobrecostes significativos. Para limitar las circulaciones y la superficie de fachada, origen de pérdidas de calor, los volúmenes deben ser compactos. En los edificios colectivos, la reducción de la superficie de contacto exterior permite disminuir las necesidades energéticas hasta un 40% respecto a una casa unifamiliar[76].

Para aprovechar el potencial que ofrece el sol en invierno, en primavera y en otoño, es necesario dimensionar los huecos con vidrios aislantes en función de la energía solar proporcionada según la orientación. La fachada norte, opaca, concentra acceso y locales de servicio, mientras que la cara sur de una construcción bioclimática se hace permeable.

Un criterio bioclimático de diseño de fachadas supone concentrar la superficie de huecos en la fachada sur (con proporciones entre el 40% y el 60% de la superficie), y reducirlos en la fachada norte (con proporciones entre el 10% y el 15%) y en las fachadas este y oeste (con proporciones inferiores al 20%).

Principios bioclimáticos relativos a la estanquidad al aire

Cuando el aire se infiltra a través de los cerramientos provoca corrientes incómodas y perjudiciales para el rendimiento energético. La estanquidad al aire de la envolvente permite, por el contrario, reducir el consumo de calefacción y prevenir los daños originados por la humedad.

La continuidad de la estanquidad al aire debe ser estudiada desde el proyecto, en especial en las uniones entre los elementos, los marcos de las ventanas y puertas y las perforaciones (conductos de las chimeneas y canalizaciones).

Existen en el mercado distintas soluciones, como por ejemplo las barreras en bandas o en hojas de celulosa natural y reciclada, colas de estanquidad al aire de látex natural o cintas adhesivas universales.

Principios bioclimáticos relativos a los vidrios

Para optimizar la envolvente del edificio es importante seleccionar la carpintería adecuada. El aumento de las exigencias térmicas ha hecho que se desarrollen un tipo de ventanas con vidrios que poseen una gran transparen-

cia, un buen coeficiente de transmisión superficial y un factor solar suficiente para limitar los aportes energéticos.

El vidrio de alta transmisión y baja emisividad limita los intercambios térmicos entre el interior y el exterior y permite un ahorro de energía considerable, mejora las prestaciones térmicas en invierno y reduce el efecto invernadero en verano, primavera y otoño[77].

Solución de fachada de doble epidermis

La denominación de *fachada de doble epidermis* engloba soluciones constructivas de cerramientos con altas prestaciones higrotérmicas, que van desde la interposición de una cámara con ventilación y drenaje entre las dos hojas que constituyen el cerramiento, hasta soluciones más avanzadas, como muro *trombe*, muro *parietodinámico* o *invernadero adosado*, que incorporan en la fachada sur de los edificios un vidrio que actúa como captador solar pasivo. Estas últimas soluciones se están extendiendo por varios países europeos, aunque su aplicación está restringida prácticamente al sector terciario.

En las soluciones de fachada ventilada, según la altura del edificio y el procedimiento adoptado en el encuentro con los forjados, la cámara de aire puede recorrer la fachada completa o estar dividida en cada piso. La cámara de aire ventilada ofrece un buen aislamiento térmico y permite importantes ahorros en las instalaciones de calefacción y climatización del aire. Combina un máximo confort térmico y visual puesto que protege contra el recalentamiento de las superficies en verano, elimina el efecto de pared fría en invierno, y reduce los reflejos, el vaho y las corrientes de aire.

En las soluciones de *muro trombe*, también llamado *muro solar ventilado* se utiliza la radiación solar que incide sobre el cerramiento para el calentamiento por recirculación del aire interior del edificio. Generalmente está formado por una hoja interior de fábrica, una cámara de aire y un acristalamiento exterior.

El *muro parietodinámico* aprovecha la energía solar que incide sobre el cerramiento para el precalentamiento del aire exterior. También está formado por una hoja interior de fábrica, una cámara de aire y una hoja exterior acristalada o metálica que absorbe la radiación solar. En ambas soluciones la circulación del aire puede ser natural (termosifón) o forzada.

El *invernadero adosado* es un recinto no acondicionado formado por un cerramiento exterior con un porcentaje alto de superficie acristalada que se coloca adyacente a las fachadas del edificio, pudiendo tener también acristalamiento el elemento de fachada que separa el invernadero del espacio interior. Dentro de esta definición se incluyen las galerías y los balcones acristalados. Generalmente se incorpora un sistema de ventilación forzada para que pueda existir una circulación de aire a través de este recinto, bien en forma de recirculación del aire interior o de precalentamiento del aire exterior que se usa para ventilación.

76 Esto supone que la vivienda colectiva tiene una prima sobre la vivienda unifamiliar a la hora de conseguir una calificación más alta de eficiencia energética.

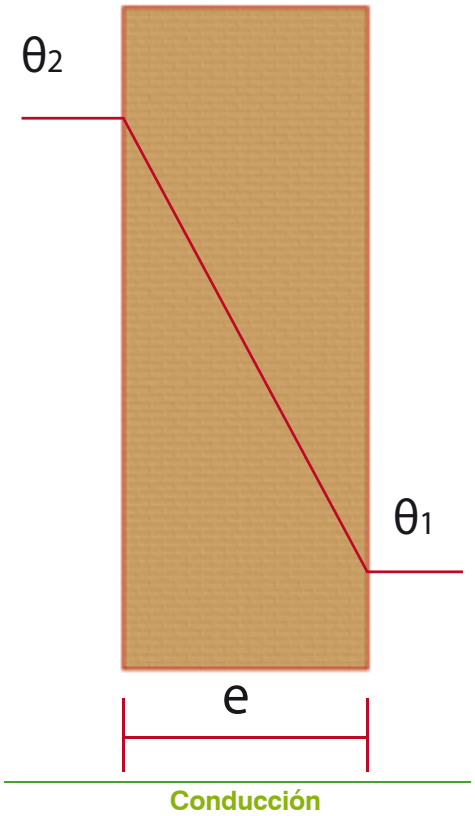
77 En el CSTB se evaluó que, en el año 2000 el sobrecoste de la inversión en estos nuevos vidrios era rentabilizado a largo plazo, ya que una caída de las pérdidas térmicas de 1 W / (m^2·K) garantiza un ahorro en calefacción de alrededor de 7,6 euros por m^2 de superficie vidriada al año.

Inevernadero adosado

5.3.2 Conceptos básicos sobre la transmisión del calor y del vapor de agua

La transmisión de calor es la transferencia de energía térmica de un cuerpo a otro en virtud de una diferencia de temperatura existente entre ellos. La transmisión de vapor de agua es un fenómeno parecido que se produce cuando entre dos puntos existe una diferencia entre las presiones de vapor y que tiende a igualarlas.

El calor se transmite de tres maneras distintas: por conducción, por radiación y por convección. El vapor de agua de transmite por difusión.



Transmisión del calor por conducción

La transmisión por conducción tiene lugar en un cuerpo determinado, desde la zona de mayor a la de menor temperatura, por el simple contacto molecular. Esta forma de transmisión es típica en los medios sólidos, aunque se puede producir también en los líquidos y gaseosos.

La conducción de calor se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe un gradiente de temperatura. Esto explica por qué los buenos conductores eléctricos son también buenos conductores de calor.

El flujo de calor por conducción fue formulado de forma precisa por el matemático francés Joseph Fourier, en el año 1822. La *ley de Fourier* expresa que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es directamente proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado)[78] e inversamente proporcional al espesor del elemento.

$$q = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \lambda / e$$

siendo:

- q: → flujo de calor por conducción, por unidad de superficie y de tiempo [W/m²]
- λ: → coeficiente de conductividad del material [W / (m·K)]
- e: → espesor del elemento [m]
- $(\theta_2 - \theta_1)$: → diferencia de temperatura [K]

Se llama *resistencia térmica* de un elemento constructivo de espesor *"e"* y coeficiente de conductividad "λ", a la siguiente relación:

$$R = e / \lambda \qquad [m^2 \cdot K / W]$$

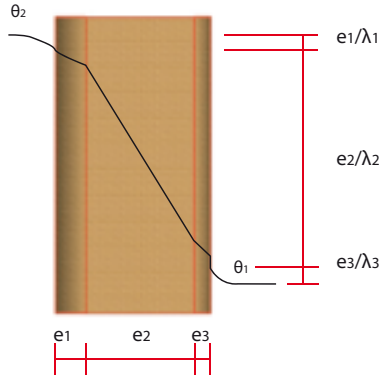
Si el elemento es heterogéneo, con capas de espesores e_1, e_2, …, e_n y coeficientes de conductividad λ_1, λ_2, …, λ_n, respectivamente, la resistencia térmica se expresa de la siguiente manera:

$$R = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \ldots\ldots + \frac{e_n}{\lambda_n}$$

El flujo de calor, en este caso es:

$$q = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \frac{1}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \ldots\ldots + \frac{e_n}{\lambda_n}}$$

$$q = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \frac{1}{R}$$



Transmisión del calor por radiación

La transmisión por radiación es el paso de calor de un cuerpo a otro de menor temperatura a través del espacio, sin calentamiento del medio que separa ambos cuerpos y por el que transcurre la energía. El ejemplo típico es el calentamiento de la tierra por la energía radiada por el sol.

El intercambio de energía depende de la diferencia de temperaturas y del poder de absorción del cuerpo que recibe la energía radiante. Las superficies opacas pueden absorber o reflejar la radiación incidente. Generalmente las superficies mates y rugosas absorben más calor que las superficies brillantes y pulidas, y las superficies brillantes reflejan más energía radiante que las mates.

La expresión del flujo de calor es:

$$q = (\theta_r - \theta_1) \cdot h_r$$

siendo:

- q: → flujo de calor por radiación, por unidad de tiempo y de superficie [W/m²]
- h_r: → coeficiente de transmisión superficial por radiación [W / (m²·K)]
- $(\theta_r - \theta_1)$: → diferencia de temperatura entre la superficie radiante y la receptora [K]

Transmisión del calor por convección

La transmisión por convección se produce cuando el calor se transporta a una zona de menor temperatura dentro de una misma masa de un fluido por el movimiento interno de las moléculas. Esta forma de transmisión de calor se caracteriza porque se produce por medio de un fluido (líquido o gaseoso).

Por ejemplo, un muro exterior de cerramiento, a mayor temperatura que el aire de la cámara, provoca en éste un aumento de temperatura al intercambiar calor por conducción. Al calentarse el aire aumenta de volumen y, por tanto, su densidad disminuye y asciende desplazando el aire que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura.

La *convección* propiamente dicha es el transporte de calor por medio de las corrientes ascendentes y descendentes.

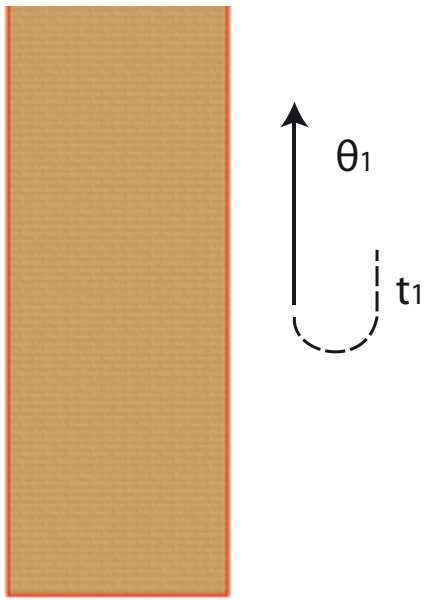
La transferencia de calor por convección se expresa por la *Ley de Enfriamiento de Newton*:

$$q = (\theta_1 - t_1) \cdot h_c$$

siendo:

- q: → flujo de calor por convección, por unidad de tiempo y de superficie [W/m²]
- h_c: → coeficiente de transmisión superficial por convección o *coeficiente de película* [W / (m²·K)]
- $(\theta_1 - t_1)$: → diferencia de temperatura entre la superficie del cuerpo y el aire alejado [K]

78 El signo cambiado indica que la transferencia siempre se produce del cuerpo que tiene mayor temperatura al que la tiene menor.



Convección

Transmisión total del calor

En los casos prácticos la transmisión de calor se produce simultáneamente por los tres procesos indicados. Sin embargo, cada proceso está referido a temperaturas distintas.

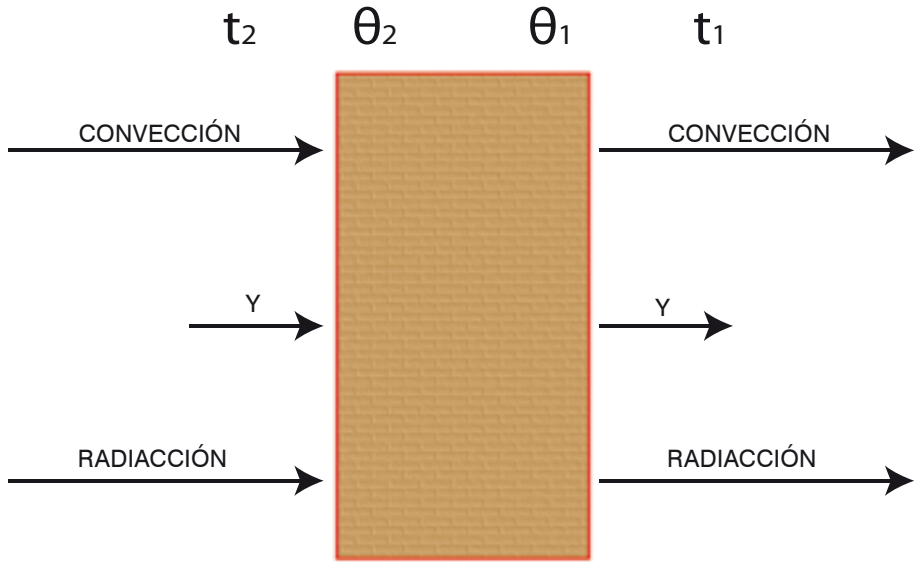
Por ejemplo, en el caso de dos ambientes separados por un muro, si el ambiente exterior tiene más temperatura que el interior, el calor se transmite en primer lugar del ambiente al muro por convección y radiación, en función de la temperatura del ambiente exterior y temperatura de la cara exterior del muro (t_1 y θ_1); después, por conducción en el interior del muro, en función de la diferencia de temperatura entre sus caras (θ_1 y θ_2); y finalmente, por convección y radiación, en función de la temperatura de la cara interior del muro y del ambiente interior (θ_2 y t_2).

Ante la dificultad de involucrar a las temperaturas intermedias en la expresión de transmisión total del calor, el flujo total se expresa sólo en función de las temperaturas de los ambientes (t_1 y t_2). Los coeficientes de radiación y convección (h_r y h_c) actúan simultáneamente en el aire en contacto con las superficies, por lo que su efecto se expresa por un único coeficiente *"h"* llamado *coeficiente superficial de transmisión de calor*.

El valor numérico del coeficiente *h*, que involucra a todos los factores relacionados con las superficies de un elemento en contacto con el aire que intervienen en el proceso de transmisión del calor, depende de muchos factores, tal como el movimiento del aire, las rugosidades de la superficie y la naturaleza y temperatura del ambiente. También varía según se considere la superficie exterior, *"h_e"*, o la superficie interior, *"h_i"*. En general es menor el coeficiente h_i que corresponde al interior, puesto que el fenómeno de convección del aire sólo se produce de forma natural, mientras que en el exterior las corrientes de aire inducen fenómenos de convección forzada.

Por consiguiente, se puede resumir el proceso total de transmisión de calor del exterior al interior, o viceversa, a través de una pared, en una función que depende de la diferencia de temperatura entre los ambientes, de los coeficientes superficiales y de la conductividad del o de los materiales que constituyen la pared. La expresión es la siguiente:

$$q = (t_2 - t_1) \cdot U$$



Transmisión global del calor

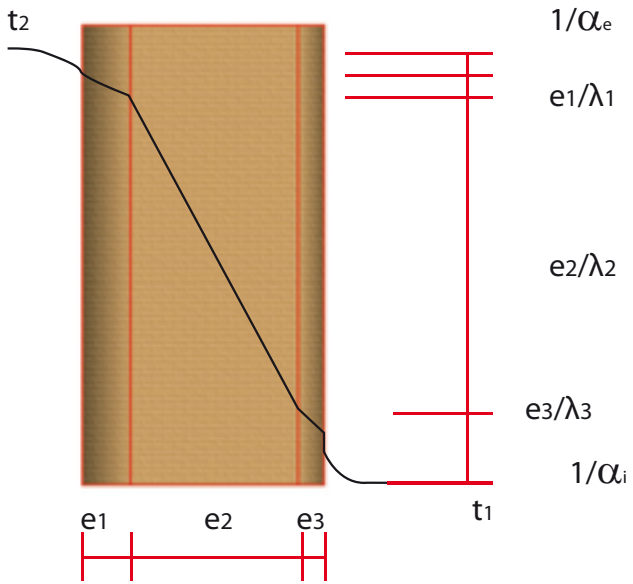
donde:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \ldots\ldots + \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e}} = \frac{1}{R}$$

siendo:

- q: → flujo de calor por unidad de superficie y tiempo [W/m²]
- $(t_2 - t_1)$: → diferencia de temperatura de los ambientes [K]
- e_i: → espesor de cada capa [m]
- λ_i: → conductividad térmica del material componente de cada capa [W / (m·K)]
- h_i, h_e: → coeficientes de transmisión superficial interior y exterior, respectivamente [W / (m²·K)]
- R: → resistencia térmica total de la pared [m²·K / W]
- U: → *transmitancia térmica* de la pared [W / (m²·K)] = 1 / R

El coeficiente de transmisión de calor *"U"* o *transmitancia térmica* caracteriza el flujo de calor que atraviesa una superficie unitaria para un gradiente unitario de temperatura. Se puede definir con mayor precisión como *"la cantidad de calor que transmite un elemento constructivo en régimen estacionario, por metro cuadrado de superficie, por hora y por gradiente de temperatura de un grado Kelvin entre los ambientes que separa"*.



Coeficientes superficiales

Transmisión del vapor de agua

Las prestaciones funcionales de los cerramientos no sólo dependen de los parámetros relacionados con la transmisión del calor de sus componentes, sino de aquellos otros que caracterizan la capacidad de transmisión del vapor de agua. Los comportamientos frente al calor y la humedad de un cerramiento multicapa están íntimamente ligados entre sí, por lo que es frecuente utilizar el calificativo *"higrotérmico"* cuando se estudia su comportamiento frente a los requisitos funcionales exigidos.

De igual forma que los materiales tienden a igualar el gradiente de temperatura entre los ambientes que separan, tienden también a equilibrar las condiciones hídricas de dichos ambientes. Las condiciones de humedad del ambiente dependen sustancialmente de la temperatura, por lo que es imprescindible realizar el análisis de los materiales para la combinación simultánea de las acciones térmicas e hídricas, esto es, del calor y de la humedad, introduciendo en el estudio el vapor de agua contenido en el aire.

Análisis higrométrico del aire

La composición del aire seco, a base de nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono, es prácticamente constante en toda la atmósfera. Sin embargo el aire atmosférico contiene siempre una cierta cantidad de moléculas de agua en estado de vapor. El estudio del comportamiento higrotérmico se realiza siempre sobre la base de partida de que el aire atmosférico es *aire húmedo*, es decir una mezcla de *aire seco* y *vapor de agua*.

El contenido de humedad del aire es independiente de la temperatura y se cuantifica por dos parámetros fundamentales:

- Humedad absoluta H_a: es la razón entre la masa de las moléculas de agua y la masa de las moléculas de aire presentes en un determinado volumen. Es un parámetro adimensional, aunque por razón de su magnitud se suele expresar en *gramos de agua por kilogramos de aire [g / kg].*

- Presión de vapor P_v: es la presión parcial originada por las moléculas de agua que contiene. Se suele expresar en *pascales [Pa].*

La cantidad de vapor que puede contener el aire no es ilimitada. Cuando la presión o el contenido de vapor sobrepasan unos determinados límites, el aire se satura y las moléculas de agua se condensan, pasando a la fase líquida. Este fenómeno depende fundamentalmente de la temperatura, de tal forma que el aire caliente admite más vapor que el aire frío. Los parámetros de presión y humedad del aire, relacionados con la temperatura son los siguientes:

- Presión de saturación P_{sat}: es la máxima presión de vapor posible del aire húmedo a una determinada temperatura, expresada en *pascales [Pa].*

- Humedad relativa H_r: es la razón entre la presión de vapor y la presión de saturación a una determinada temperatura. Generalmente se expresa en *tanto por ciento [%].*

La función que define el límite de presión o presión de saturación en función de la temperatura se llama curva de saturación. Su expresión analítica es la siguiente:

$$P_{sat} = 610{,}5 \cdot e^{\frac{17{,}269 \cdot \theta}{237{,}3+\theta}}$$

→ para una temperatura igual o superior a 0°C

$$P_{sat} = 610{,}5 \cdot e^{\frac{21{,}875 \cdot \theta}{265{,}5+\theta}}$$

→ para una temperatura inferior a 0°C.

Difusión del vapor de agua

El fenómeno de la difusión del vapor se produce siempre que exista una diferencia de presión entre dos ambientes. El flujo de vapor a través del elemento constructivo que los separa se produce para compensar la diferencia de presión y, generalmente, siempre se produce del ambiente interior al exterior, por ser aquél el que suele presentar mayor contenido de humedad.

Sin embargo, los materiales constructivos oponen una determinada resistencia a la difusión del vapor, en mayor o menor medida según el tipo de material. Los parámetros que caracterizan esta propiedad de los materiales son los siguientes:

- Permeabilidad o *difusividad* al vapor de agua d_v: es la facilidad que presenta un determinado material al paso del vapor de agua. Se expresa en *[g · m / (MN · s)].*

- Resistividad a la difusión de vapor r_v: es el inverso de la difusividad, $r_v = 1/d_v$ y mide la oposición que presenta el materia al paso de vapor.· Se expresa en *[MN · s / (g · m)].*

• Resistencia a la difusión de vapor R_v: es la oposición al paso de vapor de un material con un espesor determinado, $R_v = r_v \cdot e$ (siendo "e" el espesor del material). Se expresa en *[MN · s / g].*

• Factor de resistividad a la difusión de vapor μ: es la oposición al paso de vapor de un material referido a la que presenta el aire en reposo, $\mu = r_{v,material} / r_{v,aire}$. Es un factor adimensional. Para efectuar la conversión se puede tomar como valor de resistividad del aire en reposo $r_{v,aire} = 5{,}4$ MN · s / (g · m).

• Espesor equivalente S_d: es el espesor de la capa de aire equivalente a un determinado material respecto a la difusión de vapor, $S = \mu \cdot e$ (siendo "e" el espesor del material). Se expresa en *metros [m]*.

Existe una analogía entre el flujo de calor que atraviesa un material cuando existe un gradiente de temperatura y el flujo de vapor que atraviesa un material cuando existe un gradiente de presiones. En el primer caso el flujo es inversamente proporcional a la resistencia térmica, y en el segundo el flujo es inversamente proporcional a la resistencia a la difusión de vapor. El análisis se simplifica si este último parámetro se expresa como *espesor de aire equivalente, S_d*.

Distribución de presiones de vapor en un cerramiento multicapa

En un cerramiento multicapa se puede establecer una proporción entre los diversos incrementos de presión y las respectivas resistencias a la difusión de vapor en cada capa. Expresando la resistencia a la difusión de vapor como el espesor de aire equivalente [m] resulta muy sencillo determinar la distribución de presiones a lo ancho de la sección de un cerramiento, tomando como presión de partida y presión final las correspondientes al aire interior y exterior, respectivamente. La expresión es la siguiente:

$$P_n = P_{n-1} + (S_{dn} / \sum S_{dn}) \cdot (P_i - P_e)$$

donde: $\rightarrow S_{dn} = e_n \cdot \mu_n$

siendo:

• $P_e \rightarrow$ la presión de vapor del aire exterior [Pa]

• $P_i \rightarrow$ la presión de vapor del aire interior [Pa]

• $P_n \rightarrow$ la presión de vapor en la capa n [Pa]

• $S_{dn} \rightarrow$ la resistencia térmica de la capa n, expresada como el espesor de aire equivalente [m]

• $e_n \rightarrow$ el espesor de la capa n [m]

• $\mu_n \rightarrow$ el factor de resistividad a la difusión de vapor de la capa n referido al del aire en reposo [adimensional]

La determinación de la presión de vapor en cada capa del cerramiento, por simple comparación con las respectivas presiones de saturación que corresponden a sus temperaturas, permite conocer si existe riesgo de condensación, bien en la superficie o bien en el interior del cerramiento.

79 El efecto de *"la pared fría"* es el fenómeno por el cual el vapor de agua del aire se condensa en una superficie cuando su temperatura desciende por debajo de un determinado valor. Este punto crítico se denomina *temperatura de rocío* y se define como la temperatura para la cual el aire se satura, es decir, su humedad relativa llega al 100% y, por consiguiente, se condensa. Se puede obtener en el *ábaco psicométrico* del aire, que relaciona su temperatura con su humedad relativa.

Condensación superficial

Es la condensación de vapor de agua que se produce en la superficie interior de los cerramientos por el efecto de la *pared fría*[79].

Cuando la temperatura de la superficie de un cerramiento (normalmente la interior) es menor que la temperatura de rocío, existe un riesgo de condensación del vapor de agua del ambiente en la pared.

El riesgo se controla limitando el valor mínimo de la temperatura en la superficie interior, cuya expresión es la siguiente:

$$T_{si} = T_i - (U / h_i) \cdot (T_i - T_e)$$

siendo:

• $T_{si} \rightarrow$ la temperatura de la superficie interior

• $U \rightarrow$ la transmitancia del cerramiento

• $h_i \rightarrow$ el coeficiente de transmisión superficial interior

• T_i ; $T_e \rightarrow$ las temperaturas de los ambientes interior y exterior, respectivamente

Como se observa en la expresión anterior, el riesgo de formación de condensaciones superficiales depende, además de la temperatura exterior (el riesgo sólo existe en el período invernal), de la transmitancia del cerramiento. El límite inferior de la temperatura superficial se establece en función de la humedad relativa del ambiente interior.

Condensaciones intersticiales

Se producen en el interior de los cerramientos cuando en alguna de sus capas se supera el vapor de saturación o, lo que es lo mismo, la temperatura es inferior a la de rocío. El riesgo se determina comparando la presión de vapor en cada capa (obtenida mediante la expresión de distribución de presiones) con la presión de saturación (obtenida del ábaco psicométrico del aire o de la expresión analítica de la curva de saturación indicada anteriormente).

Aislamiento térmico de fachada ventilada

Las variables que determinan el riesgo de formación de condensaciones superficiales son las respectivas conductividades térmicas y permeabilidades de los materiales que constituyen cada capa y su posición relativa. Además interviene la temperatura y humedad relativa de los ambientes interior y exterior.

5.3.3 Materiales aislantes

Un material aislante desde el punto de vista térmico se caracteriza por tener una conductividad extraordinariamente baja en comparación con el resto de los materiales constructivos.

La colocación de aislamiento térmico supone una economía en la energía que se necesita para acondicionar el espacio interior de los edificios, al reducir considerablemente la *transmitancia térmica*, es decir las pérdidas que se producen a través de su envolvente. La reducción de la demanda energética es, a su vez, un factor fundamental para reducir la emisión de contaminantes que lleva asociada la generación de energía.

Además, el aislamiento incorporado en los cerramientos supone también una mejora del confort térmico. La temperatura psicológicamente sentida se puede fijar como la semisuma de la temperatura del ambiente interior (T_i) y la temperatura de la superficie interior (t_i) de las paredes. Debido a que las calefacciones tradicionales calientan fundamentalmente por convección, las paredes de las habitaciones en invierno están más frías que el aire ambiente. Para que la temperatura superficial no difiera demasiado de la temperatura ambiente, es necesario limitar la transmitancia del cerramiento y esto se consigue principalmente mediante la incorporación de un material aislante.

La limitación de la temperatura superficial a unos valores próximos a la temperatura ambiente, no sólo produce mayor sensación de confort, sino que lleva asociada además la eliminación del riesgo de condensaciones superficiales por efecto de *la pared fría*, como se ha indicado anteriormente.

Otra propiedad relacionada con las prestaciones funcionales del cerramiento en la que influye el comportamiento del material aislante incorporado es el control de las condensaciones intersticiales. En general, la cantidad de vapor de agua contenida en el ambiente de mayor temperatura es más elevada que la contenida en el ambiente más frío. Ello supone una diferencia de presiones de vapor que intenta equilibrarse mediante la difusión a través de las porosidades del cerramiento, lo que induce un flujo del lado caliente al lado frío. La condensación intersticial se produce cuando el vapor de agua en su difusión pasa por zonas del cerramiento donde la temperatura es inferior a la *temperatura de rocío* correspondiente.

En general, este problema se elimina interponiendo barreras de vapor que, por la razón expuesta anteriormente, para que sean eficaces se deben colocar en la zona caliente del cerramiento. Algunos materiales aislantes llevan la barrara de vapor incorporada; otros constituyen por sí mismos la barrera por el hecho de tener una resistividad muy elevada a la difusión del vapor de agua.

Los materiales más utilizados en la edificación como aislantes térmicos son los fibrosos de origen inorgánico (lana de vidrio y lana de roca) y las espumas sintéticas de origen orgánico (poliestireno y poliuretano).

La fabricación de lana de vidrio, hasta iniciado el siglo XX, fue una mera curiosidad que se realizaba con fines textiles[80]. En España, la fabricación de fibras de vidrio para su aplicación como material aislante no comenzó hasta la década de los sesenta.

La lana de vidrio se elabora partiendo de un vitrificante (generalmente sílice en forma de arena), un fundente (carbonato o sulfato de sodio) para conseguir temperaturas de fusión más bajas y un estabilizante (carbonato de calcio y magnesio) para conferir resistencia al paso de la humedad. El fibrado se realiza a través de los orificios de un plato perforado dotado de un elemento de rotación muy rápido.

La lana de roca es un producto de propiedades complementarias a la lana de vidrio, especialmente indicado para los aislamientos térmicos en usos industriales a altas temperaturas. Se elabora a partir un *caldo* de rocas basálticas compuesto por silicatos y óxidos metálicos, que tiene unas características físico-químicas parecidas a los vidrios. El fibrado se obtiene por centrifugación del material, controlando en el proceso los contenidos de sílice y óxidos metálicos, para obtener una composición química final que asegure una gran estabilidad mecánica hasta los 750ºC.

Las espumas orgánicas de poliestireno se fabrican básicamente a partir del etileno y diversos compuestos aromáticos, obtenidos como subproductos en el procesado del petróleo y del gas natural. A partir de ellos se obtiene el estireno monómero que, junto con un agente expandible, como el pentano, sufre un proceso de polimerización en un reactor con agua, dando lugar al poliestireno expandible, que es la materia prima para la fabricación de los poliestirenos.

El poliestireno expandido se presenta en forma de planchas o moldes formados por perlas de material soldadas entre sí, o en productos específicos conformados con su acabado definitivo (poliestireno moldeado).

El poliestireno extruido se obtiene con la misma materia prima que el expandido, pero el proceso de fabricación en extrusionadora incorpora al material una estructura celular totalmente cerrada, es decir sin conexiones entre las distintas celdas, muy fina y homogénea, con tamaño de celda del orden de décimas de milímetro, bajo la forma de una plancha continua y rígida.

Los sistemas de poliuretano proceden básicamente de dos productos, el petróleo y el azúcar que, después de un proceso de transformación generan dos componentes básicos, llamados genéricamente *poliol* e *isocianato*[81]. Estos componentes son líquidos a temperatura ambiente y su mezcla se efectúa con pistola produciéndose una reacción química exotérmica. Esta reacción química se caracteriza por la formación de enlaces entre el poliol y el isocianato, produciendo una estructura sólida, uniforme y muy resistente. Además, el calor que desprende la reacción se puede utilizar para evaporar un agente hinchante, que rellena las celdillas que se forman, de tal forma que se obtiene un producto con una estructura celular en gran medida cerrada (aproximadamente el 90%) con un volumen muy superior al que ocupaban los elementos líquidos.

La espuma de poliuretano se puede proyectar con pistola directamente sobre la superficie a aislar o se puede inyectar entre planchas metálicas conformando paneles sándwich.

80 Aunque los fenicios y griegos ya sabían obtener hilos de vidrio desde la antigüedad, la primera comunicación sobre lana de vidrio no aparece hasta el siglo XVIII, y se debe al físico y naturalista francés Antoine de Reamur (1713). En la *Colombian Exposition* de 1893 se presentó un traje enteramente tejido con hilos de vidrio.

81 Estas materias primas son suministradas en muchos casos por grandes empresas del sector químico.

Propiedades de los materiales aislantes

Un material aislante se caracteriza por el valor de su *conductividad térmica*; cuanto más pequeña es la conductividad, mayor es su poder aislante.

Aunque el parámetro que determina el poder aislante se denomina *conductividad*, el proceso de transmisión del calor se realiza por los tres mecanismos descritos anteriormente: conducción, radiación y convección.

El mecanismo de transmisión del calor por convección es casi inapreciable en los materiales aislantes, por el hecho de que el aire está confinado en celdillas muy pequeñas, como es el caso de las espumas orgánicas celulares, o en fibras entrecruzadas desordenadamente que impiden que el aire circule entre ellas, como es el caso de las lanas minerales.

Los mecanismos de transmisión del calor por conducción y por radiación en los materiales aislantes suponen procesos complementarios. Esto se debe a que la *conducción* es menor cuanto menos materia haya, pero la *radiación* aumenta al disminuir la materia que puede absorber la energía. La densidad del material es un parámetro que tiene importancia en el poder aislante, aunque los valores mínimos de densidad no se corresponden siempre con los valores mínimos de conductividad.

La conductividad térmica en las lanas minerales resulta, en la práctica, de la combinación de la transmisión gaseosa y de la radiación. El valor de dicha conductividad, correspondiente a una temperatura de 10°C, está comprendida entre 0,032 y 0,045 W / (m·K) para los productos de aplicación en la construcción.

En el caso de las espumas el valor de la conductividad es del mismo orden de magnitud para densidades en torno a 40 kg/m^3. El valor puede aumentar (empeora el poder aislante) si la densidad cambia; tanto si se trata de densidades bajas (por debajo de 25 kg/m^3) como si se trata de densidades altas (por encima de 50 kg/m^3).

Revestimiento de soporte con material aislante

Además de la *conductividad* (λ) que es la característica básica de los materiales aislantes, tienen importancia otras propiedades relacionadas directamente con las prestaciones térmicas del material.

Una de ellas es la resistencia al paso de la humedad. Por las razones expuestas anteriormente, los materiales aislantes que se utilizan para el aislamiento térmico, cuanto más esponjosos sean, mayor poder aislante tienen. Sin embargo, en determinadas situaciones, el esponjamiento que habilita la posibilidad de absorción de agua puede producir un efecto pernicioso. Si el aire confinado se ve reemplazado por agua o por hielo, que tienen conductividades 25 veces o 90 veces superior a la del aire, respectivamente, el aislamiento pierde totalmente su eficacia.

La capacidad de absorción de agua depende fundamentalmente de la estructura de poros del material.

Las lanas minerales tienen una estructura de poro abierto (100% porosa), que es una buena propiedad desde el punto de vista del aislamiento acústico, pero desde el punto de vista del aislamiento térmico supone una enorme facilidad para la introducción del agua, y más aún del vapor, entre los intersticios de las fibras. Por ello, este tipo de productos se deben colocar protegidos con barreras de impermeabilización, ventilación o drenaje.

Las espumas orgánicas, por el contrario, tienen una estructura cerrada en mayor o menor medida, según el tipo de producto. En particular, el poliestireno extruido se puede considerar como un producto de estructura de célula cerrada al 100%, por lo que se le incluye entre los productos denominados *higrotérmicos*. Ello supone que el propio producto constituye barrera de vapor, por lo que su utilización permite prescindir de barreras adicionales.

Otros factores importantes que condiciona el ámbito de aplicación de los materiales aislantes son el comportamiento ante el fuego y la temperatura máxima de empleo.

En general, las lanas minerales, debido a su naturaleza inorgánica, son materiales incombustibles, pertenecientes a la Euroclase A sin necesidad de ensayos, por lo que es posible, en algunas aplicaciones, incluso dejarlos vistos. Además, la estructura química de los materiales minerales hace que no se desprendan gases tóxicos cuando quedan sometidos a la acción directa del fuego[82].

Las espumas orgánicas son combustibles, pero pueden contar con la adición de agentes *ignifugantes*, también llamados *retardantes de llama*, por lo que su clasificación depende de la solución constructiva completa.

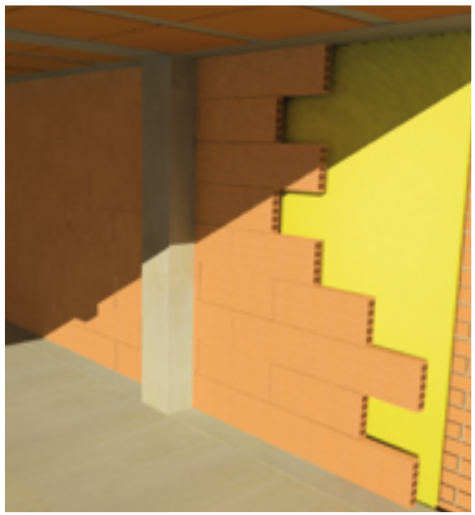
La temperatura máxima de empleo no está regulada por las Normas UNE, aunque para su definición se utiliza en Europa el siguiente criterio: *"Temperatura máxima de empleo es aquella en la que el material alcanza una deformación del 5% del espesor bajo una carga uniforme constante de 1.000 Pa".*

En los materiales inorgánicos la temperatura máxima de empleo está comprendida entre los 250°C (lana de vidrio con encolado) y los 750°C (lana de roca), lo que convierte a estos materiales en los más idóneos para su utilización en calorifugado y aislamiento industrial, sobre todo la lana de roca[83]. En las espumas orgánicas la temperatura máxima de servicio está en torno a los 100°C (poliuretano), 70°C (poliestireno expandido) y 85°C (poliestireno extruido), por lo que su campo principal de aplicación es el aislamiento de cubiertas y fachadas.

En relación con la durabilidad, las lanas minerales son inatacables por los ácidos (excepto el fluorhídrico) y por las bases no concentradas. El pH de su composición (aproximadamente 7) asegura una estabilidad total, incluso en medio húmedo, y la no existencia de corrosión de los metales en contacto con ellos.

82 Las intoxicaciones son la principal causa de muerte en los incendios, incluso de los bomberos que acuden al siniestro.

83 La lana de vidrio sin encolado tiene una temperatura máxima de servicio de 500°C y la fibra cerámica puede llegar a los 1.500°C.



Montaje de los paneles rígidos de aislamiento

Colocación y montaje de los materiales aislantes

La calidad y prestaciones de los materiales aislantes dependen no sólo de las propiedades del producto elegido, sino del montaje y de su comportamiento como parte integrante de la solución constructiva completa.

Debido a que los materiales aislantes se caracterizan por su baja conductividad térmica y que este parámetro es parecido en todos los productos que se ofertan en el mercado, las diferencias en las prestaciones finales radican en los distintos sistemas de montaje y en la correcta posición en el interior del muro.

El montaje debe tener en cuenta el comportamiento del material frente a contracciones y dilataciones para conseguir el objetivo fundamental que es la minimización de los puentes térmicos. Si el material presenta variaciones dimensionales en volumen iguales o superiores al 5% se debe realizar el montaje a través de machihembrado o doble capa, evitando siempre la continuidad de las juntas. A estos efectos, las planchas de poliestireno extruido se presentan en forma de paneles rígidos machihembrados para facilitar el montaje. Las lanas minerales, compuestas por silicatos y óxidos metálicos tienen una variación dimensional en volumen prácticamente nula[84].

Otro criterio importante es evitar que el aislante quede suelto en el interior de la cámara. Es fundamental controlar su correcto anclaje a una de las dos hojas del cerramiento y, en caso de dejar cámara de aire, garantizar que ésta queda libre de obstáculos y que no se produzcan puntos en los que exista mortero en contacto con la hoja exterior, a fin de evitar posibles humedades y puentes térmicos. La sujeción del aislamiento es sumamente importante, puesto que si se desprende y el aire se mueve a su alrededor resulta ineficaz.

Si el panel es rígido, y dependiendo del tipo de cerramiento que se vaya a ejecutar, la manera más lógica de anclarlo es mediante adhesivo o pelladas, o acuñándolo en la base y en su parte superior con cuñas del mismo material. La posición idónea en el plano exterior de la hoja interna se puede conseguir fácilmente utilizando elementos separadores adicionales.

Si, por el contrario, el panel es flexible, como puede ser una manta de lana de vidrio, la forma más correcta sería mediante anclajes mecánicos de PVC, que enganchen por un lado en una hoja del cerramiento y, por otro lado posean una cabeza de unos 8 mm de PVC que evita que se mueva su posición.

Si se trata de espumas aplicadas in situ (poliuretano) éstas se proyectan mediante pistola. El anclaje se produce al entrar sus componentes altamente reactivos en contacto con el aire, la espuma se expande y se adhiere a la superficie sobre la que se proyecta. La aplicación se realiza en sucesivas capas, hasta alcanzar el espesor final del aislamiento deseado. Otro procedimiento de aplicación de espumas, menos utilizado en nuestro país, consiste en colar la mezcla líquida de los componentes, con una reactividad ajustada para este proceso, en la cavidad a aislar; en poco tiempo, la mezcla expande y endurece, rellenando la cavidad.

En los dos últimos casos, es decir, cuando se utilizan elementos flexibles o espumas proyectadas, la posición idónea del aislante exige construir en primer lugar la hoja interior del cerramiento.

84 Ni siquiera con métodos dilatométricos muy sofisticados se consigue una medición diferente de cero.

Fachada terminada con paneles rígidos de aislamiento

Colocación de panel aislante con separadores

5.3.4 Normativa sobre ahorro de energía

Las medidas normativas en materia de ahorro de energía a aplicar en el sector de la edificación en nuestro país se circunscriben dentro de los desarrollos requeridos para la transposición de la Directiva Europea 2002/91/CE de *Eficiencia Energética de los Edificios*, cuya entrada en vigor se produjo en enero de 2006, y que establece la obligación de fijar unos requisitos mínimos de eficiencia energética para los edificios nuevos y para los existentes sujetos a obras de rehabilitación, la certificación energética de edificios y la inspección periódica de calderas y sistemas de aire acondicionado[85].

Con anterioridad a la Directiva 2002/91/CE ya existía en España, por parte de la Administración central, el compromiso de elaborar un Código Técnico de la Edificación que hiciera un especial énfasis en los aspectos relacionados con el ahorro de energía. En la exposición de motivos de la Ley de Ordenación de la Edificación (noviembre de 1999) se lee lo siguiente: *"… la sociedad demanda cada vez más calidad de los edificios y ello incide … en otros aspectos vinculados con el bienestar de las personas, como … el aislamiento térmico …"*. Y en el artículo 3 sobre requisitos básicos de la edificación relativos a la habitabilidad se incluye el *"Ahorro de energía y aislamiento térmico, de tal forma que se consiga un uso racional de la energía necesaria para la adecuada utilización del edificio".*

Con posterioridad a la LOE el gobierno de nuestro país ha llevado a cabo medidas y estrategias dirigidas a limitar la demanda energética y la consiguiente emisión de gases nocivos para cumplir, entre otros objetivos, los compromisos de Kyoto.

La oportunidad en España de estrategias que mejoren la eficiencia energética y de planes específicos de lanzamiento a corto y medio plazo, está plenamente justificada, si se tiene en cuenta, entre otros factores, la elevada dependencia energética exterior de nuestro país (cerca del 80% frente al 50% medio de la Unión Europea) y las altas tasas anuales de crecimiento de la demanda energética por encima del crecimiento del PIB, lo que induce una tendencia de la intensidad energética creciente, contraria a la tendencia media decreciente que existe en el conjunto de la Unión Europea.

Además no se puede olvidar la necesidad urgente de adoptar medidas activas de fomento de la eficiencia energética con vistas a facilitar el cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones de CO_2 establecidos en al *Plan Nacional de Asignación 2007 de derechos de emisión (PNA)*, dado que la energía es la responsable del 78% de las emisiones totales de los gases de efecto invernadero.

En este sentido destaca la publicación de la *Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 (E4)*, aprobada el 28 de noviembre de 2003 que propone, para cada uno de los principales sectores involucrados, una serie de medidas que se deben establecer durante el citado período. Sin embargo, la *Estrategia E4* no recoge una especificación pormenorizada de las actuaciones concretas, de los plazos ni de la delimitación de responsabilidades.

Por ello, el Gobierno elaboró un *Plan de Acción 2004-2012* de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España, aprobado en Consejo de Ministros el 8 de julio de 2005. Este *Plan* complementa los objetivos de la *Estrategia E4*, concretando las actuaciones a corto y medio plazo en cada sector, detallando para ello los plazos, recursos y responsabilidades, y evaluando el impacto global derivado de estas actuaciones[86].

El sector de la edificación se sitúa en el tercer lugar en importancia en cuanto al volumen de ahorro previsto como resultado de aplicación de las medidas contenidas en el *Plan*. El primer y segundo lugar se localizan en el sector transporte y en el sector industria, respectivamente.

El *Plan de Acción* incluye dentro del sector de la edificación las medidas relativas a las instalaciones fijas de los edificios, tanto las instalaciones térmicas (calefacción, climatización y producción de agua caliente sanitaria) como las instalaciones de iluminación interior.

Las medidas propuestas en el Plan para el Sector de la Edificación pretenden que los edificios nuevos cumplan con unos requisitos mínimos de eficiencia energética más exigentes, introducidos en la fase de diseño, mediante normativa obligatoria. De igual forma se pretende proporcionar al futuro comprador o usuario información sobre la eficiencia energética del edificio, de manera que este criterio contribuya a las decisiones relativas a la compra o alquiler del mismo (o a la elección de uno frente a otro), mediante procedimientos de certificación energética.

Las medidas normativas que el Plan establece para la transposición de la Directiva 2002/91/CE de *Eficiencia Energética de los Edificios*, de aplicación principalmente a los edificios de nueva planta son las siguientes:

- Aprobación, mediante Real Decreto, del nuevo *Código Técnico de la Edificación*.

- Revisión y aprobación, mediante Real Decreto, del nuevo *Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios* (RITE).

- Aprobación, también mediante Real Decreto, del procedimiento de *Certificación Energética de los Edificios*.

Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE *"Ahorro de Energía"*

En nuestro país, la obligación de crear cerramientos que procuren unas condiciones térmicas adecuadas ha quedado recogida en el Documento Básico HE *"Ahorro de energía"* del Código Técnico de la Edificación y, en particular, en la Sección 1 *"Limitación de la demanda energética"*[87], que establece reglas y procedimientos para cumplir la exigencias básicas de ahorro de energía, de obligado cumplimiento en toda obra de edificación.

Tanto el objetivo del requisito básico *"Ahorro de energía"*, como las exigencias básicas, se establecen en el artículo 15 de la Parte I del Código Técnico de la Edificación. Las que afectan directamente a los cerramientos de fachada son las siguientes:

Artículo 15. Exigencias básicas de ahorro de energía (HE)

1. El objetivo del requisito básico *"Ahorro de energía"* consiste en conseguir un uso racional de la energía necesaria para la utilización de los edificios, reduciendo a límites sostenibles su consumo y conseguir asimismo que una parte de este consumo proceda de fuentes de energía renovable, como consecuencia de las características de su *proyecto, construcción, uso y mantenimiento.*

2. Para satisfacer este objetivo, los edificios se proyectarán, construirán, utilizarán y mantendrán de forma que se cumplan las exigencias básicas que se establecen en los apartados siguientes.

3. El Documento Básico *"DB HE Ahorro de energía"* especifica parámetros objetivos y procedimientos cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de las exigencias básicas y la superación de los niveles mínimos de calidad propios del requisito de ahorro de energía.

15.1 Exigencia básica HE 1: Limitación de demanda energética

"Los edificios dispondrán de una envolvente de características tales que limite adecuadamente la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima de la localidad, del uso del edificio y del régimen de verano y de invierno, así como por sus características de aislamiento e inercia, permeabilidad al aire y exposición a la radiación solar, reduciendo el riesgo de aparición de humedades de condensación superficiales e intersticiales que puedan perjudicar sus características y tratando adecuadamente los puentes térmicos para limitar las pérdidas o ganancias de calor y evitar problemas higrotérmicos en los mismos".

La Sección HE 1 *"Limitación de demanda energética"* del Documento Básico HE *"Ahorro de Energía"* caracteriza y cuantifica las exigencias agrupándolas en tres grandes aparatos: demanda energética, condensaciones y permeabilidad al aire.

85 La Comisión Europea calculó que con el nuevo marco normativo definido por la *Directiva*, las emisiones de la UE se podrían reducir hasta 45 millones de toneladas de CO_2 al año, lo que representa el 22% del compromiso de la UE en el *Protocolo de Kyoto*.

86 El *Plan de Acción 2005-2007* calculó que su aplicación podía generar un ahorro de energía primaria acumulado de 12 millones de toneladas equivalentes de petróleo (lo que supone el 8,5% del total del consumo de energía primaria del año 2004 y el 20% de las importaciones de petróleo en ese año), y una reducción de emisiones de CO_2 a la atmósfera de 32,5 millones de toneladas.

87 En adelante DB HE 1.

El procedimiento de verificación de las exigencias se debe hacer en la fase de proyecto y en la fase de construcción. Para la verificación en la fase proyecto se puede optar por uno de los dos procedimientos alternativos de comprobación siguientes:

Opción simplificada:

Se basa en el control indirecto de la demanda energética[88] del edificio mediante la limitación de los parámetros característicos de los cerramientos y particiones interiores que componen su envolvente térmica[89]. La comprobación se realiza comparando los valores obtenidos en el cálculo con los valores límite permitidos.

Los objetivos de la opción simplificada son:

a. Limitar la demanda energética de los edificios, de una manera indirecta, mediante el establecimiento de determinados valores límite de los parámetros de transmitancia térmica y del factor solar modificado de los componentes de la envolvente térmica.

b. Limitar la presencia de condensaciones en la superficie y en el interior de los cerramientos para las condiciones ambientales definidas en el DB HE.

c. Limitar las infiltraciones de aire en los huecos y lucernarios

d. Limitar en los edificios de viviendas la transmisión de calor entre las unidades de uso calefactadas y las zonas comunes no calefactadas.

Se puede usar la opción simplificada cuando la superficie de huecos en cada fachada es inferior al 60% y la superficie de lucernarios es inferior al 5% de la superficie total de la cubierta.

Opción general:

Se basa en la evaluación de la demanda energética del edificio comparándola con la correspondiente a un edificio de referencia[90] que cumple estrictamente con los valores límite de prestaciones establecidos en el DB HE 1.

Este cálculo global requiere un modelización mediante soporte informático. El programa de referencia elaborado por la administración es el *LIDER (Limitación de la Demanda Energética)*.

Con la opción general se debe limitar también la presencia de condensaciones en la superficie y en el interior de los cerramientos, así como las pérdidas energéticas debidas a las infiltraciones de aire, para unas condiciones normales de utilización del edificio.

La verificación en la fase de construcción supone definir y justificar las características técnicas mínimas que deben reunir los productos, así como las condiciones de ejecución de cada unidad de obra, realizando una serie de controles especificados para comprobar su conformidad.

Certificación Energética de edificios de nueva construcción

La *Certificación de Eficiencia Energética* de los edificios es una de las exigencias derivadas de la Directiva Europea de *Eficiencia Energética de los Edificios* 2002/91/CE.

Ya se ha comentado en apartados anteriores la adaptación de la normativa española en este campo a través del Código Técnico de la Edificación y del Reglamento de las Instalaciones Térmicas en Edificios. En lo referente a Certificación Energética, la mencionada Directiva Europea se traspone parcialmente al ordenamiento jurídico español a través del Real Decreto 47/2007 de 19 de enero (BOE de 31 de enero), por el que se aprueba el *"Procedimiento Básico para la Certificación Energética de los Edificios de Nueva Construcción"*. Para los edificios existentes está prevista la elaboración de otro Real Decreto con anterioridad a enero de 2009.

Este Real Decreto 47/2007 entró en vigor a los tres meses después de su publicación en el BOE, siendo voluntaria su aplicación durante un período de seis meses. A partir de ese momento, es decir desde el 31 de octubre de 2007, la aplicación es obligatoria para todos los proyectos de edificios de nueva construcción que soliciten licencia de obras. El ámbito de aplicación incluye no sólo a los edificios de nueva construcción, sino también a los edificios existentes con una superficie útil superior a 1000 m^2, que sean objeto de modificaciones, reformas o rehabilitaciones, en los que se renueve más del 25% del total de sus cerramientos.

La eficiencia energética de un edificio se determina de acuerdo con el método de cálculo que figura en el Anexo I del Real Decreto, y se expresa con indicadores energéticos en la *Etiqueta de Eficiencia Energética*, según el Anexo II del mencionado texto legal. Aplicando el procedimiento que constituye el contenido del Real Decreto, se asigna a cada edificio una *Clase Energética de Eficiencia*, comprendida entre la Clase A, para los energéticamente más eficientes, y la clase G, para los menos eficientes.

Para la obtención de la escala de certificación, en nuestro país se ha realizado un estudio específico en el que se detalla el procedimiento utilizado para obtener los límites de dicha escala en función del tipo de edificio considerado y del clima de la localidad. El procedimiento toma en consideración las escalas que en la actualidad se sopesan en otros países y, en particular, la propuesta que figura en el documento del CEN prEN 15217 *"Energy performance of buildings: Methods for espresing energy performance and for energy certification of buildings"*.

La *Certificación de Eficiencia Energética del Edificio Terminado* es el proceso por el que se verifica la conformidad de la calificación obtenida por el proyecto con la del edificio terminado y que conduce a la expedición del *Certificado de Eficiencia Energética del Edificio Terminado*. Este documento es suscrito por la dirección facultativa de la obra como resultado del proceso de certificación, y debe incluir la calificación de eficiencia energética del edificio terminado, señalada en la escala de eficiencias. Este certificado se incorpora al Libro del Edificio y tiene una validez máxima de diez años.

La obtención del *Certificado de Eficiencia Energética* otorga el derecho de utilización, durante su período de validez, de la *Etiqueta de Eficiencia Energética*, que debe ser incluida en toda oferta, promoción y publicidad dirigida a la venta o arrendamiento del edificio.

La determinación del nivel de eficiencia energética correspondiente a un edificio se puede realizar mediante dos opciones:

- Opción general

Es una opción de carácter prestacional, realizada a través de programas informáticos que cumplen los requisitos exigidos en el Real decreto 47/2007 y que desarrollan el método de cálculo del Anexo I de una manera directa. Dentro de esta opción se puede utilizar:

a. El programa informático de referencia denominado CALENER, promovido por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio a través del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía) y la Dirección General de Arquitectura y Política de Vivienda del Ministerio de la Vivienda, que tiene la consideración de documento reconocido, de validez en todo el territorio nacional, y cuya correcta aplicación es suficiente para acreditar el cumplimiento de los requisitos establecidos en el Real Decreto[91].

b. Un programa informático alternativo, que cumpla con las especificaciones técnicas del método de cálculo, que esté validado de acuerdo con lo que establece el Anexo I y que cuente con la aprobación por parte de la Comisión Asesora para la Certificación Energética de Edificios. La aprobación se tiene que hacer de acuerdo con los criterios que se establecen en el *Documento de Condiciones de Aceptación de procedimientos Alternativos a LIDER y CALENER.*

88 La *demanda energética* es la energía necesaria para mantener en el interior del edificio unas condiciones de confort definidas reglamentariamente en función del uso del edificio y de la zona climática en la que se ubique. Se compone de la demanda energética de calefacción y refrigeración, correspondiente a los meses de la temporada de calefacción y de refrigeración respectivamente.

89 La *envolvente térmica* se compone de los cerramientos del edificio que separan los recintos habitables del ambiente exterior, y las particiones interiores que separan los recintos habitables de los no habitables que, a su vez, estén en contacto con el ambiente exterior.

90 El *edificio de referencia* es el obtenido a partir del edificio objeto de estudio, cuya demanda energética debe ser mayor, tanto en régimen de calefacción como de refrigeración. Se obtiene a partir del edificio objeto sustituyendo los cerramientos por otros que cumplen los requisitos de la opción simplificada.

91 El programa *CALENER* cuenta con dos versiones para facilitar su utilización: *CALENER VYP*, para edificios de Viviendas y del Pequeño y Mediano Terciario; y *CALENER GT*, para grandes edificios del sector terciario.

- Opción simplificada

Es una opción de carácter prescriptivo que desarrolla el método de cálculo del Anexo I de una manera indirecta. Consiste en la obtención de una clase de eficiencia a partir del cumplimiento por parte de los edificios afectados de una serie de prescripciones relativas tanto a la envolvente del edificio como a los sistemas térmicos de calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria e iluminación. El conjunto de estas prescripciones se denomina *solución técnica*.

Para la utilización de la opción simplificada es necesaria la proposición de soluciones específicas que tendrán la consideración de documentos reconocidos previa aprobación de los mismos por parte de la Comisión Técnica Asesora para la Certificación Energética. La aprobación se hace de acuerdo con los criterios que se establecen en el *Documento de Condiciones de Aceptación de Procedimientos Alternativos. Procedimientos Simplificados de Certificación Energética*.

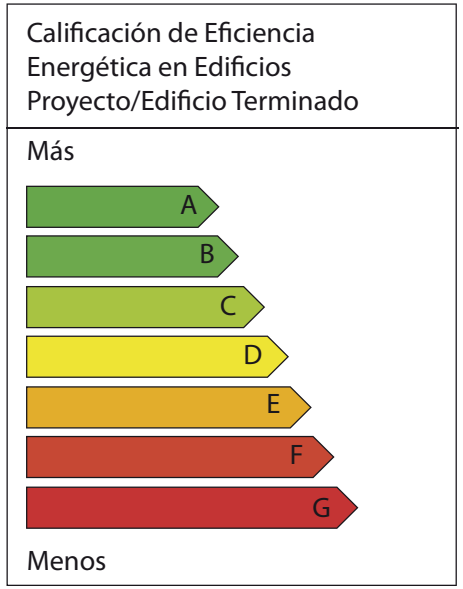
El IDAE ha aprobado el documento *"Memoria de Cálculo correspondiente a la Opción Simplificada para la Calificación de Eficiencia Energética de Edificios de Viviendas"*, mediante el cual se determina la clase de eficiencia energética a asignar a los edificios de viviendas que cumplen estrictamente con la opción simplificada del DB HE 1. La utilización de este procedimiento sólo permite obtener clases de eficiencia energética D ó E. Las únicas limitaciones al empleo de esta opción son las derivadas de la aplicabilidad de la opción simplificada del DB HE 1[92].

El objetivo de esta opción simplificada para los edificios de viviendas es proporcionar la calificación de eficiencia energética de los mismos de una manera indirecta, mediante un conjunto de soluciones técnicas que se definen en el documento, que son coherentes con la verificación del cumplimiento de los requisitos mínimos de la Directiva 2002/91/CE.

Los requisitos mínimos de la certificación por el procedimiento de la opción simplificada son los valores asociados a tres conceptos: los parámetros característicos de los cerramientos (valores límite fijados en las tablas 2.2 del DB HE 1), la permeabilidad al aire de las carpinterías (apartado 2.3 del DB HE 1) y la contribución solar a la producción de agua caliente sanitaria (porcentajes previstos en el DB HE 4).

Otros componentes son los puentes térmicos formados por encuentros entre cerramientos. Para estos componentes no existe un requisito mínimo directo, pero sí uno indirecto ligado a la formación de condensaciones superficiales.

Los valores de la tabla 5.2 son los máximos valores de transmitancia lineal de los puentes térmicos compatibles con el *factor de temperatura superficial f,* limitado en el DB HE 1. Si las transmitancias lineales son superiores a las de la tabla, implica que no se está cumpliendo con la exigencia de limitación de condensaciones.



5.3.5 Requisitos del DB HE 1 para los cerramientos

Los requisitos incluidos en la Sección 1 del DB HE que afectan a los cerramientos, y que tienen como objetivo limitar la demanda energética del edificio y asegurar el confort térmico de los espacios habitables, se pueden agrupar en tres aspectos fundamentales: limitación de la demanda energética, limitación de condensaciones tanto superficiales como intersticiales y limitación de la permeabilidad al aire de las carpinterías.

Requisito del DB HE 1:
Limitación de la demanda energética

La demanda energética de los edificios se limita en función del clima de la localidad en la que se ubican y de la carga interna en sus espacios. Para ello, el DB HE 1 establece, en las ta-

Tabla 5.2 Transmitancia lineal máxima de los puentes térmicos en encuentros entre cerramientos

CASO	Transmitancia lineal máxima (W/(m•K))				
	Zona climática				
	A	B	C	D	E
Frente de forjado	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
Esquina horizontal entrante	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Esquina horizontal saliente	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Esquina saliente	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Hueco ventana	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Pilar	0,85	0,85	0,80	0,75	0,70
Esquina entrante	-0,10	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15
Unión solera pared exterior	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

*Fuente: *"Memoria de Cálculo correspondiente a la Opción Simplificada para la Calificación de Eficiencia Energética de Edificios de Viviendas"*, tabla 13. Publicada por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía).

92 La opción simplificada del DB SE1 se puede aplicar cuando se cumplen simultáneamente dos condiciones: que el porcentaje de huecos en cada fachada sea inferior al 60% de su superficie y que el porcentaje de lucernarios sea inferior al 5% de la superficie total de la cubierta. Como excepción se admiten porcentajes de huecos superiores al 60% en aquellas fachadas cuya área suponga un porcentaje inferior al 10% del área total de las fachadas del edificio

93 En localidades que no sean capitales de provincia y que dispongan de registros climáticos contrastados se pueden emplear zonas climáticas específicas, previa justificación según el DB HE 1, Apéndice D, artículo D.2 *"Determinación de la zona climática a partir de registros climáticos"*..

blas 2.2, unos valores límite para los parámetros característicos de los cerramientos y particiones interiores que componen la envolvente térmica del edificio. De esta forma, la demanda energética se limita indirectamente, si se consigue limitar el valor medio de los parámetros característicos a los límites establecidos.

Para determinar el nivel de exigencia de este requisito se establecen 12 zonas climáticas que se identifican mediante una letra (A, B, C, D ó E) que corresponde a la división en régimen de invierno, y un número (1, 2 ,3 ó 4) que corresponde a la división en régimen de verano. En el apéndice D del DB HE 1, tabla D.1 *"Zonas climáticas"* aparecen tabuladas las zonas correspondientes a todas las capitales de provincia del territorio nacional[93].

Los espacios habitables se clasifican, a su vez, en dos categorías, en función de la cantidad de calor disipada en su interior debido a la actividad realizada y al período de utilización de cada espacio: espacios con carga interna baja (en los que se disipa poco calor) y espacios con carga interna alta (en los que se genera gran cantidad de calor por causa de su ocupación, iluminación o equipos existentes). En general, todos los espacios de edificios de viviendas y los asimilables a éstos en su uso y dimensión se pueden categorizar como espacios de *carga interna baja.*

Los parámetros característicos que definen la envolvente térmica de un edificio se agrupan en distintos tipos. El parámetro que afecta a los cerramientos se denomina *transmitancia térmica de los muros de fachada* U_M, y su valor medio está limitado en una serie de tablas que corresponden a cada una de las zonas climáticas del territorio nacional (DB HE 1, tablas 2.2 "*Valores límite de los parámetros característicos medios"*), los cuales se reproducen de forma simplificada en la tabla 5.3.

Sin embargo, no es suficiente que el valor medio de la transmitancia de todos los cerramientos esté por debajo del límite establecido. Este requisito se debe conseguir de forma equilibrada ("*… para evitar descompensaciones entre la calidad térmica de diferentes espacios…"*), es decir, con una transmitancia de valor similar en cada uno de ellos. Por esta razón, el DB HE 1 incluye un requisito adicional que supone limitar, en cada uno de los cerramientos, el valor de la transmitancia a

un valor máximo establecido en la tabla 2.1 *"Transmitancia térmica máxima de cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica"*, que se reproduce parcialmente en la tabla 5.4.

El procedimiento de verificación mediante la opción simplificada supone comprobar que el valor de la transmitancia calculada para cada uno de los cerramientos no supera el límite del valor máximo de la transmitancia y que el valor medio de todos ellos no supera el límite del valor medio.

El cálculo de la transmitancia térmica total del cerramiento a partir de la resistencia térmica de cada uno de sus componentes está definido en el DB HE 1, apéndice E, artículo E.1 *"Transmitancia térmica"*.

Requisito del DB HE 1: Limitación de las condensaciones

La limitación del riesgo de condensaciones afecta tanto a las superficiales como a las intersticiales.

Limitación de las condensaciones superficiales

Las condensaciones superficiales se limitan para evitar la formación de mohos en la superficie interior de los cerramientos y particiones interiores que componen la envolvente térmica del edificio. Ello se consigue limitando la humedad relativa en aquellas superficies interiores de los cerramientos que puedan absorber agua o que sean susceptibles de degradarse, especialmente en los puentes térmicos.

El límite de la humedad relativa media mensual en dicha superficie se establece en el 80% (DB HE 1, artículo 2.2 *"Condensaciones"*, párrafo 1).

A efectos de esta comprobación los espacios habitables se caracterizan, en función del *exceso de humedad interior*, en categorías o clases de higrometría que van de 5 a 1. La máxima categoría (espacios de clase de higrometría 5) corresponde a espacios en los que se prevé gran producción de humedad, como lavanderías y piscinas. En general, todos los espacios de edificios residenciales se pueden incluir en la clase de higrometría 3 o inferior.

La comprobación de las condensaciones superficiales se fundamenta en la comparación de los dos parámetros siguientes:

- Factor de temperatura de la superficie interior f_{Rsi}, para las condiciones interiores y exteriores correspondientes al mes de enero de la localidad en la que se ubica el edificio (especificadas en el DB HE 1, Anejo G1 *"Condiciones para el cálculo de condensaciones")*.

- Factor de temperatura de la superficie interior mínimo $f_{Rsi,mín}$, tabulado en función de la categoría del espacio según su clase de higrometría en la tabla 3.2 del DB HE 1.

La comprobación de la limitación de condensaciones superficiales supone verificar que f_{Rsi} es superior a $f_{Rsi,mín}$. Para los cerramientos de los espacios de clase de higrometría 4 o inferior (prácticamente todos excepto lavanderías y piscinas), el cumplimiento de

Tabla 5.3 Límite del valor medio de la transmitancia de muros de fachada y cerramientos en contacto con el terreno U_M (W / m²•K))

	ZONAS A	ZONAS B	ZONAS C	ZONAS D	ZONAS E
Muros de fachada y cerramientos en contacto con el terreno	0,94	0,82	0,73	0,66	0,57

Tabla 5.4 Limite del valor máximo de la transmitancia de muros de fachada U_M (W / (m²•K))

Cerramientos y particiones interiores	ZONAS A	ZONAS B	ZONAS C	ZONAS D	ZONAS E
Muros de fachada	1,22	1,07	0,95	0,86	0,74

la transmitancia máxima permitida implica la verificación automática de la condición anterior. Por consiguiente sólo es necesaria la comprobación en los puentes térmicos. El método de cálculo del factor de temperatura superficial de los puentes térmicos está descrito en el DB HE 1, Apéndice G, artículo G.2.1.1.

Limitación de las condensaciones intersticiales

Las condensaciones intersticiales se limitan para que no se produzca una merma significativa en las prestaciones térmicas de los cerramientos o supongan un riesgo de degradación o pérdida de su vida útil. Además se debe comprobar que la máxima condensación acumulada en cada período anual no es superior a la cantidad de evaporación posible en el mismo período (DB HE 1, artículo 2.2 *"Condensaciones"*, párrafo 2).

El procedimiento para la comprobación de la formación de condensaciones intersticiales se fundamenta en la comparación de los siguientes parámetros:

- Presión de vapor existente P_v en cada punto intermedio del cerramiento formado por diferentes capas, para las condiciones interiores y exteriores correspondientes al mes de enero y especificadas en el Apéndice G del DB HE 1.

- Presión de vapor de saturación P_{sat} en los mismos puntos y para las mismas condiciones anteriores.

Para comprobar que no se producen condensaciones intersticiales se debe verificar que P_v es inferior a P_{sat} en la superficie de cada capa del cerramiento.

Están exentos de la comprobación los cerramientos que dispongan de barrera contra el paso de vapor de agua en la parte caliente del cerramiento, aunque en este caso se debe comprobar que la cantidad de agua condensada en cada período anual no es superior a la cantidad de agua que es posible evaporar en dicho período[94]. Salvo una justificación expresa en el proyecto es nula la cantidad de agua condensada que se permite en los materiales aislantes.

Requisito del DB HE 1: Limitación de la permeabilidad al aire

Se trata de una limitación indirecta de la demanda energética que afecta a las carpinterías de los huecos (ventanas y puertas).

El aire procedente del exterior por la infiltración a través de las carpinterías de los huecos exteriores necesita para calentarse una cantidad de energía proporcional a su volumen, a su calor específico y a la diferencia de temperatura entre los ambientes interior y exterior. Limitando la permeabilidad al aire de las carpinterías se limita indirectamente la demanda energética del edificio para mantener unas adecuadas condiciones de confort.

El DB HE 1, artículo 2.3 *"Permeabilidad al aire"*, párrafo 3, establece que la permeabilidad al aire de las carpinterías de los huecos de los cerramientos que limitan los espacios habitables de los edificios con el ambiente exterior, medida con una sobrepresión de 100 Pa, debe tener unos valores inferiores a 50 m^3 / ($h \cdot m^2$), para las zonas climáticas A y B; y 27 m^3 / ($h \cdot m^2$), para las zonas climáticas C, D y E.

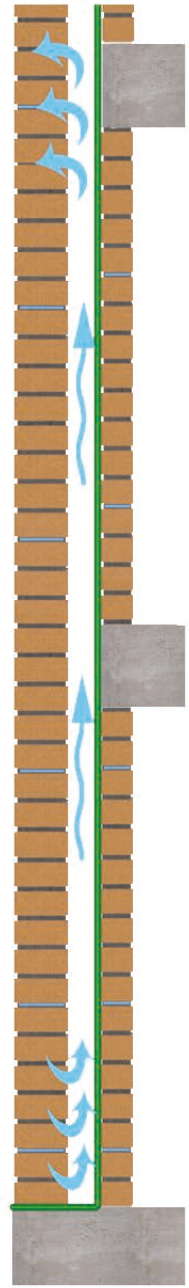
Se considera que cumplen este requisito los huecos de clase 1, 2, 3 y 4 para las zonas climáticas A y B; y los huecos de clase 2, 3 y 4 para las zonas climáticas C, D y E[95].

94 Para efectuar esta evaluación se debe repetir el procedimiento, pero para cada mes del año a partir de los datos climáticos del artículo G.1 del DB HE-1, y calcular en cada uno de ellos y para cada capa del material, la cantidad de agua condensada o evaporada según el proceso descrito en el apartado 6 de la norma UNE EN ISO 13788:2002.

95 La clasificación anterior es según la norma UNE EN 12207:2000 con ensayos según la norma UNE EN 1026:2000.

EJEMPLO 8

Fachada ventilada de ladrillo cara vista
Verificación de los requisitos del DB HE 1



Características constructivas:

- Hoja exterior del cerramiento tangente a la estructura (1/2 pie de ladrillo cara vista)
- Hoja interior de tabique de ladrillo cerámico hueco de 5 cm de espesor
- Cámara ventilada, mediante llagas sin mortero (cada 1,00 m), de 5 cm de espesor
- Aislamiento continuo de lana mineral revistiendo frentes de forjado y soportes

Caracterización de los materiales del cerramiento opaco:

- Las características parciales de cada capa y las totales del cerramiento se resumen en la tabla 5.5

Datos climáticos e higrométricos:

- Ubicación del edificio: Soria
- Zona climática: E1 [96]
- Clase de higrometría de los espacios: 3 (uso residencial)

Cálculo de la transmitancia:

El valor de la transmitancia U_M del cerramiento viene dado por la siguiente expresión (DB HE 1, Apéndice E, artículo E.1 *"Transmitancia térmica"*):

- $U_M = 1 / R_T$

siendo:

- $R_T \rightarrow$ la resistencia térmica total del cerramiento ($m^2 \cdot K / W$)

  con:

  $$R_T = R_{se} + R_1 + R_2 + ... + R_n + R_{si}$$

  siendo:

  - R_1, R_2 ... R_n $\rightarrow$ las resistencias térmicas de cada capa [$m^2 \cdot K / W$]
  - R_{se} y R_{si} $\rightarrow$ las resistencias térmicas superficiales correspondientes al aire exterior e interior, de valores 0,04 $m^2 \cdot K / W$ y 0,13 $m^2 \cdot K / W$, respectivamente.

La resistencia térmica de cada capa térmicamente homogénea viene definida por la siguiente expresión:

$$R = e / \lambda$$

siendo:

- $e \rightarrow$ el espesor de la capa [m]
- $\lambda \rightarrow$ la conductividad térmica del material que compone la capa [W / (m·K)]

Tomando los valores de la tabla 5.5 se tiene:

- Resistencia térmica total del cerramiento:

$$R_T = 0{,}13 + 0{,}026 + 0{,}112 + 1{,}22 + 0{,}09 + 0{,}172 + 0{,}04 = 1{,}79 \text{ m}^2\cdot\text{K} / \text{W}$$

- Transmitancia del cerramiento:

$$U_M = 1 / R_T = 0{,}56 \text{ W} / (\text{m}^2\cdot\text{K})$$

Tabla 5.5 Caracterización de los materiales del ejemplo 8

Capa	Conductividad térmica λ (W / (m•K))	Espesor e (m)	Resistencia térmica R (m²•K / W)	Resistividad al vapor μ (adimensional)	Espesor equivalente S_d =μ•e (m)
Superficie interior	-	-	0,13	-	-
Enlucido de yeso	0,570	0,015	0,026	6	0,09
Ladrillo cerámico hueco	0,445	0,050	0,112	10	0,50
Lana mineral	0,041	0,050	1,22	1	0,05
Cámara ligeramente ventilada		0,050	0,09	1	0,05
½ pie ladrillo cerámico perforado	0,667	0,115	0,172	10	1,15
Superficie exterior	-	-	0,04	-	-
Totales	**-**	**0,28**	**1,79**	**-**	**1,84**

Los datos de conductividad y resistencia al paso de vapor de los materiales se han tomado de la base de datos del programa LIDER. La resistencia térmica de la cámara ligeramente ventilada se ha evaluado como la mitad del valor indicado en la tabla E.2 *"Resistencias térmicas de cámaras de aire"* del Anejo E del DB HE 1.

Verificación de la conformidad con DB HE 1:

- Valor límite de los parámetros característicos medios: $U_{Mlím} = 0{,}57$ W / (m²·K) (Zona E)[97]

$$U_M = 0{,}56 \text{ W / (m}^2\text{·K)} < U_{Mlím} = 0{,}57 \text{ W /(m}^2\text{·K). VALE}$$

- Transmitancia térmica máxima de cerramientos: $U_{Mmáx} = 0{,}74$ W / (m²·K) (Zona E)[98]

$$U_M = 0{,}56 \text{ W / (m}^2\text{·K)} < U_{Mmáx} = 0{,}74 \text{ W /(m}^2\text{·K). VALE}$$

Esta condición se cumple automáticamente si se cumple la anterior, puesto que el límite establecido para los valores máximos es superior al límite establecido para los valores medios.

Evaluación del riesgo de condensaciones superficiales:

- Factor de temperatura de la superficie interior del cerramiento: $f_{Rsi} = 1 - U_M \cdot 0{,}25$ [99]
- Factor de temperatura de la superficie interior mínimo: $f_{Rsi,mín} = 0{,}64$ (Zona E; clase de higrometría 3) [100]

Verificación de la conformidad con DB HE 1:

- Utilizando el valor de U_M calculado anteriormente: $f_{Rsi} = 1 - U_M \cdot 0{,}25 = 0{,}86$

$$\mathbf{f_{Rsi} = 0{,}86 > f_{Rsi,mín} = 0{,}64 \text{ VALE}} \text{ (no hay riesgo de condensaciones superficiales)}$$

Si se observa la tabla 3.2 *"Factor de temperatura de la superficie interior mínimo"* del DB H 1 y se compara con los límites de transmitancia establecidos en las tablas 2.2 *"Valores límite de los parámetros característicos medios"* del mismo documento, se puede deducir que la exigencia de evitar condensaciones superficiales se cumple automáticamente para las clases de higrometría 4 e inferiores, si se cumple el limite de transmitancia establecido.

Sólo en espacios de higrometría muy elevada (clase 5), como pueden ser piscinas o lavanderías, es preciso restringir el límite de transmitancia por razón del riesgo de condensaciones superficiales, o utilizar soluciones constructivas que prevengan de la formación de mohos, como por ejemplo, alicatar las paredes de estos espacios.

Esta exigencia se debería comprobar, no obstante en los puentes térmicos. La base de datos del programa LIDER suministra los factores de temperatura superficial interior para los posibles puentes térmicos (integrados o no). Estos valores son sistemáticamente superiores a los valores mínimos establecidos para clases de higrometría 4 o inferior. Por consiguiente, el cumplimiento de esta exigencia en puentes térmico consiste en justificar que la temperatura real en la superficie interior del puente térmico es superior a la obtenida con el factor suministrado por el programa.

Es importante destacar que la solución constructiva del ejemplo supone construir la hoja exterior del cerramiento tangente a la estructura, lo que habilita la posibilidad de disponer aislamiento continuo, evitando la presencia de puentes térmicos debidos al paso por frentes de pilares (puentes integrados) y forjados (puentes no integrados).

Evaluación del riesgo de condensaciones intersticiales:

- Condiciones exteriores (correspondientes al mes de enero) (capital de provincia Soria)[101]:
  - Temperatura del ambiente exterior: 2,9°C
  - Humedad relativa media del ambiente exterior: 77 %
- Condiciones interiores (para todos los meses del año)[102]:
  - Temperatura del ambiente interior: 20°C
  - Humedad relativa del ambiente interior: 55 %
- *Distribución de temperaturas (artículo G.2.2.1 del DB HE 1)*

Se considera que la distribución de temperaturas en cada capa del cerramiento es lineal. La temperatura interior de cada capa se calcula repartiendo el salto térmico total entre los ambientes exterior e interior proporcionalmente a las respectivas resistencias térmicas de cada capa. Se incluyen en el cálculo las resistencias térmicas superficiales interior y exterior.

Según esto, la expresión general de la temperatura en la capa "n" es:

$$\theta_n = \theta_{n-1} + [(R_n / R_T) \cdot (\theta_i - \theta_e)]$$

siendo:

- $\theta_e \rightarrow$ la temperatura exterior media de la localidad en el mes de enero
- $\theta_i \rightarrow$ la temperatura del ambiente interior (20°C)
- $\theta_n \rightarrow$ la temperatura de la capa n
- $R_n \rightarrow$ la resistencia térmica de la capa n
- $R_T \rightarrow$ la resistencia térmica total del cerramiento

96 Según la tabla D.1 *"Zonas climáticas"* del apéndice D del DB HE 1.

97 Según las tabas 2.2 del DB HE 1.

98 Según tabla 2.1 del DB HE 1.

99 Según el artículo G.2.1.1 del DB HE 1.

100 Según tablas 3.2 del DB HE 1.

101 Según tabla G.2 *"Datos climáticos mensuales de capitales de provincia"* del DB HE 1.

102 Según el artículo G.1.2 *"Condiciones interiores"* del DB HE 1.

- *Distribución de la presión de vapor de saturación (artículo G.2.2.2 del DB HE 1)*

Se determina a partir de la distribución de temperaturas obtenida anteriormente, mediante las siguientes expresiones (artículo G.3.1 *"Cálculo de la presión de saturación de vapor"* del DB HE-1):

a. Si la temperatura t es mayor o igual a 0°C:

$$P_{sat} = 610{,}5 \cdot e^{\frac{17{,}269 \cdot \theta}{237{,}3+\theta}}$$

b. Si la temperatura t es menor de 0°C:

$$P_{sat} = 610{,}5 \cdot e^{\frac{21.875 \cdot \theta}{265{,}5+\theta}}$$

- *Distribución de la presión de vapor (artículo G.2.2.3 del DB HE-1)*

Se calcula de forma análoga a la distribución de temperaturas, repartiendo la diferencia de presiones entre los ambientes exterior e interior proporcionalmente a las respectivas resistencias a la difusión de vapor.

Según esto, la expresión general de la presión de vapor en la capa "n" es:

$$P_n = P_{n-1} + [(S_{dn} / \sum S_{dn}) \cdot (P_i - P_e)]$$

siendo:

- $P_e \rightarrow$ la presión de vapor del aire exterior [Pa]
- $P_i \rightarrow$ la presión de vapor del aire interior [Pa]
- $P_n \rightarrow$ la presión de vapor en la capa n [Pa]
- $S_{dn} \rightarrow$ la resistencia térmica de la capa n, expresada como el espesor de aire equivalente [m]

  donde: $\rightarrow S_{dn} = e_n \cdot \mu_n$

  siendo:

  - $e_n \rightarrow$ el espesor de la capa n [m]
  - $\mu_n \rightarrow$ el factor de resistividad a la difusión de vapor de la capa n referido al factor de resistividad del aire en reposo [adimensional]

El cálculo analítico de P_i y de P_e en función de la temperatura y de la humedad relativa se puede realizar con las siguientes expresiones:

$$P_i = \Phi_i \cdot P_{sat}(\theta_i)$$
$$P_e = \Phi_e \cdot P_{sat}(\theta_e)$$

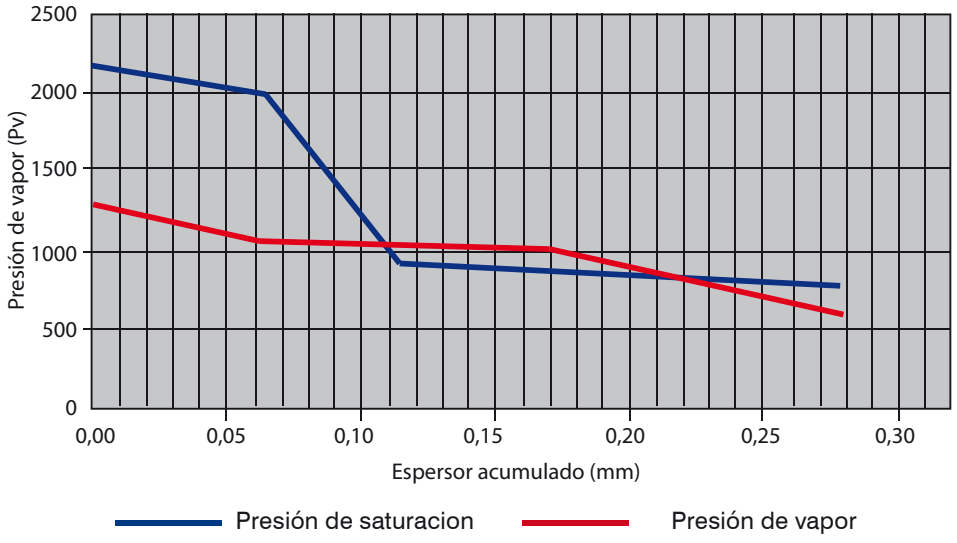
siendo:

- $\Phi_i \rightarrow$ la humedad relativa del ambiente interior (en tanto por 1) (0,55 para clase de higrometría 3)
- $\Phi_e \rightarrow$ la humedad relativa del ambiente exterior (en tanto por 1)

Tabla 5.6 Estudio del riesgo de condensaciones intersticiales del ejemplo 8

Capa	e (m)	R (m^2•K / W)	μ (-)	S_d = μ•e (m)	T (°C)	P_{sat} (Pa)	P_v (Pa)	CONDENSA
Ambiente interior					20	2337	1285	NO
Superficie interior	-	0,13	-	-	18,76	2163	1285	NO
Enlucido de yeso	0,015	0,026	6	0,09	18,51	2130	1251	NO
Ladrillo cerámico hueco	0,050	0,112	10	0,50	17,43	1991	1059	NO
Lana mineral	0,050	1,22	1	0,05	5,79	921	1040	SI
Cámara ligeramente ventilada	0,050	0,09	1	0,05	4,93	868	1020	SI
Ladrillo cerámico perforado	0,115	0,172	10	1,15	3,28	773	579	NO
Superficie exterior	-	0,04	-	-	2,90	752	579	NO
Ambiente exterior					2,90	752	579	NO
Totales	**0,28**	**1,79**	**-**	**1,84**				

Utilizando los valores de la tabla 5.5 (espesores, resistencias térmicas y resistividades al paso de vapor), y para las condiciones interiores y exteriores correspondientes al mes de enero en la capital de provincia de Soria, se obtienen los resultados de temperatura, presión de vapor de saturación y presión de vapor en cada capa del cerramiento que se resumen en la tabla 5.6.



Gradiente térmico y cálculo de condensaciones

Tabla 5.7 Estudio del riesgo de condensaciones intersticiales del ejemplo 8 con poliestireno extruido

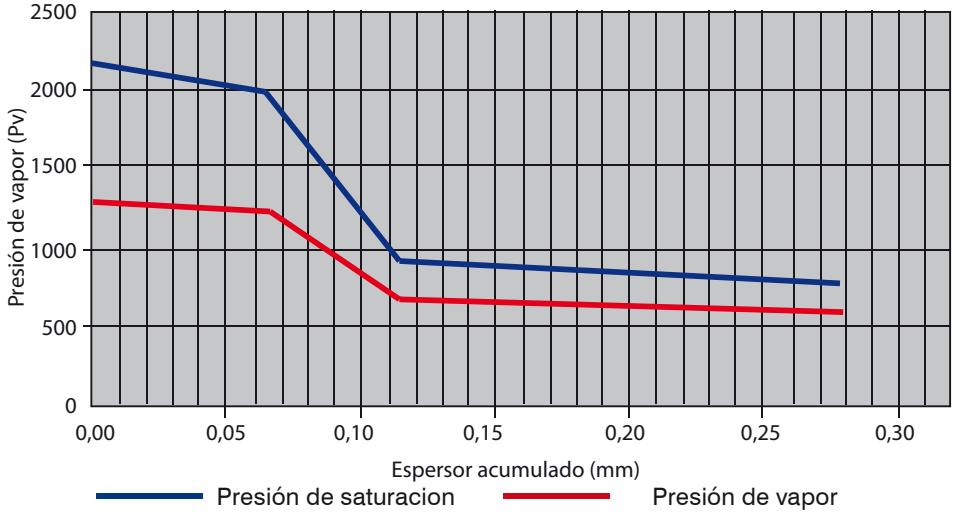
Capa	e (m)	R (m^2•K / W)	μ (-)	S_d = μ•e (m)	T (°C)	P_{sat} (Pa)	P_v (Pa)	CONDENSA
Ambiente interior					20	2337	1285	NO
Superficie interior	-	0,13	-	-	18,82	2172	1285	NO
Enlucido de yeso	0,015	0,026	6	0,09	18,58	2140	1278	NO
Ladrillo cerámico hueco	0,050	0,112	10	0,50	17,57	2007	1238	NO
Poliestireno extruido	0,050	1,32	140	7,00	5,64	912	675	NO
Cámara ligeramente ventilada	0,050	0,09	1	0,05	4,83	861	671	NO
Ladrillo cerámico perforado	0,115	0,172	10	1,15	3,26	772	579	NO
Superficie exterior	-	0,04	-	-	2,90	752	579	NO
Ambiente exterior					2,90	752	579	NO
Totales	**0,28**	**1,89**	**-**	**8,79**				

Verificación de la conformidad con DB HE-1:

La presión de vapor del aire en la cámara es superior a la presión de saturación, por consiguiente existe riesgo de condensaciones intersticiales. Además, la condensación afecta también al aislante térmico, lo cual no se permite. Por consiguiente no se verifica esta exigencia.

Las soluciones a adoptar en este caso son: aumentar el espesor del aislamiento, colocar una barrera de vapor para que la humedad no llegue al aislamiento o utilizar un material aislante con mayor resistividad a la difusión de vapor. La más eficaz de todas ellas es la última.

Si se sustituye el aislamiento de lana mineral por un aislamiento de poliestireno extruido, manteniendo el espesor, pero con una capacidad aislante algo mayor y, sobre todo, con una resistividad a la difusión de vapor mucho mayor[103], los resultados del análisis son los indicados en la tabla 5.7.



Gradiente térmico y cálculo de condensaciones

La presión de vapor del aire en todas las capas del cerramiento se mantiene por debajo de la presión de saturación, por lo tanto NO HAY RIESGO DE CONDENSACIONES INTERSTICIALES.

5.3.6 Puentes térmicos

Los *puentes térmicos* son las zonas de la envolvente térmica del edificio que presentan discontinuidades o irregularidades en su composición y que, salvo en muy raras ocasiones, suponen una pérdida de la capacidad aislante del cerramiento.

Aunque se habla genéricamente de *puente térmico* cada vez que existe un punto singular en la composición del cerramiento, es importante distinguir dos tipos diferentes de puentes térmicos, puesto que su tratamiento en el análisis es totalmente distinto.

El análisis higrotérmico descrito en el DB HE 1 y expuesto de forma simplificada en los apartados anteriores, supone implícitamente que el flujo de calor a través de las capas de un cerramiento se produce en una única dirección, perpendicular al plano de la superficie. Ello permite un análisis unidimensional del fenómeno a través de capas paralelas sucesivas. Si en alguna zona se interrumpe el aislamiento o el cerramiento modifica su espesor, se puede hacer el estudio particularizado para esa zona e integrar la repercusión que ello tiene en el cómputo de la transmisión global. Es el caso de los *puentes térmicos integrados* que, aunque suponen un punto singular, su estudio se puede hacer con el mismo procedimiento unidimensional utilizado para el cerramiento genérico, sin más que modificar el valor de la conductividad o espesor de sus capas.

Sin embargo, siempre existen encuentros del cerramiento con otros elementos constructivos que suponen un comportamiento bidimensional o tridimensional, cuyo análisis es mucho más complicado. Es el caso de los *puentes térmicos no integrados* y se producen en los encuentros con elementos que no están en el plano del cerramiento. La repercusión que suponen estos puntos singulares no se puede *integrar* en el cómputo global de la transmisión del cerramiento, y su análisis se debe realizar por un método de aproximaciones sucesivas o por el método de *elementos finitos*.

Los principales puentes térmicos integrados de los cerramientos son los que se producen en la formación de huecos (mochetas, dinteles, alféizares y cajas de persiana), los nichos de radiadores y el encuentro con pilares. Los principales puentes térmicos no integrados son el encuentro con los forjados y las esquinas.

El efecto de los puentes térmicos no sólo es una pérdida de la capacidad aislante del cerramiento y la consiguiente pérdida de eficiencia energética que ello supone; el efecto más peligroso es que constituyen puntos extraordinariamente propensos a la condensación, por lo que se deben extremar las precauciones en el detalle constructivo correspondiente. Aunque el DB HE 1 sólo obliga a introducir en el análisis de la demanda energética la repercusión que suponen los puentes integrados, es importante, al menos desde el punto de vista constructivo, tener en consideración las medidas encaminadas a prevenir el riesgo de aparición de condensaciones en todos ellos.

La elección del sistema constructivo del cerramiento es crucial para su comportamiento higrotérmico, sobre todo en el encuentro con los elementos estructurales. Los sistemas que eviten estrangular el cerramiento o modificar su composición en estos encuentros evitan todos los problemas derivados de la solución del detalle constructivo.

En las soluciones de cerramiento *"autoportante"* no existe el típico punto conflictivo que supone el encuentro con el forjado. Tampoco existen perfiles angulares o elementos de apoyo de los paños que interrumpen la continuidad de la cámara. En este tipo de soluciones, tanto la hoja exterior como la cámara de aire, si existe, pasan por delante de los forjados manteniendo todo el espesor, y la colocación del aislante puede ser continua. Las soluciones de *cerramiento autoportante* no presentan, por tanto, el típico puente térmico del *frente de forjado*.

En las soluciones convencionales de cerramiento apoyado parcialmente en cada planta, cuando se emplean plaquetas de ladrillo para ocultar el canto del forjado, este punto constituye un puente térmico que puede ser evitado teóricamente colocando un material aislante entre la plaqueta y el forjado [104].

103 El poliestireno tiene una conductividad térmica $\lambda = 0{,}038$ W / (m²•K) según la base de datos del programa LIDER. Se ha tomado un valor de resistividad al paso de vapor de $\mu = 140$, que es bastante conservador para el poliestireno extruido.

104 Una solución para aislar el frente de forjado consiste en disponer una plancha rígida de poliestireno en el encofrado. El material aislante debe ser muy resistente a la compresión, puesto que debe sufrir los esfuerzos derivados del proceso de hormigonado y tener una superficie de trasdós muy adherente para que quede unido al hormigón cuando fragua.

Aislamiento de panel rígido machi-hembrado con separadores

Sin embargo, esta solución, cuando la hoja exterior es de ½ pie de espesor sólo es factible desde el punto de vista teórico. El compromiso entre los requisitos de estabilidad y aislamiento no permite espesores viables de las plaquetas. La práctica habitual consiste en prescindir del aislante en el canto del forjado para no reducir el ancho de entrega del muro o el espesor de las plaquetas, que comprometería, en el primer caso la estabilidad del muro y, en el segundo caso, la estabilidad de las plaquetas[105]. En esta situación, el puente térmico sólo se puede evitar desde el interior del edificio, colocando el material aislante cerca del cerramiento en el suelo y techo, aunque ello no siempre es posible y casi nunca se hace.

La caja de persiana representa otro típico puente térmico, no sólo como consecuencia de la disminución del espesor del muro sino también debido a las filtraciones del aire a través de la rendija de las persianas y las aberturas de manejo, sobre todo cuando la caja tiene conexión directa con la cámara de aire. El análisis de la caja de persiana se debe realizar considerando que se trata de una *cámara muy ventilada,* por lo que sólo contabiliza en el cómputo de la transmitancia el aislamiento colocada en la parte interior.

El puente térmico producido cuando la cámara de aire es atravesada por el alféizar de la ventana se puede evitar interponiendo aislamiento entre el alféizar y la hoja interior. De la misma manera, el puente ocasionado por el nicho de los radiadores, cuando éstos se empotran en el muro reduciendo su sección, se evita con capas adicionales de material aislante, para conseguir que la sección debilitada del muro tenga un coeficiente de aislamiento térmico similar al de la sección regular.

5.3.7 Posición del material aislante

La posición relativa del aislamiento térmico en un muro multicapa no tiene trascendencia en el cómputo de las pérdidas de calor, que son función de la transmitancia total, sea cual sea la posición relativa de cada capa.

Sin embargo, en el estudio del comportamiento higrotérmico del cerramiento, interviene decisivamente la temperatura que alcanza cada capa, directamente relacionada con su posibilidad de disipar vapor o condensarlo. Desde este punto de vista, y también desde el punto de vista de eliminar o reducir el peligro de condensación que suponen los puentes térmicos, es fundamental considerar, no sólo las propiedades del material aislante incorporado, sino su posición relativa en el muro, puesto que constituye la capa que divide al cerramiento en dos partes de comportamiento totalmente diferente: la parte fría y la parte caliente.

El aislamiento térmico se puede colocar en tres zonas dentro de un cerramiento: en la envolvente exterior del edificio, en la envolvente interior o en una capa intermedia. En general, la posición que se adopte depende de la solución de proyecto del cerramiento y está condicionada por la posibilidad de colocación del material aislante según el proceso constructivo de la solución completa.

Aislamiento en la envolvente exterior

El aislamiento colocado en la envolvente exterior del edificio supone la mejor situación para la eliminación de los puentes térmicos y para aprovechar al máximo la inercia térmica del cerramiento.

Esta disposición tiene, como contrapartida, el inconveniente de que el material aislante queda sometido a la intemperie, por lo que debe estar especialmente protegido contra la acción del agua, el viento y los rayos ultravioletas.

Esta posición es la habitual en los cerramientos con cámara muy ventilada[106]. En este caso es importante utilizar materiales no combustibles (por ejemplo, lanas minerales) o compartimentar la cámara con barreras de fuego para evitar la combustión del material aislante en caso de incendio.

Aislamiento en la envolvente interior

Si el aislamiento se coloca en la envolvente interior del edificio, lo que antes se describían como ventajas, en relación a los puentes térmicos, la inercia térmica y las condiciones de protección, pasan a ser inconvenientes y viceversa. El material aislante queda totalmente protegido del ambiente exterior, pero debe hacer frente a las agresiones procedentes del interior.

Con esta solución los puentes térmicos del cerramiento tienen la máxima repercusión, al quedar el cerramiento en su totalidad en la parte fría. Probablemente se producirán condensaciones intersticiales cuyos efectos no se pueden paliar interponiendo barreas de vapor.

La inercia térmica del cerramiento, en este caso, es mínima y ello supone un inconveniente para las estancias de utilización en régimen permanente, pero constituye una ventaja para los edificios de uso intermitente, puesto que prácticamente toda la calefacción

105 El recurso al uso de interponer angulares en los frentes de forjado no restituye la estabilidad del muro cuando ésta se consigue por confinamiento. La estabilidad por confinamiento requiere *entrega* contra un *elemento cargado*, y se precisa tanto en cabeza como en base. El *apoyo* contra un *elemento adosado* no sirve como solución alternativa a no ser que se consiguiera implicar al angular en el transporte de cargas gravitatorias del forjado. Si, además, se dispone una junta horizontal contra el angular en la cabeza del muro, como preconizan algunos manuales todavía al uso, no sólo se destruye el *efecto arco*, sino que quedan muy mermadas las condiciones de sustentación para poder analizar la estabilidad y resistencia por *efecto placa* (Ver *"Requisito de seguridad estructural"*).

106 Es importante destacar que en las *fachadas ventiladas*, en las que el material de revestimiento se dispone con *junta seca*, las condiciones interiores de la cámara (humedad, temperatura, viento, agua de escorrentía, etc.) son prácticamente las mismas que las condiciones del ambiente exterior. El material aislante es el primer elemento de la fachada que recibe el impacto de las agresiones exteriores de esta naturaleza.

se utiliza en calentar el ambiente interior y sólo una mínima parte se disipa en calentar el revestimiento interior del aislamiento.

La solución de incorporar aislamiento en el interior de los locales requiere una instalación muy sencilla, aunque no suele ser producto de una especificación de proyecto para edificios de obra nueva, por su baja eficiencia energética. Su campo de aplicación está restringido al acondicionamiento de locales en obras de rehabilitación, a los que se les puede dar una rápida respuesta térmica, interviniendo desde el interior del edificio.

Aislamiento en una capa intermedia

En las soluciones convencionales de cerramiento, el procedimiento más utilizado es la colocación del aislante en el espacio intermedio de las hojas constitutivas del elemento; en este caso la inercia térmica es media y el material aislante queda protegido por dentro y por fuera. El estudio higrotérmico de la solución constructiva completa da una idea de las protecciones o barreras adicionales que se requieren, en función del tipo de aislante utilizado, para un correcto funcionamiento frente a la humedad, tanto de la que procede del exterior, como de la condensación intersticial debida al vapor procedente del interior.

En primer lugar, es importante considerar que la humedad modifica el comportamiento de algunos de los materiales aislantes, sobre todo de los compuestos por fibras minerales, provocando que pierdan una gran parte de su resistividad térmica. Por ello, cuando se utilizan estos productos, es conveniente procurar que exista una barrera impermeable para el agua que pueda penetrar esporádicamente del ambiente exterior y evitar así que llegue al material aislante. Puede servir una cámara de aire ventilada o un revestimiento de mortero hidrófugo del intradós, si no existe cámara ventilada.

Si la solución constructiva prevé cámara de aire, como una protección adicional del aislamiento térmico frente a la humedad procedente del exterior, la posición correcta del material aislante debe ser adosada a la hoja interior. En cerramientos de ladrillo cara vista, esta circunstancia obliga, o bien a construir la hoja exterior en último lugar, extremando las precauciones para que no caiga mortero en la cámara, o bien utilizar como aislamiento productos con formato de planchas rígidas autoportantes que deben quedar convenientemente separadas de la hoja exterior para mantener el ancho especificado de cámara.

En zonas de elevada severidad climática en régimen de invierno, es posible que exista riesgo de condensación intersticial y se precise la colocación de una barrera de vapor en la cara caliente del cerramiento. Los materiales aislantes de lanas minerales suelen llevar incorporada una barrera laminar para este fin, que es importante que quede colocada en la *cara caliente* del cerramiento[107]. Los materiales de espumas orgánicas calificados como *higrotérmicos,* de estructura celular cerrada, tales como el poliestireno extruido, tienen una elevada resistencia a la absorción por lo que no precisan ninguna barrea ni cámara adicional[108]. Pueden quedar emparedados en el interior de las dos hojas del cerramiento, o adosados a la hoja interior si existe cámara de aire adicional, cumpliendo por sí solos las funciones de aislamiento, barrera de vapor e impermeabilización.

Otro criterio importante está relacionado con la posibilidad de transpiración de la hoja exterior del cerramiento, que es una propiedad deseable para que parte de la humedad interior se disipe a través del muro, pero que puede entrar en contradicción con el requisito de estanquidad frente al agua procedente del exterior.

El criterio para compatibilizar las exigencias de estanquidad y prevención de condensaciones intersticiales es situar las barreras de vapor lo más cerca posible del ambiente interior. La colocación de una cámara de aire ligeramente ventilada entre el aislamiento y el muro exterior constituye una protección adicional del material aislante frente a la humedad sin mermar la permeabilidad del muro exterior. Si se recurre a sustituir la cámara por un enfoscado del intradós del muro, se debe realizar con un mortero que impida el paso del agua en estado líquido pero que sea permeable al agua en estado gaseoso. En este sentido, la práctica de proyectar espuma aislante o adosar el aislamiento en el intradós de la hoja de cerramiento exterior no es aconsejable porque impide la transpiración del muro hacia la cámara de aire, con riesgo de aparición de manchas en la fachada, debido a que el secado producido sólo a través de la hoja exterior es mucho más lento. Esta solución también produce riesgo de aparición de humedades a nivel del forjado, tanto en el tabique interior, como en el exterior de la fachada[109].

5.4 Requisito de protección contra el ruido

Con la entrada en vigor del Código Técnico (Real Decreto 1371 de 19 de octubre, BOE 23/10/2007 y Texto con la corrección de errores BOE 25/01/2008), las características de aislamiento acústico de los edificios se han convertido en requisitos que puede modificar sustancialmente algunos aspectos de la construcción tradicional para el cumplimiento de la normativa.

Las exigencias que impone el nuevo Código Técnico de la Edificación en lo referente al acondicionamiento acústico de los edificios son mayores que las existentes en la normativa vigente hasta el momento. En general, prácticamente todos los valores de aislamiento requeridos han aumentado, además de ser necesario utilizar procedimientos de verificación más sofisticados y con mayor número de variables que los definidos en la antigua norma básica NBE CA-88, lo cual parecía inminente ante la necesidad de reducir el desfase existente en nuestro país con las prestaciones que exige el mercado y, sobre todo, con las implementadas en el resto de los países comunitarios[110].

Debido a que el Código Técnico es prestacional y, en lo que se refiere a los requisitos de confort acústico, está habilitada la posibilidad de solicitar mediciones *"in situ"* para verificar el cumplimiento de las prestaciones exigidas, con unos márgenes de tolerancia muy reducidos, es preciso estudiar a fondo todas las variables que influyen en el fenómeno físico de transmisión del ruido, y sobre todo intervenir en las posibles fuentes del edificio que lo producen. En este sentido, se deben incorporar en el análisis factores que antes sólo se trataban desde una óptica cualitativa encaminada a la prevención, como son la influencia de las instalaciones, los ascensores y los aparatos de aire acondicionado.

En lo que afecta a los cerramientos de fachada la nueva normativa incorpora una dificultad adicional, puesto que el requisito de aislamiento exigido depende del nivel de ruido exterior declarado por la Administración y todavía no está disponible una buena parte de la documentación necesaria para incorporar en el análisis.

Los tipos que describe como elementos de separación el Documento Básico de *Protección frente al Ruido*[111] no constituyen en absoluto una relación exhaustiva. Describe los casos de particiones interiores de una unidad de uso o entre unidades de uso diferentes, pero en lo que se refiere a elementos constructivos de fachada es preciso recurrir a un estudio particularizado del elemento, respaldado con los ensayos correspondientes, en la mayoría de los casos en los que se desea incorporar alguna solución constructiva no convencional.

Además, en los cerramientos de fachada intervienen numerosos componentes de diferente procedencia en el sector industrial, como son los acristalamientos (caracterizados por numerosos ensayos de laboratorio), las carpinterías, las cajas de persiana (cuyos resultados de ensayos son poco significativos si se instalan de forma diferente a la muestra ensayada), los aireadores (de los que todavía no existe tradición en cuanto a su empleo), etc. En muchos casos de elevados niveles

107 Es necesario destacar que esta barrera laminar colocada en la cara caliente del cerramiento es para impedir el paso de vapor desde el interior, pero no sustituye a la barrera impermeable que se requiere para proteger a los materiales aislantes de estructura abierta del agua procedente del exterior.

108 El poliestireno extruido tiene una resistividad al paso de vapor del orden de 500 MN·s / (g·m). Con un espesor mínimo de 3 cm se consigue una resistencia al paso de vapor de 15 MN·s / g, superior al valor mínimo de 10 MN·s / g utilizado en el DB HS para caracterizar a los materiales utilizables como *barrera contra el paso de vapor*.

109 Ello se debe a que si, por defecto de estanquidad, el agua de lluvia atraviesa el muro y discurre por la superficie de contacto con la espuma, puede llegar directamente al forjado, manifestándose al exterior.

110 Esencialmente la exigencia de aislamiento a ruido aéreo entre distintos usuarios ha experimentado un notable aumento a 50 dBA, y ante ruido urbano el aumento puede ser incluso más significativo dependiendo del nivel de ruido de la zona urbanística. Además se exige un acondicionamiento acústico para controlar el tiempo de reverberación en aulas y restaurantes

111 En adelante DB HR.

de ruido urbano exterior la solución constructiva del cerramiento supone intervenir en el tipo de vidrio de las ventanas y en las prestaciones acústicas de cada una de ellas.

Todo ello significa que la aprobación de la nueva normativa sobre calidad acústica no sólo afecta de forma importante a la fase de redacción de los proyectos, sino que también exige una mayor calidad en la ejecución de la obra y, sobre todo, un esfuerzo de adaptación por parte de los fabricantes de productos y sistemas a los criterios y exigencias del nuevo Código para dar una respuesta satisfactoria a la demanda del mercado.

En los apartados que siguen a continuación se trata de exponer de la forma más sencilla posible los fundamentos físicos del fenómeno de transmisión de ruido, resumiendo el complicado tratamiento matemático y haciendo especial hincapié en lo que se refiere a la transmisión de ruido aéreo a través de cerramientos verticales, con objeto de facilitar su aplicación a los casos no tabulados explícitamente en la normativa.

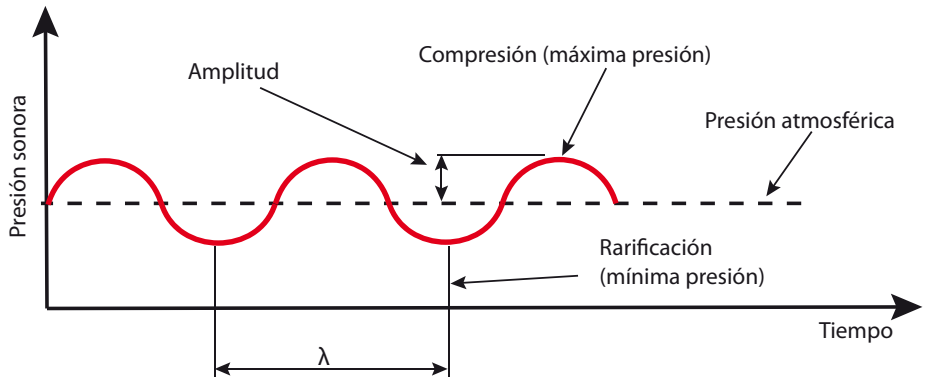
5.4.1 Conceptos básicos sobre la transmisión del sonido

Descripción física del sonido

En una acepción coloquial se entiende por *sonido* una variación de la presión ambiental que se propaga en forma de ondas, perceptible para el oído humano. Con mayor precisión y generalidad se puede definir el sonido como una perturbación que se propaga en forma de onda sonora a través de un medio elástico, produciendo variaciones de presión o vibraciones de partículas que pueden ser percibidas por el oído humano o por instrumentos específicos para tal fin[112].

Los parámetros que caracterizan el sonido son los que definen las ondas sonoras, es decir, la presión o amplitud, el período, la frecuencia y la longitud de onda.

La *presión acústica (p)* es la variación de la presión ambiental. En un movimiento vibratorio, es la magnitud que mide la amplitud de la onda. En general tiene valores muy pequeños, por lo que su unidad de medida es el pascal [Pa] ($1\,Pa = 1\,N/m^2 = 10\,\mu bar = 10^{-5}\,kg/cm^2$).



Descripción de movimiento vibratorio

El *período (T)* es el tiempo que tarda una oscilación en realizar un ciclo completo y se mide en segundos [s]. El número de variaciones de presión o ciclos por segundo es la *frecuencia (f)* del sonido; por consiguiente es la inversa del período: $f = 1 / T$. Se mide en ciclos por segundo [c.p.s], unidad que se denomina *hercio* [Hz] (1 HZ es un ciclo por segundo). A veces el parámetro que se utiliza es la frecuencia angular o *pulsación* (ω) que es el ángulo medido en radianes que se recorre en un segundo ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$).

La longitud de onda (λ) es la distancia que recorre una onda en el tiempo correspondiente a un período. Por lo tanto está relacionada con la velocidad de propagación *"c"* y con el período *"T"* o con su inverso, la frecuencia "f" ($\lambda = c \cdot T = c / f$). Se mide en metros [m].

Propagación del sonido

La *velocidad de propagación (c)* es la velocidad con que se propagan las ondas sonoras. Siempre lo hacen en la dirección perpendicular a la superficie vibrante y, dentro de unos grandes límites, esta velocidad es independiente de la presión acústica. Depende de las condiciones ambientales (presión y temperatura) y, sobre todo, del medio en el que se propaga o *"campo acústico"*. Para un ambiente normal (1 atm de presión y 20°C de temperatura) la velocidad de propagación del sonido puede oscilar entre 340 m/s si el medio es el aire, 1.460 m/s si es el agua y 6.000 m/s si se trata de vidrio.

Por analogía con la corriente eléctrica, se denomina *impedancia acústica (Z)* a la facilidad que presenta cada medio (sólido, líquido o gaseoso) a la propa-

gación del sonido. Se define como el cociente entre la presión acústica *"p"* y la velocidad de propagación *"c"* en un medio determinado (Z = p / c).

Para el caso de ondas planas se puede expresar también como:

$$Z = r \cdot c$$

siendo:

- $\rho \rightarrow$ la masa volumétrica del medio (densidad)
- $c \rightarrow$ la velocidad de propagación del sonido

También por analogía con la corriente eléctrica, la impedancia acústica se mide en Ohmios Acústicos [g / (s·cm^2)], aunque es más frecuente utilizar como unidad de medida el Rayl [Pa·s / m]. La equivalencia es: 1 Ohmio Acústico = 10 Rayls. En los gases, la impedancia acústica está comprendida entre 427 Rayls [Pa·s / m] para el aire a 0°C y 235 Rayls [Pa·s / m] para el vapor de agua. En los sólidos el valor oscila mucho de un material a otro, como ejemplo se citan $Z = 400 \cdot 10^5$ Rayls para el acero y $Z = 100 \cdot 10^5$ Rayls para el mármol. La impedancia acústica del agua es diez veces menor (en torno a $150 \cdot 10^4$ Rayls).

El procedimiento más habitual para representar gráficamente el sonido o la perturbación es el *oscilograma*, que indica la evolución en el tiempo de la presión e informa sobre la frecuencia y longitud de onda.

Percepción del sonido

La percepción del sonido está relacionada con dos parámetros fundamentales: la frecuencia, que indica lo rápido que es el cambio de presión en el aire, y la intensidad, relacionada directamente con la magnitud de los cambios de presión.

El oído humano percibe las variaciones de presión cuando la frecuencia está comprendida entre 20 Hz y 20.000 Hz[113]. El aspecto de la sensación sonora que se mide objetivamente en función de la frecuencia es el *tono*. Cada frecuencia de sonido produce un tono distinto; un sonido de una única frecuencia se denomina *tono puro*, aunque en la práctica los tonos puros se encuentran muy raramente y la mayoría de los sonidos están generados por la superposición de numerosas frecuencias.

La banda de frecuencias audibles se descompone en tres regiones: frecuencias bajas (percibidas como tonos graves), medias y altas (percibidas como tonos agudos). Las frecuencias inferiores a las sentidas por el oído corresponden a los *infrasonidos* y las superiores a los *ultrasonidos*.

< 20 Hz	20 - 400 Hz	400 - 1.600 Hz	1.600 - 20.000 Hz	> 20.000 Hz
Infrasonidos	**Sonidos graves**	**Sonidos medios**	**Sonidos agudos**	**Ultrasonidos**

112 El sonido se genera por una perturbación en la presión del aire produciendo un movimiento armónico simple de las partículas, asociado a una gráfica sinusoidal. Por ejemplo, si se mueve el aire hacia adelante y hacia atrás con el parche de un tambor, las partículas de aire se empujan entre sí provocando una compresión del medio. Cuando vuelven a su posición de equilibrio se produce una depresión o rarificación. Este proceso se repite con al aire circundante generando una onda de presión que se propaga hasta impresionar al oído humano que lo capta como sonido. El *frente de onda* es la superficie esférica envolvente de las partículas que han comenzado a vibrar en el mismo instante y se encuentran en la misma fase o estado de vibración.

113 Los estudios de aislamiento acústico se realizan para frecuencias comprendidas entre 125 Hz y 4.000 Hz.

No todas las variaciones de presión ambiental son percibidas como sonidos. Para que el oído comience a percibir un sonido, la presión acústica debe ser, al menos, de $2 \cdot 10^{-4}$ μbar ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa). Esto es lo que se denomina *umbral de audición*. Cuando la presión acústica supera los 103 μbar (10 Pa), el oído puede sufrir lesiones irreversibles. Esto es lo que se denomina *umbral doloroso*.

El otro aspecto de la sensación sonora que proporciona el oído humano es la *intensidad*, que es una magnitud proporcional al cuadrado de la amplitud o variación de la presión sonora. La intensidad es lo que el oído percibe como volumen, y técnicamente, se define como la potencia acústica transferida por una onda sonora por unidad de superficie normal a la dirección de propagación. Se mide en [W/m^2]. En la escala de intensidades, el *umbral de audición* corresponde a 10^{-12} W/m^2 y el *umbral doloroso* comienza cuando la intensidad supera aproximadamente 10 W/m^2.

De lo anterior se deduce que el rango de sonido que el oído humano puede percibir es enorme. En términos de intensidad o *volumen*, el oído puede captar sin sufrir daños un sonido aproximadamente 10 billones de veces más fuerte que el mínimo que puede percibir. Además, la sensación de sonido no aumenta en la misma proporción que aumenta la presión o intensidad acústica.

La ley de Weber-Fechner establece la relación entre la presión acústica y la sensación que percibe el oído: "*Nuestras impresiones sonoras varían según una progresión aritmética cuando las excitaciones físicas que las causan varían según una progresión geométrica*". Por ejemplo, para el oído humano, una sensación de aumento de volumen de 1 a 2 significa en términos de presión un aumento de 10 a 100.

Por esta razón se recurre a representar en escalas logarítmicas las magnitudes acústicas, de forma similar a la sensación que los sonidos producen en nuestro oído. La expresión de estas magnitudes en escala logarítmica, referidas al nivel de sensación mínimo o *umbral de audición*, tiene la notación de *decibelio*.

Así, el nivel sonoro producido por una presión acústica P, en *decibelios*, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$L = 20 \cdot \log (P / P0) \text{ [dB]}$$

siendo:

- $P_0 \rightarrow$ presión acústica del umbral de audición ($= 2 \cdot 10^{-5}$ Pa)
- $L \rightarrow$ nivel sonoro en decibelios [dB]

El nivel sonoro correspondiente a una intensidad acústica I, debido a que la intensidad es proporcional al cuadrado de la presión o amplitud de la onda, se escribe mediante la siguiente expresión:

$$L = 10 \cdot \log (I / I_0) \text{ [dB]}$$

siendo:

- $I_0 \rightarrow$ intensidad acústica del umbral de audición ($= 10^{-12}$ W/m^2)
- $L \rightarrow$ nivel sonoro en decibelios [dB]

Tanto en la escala de presiones como en la escala de intensidades, el valor de referencia o decibelio cero es la menor cantidad de sonido en el aire que puede percibir el oído humano, definido anteriormente como el umbral de audición. El umbral doloroso corresponde al nivel de 134 decibelios[114].

La escala logarítmica no es intuitiva. Por ejemplo 40 dB no es la mitad de 80 dB sino que es 10.000 veces menor en términos de potencia. Si una fuente, como puede ser un instrumento musical, produce un nivel sonoro, por ejemplo de 100 dB, dos instrumentos iguales sonando simultáneamente, es decir con una potencia doble, producen un nivel sonoro de 103 dB. Esto significa que duplicar la potencia produce sólo un aumento de 3 dB en el nivel acústico. Por la misma razón, duplicar la presión supone un aumento de 6 dB.

Aunque la potencia acústica se puede medir objetivamente como la cantidad de energía sonora emitida por unidad de tiempo, la sensación con la que el oído interpreta el volumen del sonido es subjetiva puesto que depende también de la frecuencia; es decir, dos sonidos de igual potencia y de distinta frecuencia no producen la misma sensación de volumen.

En general los sonidos son muy complejos puesto que se componen de diversas frecuencias con distintos niveles de presión en cada una de ellas. Por eso, para representar un sonido determinado se utiliza el *espectro frecuencial*, que incluye la serie de frecuencias que contiene y los respectivos niveles de presión sonora que

corresponden a cada una de ellas. Usualmente también se emplea una escala logarítmica para las frecuencias, y se suelen agrupar en *bandas* de determinados anchos[115].

Ya se ha definido el sonido o tono *puro* como el constituido por una sola frecuencia. El sonido *armónico* es el compuesto por una frecuencia fundamental y sus armónicos, que son frecuencias múltiplos de la fundamental. Pero, en general, los sonidos son *aleatorios*, es decir, están formados por varias frecuencias relacionadas de forma aleatoria. Cuando son molestos se denominan de forma genérica *ruido.*

Fletcher y Munson estudiaron la variación de la sensibilidad del oído en función de la frecuencia, además de otros factores como son la edad y la agudeza de las personas. Dedujeron que la máxima sensibilidad corresponde aproximadamente a la frecuencia de 1.000 Hz; para frecuencias mayores, la sensibilidad es ligeramente menor, y en cambio para bajas frecuencias, la sensibilidad disminuye rápidamente. Por esta razón, las frecuencias altas son más molestas que las bajas aunque también son las más fáciles de aislar.

Debido a la subjetividad que supone la sensación de molestia provocada por la percepción de determinados sonidos (denominados como *ruidos* precisamente cuando son molestos), es difícil establecer un único valor para la medida del nivel acústico, es decir, un valor objetivo que se aproxime lo más posible a la percepción del oído o *sonoridad* (la unidad de medida es el *fonio*). Las curvas *isofónicas* representan los niveles correspondientes a cada frecuencia para los que la percepción del sonido o sonoridad es la misma.

El sistema utilizado para definir con un solo valor el nivel de presión acústica consiste en establecer unas *escalas de ponderación* o filtros, basados en las curvas isofónicas. A través de estos filtros se puede convertir el espectro de un sonido en otro ajustado a la percepción del oído humano, es decir, atenuando las frecuencias bajas. El filtro más utilizado es el que se denomina *curva de ponderación* A, basada en las curvas de Fletcher y Munson sobre la sensibilidad del oído en función de la frecuencia. La adaptación a esta curva sirve para compensar las diferencias de sensibilidad que el oído humano tiene para las distintas frecuencias dentro del campo auditivo.

Los niveles sonoros tratados con filtro A, es decir, la medida resultante de esta ponderación se expresa en *decibelios A* [dBA] y se acepta para describir y caracterizar las fuentes sonoras, por ser la valoración simple más aproximada a la sensación producida por la música, la palabra y los ruidos comunitarios más comunes, incluidos los de tráfico, siempre que no se trate de ruidos con tonos dominantes.

114 Conviene destacar que el decibelio no es una unidad de medida, sino una forma de notación de un número; por consiguiente no tiene sentido físico y es adimensional. Procede del *belio*; con objeto de eliminar los decimales, se utiliza la décima parte o *"decibelio"*. Por lo tanto, cuando un número se expresa en decibelios, hay que redondearlo al número entero más próximo; no es correcto utilizar decimales cuando la notación se hace en decibelios.

115 Lo habitual es utilizar bandas con un ancho de *una octava*, que es el correspondiente a un intervalo de frecuencias en el que la superior es doble que la inferior. Cuando se precisa una resolución mayor se utiliza un ancho de *tercio de octava*, obtenido por división de cada octava en tres bandas de intervalos iguales en escala logarítmica.

Aislamiento acústico

El aislamiento acústico es el procedimiento principal de control de la propagación de sonidos entre dos recintos. El aislamiento modifica la diferencia entre el nivel de intensidad acústica en un local emisor y el nivel en el local receptor.

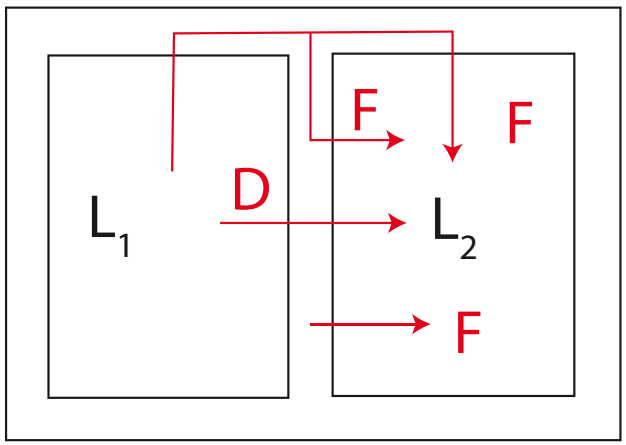
En general, se define aislamiento acústico proporcionado por un elemento separador como la resistencia al paso del sonido de un recinto a otro.

Balance energético del sonido

Para hacer vibrar un muro se requiere una cierta energía que es mayor cuanto mayor es la masa del muro. Si se trata de energía acústica, parte de esta energía incidente se refleja, parte se absorbe superficialmente, parte se disipa interiormente y otra parte se transmite, resultando un menor volumen del sonido en el local receptor. Es importante observar que cuanto más reflectante es la superficie menor es la energía que se transmite. Por otro lado, si se aumenta la absorción disminuye la energía reflejada, pero no la transmitida. Para que ésta se reduzca se debe disipar más energía en el interior del medio separador.

El aislamiento del sonido consiste en impedir su propagación por medio de elementos o materiales que supongan un obstáculo a su transmisión. Según lo anterior, los materiales aislantes deben tener masa y ser buenos reflectores.

Se consigue un factor de reflexión elevado cuando el elemento que intercepta el camino del sonido tiene una impedancia Z lo más diferente posible a la del medio en el que se propaga; por lo tanto, el procedimiento para conseguir un buen aislamiento acústico es diferente si se trata de aislar el sonido transmitido por el aire u otro medio gaseoso (con baja impedancia) o si se trata de aislar el sonido transmitido por los sólidos (con alta impedancia).



L_1: recinto emisor D: transmisión directa

L_2: recinto receptor F: transmisiones por flancos

Aislamiento a ruido aéreo

El sonido transmitido por el aire es lo que normalmente se llama *ruido aéreo*. Si se coloca una barrera entre dos locales para conseguir un aislamiento a ruido aéreo, la transmisión del ruido de un local a otro se puede realizar por distintos caminos:

a. Por vía directa a través del paramento, que se puede descomponer en dos causas principales: la porosidad a través de fisuras e intersticios y el *efecto diafragma*, es decir, la vibración del elemento constructivo bajo el efecto de la presión sonora, como una membrana.

b. Por vías indirectas, como los conductos y las paredes adyacentes o *flancos*. La consecuencia de este fenómeno es que el aislamiento acústico calculado considerando sólo el elemento separador es siempre inferior al real.

Por consiguiente, la cuantificación de la capacidad de aislamiento a ruido aéreo de un elemento constructivo, tanto si se determina por cálculo, como si se determina por ensayo en laboratorio, no es un parámetro absoluto, sino que depende de las características del entorno de los recintos así como del espectro de frecuencias del ruido emitido. Es por ello por lo que, para cuantificar el aislamiento a ruido aéreo existen varios índices que ex-

presan las características de los recintos o de sus elementos constructivos. Además, para que los índices de aislamiento sean significativos y permitan la comparación de unos sistemas con otros, deben estar *normalizados*, es decir, referidos a determinados espectros de ruidos característicos.

• Diferencia de niveles entre recintos (o aislamiento bruto entre recintos), D:

Es la diferencia, en decibelios, de los niveles medios de presión sonora que existen en dos recintos por la acción de una o varias fuentes de ruido emitiendo en uno de ellos, que se toma como recinto emisor. Este índice se utiliza para mediciones in situ o en laboratorio. Su expresión es la siguiente:

$$D = L_1 - L_2 \ [dB]$$

siendo:

• L_1; $L_2 \rightarrow$ los niveles medios de presión sonora en los recintos emisor y receptor, respectivamente [dB]

En general la diferencia de niveles entre recintos es función del tiempo de reverberación del local receptor y de la frecuencia, por consiguiente este índice no da una idea del nivel real de aislamiento conseguido. Con objeto de tener en cuenta la influencia de estos factores, se establecen los siguientes *índices normalizados*:

• Diferencia de niveles estandarizada entre recintos interiores, D_{nT}:

Es la diferencia, en decibelios, entre los niveles medios de presión sonora producidos en dos recintos, normalizada al valor de 0,5 segundos del tiempo de reverberación[116]. Se define mediante la expresión siguiente:

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log (T / T_0) \ [dB]$$

siendo:

• L_1; $L_2 \rightarrow$ los niveles medios de presión sonora en los recintos emisor y receptor, respectivamente [dB]

• $T \rightarrow$ tiempo de reverberación del recinto receptor [s]

• $T_0 \rightarrow$ tiempo de reverberación de referencia, de valor $T_0 = 0{,}5$ s

Este índice se utiliza para las mediciones in situ, y toma en consideración la influencia que ejerce la reverberación sobre el nivel de presión. Si el local receptor tiene una reverberación elevada, el valor del nivel acústico L_2 es mayor que el que cabría esperar debido al aislamiento producido por la pared. Análogamente, en el caso de baja reverberación el nivel acústico sería menor que el deducido de la capacidad aislante del elemento separador. Por ello, los resultados se corrigen tomando como referencia un tiempo de reverberación de 0,5 segundos, que se puede considerar como el correspondiente a una habitación de una vivienda con un amueblamiento normal.

Debido a que la diferencia de niveles entre recintos también depende de la frecuencia, se puede establecer para una frecuencia determinada, para una banda de frecuencias o para el espectro total de un ruido normalizado. Para la determinación del aislamiento acústico entre recintos, se utiliza el espectro normalizado del *ruido rosa*[117]; en este caso el valor del índice se denomina *"ponderado A"* y se expresa en [dBA].

116 El *tiempo de reverberación T* es el tiempo, en segundos, necesario para que un impulso sonoro se atenúe 60 dB después de cesar la fuente. Varía con la frecuencia siendo más elevado a frecuencias bajas que a frecuencias medias o altas. Debido a esto, los valores de las exigencias establecidas como límite en el DB HR se entienden que corresponden a la media de los valores a 500, 1000 y 2000 Hz.

117 El ruido rosa es un ruido que tiene el mismo nivel sonoro en todas las bandas de octava; su espectro expresado como niveles de presión, en bandas de tercio de octava, es una recta horizontal (de pendiente 0 dB/octava). Ello supone que la intensidad es proporcional al inverso de la frecuencia (1/f). El ruido blanco es un ruido patrón caracterizado por tener todas las frecuencias con la misma intensidad (1/1). Ello supone un incremento de 3 dB del nivel sonoro en cada aumento de una banda de octava. El ruido rojo o browiano es el ruido en el que la intensidad es proporcional al inverso del cuadrado de la frecuencia ($1/f^2$). Existe una similitud entre la tipificación del ruido y de la luz por sus espectros característicos. El ruido rosa tiene un espectro intermedio entre el ruido blanco y el ruido rojo. Existen otros espectros para caracterizar tipos de ruidos comunes, como por ejemplo, el ruido de tráfico o viario, con mayor nivel sonoro en las frecuencias graves, y que reproduce las condiciones de la circulación rodada.

• Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en fachadas, en cubiertas y en suelos en contacto con el aire exterior, $D_{2m,nT,A}$:

Es la valoración global, en decibelios A, de la diferencia de niveles estandarizada de un elemento en contacto con el aire exterior, para ruido rosa. Si el ruido normalizado es de automóviles, el índice se designa con la notación $D_{2m,nT,Atr}$.

• Diferencia de niveles por la forma de la fachada, $\Delta L_{f,s}$:

Es la mejora del aislamiento acústico a ruido aéreo de fachadas, en decibelios, por efecto de apantallamientos debidos a petos, formas especiales y retranqueos.

• Índice de reducción acústica de un elemento constructivo, R:

Es el aislamiento acústico, en decibelios, de un elemento constructivo medido en laboratorio. Se define mediante la expresión siguiente:

$$R = 10 \cdot \log (W_1 / W_2)$$

siendo:

- $W_1 \rightarrow$ la potencia sonora que impacta sobre el elemento en estudio
- $W_2 \rightarrow$ la potencia sonora transmitida a través de la muestra

Este índice varía con la frecuencia, es decir, que un mismo elemento produce distinto aislamiento acústico para cada frecuencia. Cuando el índice se define para el espectro de frecuencias que corresponde a un ruido incidente rosa normalizado, se le denomina *"ponderado A"*, se designa con la notación *"R_A"* y se expresa en decibelios A [dBA]. Si el espectro de frecuencias corresponde a un ruido dominante de automóviles, el índice se designa con la notación *"R_{Atr}"*, y también se expresa en decibelios A.

• Índice global de reducción acústica, R_w:

Es el valor en decibelios de la curva de referencia, a 500 Hz, ajustada a los valores experimentales del índice de reducción acústica (según el método especificado en la Norma UNE-EN ISO 717-1)[118]. Este índice se utiliza para expresar las mediciones de laboratorio.

Aislamiento a ruido aéreo de paredes simples

La condición para que una pared se considere *"simple"* desde el punto de vista del aislamiento acústico es que los puntos situados sobre una misma normal no modifiquen su distancia mutua cuando la pared vibra. Puede ser homogénea, es decir, de un solo material, o heterogénea, si está formada por varias capas o estratos sin separación significativa entre ellos, como por ejemplo un muro de ladrillo cara vista enfoscado por su trasdós.

Una pared simple constituye un buen aislamiento acústico si es suficientemente pesada, poco rígida y estanca al aire.

a. Ley de masa y de frecuencia

Cuanto más pesada es una pared mayor dificultad encuentra el sonido para propagarse a través de ella y a la inversa, cuanto más ligera, más fácilmente entra en vibración y, por tanto, mejor transmite el sonido.

Este hecho se expresa por la *ley de masa y frecuencia* (*Ley de Berger*), que permite predecir una buena aproximación del aislamiento acústico de una pared simple: el aislamiento es mayor cuanto mayor sea su masa superficial y cuanto mayor sea la frecuencia.

Por ello, la primera variable a considerar para predecir el aislamiento acústico de una pared es medir la masa por unidad de superficie [kg/m^2] pues a mayor masa es más difícil moverlo y atravesarlo por la acción de la presión del aire.

La expresión de la *ley teórica de masa y frecuencia* es la siguiente:

$$D = 20 \cdot \log (\omega \cdot m / 2 \cdot Z) \text{ [dB]}$$

siendo:

- $\omega \rightarrow$ la frecuencia angular o pulsación ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$) [Hz]
- $Z \rightarrow$ la impedancia acústica del aire [Rayls = Pa · s / m] (para el aire a 20°C, Z = 414 Rayls)

Esta ley es experimental, por lo tanto aproximada, aunque constituye un buen índice del comportamiento acústico de una pared. De esta ley se deduce que doblando la masa se consigue un incremento de 6 dB en el aislamiento. También se deduce de esta ley que el aislamiento aumenta 6 dB cuando la frecuencia se duplica. Sin embargo el aislamiento medido sobre las paredes reales es algo inferior al que predica la ley teórica debido a los factores que se indican a continuación.

Aislamiento real de paredes simples

La ley de masas sólo se cumple con relativa aproximación en un intervalo de frecuencias que está determinado por dos frecuencias características de una pared real, que son la *frecuencia natural* (f_0) y la *frecuencia crítica*, también llamada *de coincidencia* (f_c). En la cercanía de estas frecuencias no se cumple la ley de masas, con una reducción notable del aislamiento acústico.

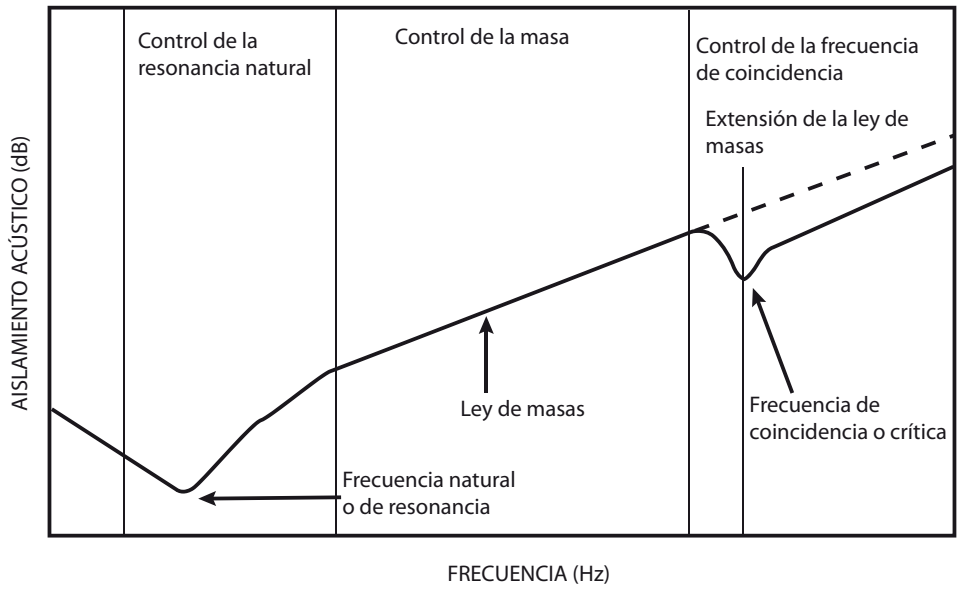
- Frecuencia natural o frecuencia de resonancia (f_0): es la frecuencia de vibración natural de la pared cuando recibe el impacto de una onda sonora, por efecto diafragma o efecto tambor. Depende de la masa de la pared, de su rigidez, de las dimensiones (longitud, anchura y espesor), de la forma y de las condiciones de contorno, es decir, de las sujeciones perimetrales de la hoja al resto de la estructura.

  Si la pared es excitada por una onda sonora de una determinada frecuencia, en general, la propia pared opone resistencia al movimiento y la vibración se detiene. Pero si la frecuencia de la onda sonora es f_0, la pared responde por simpatía con la misma frecuencia generando el sonido al otro lado. Entonces la transmisión de energía es máxima y el aislamiento mínimo.

  El aislamiento acústico de un elemento constructivo para la frecuencia natural del sistema es prácticamente nulo. Sin embargo, esta circunstancia no es muy grave, puesto que la transmisión del sonido por esta causa se produce sólo a muy bajas frecuencias, para las cuales la sensibilidad del oído es mucho menor.

- Frecuencia crítica o frecuencia de coincidencia (f_c): es la frecuencia a la que le corresponde una longitud de onda que coincide con la longitud de onda de flexión de la pared cuando flecta libremente. Si la onda incidente tiene la frecuencia crítica, f_c, entra en fase con las ondas de flexión y *se acopla*, es decir, se refuerza. Depende del material y del espesor. Las paredes delgadas tienen una frecuencia de resonancia alta y las paredes gruesas, baja.

  El resultado es una merma del aislamiento acústico, similar al que se produce para la frecuencia natural, aunque la causa es distinta. El problema es que este fenómeno ocurre generalmente para frecuencias medias y altas, que son mucho más perceptibles y molestas al oído que las bajas, aunque por otra parte



118 El subíndice que lo identifica *"w"* procede del inglés *"weighting"* e indica que el valor es ponderado. El índice R_w se acompaña normalmente de dos términos de corrección C y C_{tr}, denominados *términos de adaptación espectral*. El primero se aplica cuando existe un predominio de ruido rosa, mientras que el segundo corresponde a un ruido predominante de tráfico, en el que prevalecen las bajas frecuencias. La expresión completa del índice R_w es R_w (C; C_{tr}). Para calcular el aislamiento de fachadas se aplica el término C_{tr}.

más fáciles de aislar.

La frecuencia crítica se define a partir de las constantes elásticas de la pared, mediante la expresión siguiente:

$$f_c = \frac{c^2}{2\cdot\pi\cdot d}\sqrt{\frac{12\cdot\rho}{E}\cdot\left(1-\sigma^2\right)}$$

siendo:

- c → la velocidad del sonido en el aire [m/s] (para el aire a 20ºC, c = 340 m/s)
- d → el espesor de la pared [m]
- ρ → la densidad del material de la pared [kg/m³]
- σ → el coeficiente de Poisson
- E → el módulo de Young [N/m²]

Particularizando la expresión anterior para la velocidad del sonido en el aire a 20ºC (c = 340 m/s), se obtiene la expresión de la frecuencia crítica que indica el DB HR, Anejo A *"Terminología", fórmula A.10*)

$$f_c = \frac{64.000}{d}\sqrt{\frac{\rho\cdot\left(1-\sigma^2\right)}{E}}$$

La frecuencia crítica de una pared de ladrillo cerámico perforado de ½ pie de espesor, con una densidad ρ = 1600 kg/m³; un módulo de Young E = 4·10⁹ N/m², y un coeficiente de Poisson σ = 0,25 es aproximadamente de 340 Hz[119].

Según lo anterior, la frecuencia natural y la frecuencia crítica de la pared delimitan tres zonas en las que el aislamiento acústico se rige por diferentes leyes, tal como se representa esquemáticamente en la figura.

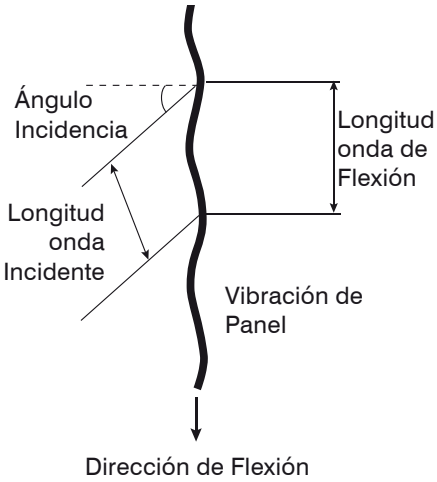
- Zona de *"dominio de la elasticidad"*, que corresponde en general a muy bajas frecuencias ($f < f_0$) y con un aislamiento descendente hasta f_0 donde es prácticamente nulo.

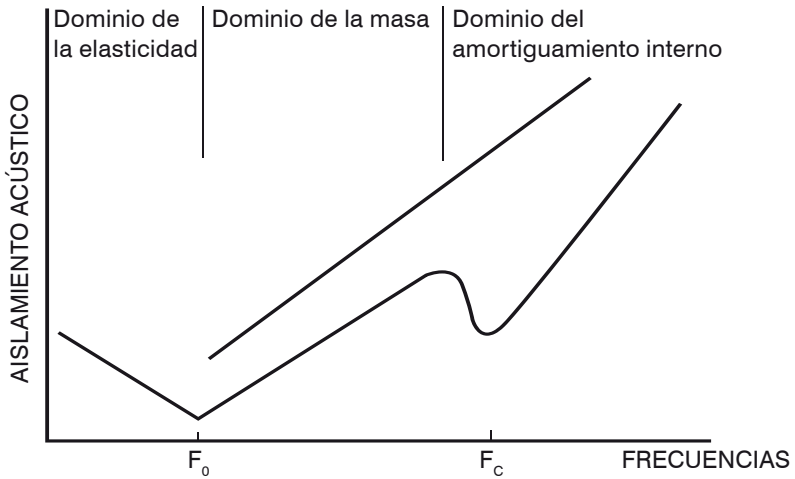
- Zona de *"dominio de la masa",* que corresponde a frecuencias medias ($f_0 < f < f_c$) en la que sí se cumple la ley de masas. Particularizando para un valor de impedancia acústica del aire a 20ºC (Z = 414 Rayls), se obtiene:

$$R = 20\cdot\log(m\cdot f) - 42\ [dB]$$

(ley teórica de masa y frecuencia)

- Zona del *"dominio del amortiguamiento interno"*, que corresponde a altas frecuencias ($f > f_c$), en la cual el aislamiento baja de modo considerable en las cercanías de f_c y aumenta desde ese valor de un modo progresivo. En esta zona, el factor que condiciona el aislamiento acústico es el *amortiguamiento interno* (η) del material, es decir, la capacidad del material para absorber energía de vibración.





Aunque los índices enunciados anteriormente (R, R_A, R_W) dan una idea del aislamiento acústico a ruido aéreo de un elemento constructivo, en algunos casos es necesario analizar el comportamiento para distintas frecuencias. Por ejemplo, si el ruido que se trata de aislar tiene un frecuencia conocida, por ejemplo el ruido de una sala de máquinas, es muy importante conseguir que no exista un déficit de aislamiento precisamente para esa frecuencia en particular.

b. Ley de masa según el DB HR

Los materiales de construcción no responden todos por igual a la misma ley de masa. Las amplitudes de cada uno de los dominios indicados anteriormente, así como su posición en el rango de masas considerado pueden variar de unos materiales a otros e, incluso, de unos elementos a otros (aun siendo del mismo material) dependiendo de su espesor, que condiciona el valor de las frecuencias críticas. Por ejemplo, un parámetro que no queda reflejado en la ley de masa y que interviene decisivamente en el aislamiento es acústico es la porosidad[120]. En la práctica existe una diferencia notable en el aislamiento, de valor comprendido entre 10 y 15 dB, respecto a lo que predica la ley de masas, observada en medidas sobre paredes reales.

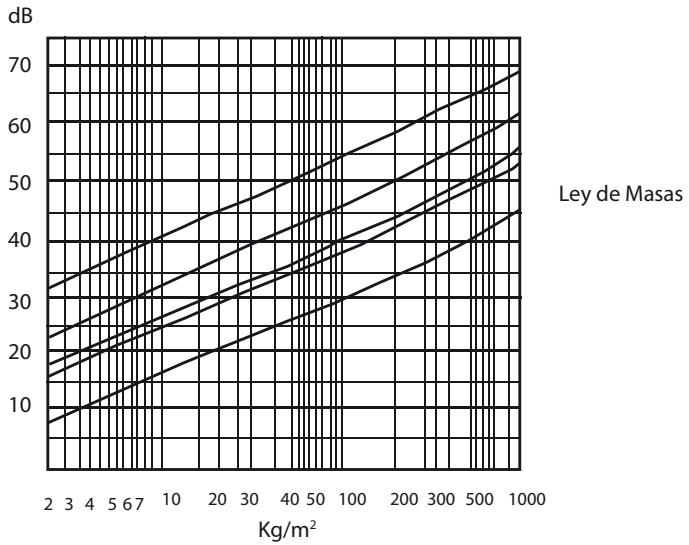
La pendiente de la ley de masa obtenida a partir de resultados experimentales es menor si se trata de elementos con masas inferiores a unos 150 kg/m^2. Para paredes ligeras (de masa superficial inferior 150 kg/m^2) el aislamiento acústico real aumenta unos 5 dB al duplicar la masa; en paredes pesadas el aumento es de unos 10 dB.

Aunque se pudiera obtener un factor que caracterizara el aislamiento acústico de cada material o elemento constructivo a partir de su masa, es imprescindible añadir otra variable, que es la frecuencia. El aislamiento acústico depende del espectro de la onda incidente, por lo que un mismo elemento no presenta el mismo índice de aislamiento para un ruido rosa que para un ruido de tráfico o para el ruido de una sala de máquinas.

El DB HR proporciona las siguientes expresiones para obtener el índice global de reducción acústica, ponderado A, de una pared simple, en función exclusivamente de su masa, que se pueden utilizar en ausencia de ensayo, y que sirven para caracterizar, en un primer nivel de aproximación, las propiedades de aislamiento acústico de un elemento constructivo;

Para m $\leq$ 150 kg/m^2 $\quad R_A = 16{,}6 \cdot \log(m) + 5$ [dBA]

Para m $\geq$ 150 kg/m^2 $\quad R_A = 36{,}5 \cdot \log(m) - 38{,}5$ [dBA]



119 Esta frecuencia corresponde a la de la voz humana, por lo que a veces se produce el hecho curioso de que se puede percibir una conversación a través de una pared, pero no se puede percibir, por ejemplo, la música.

120 Un ejemplo de la importancia de los poros en el aislamiento se ve analizando el caso de una madera dura, de una pulgada de espesor. Si se analiza por la ley de masa se obtiene un aislamiento de 30 dB, pero si esa misma muestra se deja una semana sumergida en agua, de forma que todos sus poros se impregnan, el aislamiento pasa a ser de 60 dB.

El índice global de reducción acústica obtenido con las expresiones anteriores corresponde al espectro de un ruido incidente rosa normalizado. Si el ruido incidente tiene un espectro diferente, por ejemplo el que corresponde a ruido de tráfico, el índice se debe corregir con el *"término de adaptación espectral, C_{tr}"*.

c. Aislamiento a ruido aéreo de paredes dobles con cámara de aire

En general, los sistemas formados por dos paredes de masa superficial m_1 y m_2, separadas por una cavidad o cámara de aire de espesor *d*, suponen una barrera más potente a la transmisión del sonido que el formado por una sola pared de masa equivalente $m = m_1 + m_2$. Ello se debe a que el sonido que incide en el elemento produce una vibración en la pared expuesta, la cual sólo transmite parte de la energía a la cámara de aire, que a su vez transmite vibraciones a la segunda pared, quien finalmente irradia la energía residual al recinto receptor.

Debido a que sólo una fracción de la energía sonora es transmitida en cada fase de estas etapas, las paredes múltiples ofrecen, potencialmente, mayores prestaciones de aislamiento que las simples. Este hecho representa un paso importante en el aligeramiento de las soluciones constructivas para un mismo valor de aislamiento acústico.

Sin embargo, para que se produzca este efecto beneficioso de la pared doble es imprescindible que cada una de las hojas que la constituyen pueda actuar independientemente, puesto que de no ser así, el comportamiento es similar al de una pared simple de masa igual a la suma de las masas de sus hojas. Este efecto se llama *acoplamiento* y para evitarlo juega un papel muy importante el diseño y correcta ejecución del muro.

La mejora del aislamiento acústico que supone una pared doble es más significativa cuando se utilizan materiales ligeros, ya que si la pared es muy pesada (y por tanto muy aislante) cuesta más aumentar el aislamiento. La mejora puede ser muy notable si se utilizan materiales blandos a la flexión (es decir, con una frecuencia crítica f_c elevada), y la eficacia aumenta si se rellena la cavidad con productos adecuados, como se verá más adelante.

De igual forma que ocurría en el caso de las paredes simples, el aislamiento que proporcionan los sistemas de paredes dobles presenta determinadas frecuencias en el entorno de las cuales existe una fuerte reducción de la capacidad aislante. En este caso se trata de la *"frecuencia natural del sistema"* o*" frecuencia de resonancia"*, de las *"frecuencias críticas"* de cada una de las dos hojas y de las *"frecuencias de cavidad"*, que dan lugar a zonas o dominios que se rigen por leyes diferentes.

• Frecuencia natural del sistema o frecuencia de resonancia (f_0)

Se define como la frecuencia de vibración propia del conjunto de masas m_1 y m_2, unidas por un medio separador que funciona como un resorte de rigidez K. Depende de las masas y de la distancia de separación, siendo más bajas con masas y distancias elevadas.

Cuando se trata de paredes simples, la frecuencia natural o frecuencia de resonancia es muy baja por lo que, o bien cae fuera del campo audible, o bien la pared sólo es ineficaz para los sonidos graves (poco molestos), por lo que no suele ser un problema.

En el caso de paredes dobles con cámara de aire, la frecuencia de resonancia del sistema masa-muelle-masa es, en general, mayor que la que corresponde a una hoja simple, por lo que puede constituir una restricción importante en la cuantificación del aislamiento global.

La explicación del fenómeno físico de resonancia es que el aire atrapado entre las hojas actúa como una ligadura elástica o resorte neumático, y el conjunto se puede comparar a un sistema mecánico del tipo masa-muelle-masa que entra en vibración para una determinada frecuencia (*frecuencia de resonancia*) transfiriendo energía vibratoria de una hoja a la otra.

La frecuencia de resonancia propia del sistema viene definida por la siguiente expresión:

$$f_0 = \frac{1}{2\cdot\pi}\sqrt{K\cdot\frac{m_1+m_2}{m_1\cdot m_2}} \quad \text{[Hz]}$$

siendo:

- K → la rigidez dinámica del medio separador [MN/m^3]
- m_1 ; m_2 → las masas superficiales [kg/m^2]

El medio separador puede estar constituido por aire, por un material determinado o por un sistema mecánico. Si el medio lo constituye el aire, la frecuencia de resonancia viene dada por la expresión:

$$f_0 = 615\sqrt{\frac{1}{d}\cdot\frac{m_1+m_2}{m_1\cdot m_2}}\ \text{[Hz]}$$

siendo:

d → el espesor de la cámara de aire [cm]

m_1; m_2 → las masas superficiales de los elementos [kg/m²]

Como se aprecia en la expresión anterior, la frecuencia de resonancia del sistema es inversamente proporcional al espesor de la cámara de aire y a la masa de las hojas. Para esta frecuencia, el aislamiento acústico es muy bajo, prácticamente nulo; por tanto, se debe conseguir que esta frecuencia sea lo más baja posible, ya que la sensibilidad del oído disminuye al disminuir la frecuencia.

Debido a que existe una relación directa entre las masas, el espesor de la cámara de aire y la frecuencia de resonancia propia del sistema, para reducir este último parámetro a un valor determinado basta con establecer un límite inferior al espesor de la cámara de aire, en función de la masa superficial de las dos hojas.

Normalmente se intenta que esta frecuencia esté por debajo del campo de medida (100 Hz). Algunos estudios aconsejan que esta frecuencia sea menor de 75 Hz, y otros, más exigentes, recomiendan que sea menor de 60 Hz. Para estos dos casos, se obtienen las relaciones prácticas siguientes:

$f_0 < 75$ Hz supone $d > 67\cdot\left(\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}\right)$ [cm]

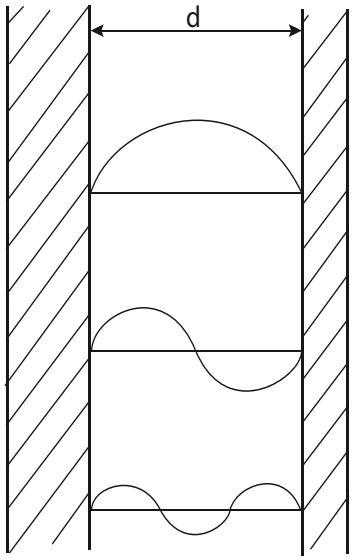
$f_0 < 60$ Hz supone $d > 105\cdot\left(\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}\right)$ [cm]

• Frecuencias críticas de cada una de las hojas (f_c)

La pared doble presenta la misma reducción del aislamiento acústico que una pared simple en las cercanías de las frecuencias críticas o de coincidencia correspondientes a las hojas que la constituyen, aunque por lo general, este efecto es más atenuado que en una pared simple. Se puede minimizar procurando que las frecuencias críticas de cada hoja sean diferentes o consiguiendo que, al menos la de una de ellas sea muy elevada.

• Frecuencias de cavidad ($f_{cavidad}$)

Las frecuencias de cavidad son las que corresponden a una separación entre hojas, *d*, exactamente igual a un múltiplo de la semilongitud de onda.



Frecuencias de cavidad

$$d = n\cdot(\lambda/2) = n\cdot(c/2\cdot f_{cavidad});\ \rightarrow f_{cavidad} = n\cdot c/(2\cdot d)$$

siendo:

- d → el espesor de la capa de aire [m]
- n → un número entero [1, 2, 3 ,,,]
- c → la velocidad del sonido [m/s]
- $f_{cavidad}$ → las frecuencias de cavidad [Hz]

En las proximidades de estas frecuencias, que dependen exclusivamente del espesor de la pared, el aislamiento experimenta una brusca reducción debido a que las ondas rebotan de una hoja a la otra, formando ondas estacionarias en la cámara de aire. Este efecto se elimina colocando materiales flexibles y absorbentes dentro de la cavidad.

Según lo anterior, el comportamiento acústico de una pared doble presenta también tres zonas que se rigen por leyes diferentes.

- Zona de *"dominio de la elasticidad"* ($f < f_0$) en la que el comportamiento del sistema es idéntico al de una sola hoja de masa $m_t = m_1 + m_2$. Precisamente para $f = f_0$ el aislamiento es casi nulo.

- Zona de *"dominio de la masa"* ($f_0 < f < f_{cavidad}$) en la que realmente se aprecia la ventaja de la doble pared, ya que para una masa equivalente a la pared simple la mejora del aislamiento alcanza los 18 dB al duplicar la frecuencia, en vez de 6 dB. El aislamiento obtenido en esta zona de frecuencias a nivel teórico se puede calcular mediante la expresión siguiente:

$$R = 20 \cdot \log\left[\left(\frac{m_1 \cdot m_2 \cdot d}{2 \cdot \rho^2 \cdot c^3}\right) \cdot \omega\right] \text{ [dB]}$$

(ley teórica de masa y frecuencia para una pared doble)

siendo:

- m_1; m_2 → las masas superficiales de los elementos [kg/m²]
- d → el espesor de la capa de aire [m]
- ω → la frecuencia angular o pulsación ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$) [Hz]
- ρ → la densidad del aire [kg/m³] (para el aire a 20ºC, $\rho = 1{,}22$ kg/m³)
- c → la velocidad del sonido en el aire [m/s] (para el aire a 20ºC, c = 340 m/s)

- Zona del *"dominio de las resonancias de cavidad",* determinada exclusivamente por la distancia *"d"*. En esta zona el aislamiento baja fuertemente en torno a las frecuencias de cavidad, para las cuales el sistema se comporta como una masa única $m_t = m_1 + m_2$, ya que ambas hojas se acoplan acústicamente, desapareciendo el efecto aislante de la pared doble. Este efecto se produce para altas frecuencias.

Criterios para mejorar el aislamiento acústico de los muros de fachada

La ley de masa predica que cuanto más grueso y pesado sea un muro, mayor es su aislamiento acústico. La solución clásica de disponer muros pesados y gruesos como elementos separadores o como elementos de cerramiento, para los valores de reducción acústica exigidos puede ser, hoy día, inviable en muchos casos.

El recurso de muro de doble hoja con cámara de aire permite conseguir un significativo aligeramiento en las soluciones constructivas que requieren prestaciones acústicas para los niveles exigidos. No obstante, es importante evitar las zonas de frecuencias críticas por coincidencia o resonancia, con objeto de que no se produzcan *"agujeros"* en el aislamiento para estas frecuencias, o alejarlas suficientemente del rango para el cual el oído humano es especialmente sensible.

En un sistema "*multicapa*", si las hojas son del mismo material, se puede mejorar el aislamiento evitando que sean de la misma masa, para lo cual es suficiente que tengan distinto espesor, con objeto de evitar el efecto de acoplamiento de las dos hojas en una misma frecuencia crítica.

Otro procedimiento consiste en diseñar hojas de materiales diferentes, procurando que uno de ellos sea blando a la flexión, para que al menos una hoja tenga una frecuencia crítica muy elevada (superior a 3.000 Hz) donde el aislamiento ya es tan importante que la merma no resulta significativa. En esta misma línea, un recurso muy eficaz es la disposición de ambas hojas con materiales blandos a flexión.

Para evitar los efectos de resonancia o acoplamiento de las hojas un procedimiento habitual consiste en incorporar elementos absorbentes en el interior de la cámara de aire. Los materiales utilizados están caracterizados por tener una estructura constituida por poros conectados entre sí y con el exterior[121]. Al incidir la onda acústica, las fibras del material de la cámara vibran produciendo pérdidas por rozamiento y calor, absorbiendo así una buena parte de la energía de resonancia en la cavidad, e impidiendo que se transmita desde la hoja excitada por vibración acústica hacia la segunda. El coeficiente de absorción de estos materiales varía con la frecuencia.

Los productos más comunes en el mercado se pueden agrupar en dos categorías: materiales fibrosos y materiales con estructura celular abierta. Los materiales fibrosos, como las lanas minerales son los más utilizados como absorbentes acústicos en muros con cámara, con espesores variables, según las frecuencias que se desean aislar, considerando que, en general, la absorción aumenta con el espesor. Dentro de la categoría de materiales con estructura celular abierta, el más común es la espuma de poliuretano.

Los materiales absorbentes suponen una mejora del aislamiento acústico cuando se utilizan rellenando la cavidad de los muros de doble hoja. Tienen otra aplicación cuando se utilizan como revestimiento de paredes para mejorar las condiciones acústicas de los locales, debido a la propiedad de absorber las ondas reflejadas. Sin embargo, el revestimiento de paredes con materiales absorbentes no supone una mejora en el aislamiento acústico al ruido que se pueda transmitir a través de ellas, puesto que estos materiales absorben las ondas reflejadas pero no las incidentes, y por lo tanto no impiden que las ondas impacten en la pared revestida y se produzca la transmisión en función exclusivamente de su masa. Lo único positivo con este tratamiento es que se reduce el nivel de ruido propio del local y el ruido que se transmite al vecino.

Otro punto de atención importante para conseguir un buen aislamiento en muros de doble hoja, es evitar el acoplamiento rígido entre elementos. Las uniones rígidas provocan un cortocircuito acústico *(puente fónico)* que reduce el efecto de la pared múltiple. En el caso límite, el aislamiento acústico sería el de un muro de una hoja de masa equivalente a la masa total. Si son inevitables estos puentes, por ejemplo en las sujeciones laterales de los muros o en los pasos inevitables de las tuberías, éstos deben ser relativamente blandos y ligeros para muros pesados; y pesados para muros ligeros.

Influencia de los huecos en el aislamiento acústico

Las rendijas o juntas en un muro pueden producir resultados catastróficos en el aislamiento acústico[122]. Por ello, no se puede lograr un buen aislamiento a menos que se sellen cuidadosamente todas las ranuras y agujeros de las aberturas y tabiques. En general, por donde pueda pasar el aire, también puede pasar el sonido, y pequeñas cantidades de energía producen comparativamente altos niveles de sensación. Además, para que el aislamiento sea efectivo se debe cuidar la continuidad del elemento aislante.

Aunque se reemplace una puerta de madera por otra de plomo macizo, no se consigue incrementar significativamente el aislamiento acústico si el problema consiste en la transmisión a través del perímetro. Este punto se resuelve mediante el sellado con juntas de goma que se comprimen al cerrar la puerta.

La transmisión del sonido a través de las ventanas se rige por los mismos principios. El aislamiento a ruido aéreo de las fachadas se mejora sustancialmente incrementando el espesor de los vidrios, utilizando vidrios laminados, vidrios dobles con cámara de aire[123] o soluciones de doble ventana. También es fundamental extremar las precauciones para una correcta fijación de marcos y premarcos al muro y un perfecto sellado de las rendijas.

121 Los materiales con estructura de celda cerrada, aunque presentan un excelente comportamiento frente a la humedad, no son eficaces como absorbentes acústicos, puesto que pueden producir resonancia.

122 Una plancha de plomo de 25 mm de espesor y 0,5 m^2 produce una reducción acústica de 50 dB, pero si en ella se perforan tres agujeros de 12 mm de diámetro, que representan sólo el 0,1 % de su superficie, el aislamiento se reduce a 20 dB.

123 Las ventanas con doble vidrio y cámara intermedia producen un buen aislamiento térmico y acústico, aunque pueden producir resonancia a determinadas frecuencias originando el efector tambor.

5.4.2 Normativa sobre protección contra el ruido

En la legislación española, el mandato constitucional de proteger la salud y el medio ambiente están explícitos en los artículos 43 y 45 de la *Constitución*, respectivamente. Estos mandatos engloban en su alcance la protección contra la contaminación acústica. Además, la protección constitucional frente a esta forma de contaminación está también refrendada por algunos *derechos fundamentales* reconocidos por la Constitución, entre otros, el *"derecho a la intimidad personal y familiar"*, consagrado en el artículo 18.1.

La Unión Europea, en el *Libro Verde de la Comisión Europea sobre política futura de lucha contra el ruido*, tomó conciencia de la necesidad de aclarar y homogeneizar el entorno normativo del ruido. En línea con este principio los trabajos de la Unión Europea produjeron la *Directiva sobre Ruido Ambiental* (Directiva 2002/49/CE del parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002, sobre la *"Evaluación y gestión del ruido ambiental"*).

La Directiva sobre Ruido Ambiental marca una nueva orientación respecto a las actuaciones normativas previas de la Unión Europea en materia de ruido. Fija como una de sus finalidades determinar la exposición al ruido ambiental, mediante la elaboración de mapas de ruidos según métodos de evaluación comunes a los Estados miembros.

La trasposición de la Directiva Europea sobre Ruido Ambiental constituyó una oportunidad idónea para dotar de mayor estructura y orden el panorama normativo español sobre ruido. En 2003 se promulga la *Ley de Ruido* (Ley 37/2003, de 17 de noviembre) (BOE 18/11/2003) que surge con la voluntad de dotar de un esquema básico de rango estatal a la dispersa normativa relacionada con el ruido que tenían elaborada las administraciones locales o autonómicas.

La Ley de Ruido tiene prevista la representación gráfica de las áreas acústicas sobre el territorio, que dará lugar a la cartografía de los objetivos de calidad acústica. Los mapas resultantes de esta representación gráfica se conciben como un instrumento importante para facilitar la aplicación de los valores límite de emisión e inmisión que ha de determinar el Gobierno, y que deben servir de base para fijar los niveles de aislamiento exigibles a los elementos que delimitan los edificios con el ambiente exterior. La propia Ley, en la exposición de motivos, indica que *"El Código Técnico de la Edificación, previsto en la Ley 38/1999 de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación deberá incluir un sistema de verificación acústica de la edificaciones"*.

En consonancia con lo anterior, El Código Técnico de la Edificación desarrolla el requisito de habitabilidad de *bienestar acústico* contenido en la Ley de Ordenación (LOE) vigente desde mayo de 2000 y establece los procedimientos de verificación acústica de los edificios a los que alude la Ley del Ruido.

El objetivo del requisito básico *"Protección frente al ruido"* está descrito en el artículo 14 de la Parte I del Código Técnico de la Edificación *"Exigencias básicas de protección frente al ruido (HR)"*: *"… consiste en limitar dentro de los edificios, y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento"*.

El Documento Básico *"Protección frente al ruido"* aprobado por Real Decreto 1371/2007 de 19 de octubre, *"... especifica los parámetros objetivos y sistemas de verificación cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de las exigencias básicas y la superación de los niveles mínimos de calidad propios del requisito básico de protección frente al ruido"*. El cumplimiento del mencionado DB HR permite considerar, además, que el edificio es conforme con las exigencias acústicas derivadas de la aplicación de los *objetivos de calidad acústica* al espacio interior de las edificaciones incluidas en la *Ley de Ruido* 37/2003, de 17 de noviembre y sus desarrollos reglamentarios.

Desde que finalizó el periodo de moratoria, el DB HR es de obligado cumplimiento en las obras de edificación, quedando derogada definitivamente la Norma Básica de la Edificación NBE-CA-88 *"Condiciones acústicas en los edificios"*.

El ámbito de aplicación del DB HR es similar al de la antigua Norma Básica NBE CA-88, con algunos matices. Se exceptúan del ámbito de aplicación los *recintos ruidosos*, las aulas y salas de conferencia de volumen superior a 350 m^3 (aunque se consideran *recintos protegidos* respecto de otros recintos y del exterior), y las obras de reforma salvo cuando se trate de rehabilitación integral o en aquéllas que, aun siendo de rehabilitación integral, cuando el cumplimiento de las exigencias suponga alterar la configuración de la fachada en edificios protegidos.

El DB HR es más prolijo en lo que se refiere a términos y parámetros acústicos que la precedente NBE CA-88. En primer lugar, el estudio de las condiciones de aislamiento del edificio lo fundamenta en su división por recintos[124], especificando los siguientes:

- Recinto habitable: interior, destinado al uso de personas (habitaciones y estancias, aulas, quirófanos, oficinas, cocinas, baños, distribuidores…).

- Recinto no habitable: no destinado al uso permanente de personas o cuya ocupación es ocasional por ser bajo el tiempo de estancia (garajes, trasteros, cámaras técnicas, desvanes no acondicionados y sus zonas comunes).

- Recinto protegido: recinto habitable con mejores características acústicas.

- Recinto de instalaciones: el que contiene equipos de instalaciones tanto individuales como colectivas (cajas de ascensores y conductos de extracción de humos de los garajes).

- Recinto de actividad: en el que se realiza una actividad distinta a la realizada en el resto de los recintos del edificio en el que se encuentra (comercial, administrativa, lúdica, etc.) cuando el nivel medio de presión sonora es superior a 70 dBA y no llegue a 80 dBA, valor para el que se considera recinto ruidoso.

- Recinto ruidoso: de uso generalmente industrial, cuyas actividades producen un nivel medio de presión sonora en el recinto superior a 80 dBA, no compatible con el requerido en los recintos protegidos.

- Unidad de uso: edificio o parte de él que se destina a un uso específico y cuyos usuarios están vinculados entre sí (en edificios de viviendas, cada una de ellas; en hospitales y hoteles, cada habitación con sus anexos; en edificios docentes, cada aula o laboratorio).

- Zona común: zona que pertenece o da servicio a varias unidades de uso, pudiendo ser habitable o no.

La secuencia de verificaciones que se deben hacer para la correcta aplicación del DB HR se refieren a las condiciones de diseño y dimensionado del aislamiento acústico a ruido aéreo y a ruido de impactos, del tiempo de reverberación y de absorción acústica (sólo para algunos recintos), a las condiciones referentes al ruido y vibraciones de las instalaciones y las relativas a los productos de construcción; además de verificar el cumplimiento de condiciones constructivas, de mantenimiento y de conservación.

La NBE CA-88 reducía los parámetros acústicos fundamentales a dos: el *aislamiento acústico normalizado a ruido aéreo* R_w y el *nivel de ruido de impacto normalizado* L_N, expresados ambos en dBA (por lo que no hacía falta incluir el subíndice "A" en las notaciones). El DB HR establece muchos más parámetros, incluso para abordar la versión simplificada de la verificación. Por ejemplo, para justificar el cumplimiento de los elementos divisorios verticales, establece un límite para aislamiento acústico a ruido aéreo R_A si se trata de tabiques que separan una misma unidad de uso, un límite de diferencia de niveles $D_{nT,A}$ si separan unidades de uso distintas o $D_{2m,nT,Atr}$ si separa un recinto protegido del ambiente exterior, como es el caso general de las fachadas[125]; si además se trata de un elemento divisorio medianero la comprobación se puede hacer contra el límite $D_{nT,A}$ correspondiente al conjunto de los dos cerramientos o contra el $D_{2m,nT,Atr}$ de cada uno de ellos por separado.

En relación a este último parámetro, la exigencia se establece en función del *índice de ruido día*, L_d. El problema es que este último parámetro debe ser facilitado por la administración o mediante consulta de los mapas estratégicos de ruido. Si no hay mapa oficial de ruido actualizado en la localidad objeto

124 La definición de recinto es, según el DB HR *"el espacio del edificio limitado por cerramientos, particiones o cualquier otro elemento de separación".*

125 Otros parámetros que es necesario verificar, aunque no afecten al caso de los cerramientos es el nivel de ruido de impacto procedente de una unidad de uso diferente $L'_{nT,w}$ (antes era L_N), el tiempo de reverberación T (en el caso de aulas pequeñas sin mobiliario) y la absorción de vestíbulos A.

de estudio y se está operando en un sector del territorio con predominio de suelo de uso distinto al residencial (para el que se puede tomar L_d = 60 dBA), el DB HR remite a lo dispuesto en las normas reglamentarias de desarrollo de la *Ley de Ruido* 37/2003 [126].

La aplicación del DB HR a los muros de fachada se puede matizar, puesto que introduce un aspecto subjetivo, que es la posibilidad de considerar *entornos tranquilos* en determinados casos. El efecto de esta consideración es reducir el nivel de exigencia aunque, lógicamente, el procedimiento de análisis global se complica, sobre todo teniendo en cuenta que no queda explícito el tratamiento de locales que tengan dos fachadas a entornos diferentes.

Las exigencias de los elementos separadores, a efectos de aislamiento a ruido aéreo, las clasifica agrupando por un lado los muros y forjados, y por otro las fachadas y cubiertas.

En general, la nueva normativa ha aumentado las exigencias de insonorización de todas las partes del edificio. En lo que atañe las fachadas, cuando el entorno exterior está sometido predominantemente a ruido de aeronaves o ferroviario, se incrementa la exigencia de aislamiento. Como contrapartida, la aplicación de la ley de masa para calcular el índice global de reducción acústica R_A de un cerramiento de una hoja, según el DB HR arroja 3 dBA más que la aplicación de la ley de masa según la NBE CA-88.

Una innovación muy significativa que introduce el DB HR es la de tener en cuenta el aislamiento de las puertas entre recintos, exigiendo que tengan el mismo aislamiento que los muros en los que se alojan, o bien sustituyéndolas por un local distribuidor de alta absorción (3 ó 4 m^2 de absorción) que disponga de una puerta exterior que aísle 33 dBA y otra interior de 20 dBA.

En lo que respecta a los niveles equivalentes L_{eq} de inmisión (recepción) de ruido aéreo recomendados como máximos en la NBE CA-88, sufren en algunos casos disminuciones. En el uso residencial privado afectan únicamente a las estancias que no sean dormitorios, y bajan de 45 a 40 dBA durante el día y de 40 a 35 dBA durante la noche.

Un aspecto nuevo que introduce, muy importante, es el de las tolerancias de la mediciones “in situ”, cuando se efectúen por reclamaciones de los usuarios, según el cual se admiten valores a la baja con respecto a los exigibles, de 3 dBA para el *aislamiento a ruido aéreo*; 0,1 segundo para el *tiempo de reverberación* y 3 dBA para el *aislamiento a ruido de impacto*.

Todo ello significa que la introducción del Código Técnico, con el consiguiente incremento de los niveles de aislamiento, va a suponer un esfuerzo de adaptación muy importante de todos los agentes que intervienen, y de adecuación de muchos materiales y sistemas constructivos empleados habitualmente, con la repercusión económica que ello tendrá en el sector de la construcción.

Código Técnico. DB HR Opción simplificada

La *“opción simplificada”* del DB HR del C.T.E. representa una aplicación sencilla y fácil para justificar su cumplimiento. Pretende obtener de una forma directa los parámetros mínimos necesarios para dar satisfacción a los requerimientos acústicos que impone el DB HR.

En el caso de las fachadas los parámetros mínimos son: el índice de aislamiento mínimo de la parte ciega y el índice de aislamiento mínimo de los huecos. Una vez determinados los parámetros mínimos requeridos, es suficiente con elegir adecuadamente los elementos constructivos que cumplan con los mismos.

La elección de los elementos constructivos adecuados para la aplicación de la *“opción simplificada”* es muy sencilla y se puede realizar mediante tres formas generales:

- Resultados de ensayos de laboratorio, realizados según los procedimientos indicados en la normativa correspondiente, contenida en el Anejo C del DB HR [127].

- Métodos de cálculo sancionados por la práctica. En muchos casos, las características acústicas necesarias se pueden calcular mediante procedimientos y fórmulas de muy fácil aplicación. Estos procedimientos están avalados por las normas de la UE ó ISO, asumidas por UNE (normas UNE EN ó UNE EN ISO).

- Documentos reconocidos del C.T.E., que incluyan tabulaciones del conjunto *“elemento constructivo – características técnicas asignadas al mismo”*. Uno de estos Documentos Reconocidos denominado *“Catálogo de Elementos Constructivos”,* elaborado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, disponible actualmente en borrador.

5.4.3 Comportamiento de las fachadas de ladrillo cara vista frente al ruido

El aislamiento acústico de los cerramientos debe proteger a los ocupantes de un edificio contra los ruidos aéreos que se originan en el exterior o en los pisos contiguos en el caso de fachadas exentas. El control sobre los ruidos encomendado a las fachadas se realiza actuando sobre su transmisión desde el exterior y desde el interior del edificio, aislando el local que se desee proteger.

Según lo expuesto en el apartado anterior se puede extraer como conclusión que existen dos procedimientos para conseguir un buen aislamiento frente a la transmisión de ruido aéreo. Uno de ellos consiste en dotar al muro de suficiente masa, y el otro consiste en disponer muros de doble hoja, de masas diferentes, mejorando considerablemente la solución si se incorporan materiales absorbentes en la cámara de aire.

Las fachadas de ladrillo cerámico cara vista, con cámara de aire y trasdosado por el interior corresponden a los sistemas de pared doble, con un valor de índice de aislamiento global a ruido aéreo suficiente, en la mayoría de los casos, sin necesidad de incorporar recursos adicionales. Por una parte, la hoja exterior de ½ pie de espesor de ladrillo perforado tiene una masa superficial relativamente importante, como para suministrar, por sí misma, un índice de aislamiento a ruido aéreo muy considerable si se compara con la exigencia (según la ley de masa del DB HR, para una hoja exterior de ½ de ladrillo perforado con revestimiento se obtiene un valor de R_A = 46 dBA).

Por otra parte, la mejora del aislamiento que supone la hoja de trasdós se puede determinar mediante el criterio de pared doble. Ya se ha visto que la ley de masas y frecuencias aplicada a estos sistemas arroja valores de aislamiento a ruido aéreo superiores a los de una pared simple de masa equivalente. La diferencia de masa existente entre la hoja exterior y la hoja interior dificulta la aparición de resonancias que pudieran mermar el aislamiento acústico.

Para poder aplicar la *opción simplificada* del DB HR existe una exigencia adicional a las fachadas para que tengan un comportamiento aceptable como elementos de flanco. La exigencia se refiere a la masa superficial mínima de la hoja exterior (100 kg/m²), cuando se utilizan sistemas resilentes o de entramado autoportante como elementos separadores. Esta exigencia se cumple sobradamente cuando se utiliza al exterior ladrillo cara vista de ½ pie de espesor que, según la base de datos del programa LIDER, se puede considerar con una masa superficial de 205 kg/m².

5.4.4 Resultados de ensayos en fachadas ventiladas de ladrillo cara vista

La justificación mediante cálculo del cumplimiento de los requisitos del DB HR es una vía posible a utilizar para el proyecto y dimensionado de todos los elementos constructivos relacionados con las prestaciones acústicas de los edificios.

Sin embargo, las soluciones novedosas de determinados elementos constructivos, como son los cerramientos de fachada, concebidas para mejorar sus prestaciones en los demás aspectos incluidos en la nueva normativa, no tienen todavía la tradición suficiente como para establecer una correspondencia entre los resultados teóricos y el comportamiento real.

La propia norma UNE-EN 12354-1:2000 *"Acústica en la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte1: Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos"*, que ha servido en buena medida de base al contenido del DB HR, reconoce en el preámbulo la incertidumbre que existe en la precisión de determinados modelos, que sólo la experiencia y los datos de campo podrán dilucidar.

Así, la mencionada norma UNE-EN 12354-1, en el primer capítulo *"Antecedentes"* dice textualmente: *"… Aunque la norma cubre los principales tipos de*

126 La Ley de Ruido define el índice de ruido día L_d de cada zona urbanística, y los niveles de exigencia del $D_{2m,nT,Atr}$ de las fachadas se establecen entre 30 dBA y 47 dBA (incrementados en 4 dBA si el ruido dominantes es de aeronaves), para valores de L_d comprendidos entre 60 dBA y 75 dBA. La NBE CA-88 fijaba el índice de aislamiento a ruido aéreo R_A en 30 dBA para todos los casos.

127 Este era el procedimiento habitual a seguir con la norma NBE CA-88: el técnico solicita a los fabricantes de productos y sistemas los resultados de ensayos de laboratorio.

edificaciones no puede de momento cubrir todas las variaciones en la construcción de edificios. Se establece una aproximación para aumentar la experiencia para futuras mejoras y desarrollos.

Durante la preparación de esta norma se puso de manifiesto que los datos de los elementos necesarios basados en métodos de medida normalizados no estaban todavía disponibles…

La precisión de esta norma sólo se puede especificar en detalle después de una amplia comparación con datos de campo, éstos sólo pueden obtenerse hasta que pase un período de tiempo después de establecerse el modelo de predicción…".

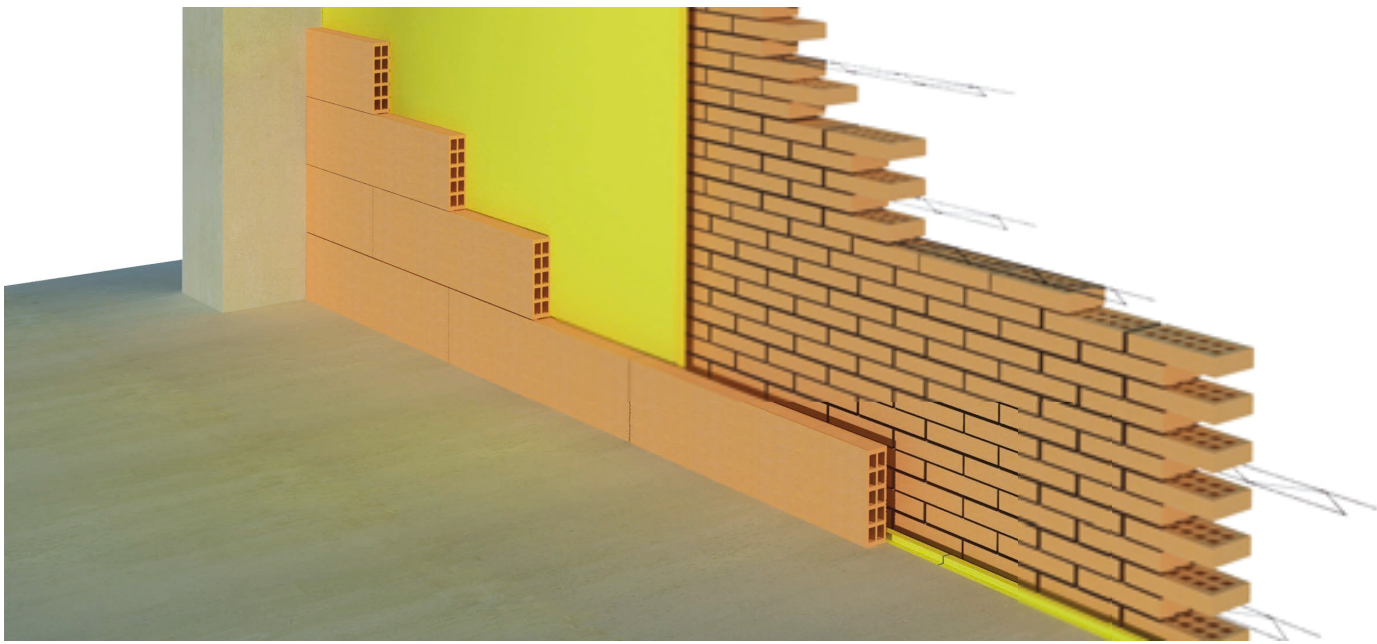
El ladrillo cara vista utilizado de forma convencional en los cerramientos de fachada tiene suficiente tradición como para asegurar un excelente comportamiento en lo que atañe a las prestaciones acústicas requeridas para las fachadas en condiciones habituales. El sistema innovador G.H.A.S.® que se presenta más adelante para incrementar las prestaciones, tanto estructurales como higrotérmicas de las fachadas de ladrillo cara vista, incorpora condiciones particulares cuya repercusión en el comportamiento acústico no ha sido probada anteriormente, precisamente por el carácter innovador del sistema.

El reto que supone mejorar unas determinadas prestaciones es conseguirlo sin menoscabo del resto de los requisitos exigibles al edificio. Por esta razón el departamento técnico de Geohidrol ha realizado mediciones in situ para determinar el aislamiento acústico entre recintos de unidades de uso distintas en edificios construidos con el *Sistema G.H.A.S.®* de *"fachada ventilada de ladrillo cara vista"*. Las mediciones in situ se realizaron con anterioridad a la entrada en vigor del DB HR, por si fuere necesaria alguna medida adicional para cumplir los requisitos exigidos.

Simultáneamente, la Sección *Cara Vista* de Hispalyt ha realizado ensayos en laboratorio de fachadas de ladrillo cara vista, ventiladas y convencionales, con objeto de poder comparar las prestaciones acústicas relacionadas con el aislamiento a ruido aéreo de ambas soluciones.

En ambos casos, tanto las mediciones in situ como los ensayos en laboratorio, ponen de manifiesto que la solución de *fachada ventilada de ladrillo cara vista* no supone ningún menoscabo del comportamiento acústico respecto de la solución convencional.

Se adjunta a continuación un breve resumen de las verificaciones realizadas.



Medición in situ

1.- OBJETO PRESENTE INFORME

Se refiere el presente informe a la evaluación de la medición acústica a realizar “in situ” de comprobación de valores L'_n y L'_{nT} en la composición que seguidamente se especifica, en la promoción ituada en El Bercial 86, Getafe, Madrid.

2.- METODOLOGÍA

El método de trabajo que se ha seguido, ha sido el siguiente:

- Selección de los puntos de medida
- Medición “in-Situ”
- Análisis de los resultados

3.- LABORATORIO ACÚSTICO EMPLEADO

Para la realización de las mediciones, se trasladó el laboratorio que a continuación se detalla con todos los equipos prefectamente calibrados y certificados:

- Ordenador portatil TOSHIBA Tecra 740CDT
- Symphonie nºs. #00720 (01db)
- Software dBTRIG32, dTRAIT32 y dBATI
- Preamplificador tipo 26AK nº s. 15259 (G.R.A.S.)
- Micrófono 1/2", tipo 40AF nº s 12385 (G.R.A.S.)
- Preamplicador tipo 26AK nº s. 15258 (G.R.A.S.)
- Micrófono 1/2", tipo 40AF nº s. 21949 (G.R.A.S.)
- Verificador calibración, tipo 4230, nº s. 123511
- Fuente dodecaédrica DO 12 con trípode nº 2136
- Preamplificador de potencia UT - TMI
- Amplificador de potencia M-700
- Ecualizador gráfico de 31 + 31 bandas EQ-9231 nº 990300973
- Emisor UHF ACT707T. nº 269022657
- Receptor UHF ACT707S, nº 269022657
- Estación metereológica HUGER
- Radio teléfonos

Antes de efectuar mediciones acústicas, se comprobó la calibración del analizador, obteniéndose a 1.000 Hz, 93,8 dB(a), dentro de las normas establecidas por el fabricante.

4.- MEDICIONES ACÚSTICAS "IN-SITU"

Se personaron nuestros técnicos el pasado día 10 de septiembre de 2007, entre las 04:30 h. y las 19:00 h., con el laboratorio anteriormente descrito.

Se comprobó la calibración al acometer las medidas acústicas obteniéndose a 1000 Hz, 94 dB, dentro de Normas.

Para la realización de la medición se comprobó que la velocidad del viento no fuera superior a 3 m/s y se eligió esas horas, para que el ruido de fondo fuera el menor y se evitaran los ruidos propios del trabajo de obra y los edificios colindantes.

Las condiciones ambientales eran las siguientes:

- Temperatura: 28°C
- Humedad relativa: 25%
- Presión atmosférica: 1016 mba.
- Velocidad viento: nula

Antes de efectuar las mediciones acústicas, se comprobó la calibración del analizador, obteniéndose a 1.000 Hz, valores dentro del grado de incertidumbre del calibrador.

El intervalo de frecuencias recepcionado es de 100 HZ a 5 Hz, en tercios de octava, para las mediciones de los ruidos de impacto.

La altura del micrófono fue de 1,20 mts, desde el suelo y no se colocó a una distancia menor de 1,5 mts. de la pared o cualquier obstáculo.

Los valores de los niveles recepcionados y los histogramas, se han recogido en los ficheros que se indican en la siguiente tabla:

FICHEROS	OBSERVACIÓN
med-2.cmg	Aislamiento ruido aéreo forjado entre dormitorio, 2º B y dormitorio 1º B, portal 1

5.- RUIDO AÉREO FORJADO ENTRE DORMITORIOS 2º B Y DORMITORIOS 1º B, PORTAL 1 (med-1)

Esta medición está completada en la NBC-CA-88 como elemento horizontal de separación de propiedades o usuarios distintos (Capítulo III, artículo nº 14).

Para la realización de este ensayo, se ha tomado como sala emisora el dormitorio 2ºB y como sala receptora el dormitorio 1ºB, portal 1.

Se ha generado un Ruido Rosa en la sala emisora. Se midió el Ruido de Fondo, comprobando su validez para la medición a realizar.

El paramento ensayado, según la documentación entregada, está formado por:

- Tarima flotante.
- Mortero de cemento.
- Lámina anti-impacto.
- Forjado de hormigón de nervios "in-situ", con bovedilla cerámica 25+5.
- Yeso.

El nivel del ruido de fondo se ha realizado en la sala receptora, antes y después de cada serie de medidas, con un tiempo de integración de 15 seg. Los valores de emisión y recepción se han realizado 10 posiciones fijas de micrófono, con dos posiciones de la fuente sonora y con un tiempo de integración de 10 seg. La posición de la fuente de ruido se ha colocado para que la radiación directa no sea dominante y la distancia entre los bordes del recinto y el centro de la fuente no sea inferior a 0,5 mts. La distancia entre las posiciones de la fuente no ha sido inferior a 1,4 mts.

Para el cálculo del Tiempo de reverberación el rango de la caída ha sido superior a 20 dB y el extremo del rango ha sido superior en 10 dB al nivel de fondo. Se ha realizado con dos posiciones de la fuente, y cuatro posiciones de micrófono con dos lecturas en cada caso.

Se entregan Hoja de Cálculo del Aislamiento Acústico R'_w donde se indica la superficie de la muestra a ensayar, así como el volumen de la sala receptora y los espectros con frecuencias.

La medición se realizó el día 10/09/07, iniciándose a las 17:45 horas.

Los valores de los niveles de L_1, L_2, Tiempo de reverberación y ruido de fondo se realizan promediando valores de distintas posiciones de micrófonos, fuente de ruido, según se indica en el Manual de Procedimientos de nuestro laboratorio y la norma UNE-EN ISO 140-4: 1.999 : "Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: medición "in-situ" del aislamiento al ruido aéreo entre locales.

Se adjunta Hoja de índice de reducción sonora.

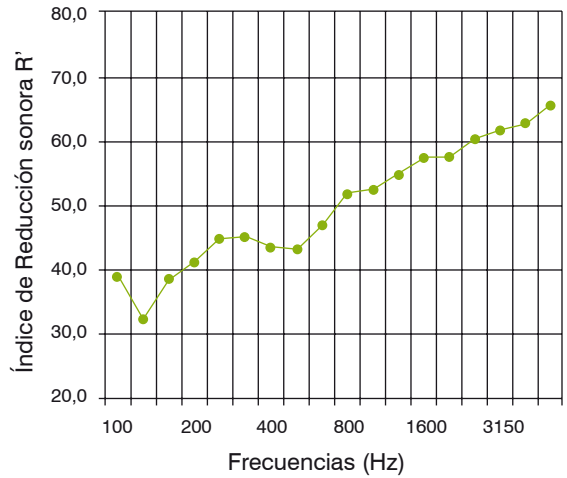
ÍNDICE DE REDUCCIÓN SONORA APARENTE SEGÚN ISO-140-4

Muestra: Tarima flotante - Mortero de cemento - Lámina anti-impacto - Forjado de hormigón de nervios "in-situ", con bovedilla cerámica 25+5 - Yeso.

Situación: AÉREO FORJADO DE DORMITORIO 2ºB Y DORMITORIO 1ºB, PORTAL 1

Volumen sala receptora:	19 m^3	*Temperatura:*	28ºC
Área de la muestra:	7 m^2	*Humedad Relativa:*	25%

f (Hz)	R' (dB)
100	39,2
125	32,2
160	38,5
200	41,1
250	44,9
315	45,1
400	43,5
500	43,0
630	47,0
800	51,9
1000	52,5
1250	55,0
1600	57,5
2000	57,7
2500	60,4
3150	61,9
4000	62,9
5000	65,7



Observaciones: Fachada ventilada

Índices de Aislamiento:	R'_w (C;Ctr):	51 (-2, -5)	dB
	R' (A)	49	dB(A)

Nº de resultado:	878/1	Firma y sello:
Fecha informe:	Sept./07	
	Anexo al informe nº : 878	

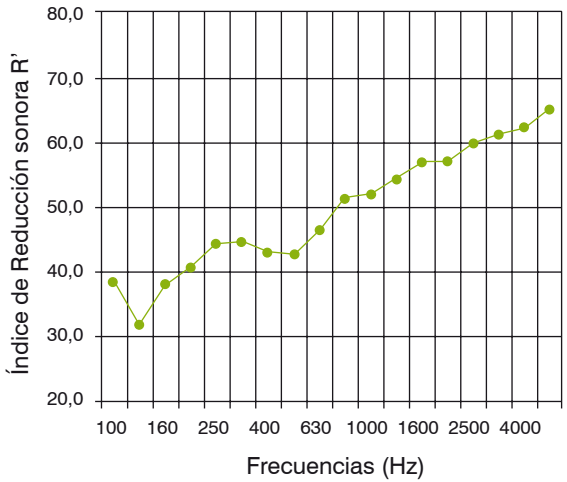
ÍNDICE DE REDUCCIÓN SONORA APARENTE SEGÚN ISO-140-4

Muestra: Tarima flotante - Mortero de cemento - Lámina anti-impacto - Forjado de hormigón de nervios "in-situ", con bovedilla cerámica 25+5 - Yeso.

Situación: AÉREO FORJADO DE DORMITORIO 2ºB Y DORMITORIO 1ºB, PORTAL 1

Volumen sala receptora: 19 m^3 *Temperatura:* 28ºC
Área de la muestra: 7 m^2 *Humedad Relativa:* 25%

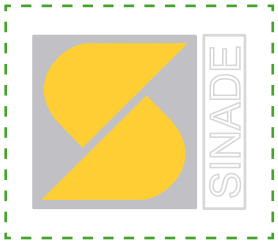
f (Hz)	R' (dB)
100	38,5
125	31,6
160	37,9
200	40,5
250	44,3
315	44,5
400	42,9
500	42,4
630	46,4
800	51,3
1000	51,9
1250	54,4
1600	56,9
2000	57,1
2500	59,8
3150	61,3
4000	62,3
5000	65,1



Observaciones: Fachada ventilada

Índices de Aislamiento:	$ID_{nT,w}$	50 (-1, -4)	dB
	$D_{nT,A}$	49	dB(A)

Nº de resultado:	878/1	Firma y sello:
Fecha informe:	Sept./07	
	Anexo al informe nº : 878	



6.- TABLA RESUMEN RESULTADOS EMISIONES

TIPO	COMPOSICIÓN	R' (A)	$D_{nT,A}$
Forjado aéreo	Tarima flotante Mortero de cemento Lámina anti-impacto Forjado de hormigón de nervios "in-situ", con bovedilla cerámica 25+5 Yeso	49	49

Ensayo en laboratorio

Informe de Ensayo Nº B0158 – IN – CT – F - 3

Medidas de aislamiento acústico en laboratorio

MUESTRA DE ENSAYO: Solución de fachada ventilada de ladrillo caravista y ladrillo gran formato, con poliestireno extruido.

SOLICITANTES:
- HISPALYT.
- Instituto de Ciencias de la Construcción EDUARDO TORROJA.

NORMA APLICADA: UNE-EN ISO 140-3:1995.

FECHA DE ENSAYO: 29 de noviembre de 2.007.

FECHA DE EMISIÓN DE INFORME: 26 de febrero de 2.008.

Responsable Laboratorio Acústica	Técnico Superior Laboratorio Acústica
Mª José de Rozas	**Susana Escudero**

La titularidad técnica de la acreditación ENAC Nº4/LE456 corresponde a la fundación LABEIN, así como las firmas técnicas de este informe.

Las instalaciones en las que se ejecutan los ensayos bajo acreditación ENAC Nº4/LE456 pertenecen al Área de Acústica del Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación del Gobierno Vasco.

EL PRESENTE INFORME CONSTA DE:

Nº total de páginas: 13 Páginas del ANEXO: 1

El presente documento concierne única y exclusivamente a las muestras sometidas a ensayo y al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones.

Queda terminantemente prohibida la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización expresa por escrito de LABEIN.

El objeto de ensayo ha sido sometido a las pruebas requeridas por el solicitante, aplicando los procedimientos especificados para la normativa usada.

Los resultados de los ensayos se recogen en las páginas interiores. La incertidumbre de las medidas cumple las recomendaciones de la UNE-EN 20140-2:1994.

Este documento es una copia en PDF del Informe original, por solicitud de nuestro cliente.

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

EUSKO JAURLARITZA GOBIERNO VASCO

ETXEBIZITZA ETA GIZARTE GAIETAKO SAILA
Etxebizitza, Berrikuntza eta Kontrol Zuzendaritza
Eraikuntzaren kalitate kontrolerako Laborategia

DEPARTAMENTO DE VIVIENDA Y ASUNTOS SOCIALES
Dirección de Vivienda, innovación y Control
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación

AKUSTIKA ARLOA *kudeatzailea:*
ÁREA DE ACÚSTICA *gestionada por:*

labein tecnalia

ENAC ENSAYOS Nº 4 / LE 456

EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO

AKUSTIKA ARLOA/ÁREA DE ACÚSTICA
Eraikuntzaren Klaitate Kontrolerako Laborategia
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación

labein tecnalia

ÍNDICE

1.- OBJETO 3
2.- SOLICITANTES 3
3.- LUGAR DE PREPARACIÓN DE LA MUESTRAY EJECUCIÓN DEL ENSAYO 3
4.- NORMAS Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO UTILIZADOS 4
5.- DISPOSICIÓN DE MEDIDA 4
5.1.- Descripción de la muestra 4
5.2.- Recintos de Ensayo 1 0
5.3.- Equipos 1 1
6.- PROCESO DE MEDIDA Y EVALUACIÓN 1 1
7.- RESULTADOS 1 2

ANEXO Resultados de ensayo

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

1.- OBJETO

En el presente informe se recogen los resultados del ensayo de **aislamiento acústico a ruido aéreo** realizado según norma **UNE-EN ISO 140-3** de un cerramiento vertical doble compuesto por fábrica de ladrillo caravista y ladrillo gran formato (LGF) (fabricantes 16 y 17 respectivamente, según Documento PRZD 1674-CTP-IN-12 *"Plan de ensayos acústicos en laboratorio"*).

2.- SOLICITANTES

• HISPALYT

Calle Orense, Nº 10, 2ª planta, Oficina 14.

28020 MADRID

• Instituto de Ciencias de la Construcción EDUARDO TORROJA EDUARDO TORROJA

Calle Serrano Galvache, Nº 4.

28033 MADRID

PERSONA DE CONTACTO: Ana Ribas.

3.- LUGAR DE PREPARACIÓN DE LA MUESTRA Y EJECUCIÓN DEL ENSAYO

El montaje de la muestra se ha llevado a cabo en el Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación del Gobierno Vasco, sito en:

C/ Aguirrelanda, Nº 10

01013 Vitoria - Gasteiz.

El ensayo se ha realizado en las salas de transmisión horizontal del Área de Acústica de dicho laboratorio por personal de LABEIN (Unidad de Construcción y Desarrollo del Territorio).

Los materiales empleados en la construcción de la muestra han sido seleccionados y entregados por el cliente. La construcción de la muestra ha sido realizada por *"Construcciones IGLESIAS"*, bajo la supervisión de personal de LABEIN y ha concluido el 9 de octubre de 2.007, a excepción de 16 juntas verticales de mortero, cuya ejecución finalizó el 23 de noviembre de 2.007.

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

EUSKO JAURLARITZA GOBIERNO VASCO
AKUSTIKA ARLOA/ÁREA DE ACÚSTICA
Eraikuntzaren Klaitate Kontrolerako Laborategia
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación
labein tecnalia

4.- NORMAS Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO UTILIZADOS

- **UNE-EN ISO 140-3:1995**: "Acústica. Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción."
- **UNE-EN ISO 717-1:1997**: "Evaluación del aislamiento acústico a ruido aéreo en los edificios y en los elementos de construcción".
- **PE.CM-AA-61-E**: "Procedimiento para la determinación del aislamiento acústico a ruido aéreo en las cámaras de transmisión horizontal y vertical según UNE-EN ISO 140-3:1995".
- **PE.MC-AA-06-M**: "Procedimiento para la gestión de muestras de ensayos acústicos en laboratorio".

5.- DISPOSICIÓN DE MEDIDA

5.1.- Descripción de la muestra

Las dimensiones de la muestra han sido 2,8 m de alto por 3,6 m de largo (superficie de la muestra 10,08 m^2). La muestra ha sido construida en un marco prefabricado de hormigón de 40 cm de espesor.

La muestra bajo ensayo consiste en una solución de fachada ventilada, compuesta por fábrica de ladrillo caravista con 4 juntas verticales libres de mortero, cámara de aire de 30 mm, poliestireno extruido de 40 mm y fábrica de ladrillo gran formato de 7 revestida con 15 mm de yeso por su cara exterior (ver figuras 1-2 y fotos 1-12).

Las dimensiones medidas del ladrillo caravista son: 240 mm de largo, 50 mm de alto y 115 mm de espesor (ver figura 3). El peso medio medido del mismo ha sido de 1,5 kg (masa superficial estimada 124,2 kg/m^2).

Las dimensiones medidas del ladrillo gran formato son: 705 mm de largo, 510 mm de alto y 70 mm de espesor (ver figura 4). El peso medio medido del mismo ha sido de 16,7 kg (masa superficial estimada 46,4 kg/m^2).

El montaje del ladrillo caravista se ha realizado con junta horizontal y vertical de mortero de 10 mm de espesor, excepto 4 juntas verticales libres de mortero dispuestas en la primera y penúltima hilera, tal y como se indica en la figura 2. El montaje del ladrillo gran formato se ha realizado con junta horizontal y vertical de pegamento-cola.

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

Las planchas de poliestireno extruido, *"Styrodur 3035 CS"*, tienen un espesor de 40 mm y una densidad medida de 30 kg/m^3 y se han colocado mediante separadores de poliestireno extruido de 30 mm de espesor, pegados con pegamento-cola sobre la fábrica de ladrillo caravista (ver fotos 6 - 8).

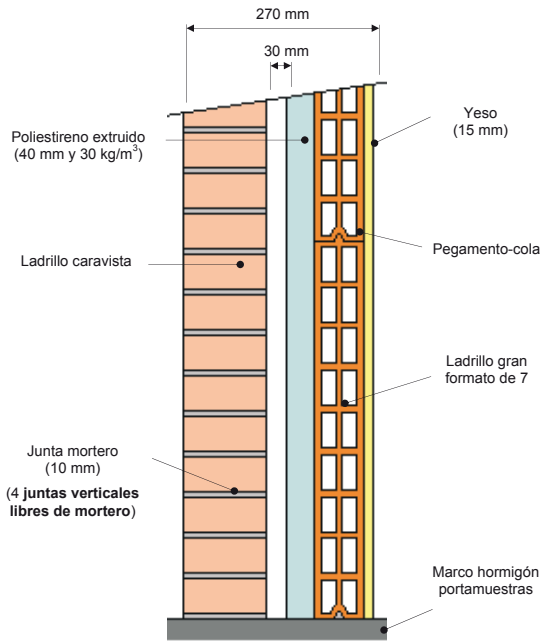


Figura 1: Esquema de muestra ensayada (B0158-09-M363)

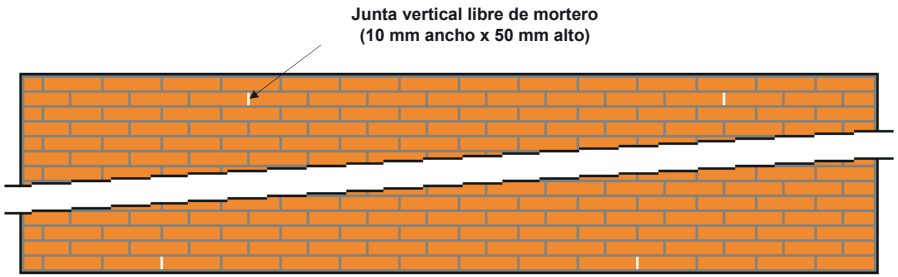


Figura 2: Ubicación de juntas libres de mortero

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO
AKUSTIKA ARLOA/ÁREA DE ACÚSTICA
Eraikuntzaren Klaitate Kontrolerako Laborategia
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación
labein tecnalia

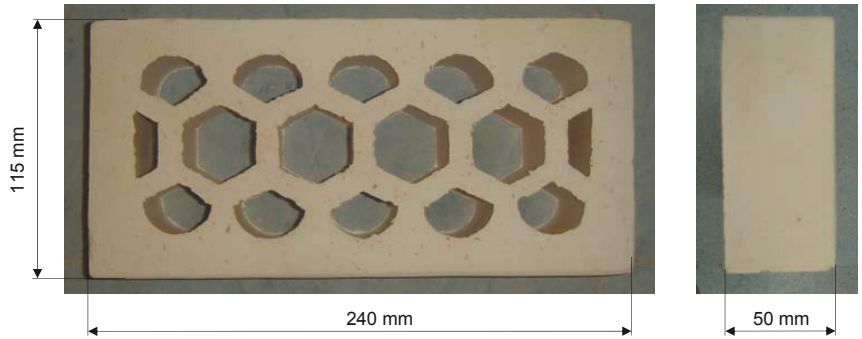


Figura 3: Dimensiones medidas de ladrillo caravista

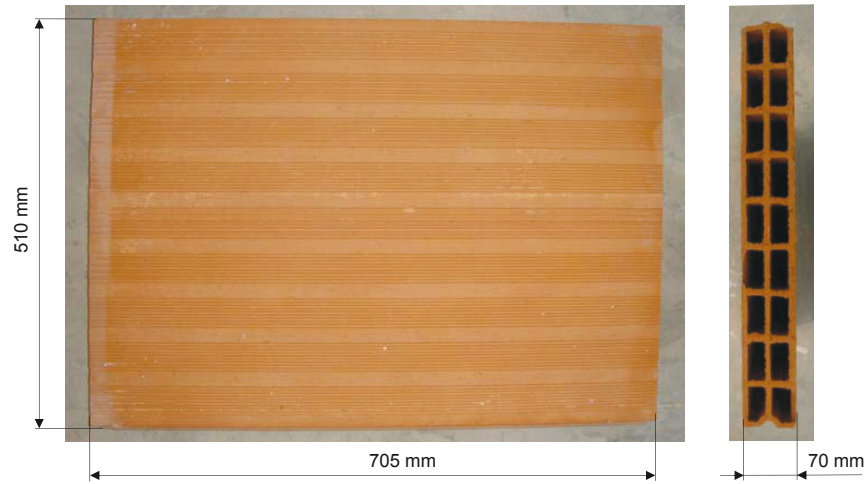
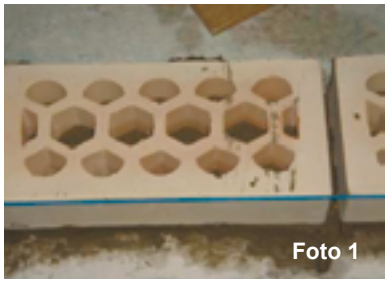
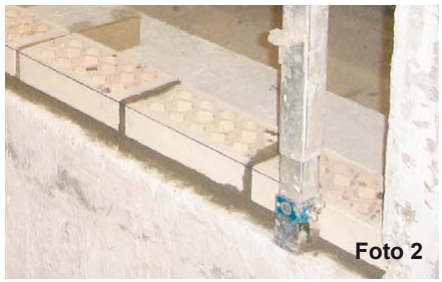


Figura 4: Dimensiones medidas de ladrillo gran formato

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF





Fotos 1 - 3: Montaje de fábrica de ladrillo caravista con juntas verticales de ventilación

Penúltima hilera

Primera hilera

Fotos 4 y 5: Detalle de juntas verticales de ventilación libres de mortero

EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO
AKUSTIKA ARLOA/ÁREA DE ACÚSTICA
Eraikuntzaren Klaitate Kontrolerako Laborategia
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación
labein tecnalia

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO

AKUSTIKA ARLOA/ÁREA DE ACÚSTICA
Eraikuntzaren Klaitate Kontrolerako Laborategia
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación

labein tecnalia

Foto 6

Foto 7

Foto 8

<u>Fotos 6 - 8</u>: Montaje de poliestireno extruido

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

Fotos 9 y 10: Montaje de fábrica de ladrillo gran formato

Fotos 11 y 12: Vista de muestra en cámaras de ensayo

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO
AKUSTIKA ARLOA/ÁREA DE ACÚSTICA
Eraikuntzaren Klaitate Kontrolerako Laborategia
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación
labein tecnalia

5.2.- Recintos de Ensayo

El ensayo se ha realizado en las cámaras de transmisión horizontal, compuestas por una sala emisora y otra receptora. La cámara receptora está compuesta de una doble caja de hormigón de veinte y diez centímetros de espesor cada una acústicamente desconectadas. La movilidad de la sala emisora permite la construcción y/o montaje de la muestra en el exterior y la posterior colocación de la misma entre las salas de ensayo.

Dichas salas cumplen la norma **UNE-EN ISO 140-1:1998**.

En la figura 5 se muestra un croquis de las salas de transmisión horizontal.

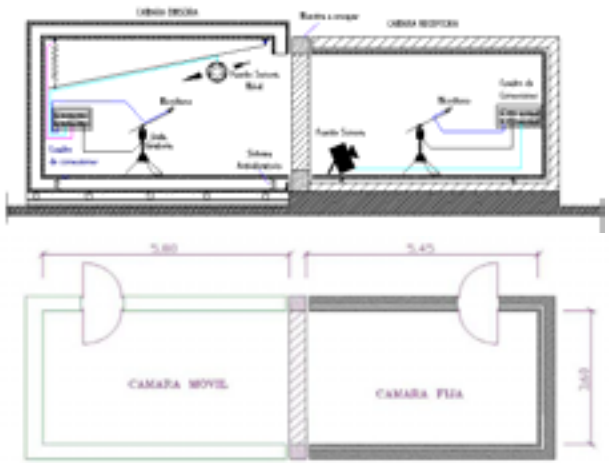


Figura 5: Cámaras de transmisión horizontal

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

5.3.- Equipos

	Sala Horizontal Emisora	Sala Horizontal Receptora
Micrófonos	Brüel & Kjær 4190; Nº serie 2058386	Brüel & Kjær 4190; Nº serie 2058385
Preamplificadores	Brüel & Kjær 2669; Nº serie 2025847	Brüel & Kjær 2669; Nº serie 2025851
Fuentes sonoras	Brüel & Kjær 4296; Nº serie 2071420	CERWIN VEGA; Nº 012446
Jirafas giratorias	Brüel & Kjær 3923; Nº serie 2036586	Brüel & Kjær 3923; Nº serie 2036591

	Sala de Control
Analizador	Brüel & Kjær 2144; Nº serie 1893979
Amplificador	LAB Gruppen;LAB 300; Nº serie 970-967
Ecualizador	Sony, SRP-E100; Nº serie 400238
Calibrador	Brüel & Kjær 4231; Nº serie 2061477
Medidor de condiciones atmosféricas	Testo 0560 4540; Nº serie 711.88490007GB

6.- PROCESO DE MEDIDA Y EVALUACIÓN

El índice de reducción sonora (R) para cada tercio de octava entre 100 Hz y 5 kHz se ha calculado según la norma **UNE-EN ISO 140-3** de acuerdo con la siguiente expresión:

$$R=L_1-L_2+10*\text{Log } S/A \qquad \text{donde,}$$

L_1: Nivel de presión sonora promedio en la sala emisora.

L_2: Nivel de presión sonora promedio en la sala receptora.

S: Área de la muestra.

A: Área de absorción sonora equivalente en el recinto receptor.

La medida de los niveles de presión sonora promedio L_1 y L_2, se ha realizado emitiendo ruido blanco ecualizado (entre 100 Hz y 5 kHz) mediante una fuente omnidireccional móvil.

El campo sonoro en la sala emisora y receptora se ha muestreado mediante un micrófono girando con un radio de un metro a una velocidad de 16 s/ciclo durante 32 s. de medida.

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

EUSKO JAURLARITZA GOBIERNO VASCO
AKUSTIKA ARLOA/ÁREA DE ACÚSTICA
Eraikuntzaren Klaitate Kontrolerako Laborategia
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación
labein tecnalia

El área de absorción sonora equivalente se ha evaluado a partir del tiempo de reverberación medido en la sala receptora utilizando la fórmula de Sabine:

$$A=0.16*V/T \qquad \text{donde,}$$

A: Área de absorción sonora equivalente en el recinto receptor.

T: Tiempo de reverberación del recinto receptor.

V: Volumen del recinto receptor.

El tiempo de reverberación de la sala receptora se ha determinado empleando una posición de fuente y seis posiciones fijas de micrófono distribuidas a 60º en el recorrido del micrófono.

Finalmente se ha medido el ruido de fondo de la sala receptora en cada tercio de octava entre 100 Hz y 5 kHz mediante un micrófono girando con un radio de un metro a una velocidad de 16 s/ciclo durante 32 s. de medida.

Antes y después de la realización del ensayo, se ha procedido a la verificación de toda la cadena de medida.

7.- RESULTADOS

Se presentan en el ANEXO los siguientes resultados para la muestra bajo ensayo:

- El **índice de reducción sonora**, **R**, en bandas de frecuencias de tercio de octava entre **100 y 5000 Hz**, en **tabla y gráfica**.

- El **índice global de reducción acústica ponderado A**, $\mathbf{R_A}$ ó R(A), entre **100 y 5000 Hz**, expresado con una cifra decimal, como uno de los parámetros acústicos que define el aislamiento a ruido aéreo de la muestra para la aplicación del ***Documento Básico "DB-HR Protección frente al ruido"***, del *Código Técnico de la Edificación (CTE)*.

  Este índice, R_A, también denominado índice de aislamiento a ruido rosa en dB(A), es el índice de especificación de requisitos de la *Norma Básica de Edificación:* ***NBE-CA 88 "Condiciones Acústicas"***, vigente hasta el 24 de octubre de 2008, en coexistencia con el *Documento Básico "DB-HR Protección frente al ruido"* del *Código Técnico de la Edificación*.

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

- El **índice ponderado de reducción sonora**, $\mathbf{R_w}$, calculado según la norma ***UNE-EN ISO 717-1***, a partir del índice de reducción sonora, R.

- Los **términos de adaptación al espectro** entre **100 y 3150 Hz**, **C** y $\mathbf{C_{tr}}$, calculados según la norma ***UNE-EN ISO 717-1***, que son los valores, en decibelios, que han de añadirse al valor de la magnitud global (R_w, por ejemplo) para tener en cuenta las características de un espectro de ruido particular, tales como ruido rosa (C) y ruido de tráfico (C_{tr}).

Además de los resultados acústicos, se recoge una estimación de la masa superficial (kg/m^2) de la muestra bajo ensayo, obtenida a partir de las masas de los diferentes componentes que conforman la misma.

EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO

AKUSTIKA ARLOA/ÁREA DE ACÚSTICA
Eraikuntzaren Klaitate Kontrolerako Laborategia
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación

labein tecnalia

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO

ETXEBIZITZA ETA GIZARTE GAIETAKO SAILA

Etxebizitza, Berrikuntza eta Kontrol Zuzendaritza
Eraikuntzaren kalitate kontrolerako Laborategia

DEPARTAMENTO DE VIVIENDA Y ASUNTOS SOCIALES

Dirección de Vivienda, Innovación y Control
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación

Aislamiento a Ruido Aéreo según UNE-EN ISO 140-3:1995
Medidas en Laboratorio

Fecha Ensayo: 29/11/07

Solicitantes: HISPALYT / Instituto de Ciencias de la Construcción EDUARDO TORROJA.

Muestra: Solución de fachada ventilada de ladrillo caravista y ladrillo gran formato, con poliestireno extruido.

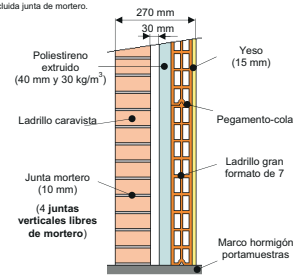
Descripción de la muestra:

La muestra bajo ensayo consiste en un cerramiento vertical compuesto por fábrica de ladrillo caravista (240x50x115 mm y 124,2 kg/m^2) con 4 juntas verticales libres de mortero, cámara de aire de 30 mm, poliestireno extruido de 40 mm y fábrica de ladrillo gran formato de 7 (705x510x70 mm y 46,4 kg/m^2) revestida con 15 mm de yeso por su cara exterior, según se detalla en informe.

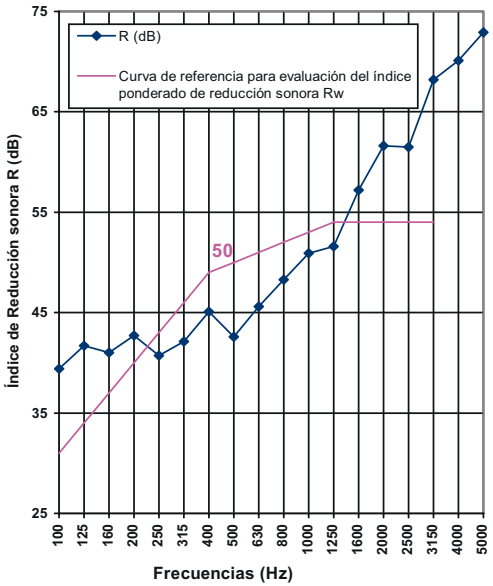
Volumen sala receptora: 55 m^3
Volumen sala emisora: 65 m^3
(*) Incluida junta de mortero.

Masa superficial estimada: 211 kg/m^2 (*)
Área de la muestra: 10,08 m^2 (2,8x3,6 m)

Temperatura: 13,2 ºC
Humedad relativa: 64 %



f (Hz)	R (dB)
100	39,4
125	41,7
160	41,0
200	42,7
250	40,7
315	42,1
400	45,1
500	42,6
630	45,6
800	48,3
1000	50,9
1250	51,6
1600	57,2
2000	61,6
2500	61,5
3150	68,2
4000	70,1
5000	72,9



Indices de aislamiento:			
	R_A:	50,1	dBA
	R_w (C;C_{tr}):	50 (-1;-3)	dB

Evaluación basada en medidas de laboratorio mediante método de ingeniería

ENAC ENSAYOS Nº 4/LE456

Nº de resultado: B0158 – 09 – M363

Fecha informe: 26 de febrero de 2.008

Firma:

Area de Acústica
Gestionada por
labein tecnalia

Anexo al informe Nº B0158 - IN - CT - F - 3

Pág. 1 de 1

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

5.5 Requisito de protección contra incendio

El objetivo del requisito básico de protección en caso de incendio, así como las exigencias básicas de los edificios se establecen en el artículo 11 de la Parte 1 del Código Técnico de la Edificación.

El objetivo básico definido como *"Seguridad en caso de incendio"* consiste en reducir a límites aceptables el riesgo de que los usuarios de un edificio sufran daños derivados de un incendio de origen accidental, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento.

El Documento Básico *"Seguridad en caso de incendio"*[128] especifica parámetros objetivos y procedimientos cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de las exigencias básicas y la superación de los niveles mínimos de calidad propios de este requisito básico[129].

El DB SI está dividido en seis partes, destinada cada una de ellas a describir una exigencia básica. La que afecta directamente al sistema constructivo de los cerramientos de fachada y a sus materiales constitutivos es la Sección 2 *"Propagación exterior"*.

La novedad más significativa, respecto a la normativa anterior en lo referente a las fachadas de los edificios y sus componentes, se centra en las condiciones de *reacción al fuego y resistencia al fuego* de los elementos constructivos, que se debe hacer conforme a las nuevas clasificaciones europeas establecidas mediante el Real Decreto 312/2005, de 18 de marzo; lo que ha originado la elaboración de una nueva normativa de ensayos de los materiales de construcción para la obtención de la clasificación correspondiente, denominada *Euroclase.* La nueva normativa de ámbito europeo que regula los ensayos para la clasificación de los materiales es la norma EN 13501-1:2002.

Antecedentes del ámbito reglamentario

La base del sistema que rige los productos de construcción en el ámbito europeo es la *Directiva de los Productos de la Construcción*, publicada en el D.O.C.E. de diciembre de 1988 cuya entrada en vigor se produjo en junio de 1991. Este documento fue traspuesto a la legislación española en el Real Decreto 1639/1992 y una ampliación emitida en 1993.

La directiva establece que los productos de construcción deben cumplir con los denominados *requisitos esenciales* para ser puestos en el mercado europeo, de los cuales uno de ellos es el requisito de *Seguridad en caso de incendio*. Esto ha supuesto un hito en la articulación del mercado europeo de los productos de construcción con funciones definidas en la protección contra incendios, fundamentalmente en los aspectos de la reacción y la resistencia al fuego.

Los principios básicos establecidos por la directiva para el cumplimiento del requisito esencial de seguridad en caso de incendio se consiguen mediante el correcto diseño del edificio (que no es objeto de la directiva) y mediante el control de las exigencias a los productos que componen el edificio, ya sean sus materiales (*reacción al fuego*) o sus elementos constructivos (*resistencia al fuego*) que sí son objeto de la directiva.

128 En adelante DB SI.

129 Se exceptúan los edificios, establecimientos y zonas de uso industrial a los que les sea de aplicación el *"Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales"*. A estos efectos se consideran zonas de uso industrial, además de las propiamente dichas, los almacenes integrados en establecimientos de cualquier uso no industrial, cuando la *carga de fuego total* exceda de $3x10^6$ MJ; y los garajes para vehículos destinados al transporte de personas o mercancías. La *carga de fuego* es la suma de las energías caloríficas que se liberan en la combustión de todos los materiales combustibles existentes en un espacio; se obtiene conforme a la norma UNE-EN 1991-1-1:2004.

Reacción al fuego según
la nueva normativa europea

Se entiende por *reacción al fuego* de los materiales la respuesta ante un fuego al cual está expuesto y alimenta. La valoración de este parámetro se realiza mediante varios niveles de ataque térmico que corresponden a diferentes estados en el desarrollo de un fuego. Los ensayos de reacción al fuego previstos por las normas consisten en diferentes exposiciones al fuego del material en diferentes configuraciones dependiendo de su uso. La exposición al calor mediante llama directa y/o radiación, crea los diferentes escenarios donde los incendios se pueden iniciar y desarrollar en la realidad. Existen definidos cinco escenarios de referencia para evaluar uno o varios de los siguientes aspectos de la reacción al fuego de un material:

- Combustibilidad: es la capacidad del material de mantener o no un proceso de combustión en unas determinadas condiciones de ensayo.

- Potencial calorífico o calor de combustión: es la cantidad de energía calorífica liberada por el material por unidad de masa en una combustión completa.

- Inflamabilidad: es la facilidad que tiene un material combustible para emitir gases que ardan.

- Emisión de humos: es la capacidad para impedir la visión y, por tanto, dificultar la evacuación[130].

- Caída de partículas inflamadas: puede ser en forma de gotas o de material desprendido[131].

- Toxicidad de gases[132].

Sistema de clasificación mediante
Euroclases de reacción al fuego

La norma EN 13501-1:2002 permite clasificar, dependiendo de los resultados obtenidos en los ensayos, los materiales de construcción en la *Euroclase* correspondiente que define tres aspectos: la reacción al fuego, la densidad de los humos que se generan en la combustión y el desprendimiento de gotas o partículas inflamables.

En los revestimientos de paredes y techos la Euroclase se designa por tres siglas: una letra mayúscula que puede ir seguida de un número (A1, A2, B, C, D, E y F), que indica la reacción al fuego del material en términos de inflamabilidad, desarrollo de llamas y velocidad de cesión de calor; la letra *"s"* minúscula seguida de un número (s1, s2 y s3) que indica el grado de opacidad de humos; y la letra *"d"* minúscula seguida de un número (d0, d1 y d2) que indica la naturaleza de las gotas o partículas desprendidas en su caso.

La secuencia de letras y números dan idea del nivel de la prestación correspondiente; así, la letra *"A"* supone mayor prestación del material en relación a la combustión que la letra *"B"*: y el número *"1"* indica mayor prestación en cuanto a la emisión de humos que el número *"2"*, etc.

Por ejemplo, un revestimiento de un muro que tenga la clasificación Bs2d0 significa que presenta buena reacción al fuego (cercana a la no inflamabilidad), una moderada emisión de humos y no desprende gotas ni partículas inflamadas persistentes.

Esta clasificación afecta a los materiales que constituyen las barreras y revestimientos de los cerramientos de fachada en soluciones no convencionales de fachadas ventiladas de junta seca (no estancas), como se indica más adelante. Las fachadas de ladrillo cara vista en la hoja exterior y trasdosado cerámico en la interior, con juntas de mortero, incluso las que poseen llagas de ventilación en la primera y última hilada, son fachadas estancas a los efectos de propagación del incendio, por lo que las barreras y revestimientos incorporados en el interior de la cámara de aire se pueden considerar protegidos y no les son aplicables las exigencias de reacción al fuego.

5.5.1 Aplicación del DB SI a los cerramientos de fachada

El sistema constructivo de los cerramientos de fachada tiene relevancia en dos exigencias básicas fundamentales de los edificios, de las relacionadas con la seguridad en caso de incendio. Se trata de las exigencias básicas de *propagación interior* y *propagación exterior* del fuego que puede producirse a través de la fachada.

Otras exigencias básicas que pueden afectar a los cerramientos, aunque no a su sistema constructivo son: *la resistencia al fuego de la estructura,* que interviene cuando los cerramientos tienen, además, una función sustentante para otros elementos[133]; y la exigencia básica de *intervención de los bomberos* que puede afectar en lo que respecta a accesibilidad por fachada, aunque sólo desde el punto de vista de la composición arquitectónica de la misma.

Sección SI 1. Propagación interior

Este Sección del DB SI está dedicada a describir los procedimientos para evitar que un incendio producido accidentalmente en una zona del edificio se propague al resto. Estos procedimientos se fundamentan en la sectorización mediante elementos separadores que opongan resistencia a la transmisión del fuego.

La compartimentación contra incendios de los espacios ocupables, definida en la Sección 1 del DB SI, debe tener continuidad en los espacios ocultos, en particular en la cámara de aire del cerramiento de fachada cuando transcurre sin interrupción entre plantas sucesivas. En estos casos, se puede conseguir la compartimentación disponiendo en la cámara dispositivos intumescentes de obturación que, en caso de incendio, cierren automáticamente la sección de paso.

Una alternativa mucho más sencilla, puesto que elimina la necesidad de estos dispositivos auxiliares de obturación es dotar a la hoja interior del cerramiento del mismo nivel de exigencia que corresponde a los forjados delimitadores de los sectores de incendio.

El nivel de exigencia para los elementos de sectorización depende del uso del edificio y de la altura total de evacuación. En edificios de uso residencial privado o público, docente y administrativo, que constituye el campo habitual de los cerramientos de ladrillo cara vista, la exigencia de *resistencia al fuego* para los forjados, que se debe imponer también a la hoja interior del cerramiento, cuando la exterior es pasante o autoportante, está comprendida entre EI-60, para una altura de evacuación no superior a 15 m; hasta EI-120, para edificios en altura. Este requisito se cumple con hoja interior de tabique o tabicón de ladrillo de ladrillo hueco, según la exigencia, y guarnecido de yeso de 1,5 cm de espesor por la cara expuesta, tal como se indica en la tabla 5.8.

130 El humo es generalmente la primera manifestación detectada de un incendio en marcha, capaz de extenderse por todo el edificio, creando las primeras sensaciones de pánico y, por tanto, incrementando la gravedad del peligro.

131 Cada gota o partícula inflamada desprendida puede ser un foco potencial de incendio.

132 El efecto de los gases tóxicos, provocando intoxicación y asfixia está considerado como la causa principal de mortandad en siniestros por fuego.

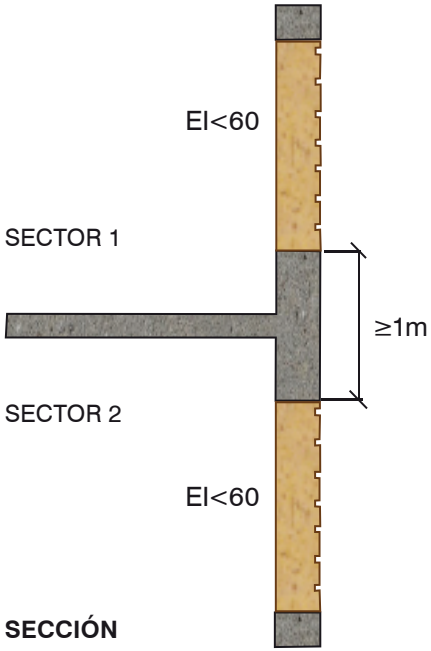
133 En este aspecto la utilización de material cerámico no suele requerir medidas adicionales por las excelentes propiedades de aislamiento que proporciona.

Tabla 5.8 Resistencia al fuego de muros y tabiques de fábrica de ladrillo cerámico

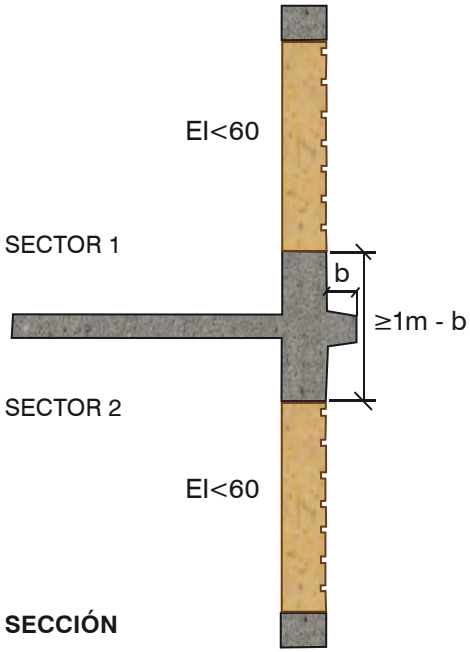
Tipo de revestimiento		Espesor e de la fábrica (mm)				
		Ladrillo hueco			Ladrillo macizo o perforado	
		40≤e<80	80≤e<110	e≥110	100≤e<200	e≥200
Sin revestir		(1)	(1)	(1)	REI-120	REI-240
Enfoscado	Por la cara expuesta	(1)	EI-60	EI-90	EI-180	REI-240
	Por las dos caras	EI-30	EI-90	EI-120	REI-180	REI-240
Guarnecido	Por la cara expuesta	EI-60	EI-120	EI-180	EI-240	REI-240
	Por las dos caras	EI-90	EI-180	EI-240	EI-240	REI-240

(1) No es usual.

* Fuente: Documento Básico *"Seguridad en caso de incendio"*. Anejo F *"Resistencia al fuego de los elementos de fábrica"*, tabla F1.



SECCIÓN



SECCIÓN

Sección SI 2. Propagación exterior

En esta Sección se define una exigencia que afecta a las fachadas de los edificios, que tiene como objetivo limitar el riesgo de propagación exterior horizontal del incendio a edificios colindantes. En este sentido se trata de disponer las fachadas de edificios colindantes suficientemente separadas para que el fuego no se propague en horizontal. Es un requisito que tiene trascendencia desde el punto de vista urbanístico y compositivo, pero no afecta al sistema constructivo de los cerramientos. Es oportuno destacar aquí que sólo es preciso cumplir este requisito de separaciones mínimas entre fachadas colindantes cuando sean inferiores a EI-60, lo cual no ocurre con soluciones convencionales de hoja exterior de ½ pie de ladrillo cerámico y trasdosado interior.

El requisito que sí afecta directamente al sistema constructivo del cerramiento es el que tiene como objetivo limitar el riesgo de propagación vertical del incendio por fachada entre dos sectores distintos. La exigencia a este respecto es que la fachada debe ser al menos EI-60 en una franja de 1 metro de altura, como mínimo, medida sobre el plano de fachada. Si existen vuelos o salientes, esta distancia se puede reducir.

En sistemas convencionales, el encuentro del forjado se produce con la hoja exterior del cerramiento, y la exigencia se cumple sobradamente en lo que afecta a las partes ciegas, repercutiendo únicamente en el diseño de los huecos rasgados en vertical.

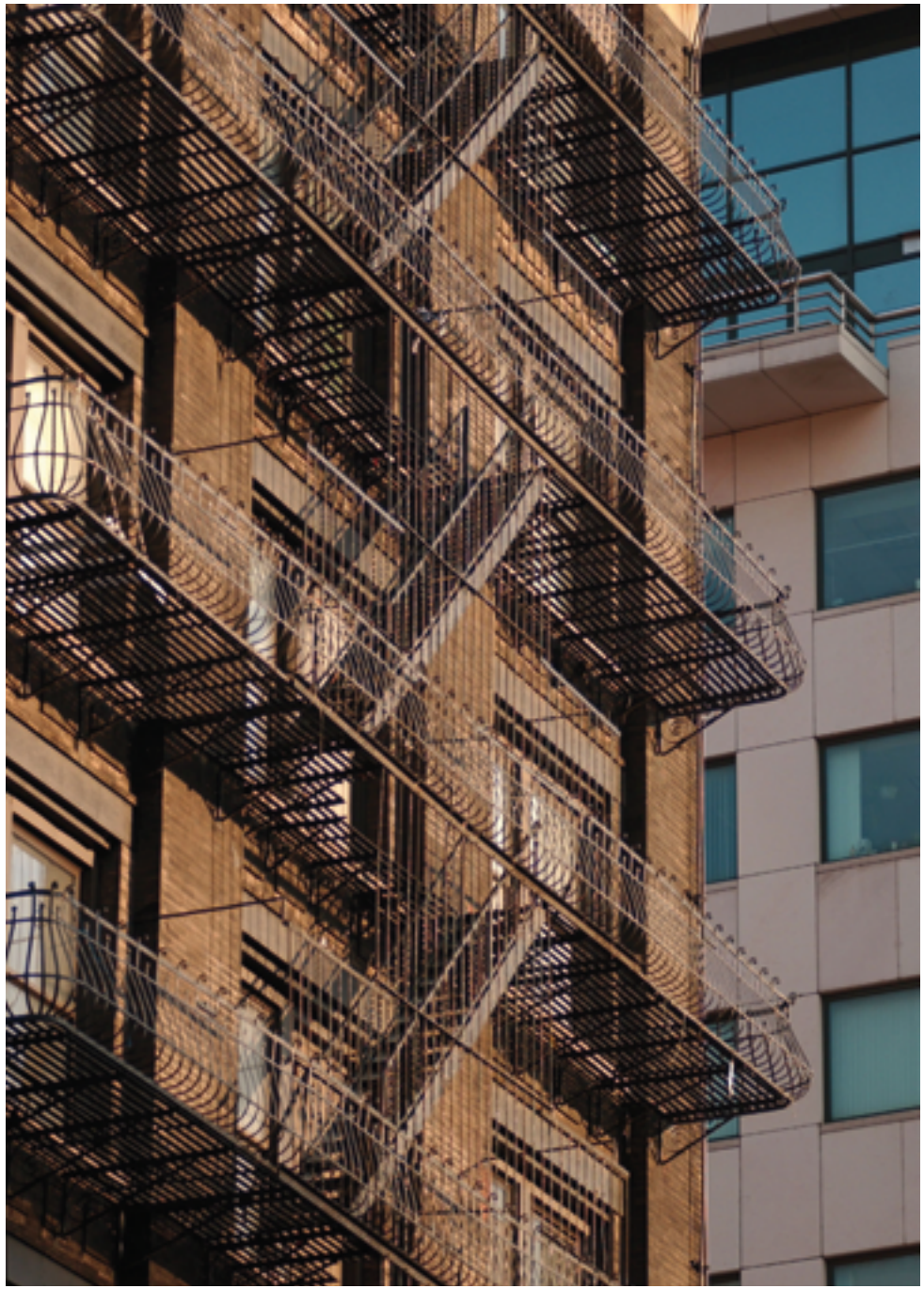
En sistemas no convencionales de fachada autoportante de ladrillo cara vista, el encuentro del forjado se produce en la hoja interior del cerramiento. El requisito de EI-60 mínimo se cumple con un simple trasdosado de ladrillo hueco sencillo revestido con 1,5 cm de guarnecido de yeso por la cara expuesta.

Otro requisito se refiere a la clase de reacción al fuego de los materiales que ocupen las superficies interiores de las cámaras ventiladas. Se exige que la clase sea no inferior a B-s3-d2 hasta una altura de 3,5 m como mínimo, en las fachadas cuyo arranque inferior sea accesible al público, bien desde la rasante exterior o desde la cubierta; y en toda la altura de la fachada cuando ésta exceda de 18 m, con independencia de dónde se encuentre su arranque.

Como se ha explicado en el apartado precedente, el nivel de exigencia es el mínimo en aspectos relacionados con la producción de humo y gotas o partículas inflamables (indicado por las siglas *"s3"* y *"d2"*). La exigencia principal para los materiales incorporados en la cámara ventilada se refiere al aspecto relacionado con la combustibilidad e inflamabilidad, que afecta a los revestimientos y barreras, fundamentalmente al aislamiento térmico; y sólo cuando la hoja exterior no es estanca, es decir, en fachadas ventiladas de junta seca.

A este respecto, indicamos aquí que los materiales de aislamiento de origen inorgánico, tales como las lanas minerales, perlita, vermiculita o vidrio celular pertenecen a la *Euroclase* A1 sin necesidad de ser ensayados, según el Real

Decreto (B.O.E. 79 de 2 de abril), por lo que se pueden utilizar en cualquier solución constructiva de cerramiento sin necesidad de precauciones adicionales. De la misma manera, las piezas de arcilla cocida, así como el yeso y el mortero de los revestimientos también pertenecen a la *Euroclase* A1 sin necesidad de ser ensayados, en virtud del mismo Real Decreto, por lo que cualquier material incorporado en la cámara de aire, ventilada o no, limitada por elementos de fábrica de estas características queda exento de restricciones, por quedar en situación protegida. Los materiales orgánicos en general son inflamables, lo que supone una restricción al uso en cámaras ventiladas cuando se usa un sistema de junta seca como elemento de revestimiento exterior.



Sección SI 5.
Intervención de los bomberos

Los requisitos de esta sección que afectan a la fachada tienen como objetivo posibilitar el acceso desde el exterior al personal del servicio de extinción de incendios. Afectan únicamente a la geometría y disposición de huecos, pero no al sistema constructivo.

Los huecos en estas fachadas deben cumplir las condiciones siguientes:

a. Facilitar el acceso a cada una de las plantas del edificio, de forma que la altura del alféizar respecto del nivel de planta a la que accede no sea mayor de 1,20 m.

b. Sus dimensiones horizontal y vertical deben ser, al menos, 0,80 m y 1,20 m respectivamente. La distancia máxima entre los ejes

verticales de dos huecos consecutivos no debe exceder de 25 m, medida sobre la fachada.

c. Deben estar exentas de elementos que impidan o dificulten la accesibilidad en interior, a excepción de los elementos de seguridad situados en los huecos de las plantas cuya altura de evacuación no exceda de 9 m.

Anejo F del DB SI. Resistencia al fuego de los elementos de fábrica

La resistencia al fuego es la capacidad de un elemento constructivo para mantener durante un período de tiempo determinado la función portante que le sea exigible. La resistencia al fuego de los elementos de fábrica de ladrillo cerámico se define en la tabla F.1 del Anejo F del DB SI, que se reproduce parcialmente en la tabla 5.8.

Esta tabla es aplicable solamente a muros de una hoja, sin revestir y enfoscado con mortero de cemento o guarnecidos con yeso, con espesores de 1,5 cm como mínimo. En soluciones de dos hojas se puede adoptar como valor de resistencia al fuego del conjunto la suma de los valores correspondientes a cada hoja. La notación “EI” indica que el elemento mantiene la integridad para el tiempo indicado; la notación “REI” indica que mantiene también la capacidad portante.

6. Procesos patológicos

6.1 Lesiones en las piezas cerámicas 299

6.1.1 Lesiones en las piezas: desconchados por caliches 299
6.1.2 Lesiones en las piezas: microfisuras 300
6.1.3 Lesiones en las piezas: exfoliaciones 300
6.1.4 Lesiones en las piezas: defectos de cocción 300
6.1.5 Lesiones en las piezas: presencia de materia orgánica 300

6.2 Lesiones en los muros 301

6.2.1 Lesiones debidas a procesos mecánicos y físicos 301
6.2.2 Lesiones debidas a procesos químicos 302
6.2.3 Lesiones debidas a procesos biológicos 307

6.3 Fisuras y grietas en los muros de fábrica 308

6.3.1 Procedencia de las fisuras y grietas 308

GEO HIDROL

6. Procesos patológicos

Un edificio debe durar en uso como mínimo cien años. El material cerámico es uno de los pocos materiales de construcción que puede mostrar obras de más de 1000 años de antigüedad que todavía conservan todo su esplendor. A modo de ejemplo se puede citar la Gran Muralla China, Monumentos de la Antigua Roma y la Ciudad de Venecia, a pesar de sus malas condiciones higrométricas.

Los elementos de fábrica de ladrillo de un edificio bien diseñado y construido no deberían tener problemas durante su vida útil; sin embargo, a veces por falta de conocimiento, o debido a malos usos y costumbres no se construye adecuadamente, apareciendo algunos procesos patológicos que se describen en este capítulo.

6.1 Lesiones en las piezas cerámicas

Este apartado está dedicado a las lesiones específicas de las piezas cerámicas debidas, generalmente, al proceso de fabricación o a la composición de la arcilla, y que pueden alterar el aspecto o la durabilidad de las fábricas, analizando los daños o defectos que aparecen en éstas, así como los agentes que inducen a su proliferación.

Los límites de validez de las piezas cerámicas defectuosas están regulados por la normativa en la mayoría de los casos.

Las lesiones más frecuentes en las piezas cerámicas se deben al proceso de fabricación y pueden ser de los siguientes tipos:

1 La dimensión media de un cráter es la media de las longitudes de los lados del menor rectángulo circunscrito.

6.1.1 Lesiones en las piezas: desconchados por caliches

El caliche es un nódulo de cal viva (óxido de calcio) que se origina durante la cocción del ladrillo debido a una mala preparación y moldeo de la masa. Su efecto nocivo surge cuando se moja el ladrillo puesto que el nódulo aumenta de tamaño haciendo saltar la capa de arcilla que lo recubre y originando la aparición de desconchados. Este efecto se suele manifestar a los 3 ó 4 meses transcurridos desde la fabricación.

La norma UNE 67039:1993 EX *"Productos cerámicos de arcilla cocida. Determinación de inclusiones calcáreas"* define un método de ensayo para determinar la presencia de caliches en las piezas cerámicas utilizadas en la construcción. El ensayo consiste en acelerar el proceso sometiendo la pieza a un flujo de vapor y medir las dimensiones de los cráteres producidos. Si el cráter es superior a 7 mm se denomina *desconchado*[1]; y *pieza desconchada* a la que tiene más de un desconchado en sus caras vistas.

Las especificaciones para el ladrillo visto en cuanto a las inclusiones calcáreas son las siguientes:

- De cada seis piezas, el número de piezas desconchadas no debe ser superior a uno.
- Ningún desconchado debe tener una dimensión media superior a 15 mm.

Los desconchados que no hayan sido producidos por caliches no son importantes, puesto que sólo se deben a un problema de recepción en obra.

6.1.2 Lesiones en las piezas: microfisuras

Las microfisuras son defectos derivados del proceso de cocción; en la mayoría de los casos se deben a un cambio en la fase del cuarzo, que produce microfisuras alrededor de cada grano de este material, provocando una merma en la resistencia mecánica de la pieza.

Figura 1

Figura 2

6.1.3 Lesiones en las piezas: exfoliaciones

Son defectos que consisten en la formación de una estructura laminar del ladrillo, originados en el moldeo de la masa de arcilla durante el proceso de fabricación cuando se emplean arcillas excesivamente plásticas. Se debe a que las partículas se orientan por el rozamiento con la hélice de la galletera, quedando las capas de arcilla yuxtapuestas pero no trabadas.

Otra causa de aparición de exfoliaciones y roturas frágiles es la presencia de sílice inerte en la composición de la arcilla.

6.1.4 Lesiones en las piezas: defectos de cocción

La cocción defectuosa puede serlo, bien porque no se alcanza en el proceso la temperatura necesaria o porque no dura el tiempo suficiente. Si por alguna de estas razones no se llega a producir la fase vítrea, el efecto es una merma considerable de la resistencia mecánica de las piezas, propensas a desintegrarse con rapidez.

Otro defecto de cocción, contrario al descrito anteriormente, se produce cuando en el proceso se supera la temperatura adecuada. El resultado en este caso es la obtención de piezas demasiado rígidas y, por consiguiente, más frágiles en su comportamiento mecánico. La situación extrema se produce cuando el ladrillo llega a fundir, adquiriendo un aspecto ennegrecido.

En la figura 1 se muestra de arriba hacia abajo: 1) probeta seca (sin cocer); 2) probeta cocida a 850°C; 3) probeta cocida a 950°C; 4) probeta cocida a 1050°C; 5) probeta cocida a 1150°C. Debido a la presencia de carbonatos, que actúan como fundentes y a la elevada temperatura alcanzada en el último caso el ladrillo ha fundido, manifestando un característico aspecto ennegrecido.

6.1.5 Lesiones en las piezas: presencia de materia orgánica

La materia prima de los ladrillos puede llevar, además de una mezcla dosificada de arcillas y arena de cuarzo, otros componentes orgánicos que no es fácil eliminar y que se comportan, durante la cocción, de forma distinta a los componentes habituales. El defecto se manifiesta en abombamientos y deformaciones.

En la figura 2, de arriba hacia abajo se muestra: 1) probeta seca (sin cocer); 2) probeta cocida a 850°C; 3) probeta cocida a 950°C; 4-6) probetas cocidas a 1050°C. En las probetas 4), 5) y 6) se aprecian los efectos de la materia orgánica que no ha podido escapar en forma gaseosa debido al proceso de vitrificación de la parte externa, produciendo una deformación notable en las piezas.

6.2 Lesiones en los muros

Atendiendo a la procedencia de las causas que los originan, los procesos patológicos en los muros de fábrica se pueden clasificar en dos grandes grupos:

6.2.1 Lesiones debidas a procesos mecánicos y físicos

Las causas proceden de los diversos ataques que producen las condiciones ambientales en los muros de fábrica, sin que intervengan organismos vivos.

Lesiones originadas por agentes climáticos

Lesiones producidas por el agua y el viento

La acción prolongada de los agentes climáticos, como el agua de lluvia y el viento, puede producir erosiones y manchas de humedad en las fachadas. El efecto de desgaste se manifiesta en una pérdida de masa que puede llegar a modificar la forma del muro de fábrica.

Las lesiones típicas debidas a esta causa son la disgregación y las zonas de lavado del material.

La disgregación se produce cuando el material pierde su cohesión interna, desprendiéndose de forma natural o con un esfuerzo mínimo. Su presencia es claramente visible pues, al perder masa, se presenta acompañada de un desnivel en la superficie del elemento de fábrica. Según la granulometría del material desprendido se trata de *sabulización*, cuando el grano es del tamaño de una arena, o *pulverización*, cuando es menor.

Estos procesos patológicos son más probables en muros que presentan deficiencias en la ejecución de las juntas, sobre todo si no están bien rellenas de mortero.

Lesiones producidas por las heladas

Los procesos patológicos en los muros de ladrillo relacionados con la acción del hielo tienen su origen en la saturación de las piezas.

2 Los ladrillos con protección hidrófuga situados en la fachada repelen el agua de lluvia, por lo que es muy difícil que alcancen un grado de saturación que pueda producir el efecto destructivo de las heladas.

Los ladrillos que no tienen un tratamiento hidrófugo[2] son bastante porosos. Si su posición lo propicia, pueden retener una gran cantidad de agua, llegando a saturar las caras de la pieza. Durante las heladas, el agua aumenta de volumen, produciendo un efecto barrera cuyo resultado es un desgaste superficial e incluso roturas si el efecto llega a superar la resistencia del material.

El efecto de las heladas se manifiesta generalmente en forma de exfoliaciones, sobre todo si existe una gruesa capa de suciedad acumulada en la superficie del muro. Esta capa es impermeable al paso del vapor de agua, de forma que el agua se acumula en el ladrillo y se congela en época de heladas, haciendo saltar las capas exteriores de los mismos. A veces puede ser el mortero de la fábrica el que salte en vez del propio ladrillo.

Normalmente las lesiones en los muros por la acción del hielo sobre los ladrillos carecen de gravedad, aunque si las heladas son intensas, cuando se ha producido un número elevado de ciclos hielo / deshielo, el fenómeno puede afectar a una gran superficie de la fachada, deteriorando considerablemente el aspecto estético del edificio. Debido a que el efecto que produce la helada es destructivo, el único tratamiento posible para su reparación es sustituir las partes afectadas.

Lesiones originadas por el mortero

El mortero puede ser causa de lesiones en la fábrica e, incluso, en las propias piezas a las que une, debido al fenómeno de retracción que experimenta durante el fraguado y al diferente comportamiento frente al agua y diferente respuesta térmica respecto de las piezas cerámicas.

Los muros de fábrica son más propensos a manifestar procesos patológicos cuando se ejecutan con un mortero excesivamente rico en contenido de cemento o bien con exceso de agua.

Los procesos patológicos se manifiestan en forma de fisuras entre el mortero y el ladrillo, en tendeles o llagas, que llegan en algún caso a partir el ladrillo.

Estos efectos se pueden prevenir tomando las debidas precauciones durante la ejecución del muro, fundamentalmente las indicadas en el proceso de rejuntado.

6.2.2 Lesiones debidas a procesos químicos

Las causas proceden de los efectos nocivos debidos a determinadas reacciones químicas que se producen en los componentes de los muros de fábrica. Estas reacciones pueden ser propiciadas por agentes agresivos del ambiente exterior, tales como la lluvia ácida, o simplemente por la presencia de oxígeno o agua en determinadas condiciones que favorecen la corrosión de los elementos metálicos embutidos o la degradación de los materiales del propio muro. Las más importantes son las *eflorescencias*.

Eflorescencias

Las eflorescencias son depósitos de sales cristalizadas que aparecen en la superficie de los ladrillos en forma de manchas, normalmente de color blanquecino. La norma que define el ensayo para determinar el comportamiento ante las eflorescencias de los ladrillos vistos es la norma UNE 67029:1995 EX *"Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de eflorescencia"*.

Aunque el proceso de formación de eflorescencias es complejo se puede decir, con carácter general, que estos depósitos se forman por la migración de las sales solubles, presentes en el interior del ladrillo o procedentes del exterior, y la acumulación en su superficie o en los poros inmediatos, cuando se evapora el agua existente. Si la solución salina sobrepasa su concentración de saturación se precipita en las zonas de máxima evaporación.

Debido a que el lugar donde aparecen las manchas es en la superficie de los ladrillos, es un error muy frecuente atribuir indiscriminadamente al material cerámico la causa de las eflorescencias. Sólo en algunas ocasiones el origen está en las propias piezas cerámicas. Aunque los ladrillos pueden contener algunas sales, el proceso de fabricación a altas temperaturas, así como una adecuada composición química de las materias primas utilizadas, hacen que la mera presencia de dichas sales no se manifieste como lesión.

Además de la presencia de sales se requiere la concurrencia de otros factores

para que se manifiesten las eflorescencias, sobre todo la presencia de una suficiente cantidad de agua que las disuelva y una fuerte evaporación para que se precipiten, junto con la porosidad del material que facilite la entrada y arrastre de las sales hasta su superficie. Según lo anterior, los factores que favorecen la aparición de eflorescencias en un muro de fábrica pueden ser de diversa naturaleza.

a. Condiciones ambientales

Las temperaturas relativamente bajas propician la aparición de eflorescencias porque suponen mayor presencia de humedad y sales en suspensión debido a la dificultad de evaporación.

Este efecto es más acusado si el elemento está sometido posteriormente a una fuerte exposición al viento y al sol que provocan una rápida evaporación.

En general, la experiencia muestra que las regiones especialmente lluviosas son más propicias a la generación de eflorescencias que las regiones secas y áridas.

b. Geometría de los poros

Cuantitativamente el alcance de las eflorescencias no sólo depende del volumen de las sales existentes sino de su transmisión por la receptividad y flujo a través del material al ser arrastradas por el agua.

Los materiales susceptibles de padecer eflorescencias son los de naturaleza porosa, puesto que a mayor porosidad se produce una mayor succión capilar. Según la forma de los poros los depósitos de sales se pueden formar en el interior o en la superficie.

Los morteros muy porosos, con un elevado índice de absorción, facilitan la entrada y el arrastre de las sustancias canalizando su transporte hasta la superficie. La presión hidrostática de la humedad sobre el material condiciona, también de manera muy significativa, el proceso absorbente y, en consecuencia, el alcance de la lesión.

c. Contenido de sales solubles en ladrillos, morteros o terreno

A mayor contenido de sales se produce una mayor migración o transporte de las mismas. Las formas más considerables de estas alteraciones responden a sales alcalinas. Son características en la formación de eflorescencias los sulfatos (cálcicos, magnésicos, potásicos y sódicos), el carbonato cálcico y toda sal que, por reacción con otras sustancias, resulte soluble en el agua.

Alguno de los agentes mencionados puede estar presente en el mortero, bien en la composición del cemento, de los áridos, de la cal hidratada y, en ocasiones, de los aditivos. Con una limpieza al finalizar la obra desaparecen fácilmente en la mayoría de los casos.

Las sales solubles también pueden ser aportadas del exterior, por ejemplo de suelos salinos, productos industriales, terrenos con escombros, cenizas,

escorias u otros residuos. La polución atmosférica en zonas contaminadas por industrias o calefacciones, debido a la presencia de anhídrido sulfuroso procedente de la combustión, puede transformarse en ácido sulfúrico en presencia del agua de lluvia, que reacciona con los componentes del mortero o el ladrillo provocando eflorescencias. Las lesiones producidas por contaminación exterior suelen ser las más graves y persistentes.

d. Presencia de agua

La humedad puede proceder del terreno o del propio proceso de ejecución, es decir, del agua de amasado, del humedecimiento de los ladrillos o del proceso de curado cuando se utilizan aguas de pozos con elevada concentración de sales. Este caso de eflorescencias suele corresponder a las obras recién acabadas.

También el agua de lluvia al incidir sobre la fábrica puede infiltrarse penetrando hacia el interior del cerramiento. Este fenómeno sucede si se combina con viento que produzca la presión suficiente para introducir la humedad en los capilares del material. El agua, que finalmente vuelve a salir al exterior, se convierte en el medio de arrastre de las sales que puedan existir.

Otras fuentes de humedad proceden de la condensación intersticial que se forma en el interior de los muros y del tránsito capilar del agua por los materiales porosos desde zonas en contacto con ella, como el terreno, terrazas o salientes que la acumulen[3].

El aporte de sales puede ser interno o externo: las sales se pueden encontrar en el propio ladrillo[4], en el mortero (bien en los áridos, en el cemento o en aditivos químicos) y, a veces, en el terreno. También se pueden producir por la carbonatación del hidróxido de calcio presente en la superficie de los ladrillos[5] o por la disolución del conglomerante de cal del mortero que, al evaporarse el agua, se deposita en forma de eflorescencias salinas.

La causa de aparición de los tipos de eflorescencias mas frecuentes son las sales contenidas en los cementos y áridos, así como las sales procedentes del terreno en presencia de humedad.

Las eflorescencias propiamente dichas son depósitos superficiales, y se deben distinguir de las *criptoeflorescencias* que son depósitos interiores ocultos en el interior de los poros del material; y de las *subeflorescencias,* que no llegan a aflorar a la superficie, pero producen picaduras y disgregaciones.

Las criptoeflorescencias se producen en materiales afectados por sales muy solubles que cristalizan antes de alcanzar la cara superficial. La cristalización produce sustancias de escasa adherencia que, cuando dilatan, presionan las capas últimas del material cuya finura no puede contener el desprendimiento final de la superficie. Son mucho más peligrosas que las eflorescencias típicas, pues al aumentar el volumen en el interior del ladrillo, crean fuertes tensiones que hacen que el poro se abra y penetre el agua y el hielo que, aunque lentamente, podría llegar a destruir la pieza.

Los diferentes tipos de eflorescencias se corresponden con las distintas causas que las originan, y se distinguen por la forma en la que se manifiesta el proceso patológico. Se pueden clasificar en seis tipos diferentes y es importante distinguirlos porque cada uno de ellos requiere un procedimiento de reparación específico.

- Eflorescencias del Tipo I

Son depósitos superficiales de sales blanquecinas muy solubles en agua, que aparecen en forma de velo, situadas en el centro o los bordes del ladrillo, aunque también pueden cubrir la junta de mortero.

Se deben a reacciones químicas entre el ladrillo y el mortero y suelen aparecer en la cuarta parte superior de los edificios, en la base del muro y en los antepechos de las ventanas. Se manifiestan en primavera cuando el viento y el sol secan la fábrica tras el período húmedo del invierno.

Este tipo de eflorescencias es muy abundante y desaparece tras varios ciclos de humectación y secado. Para eliminarlas de una forma rápida suele ser suficiente cepillar la fachada con un cepillo duro que no sea metálico y, posteriormente, arrastrar los restos con agua limpia[6]. En caso de que persistan, se puede aplicar una disolución de ácido clohídrico en agua, con una concentración del 10%, tras haber mojado abundantemente la fachada, y lavarla posteriormente.

- Eflorescencias del Tipo II

Corresponde a las *criptoeflorescencias* o *subeflorescencias*, que se manifiestan en forma de desconchados importantes y desprendimientos de las capas de ladrillo de unos milímetros.

Se deben a que el agua circula muy lentamente por la red capilar mientras que la evaporación es muy brusca, las sales cristalizan en el interior del ladrillo y, debido al aumento de volumen al pasar de estado anhidro (sin agua) a hidrato, se desconcha la parte exterior.

Este tipo de eflorescencias, aunque resultan ser las más perjudiciales, son poco frecuentes y sólo se suelen dar en zonas húmedas o marítimas. Debido a que los efectos que producen son desconchados con pérdida de material, su reparación sólo es posible reponiendo las partes dañadas, pero se puede prevenir su aparición regando la fachada intensamente y de forma repetida durante épocas de baja evaporación.

- Eflorescencias del Tipo III

Son exudaciones o depósitos blancos superficiales en forma de regueros producidos en el proceso de hidratación del cemento, cuando libera cal que es arrastrada por el agua de lluvia, discurriendo por la fachada y que se transforma en carbonato cálcico en presencia del anhídrido carbónico del aire.

Son poco solubles en el agua y se distinguen porque en presencia de ácido clorhídrico son efervescentes. Este tipo de manchas no se elimina definitivamente con facilidad. Si existen depósitos abundantes se deben cepillar y rascar previamente; después se empapan de agua y se aplica una disolución de ácido clohídrico, tras lo cual hay que enjuagar abundantemente[7].

- Eflorescencias del Tipo IV

Son regueros de color pardo sobre los ladrillos y las juntas de mortero. Se producen cuando cierto tipo de ladrillos de fabricación reciente se exponen a la lluvia y exudan sulfatos de hierro que reaccionan en contacto con el aire, produciendo óxidos e hidróxidos férricos de un color pardo rojizo, no solubles en el agua.

Son poco frecuentes y suelen aparecer en ladrillos fuertemente cocidos. Se eliminan aplicando sobre las manchas una pasta formada por citrato sódico, agua tibia, glicerina y creta, que se debe enjuagar con abundante agua limpia al final de cada aplicación, ya que se puede repetir el proceso hasta su eliminación total.

- Eflorescencias del Tipo V

Las manchas son de color amarillo verdoso, producidas por las sales de vanadio que proceden de ciertas arcillas. Son muy poco frecuentes, y se eliminan aplicando una solución de sosa cáustica, con una concentración de 350 gramos por litro, dejándola actuar durante dos o tres días, y lavando después con abundante agua limpia.

- Eflorescencias del Tipo VI

Se manifiestan en manchas de color marrón oscuro o negro, que aparecen sobre las juntas y los ladrillos marrones pigmentados con bióxido de manganeso.

Se producen cuando el bióxido de manganeso que da el color a los ladrillos pardos reacciona con los sulfatos presentes en ellos formando sulfato de

3 En los muros en contacto con el terreno el agua puede ascender por la estructura capilar de los materiales y subir varias plantas.

4 La arcilla contiene compuestos solubles en agua, y los ladrillos pueden adquirir sustancias durante el proceso de cocción, al impregnarse de humos y gases que circulan por el interior de los hornos.

5 Las sales que aparecen en la superficie de los ladrillos suelen ser, en mayor o menor medida, de sulfatos y carbonatos (de sodio, de potasio o de calcio) cuya composición es diferente a la de las sales contenidas en su interior.

6 Esta operación se debe hacer en tiempo caluroso o seco, para impedir que el agua de lluvia vuelva a disolver más sales en el interior del material cerámico.

7 Hay que tener en cuenta que la aplicación repetida de ácido clorhídrico o en disoluciones muy concentradas es perjudicial para el material y puede, incluso, dañar las juntas de mortero. No es aconsejable la aplicación de este producto sin realizar pruebas previamente cuando se trata de juntas coloreadas o de cerámica vidriada.

manganeso soluble que, tras diversas reacciones, forma óxido de manganeso. Se distinguen de las del tipo IV por el color de los ladrillos en las que se forman.

Se limpian mojando la zona que presenta manchas y aplicando una solución de ácido acético, agua oxigenada y agua, y lavando posteriormente de forma abundante con sosa cáustica.

En la tabla 6.1 se resume el origen y aspecto de cada tipo de florescencia, así como el sistema de limpieza recomendado.

Prevención de las eflorescencias

El diseño juega un papel fundamental en la prevención de eflorescencias. Hay que impedir que en la obra se produzcan filtraciones de agua que mojen la fábrica por zonas diferentes a las normalmente expuestas. Por tanto, es muy importante la correcta ejecución de los detalles constructivos que tienen como objeto evitar la entrada de agua.

Se debe evitar, fundamentalmente, que la obra entre en contacto con sales solubles que proceden de suelos contaminados por productos industriales, por escombros o por residuos orgánicos o inorgánicos. En este sentido, es importante intercalar barreras impermeables de polietileno en el arranque de los muros o cerramientos que impidan el ascenso de agua por capilaridad. Si el muro está en contacto con el terreno constituye una buena medida la impermeabilización del trasdós, que inhiba el flujo de sales desde el propio terreno.

Se deben diseñar los elementos constructivos de circulación o caída de agua evitando el traspaso de ésta a la fábrica. En este sentido, requiere un especial cuidado el detalle de los canalones, alféizares y albardillas, que deben ir provistos de goterones y tener un vuelo suficiente.

Tabla 6.1. Tipo, origen y limpieza de eflorescencias

Tipo	Aspecto	Origen	Limpieza
I	Polvo blanco, velo. Soluble	Sales solubles Contaminación atmosférica Reacción química entre el ladrillo y el mortero	Cepillado y limpieza con agua
II	Desconchados Desprendimientos de capas del ladrillo	Cristalización de sales en el interior del ladrillo	Reposición de las partes dañadas. Se previenen regando en épocas de baja evaporación
III	Depósito blanco (carbonato cálcico) Pegajoso Efervescente Insoluble	Óxidos e hidróxidos férricos producidos por la exudación de sulfatos de hierro Ladrillos fuertemente cocidos	Cepillado y limpieza con una disolución de ácido clorhídrico (concentración del 5% al 10%) Con cerámica vidriada o juntas coloreadas es preciso realizar pruebas previas.
IV	Regueros de color pardo Insolubles	Sales de vanadio de algunas arcillas	Pasta formada por citrato sódico, agua tibia, glicerina y creta.
V	Manchas de color amarillo verdoso	Óxido de manganeso procedente del sulfato de manganeso soluble	Solución de sosa cáustica (350 g/l)
VI	Manchas de color marrón oscuro o negro en ladrillos pigmentados con bióxido de manganeso	Óxido de manganeso procedente del sulfato de manganeso soluble	Solución de ácido acético, agua oxigenada y agua.

En el caso de cerramientos con cámara es preferible colocar el aislante sobre la cara exterior de la hoja interna. Si el aislamiento se coloca en contacto con la hoja externa, se provoca que la evaporación se realice siempre a través de la cara vista, desplazando las sales en esa dirección.

Para evitar las eflorescencias del tipo I, la reacción entre el ladrillo y el mortero se previene utilizando morteros bastardos (compuesto de cemento, cal y arena) e impidiendo la succión del agua y las sales del mortero mediante el humedecimiento previo de las piezas.

Durante la ejecución de la obra hay que intentar que los ladrillos no se mojen demasiado. En cualquier caso, se debe evitar la colocación del material cerámico cuando la humedad relativa del aire es elevada. En época de lluvias fuertes hay que cubrir la obra no terminada y el acopio de ladrillos a pie de obra. También es conveniente, en caso de lluvias abundantes, proteger la fábrica que esté recientemente ejecutada.

Lesiones originadas por la contaminación ambiental

Los efectos nocivos de esta naturaleza sobre los muros de fábrica se deben a diversos procesos de combustión, como los humos agresivos de las calefacciones o los procedentes de la industria.

El humo y las emisiones industriales con presencia de sulfuros, bajo ciertas condiciones, pueden formar cristales de sulfato cálcico en las juntas de mortero. Al llover, el agua extiende una sal blanquecina al conjunto de la fábrica.

Los morteros con áridos de naturaleza caliza son especialmente sensibles a los ácidos sulfúrico y sulfuroso.

Producen consecuencias parecidas a las eflorescencias alterando también el aspecto estético del mortero. La costra negra que se forma en la superficie de los muros de fábrica también puede llegar a producir con el tiempo lesiones que se manifiestan en forma de exfoliaciones o disgregaciones. Este fenómeno constituye una lesión crónica en fachadas próximas a zonas industriales cuya exposición es inevitable.

Lesiones originadas por la oxidación de elementos metálicos

Si los elementos metálicos embutidos en las fábricas no tienen la protección adecuada o el recubrimiento mínimo, con la entrada de agua se puede originar un proceso de oxidación que se manifiesta en la aparición de la consiguiente mancha de óxido. Además, el proceso de oxidación es un fenómeno expansivo que puede llegar a reventar el muro.

Para prevenir este tipo de lesiones, además de proteger adecuadamente los elementos metálicos que vayan a quedar embutidos en la fábrica, se debe impedir el contacto con el agua mediante un recubrimiento suficiente de mortero que garantice su impermeabilidad.

Además, para prevenir la corrosión de los elementos metálicos por el ataque químico de los componentes del mortero, se debe limitar a un máximo de 0,1% el contenido de iones cloruro en la masa del cemento utilizado.

6.2.3 Lesiones debidas a procesos biológicos

Son daños del tipo *"biodeterioro"*, es decir, debidos a la exposición del muro de fábrica al medio ambiente por períodos de tiempo prolongados. Los agentes que los producen son los diversos microorganismos que forman el biotopo circundante, que pueden afectar de varias formas al elemento de fábrica según sus propias características y ciclo vital.

Los hongos y bacterias producen diversos ácidos orgánicos que pueden atacar a los materiales de naturaleza pétrea. Las secreciones reaccionan con el mineral, disminuyendo la masa del muro y reduciendo, por tanto, sus características portantes, térmicas o acústicas.

El ataque suele ser visible en la cara exterior del muro, produciendo manchas que pueden afectar al aspecto estético del edificio.

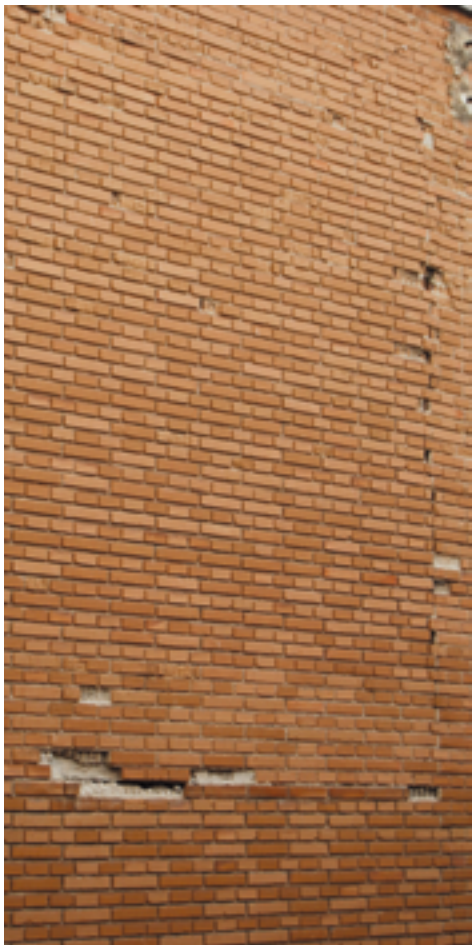
Las algas y musgos generan pátinas biogénicas, generalmente de un color que varía desde el pardo oscuro al amarillo, pasando por el verde, dependiendo de la variedad del microorganismo considerado. Su mera presencia indica la existencia de una humedad importante.

En su ciclo vital producen sales solubles que reaccionan con el material, pudiendo llegar a ser dañinas.

Las agresiones producidas por los líquenes se suelen presentar en el interior de la masa del muro, por lo que en muchas ocasiones no existe una manifestación exterior del proceso patológico.

La existencia de arbolado o vegetación en la proximidad de los edificios también puede generar lesiones en los muros de fábrica.

La savia ligeramente ácida puede provocar manchas en los materiales que contengan carbonato cálcico, pero el efecto más perjudicial es el puramente mecánico, al introducir sus raíces en los elementos de base o cimentación, produciendo tensiones muy elevadas.



6.3 Fisuras y grietas en los muros de fábrica

Aunque a veces se utilizan indistintamente los términos *"fisura"* y *"grieta"*, es conveniente matizar el significado de cada uno de los dos conceptos.

Se entiende como *"fisura"* la abertura que afecta a la superficie del elemento o a su acabado superficial o revestimiento; y como *"grieta"* la abertura incontrolada que afecta a todo el espesor del muro.

6.3.1 Procedencia de las fisuras y grietas

En los muros de fábrica las fisuras o grietas marcan siempre la línea de máxima compresión. Si la fisura o grieta es inclinada, la dirección apunta hacia la parte más rígida. Estas sencillas reglas permiten, en determinados casos, determinar las causas de su procedencia con una simple inspección, aunque en la mayoría de las situaciones no es tan sencillo, puesto que sólo existen datos sueltos que es preciso ensamblar para dictaminar el verdadero origen del proceso.

Las principales causas de aparición de grietas y fisuras por procesos mecánicos y físicos son las siguientes:

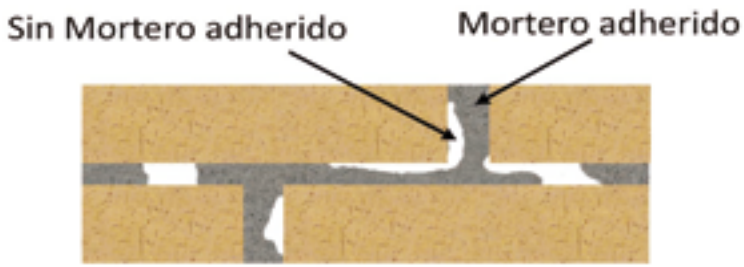
Lesiones debidas a deficiencias de ejecución o de materiales

Los muros no tienen problema para resistir esfuerzos de compresión, pero no ocurre lo mismo cuando tienen que soportar tracciones, siendo éste el principal origen de la aparición de grietas y fisuras.

Un muro mal ejecutado o construido con materiales de deficiente calidad, dará como resultado un muro de poca resistencia a la tracción y con propensión a fisurarse ante el menor esfuerzo.

Deficiencia de materiales: morteros mal elaborados

La consistencia del mortero de asiento debe ser la adecuada para lograr una mezcla manejable. Sin embargo, se debe evitar un mortero con exceso de agua, pues se corre el riesgo de que escurra por las juntas y que además se produzcan contracciones en el fraguado que provoquen fisuras.



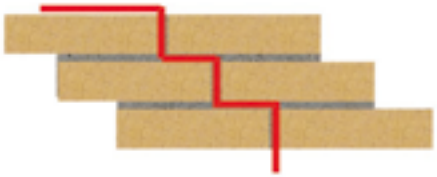
Deficiencia de materiales: retracción de fraguado

Si los morteros de asiento tienen mucho espesor y son muy ricos en cemento, se producen fuertes contracciones en el proceso de fraguado, produciendo fisuras antes de que el muro llegue a entrar en carga. Las fisuras, generalmente, suelen seguir la dirección de las juntas, aunque en algunas ocasiones pueden llegar a romper el ladrillo.

El fenómeno es más acusado cuando las juntas de mortero son de gran espesor y se utilizan piezas cerámicas de baja resistencia.

Deficiencia de ejecución: falta de adherencia entre el mortero y el ladrillo

A veces resulta difícil determinar si la grieta o fisura se produjo por un movimiento excesivo de la estructura que sustenta al muro o por la deficiente resistencia de la fábrica. La observación de las grietas puede proporcionar algún indicio.



Grieta que rompe al mortero

Deficiente adherencia

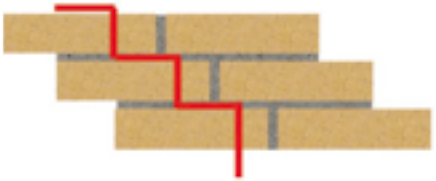
Si la grieta produce una separación limpia entre el mortero y el ladrillo, ello es debido a una baja adherencia entre ambos, posiblemente por falta de humectación del ladrillo o por problemas en la elaboración del mortero. Si todos los ladrillos que bordean la grieta tienen mortero adherido, se debe descartar esta causa.

Si el mortero está bien adherido al ladrillo, el problema suele estar originado por movimientos que superan la resistencia de la fábrica.

Deficiencia de ejecución: falta de traba en las esquinas

En el aparejo a soga hay un solape de medio ladrillo entre hilada e hilada. Cuando se trata de esquinas con ángulos diferentes de 90°, la práctica de cortar los ladrillos a inglete propende a que se marque una grieta en la arista del ángulo.

Se debe construir de manera que todos los ladrillos queden trabados, especialmente en las esquinas.

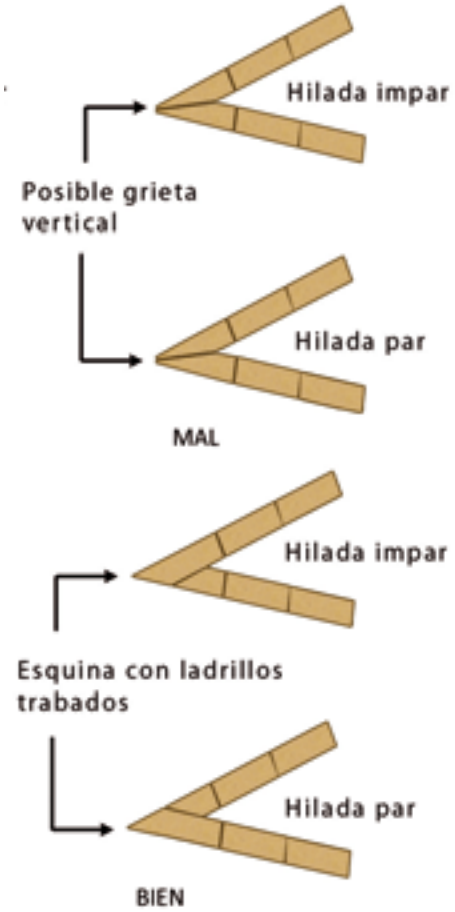


Grieta que rompe al mortero y al ladrillo

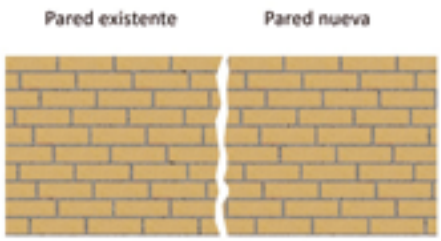
Movimiento incompatible

Deficiencia de ejecución: uniones mal resueltas

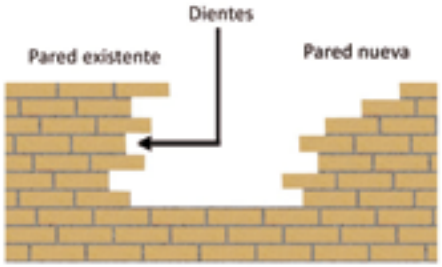
En las uniones a muros existentes se debe respetar la traba de las piezas. Para ello es necesario practicar un dentado en el muro existente. Si no es posible construir la unión trabada, siempre es aconsejable materializar una junta vertical de movimiento.



Fisuración por esquinas mal aparejadas



Riesgo de aparición de fisura



Unión trabada

Acciones mecánicas exteriores

Es la causa más común y la que produce las grietas más claras y abundantes.

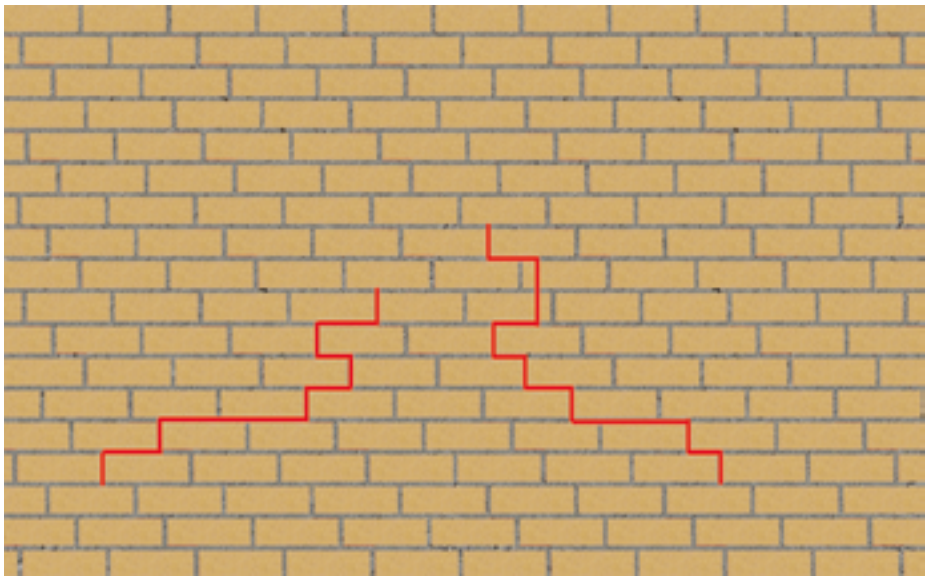
Estas acciones producen esfuerzos que pueden ser de tracción, de corte o rasantes. Las acciones que producen esfuerzos de compresión raramente producen fisuras.

Los esfuerzos ocasionados por movimientos no controlados suelen ser muy variados, por lo que conviene agruparlos en una serie de tipos, dependiendo de si el movimiento es de la estructura soporte o del propio muro.

Acciones debidas a movimientos diferenciales del terreno

Los movimientos del terreno pueden tener como causa un estado de tensión muy diferente en dos zonas contiguas, produciéndose *asientos diferenciales*, cuyos efectos se manifiestan en fisuras localizados en las zonas de encuentro entre elementos constructivos de distinto peso, por ejemplo, en chimeneas. Pero en la mayoría de los casos los movimientos del terreno proceden del fenómeno de expansión debido a la modificación del estado de humedad.

Los suelos arcillosos modifican su resistencia a la compresión según su contenido de agua. Con la humedad natural (aproximadamente del 18%) tienen muy buena resistencia, pero a medida que aumenta el contenido de humedad también aumenta su volumen, al tiempo que disminuye la resistencia, llegando al valor límite del 26% (límite plástico). Luego comienza a disminuir su volumen, y se licúan a partir del 35%.



Al aumentar su volumen, el suelo ejerce una presión sobre el cimiento que puede llegar a los 0,4 N/mm^2. Debido a que las cargas que los muros transmiten al suelo, incluso tratándose de muros portantes, suelen estar por debajo de ese valor, puede ocurrir que la acción del suelo empuje la estructura hacia arriba.

Si la humedad continúa aumentando el suelo pierde volumen y resistencia, produciéndose el fenómeno contrario.

En la medida en que los movimientos sean uniformes, el problema no se manifiesta; el inconveniente surge cuando existen movimientos diferenciales o la humedad del suelo no es uniforme.

El exceso de humedad puede proceder del agua de lluvia que cae por los desagües del techo, de falta de drenaje perimetral o de tuberías rotas.

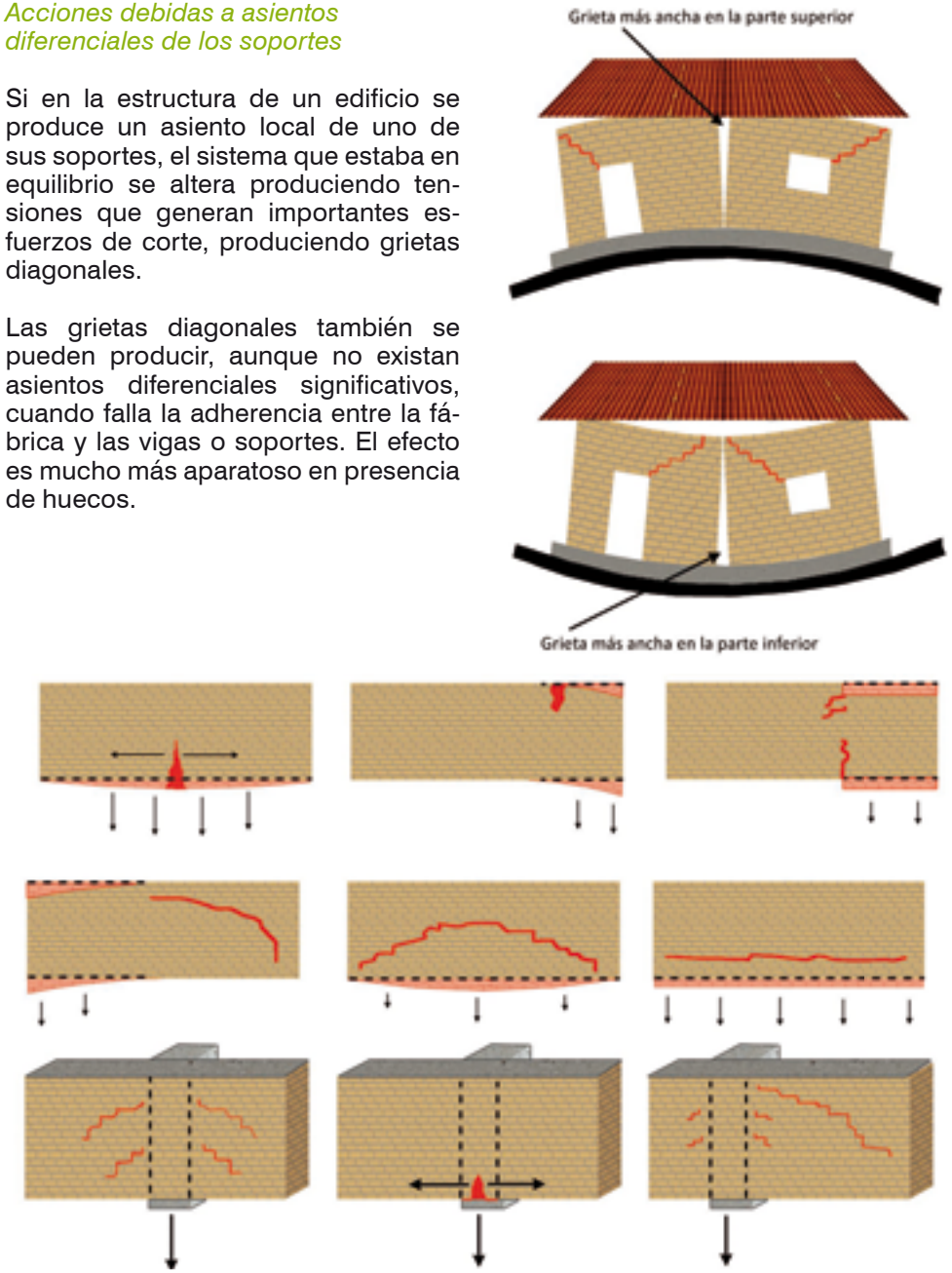
Si los cimientos ceden de forma puntual, como ocurre al romperse una tubería, o por la presencia de desagües que aflojan un terreno, las grietas pueden ser verticales o en forma de "V" invertida sobre el eje del asiento, o ligeramente inclinadas en algunos tramos por los esfuerzos de corte. Si el movimiento está muy localizado en el extremo de un muro, los esfuerzos de corte pueden ocasionar que las grietas sean prácticamente verticales.

Si el muro es muy largo y apoya sobre un terreno débil, puede resultar que no se llegue a formar un arco de descarga por estar muy alejados los puntos de arranque. En consecuencia, la grieta que se produce es horizontal, coincidente con una hilada en la parte inferior.

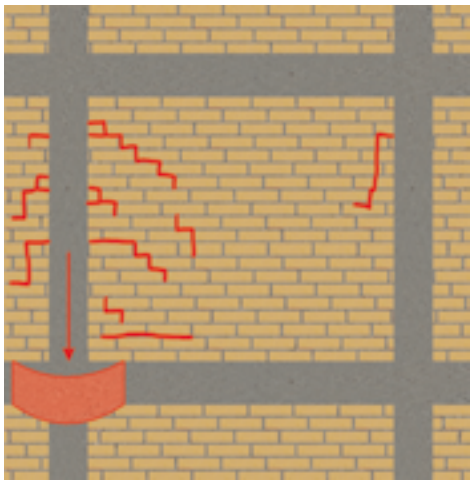
Acciones debidas a asientos diferenciales de los soportes

Si en la estructura de un edificio se produce un asiento local de uno de sus soportes, el sistema que estaba en equilibrio se altera produciendo tensiones que generan importantes esfuerzos de corte, produciendo grietas diagonales.

Las grietas diagonales también se pueden producir, aunque no existan asientos diferenciales significativos, cuando falla la adherencia entre la fábrica y las vigas o soportes. El efecto es mucho más aparatoso en presencia de huecos.



Grietas debidas a asientos diferenciales



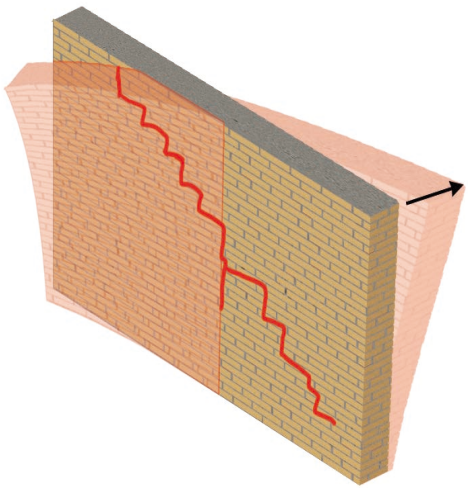
Asiento diferencial de soporte

Fenómeno de alabeo por inestabilidad local

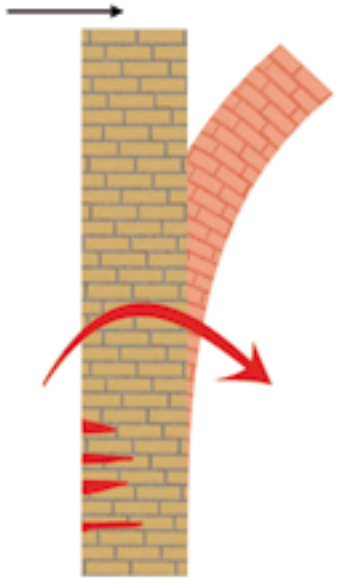
Se produce en muros suspendidos en apoyos locales, cuando la fábrica trabaja como una viga de gran canto, por ejemplo en formación de dinteles exentos.

El fenómeno es especialmente notable cuanto más esbelto es el muro, es decir, cuanto la longitud entre apoyos es elevada en relación con la altura del muro suspendido.

La inestabilidad se manifiesta en forma de alabeo, debida a los esfuerzos de torsión generados, con grietas de configuración inclinada.



Alabeo por inestabilidad local



Vuelco por acción horizontal

Vuelco

Se produce en muros que no están bien sujetos en cabeza o en los que no han sido correctamente apeados durante el proceso de ejecución. El muro funciona como una ménsula en voladizo, razón por la cual se fisura la parte inferior, sólo por una de sus caras, y con grietas cada vez menos pronunciadas según se asciende en altura.

Acciones debidas a cargas puntuales

Aplastamiento local

Se produce cuando el apoyo de un elemento sobre el muro genera una tensión local que supera el valor de resistencia de la fábrica. Es un fallo típico de las jambas en las que apoyan dinteles o vigas cuando la entrega es escasa. Se puede evitar dotando al apoyo de una mayor superficie que permita una mejor distribución de tensiones.

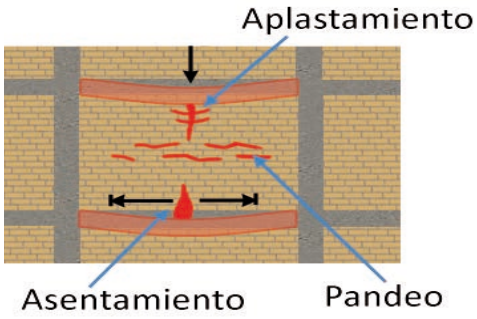
Las cargas puntuales también pueden provocar aplastamientos locales que se manifiestan con una grieta vertical acompañada de ramificaciones laterales. Si la carga está aplicada en un extremo pueden aparecer fisuras a 45º.

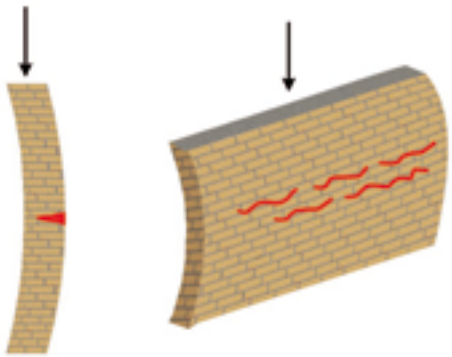
Pandeo

Las cargas verticales, estén distribuidas o concentradas, pueden ocasionar el pandeo del muro. El pandeo es un fenómeno que depende de la esbeltez. Cuando más alto y delgado, el muro es más esbelto, y mayor es la posibilidad de pandeo.

También depende de su vinculación a elementos verticales y forjados en su perímetro y de la excentricidad de las cargas.

Al deformarse un muro por pandeo aparecen grietas y fisuras horizontales, abiertas en una de las caras y cerradas en la otra. El pandeo se produce sólo en muros delgados si soportan grandes cargas.





Grietas horizontales por pandeo

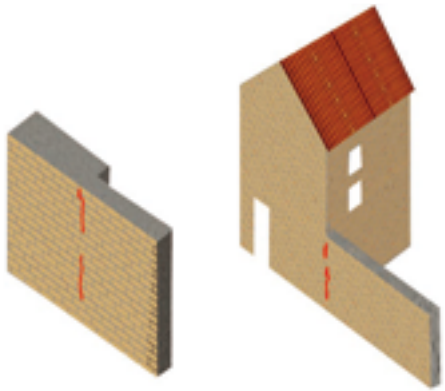
Acciones debidas a cargas uniformes sobre muros de sección variable

Muros sometidos a estados de carga muy diferentes

Se produce en situaciones en las que se conectan muros con estados de tensión vertical de valores muy diferentes. En estos casos no es posible la compatibilidad de deformaciones y este efecto se manifiesta en forma de grietas verticales.

La situación típica se produce en las regiones próximas a cambios geométricos. Una carga uniforme aplicada sobre un muro cuya sección presenta una variación de espesor puede ocasionar que el muro más delgado sufra mayores deformaciones, con la consiguiente aparición de una grieta vertical entre ambos.

Se puede prevenir el proceso patológico materializando una junta vertical de movimiento o incorporando armadura de tendel.

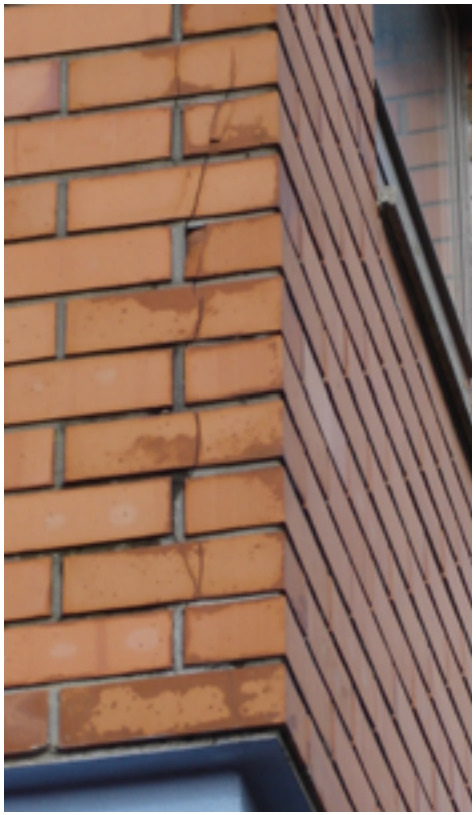


Grietas verticales por discontinuidad geométrica

Acciones debidas a deformaciones en vigas y forjados

Aunque es habitual atribuir cualquier proceso patológico de fisuración en muros a la flecha de las vigas o forjados en las que se sustenta, lo cierto es que estos efectos son raros en las estructuras bien calculadas.

Si el muro tiene continuidad hasta la cimentación o hasta un elemento de arranque muy rígido, puede ocurrir que la carga se acumule en plantas bajas. Esto no suele suponer un problema para la fábrica si está bien arriostrada lateralmente, debido a su buena resistencia a compresión[8].



El problema se manifiesta si la continuidad se interrumpe en alguna planta. En estos casos, si las deformaciones o flechas de los elementos estructurales en la planta de arranque son excesivas se pueden producir grietas en la parte inferior. El efecto es mucho más aparatoso en presencia de huecos.

Acciones higrotérmicas

Empuje entre muros adyacentes

Las variaciones de temperatura y humedad provocan contracciones y dilataciones en los muros. Cuando la fábrica dilata puede producir empujes sobre los elementos colindantes, originando fisuras verticales.

Expansión por humedad

Se conoce como *expansión por humedad* al aumento de volumen producido a largo plazo por la acción de la humedad ambiente. La dilatación de las fábricas de piezas cerámicas se debe fundamentalmente a este fenómeno. El cambio de volumen es similar al experimentado por el hormigón, pero no es reversible en condiciones normales.

El proceso se inicia en el momento mismo en que la pieza sale del horno y progresa lenta e indefinidamente siguiendo una curva asintótica. Por lo tanto, el efecto es más acusado durante las primeras semanas, y se reduce paulatinamente, aunque cada pieza se comporta de modo diferente en función del tipo de arcilla con la que se ha fabricado[9].

En este sentido es importante distinguir entre la *expansión por humedad*, que es el incremento total de las dimensiones que puede sufrir una pieza cerámica desde que sale del horno, y la *expansión potencial*, que corresponde al diferencial que le resta por expandir a partir de un momento más o menos alejado de la fecha en que fue cocida. El orden de magnitud de la expansión por humedad en las piezas cerámicas que se fabrican actualmente está alrededor de 0,5 mm/m, mientras que la expansión potencial depende del tiempo y procesos de almacenamiento hasta que se colocan.[10]

El fenómeno de la expansión por humedad sólo produce lesiones en los muros que tienen impedido el movimiento. Los muros más propensos a la fisuración por esta causa son los muros largos en los que no se han dispuesto las juntas de movimiento pertinentes, y los muros situados en condiciones singulares de humedad ambiente, por ejemplo los muros de sótanos.

Las fisuras que se producen por esta causa suelen ser homogéneas, lo que indica la presencia de una tensión uniforme que causa el problema. En los muros largos cuyo movimiento longitudinal ha sido coartado, por ejemplo, por estar confinados entre los soportes de una estructura, se origina primero un abombamiento en el centro del muro por su cara exterior, que acaba produciendo una grieta de trayectoria vertical. Cuando el movimiento no está coartado en toda la longitud del muro, como por ejemplo en el caso de los petos de azoteas, el fenómeno de expansión se manifiesta sobre todo en las esquinas.

La forma de prevenir la fisuración por esta causa es demorar la puesta en obra de los ladrillos al menos 3 ó 4

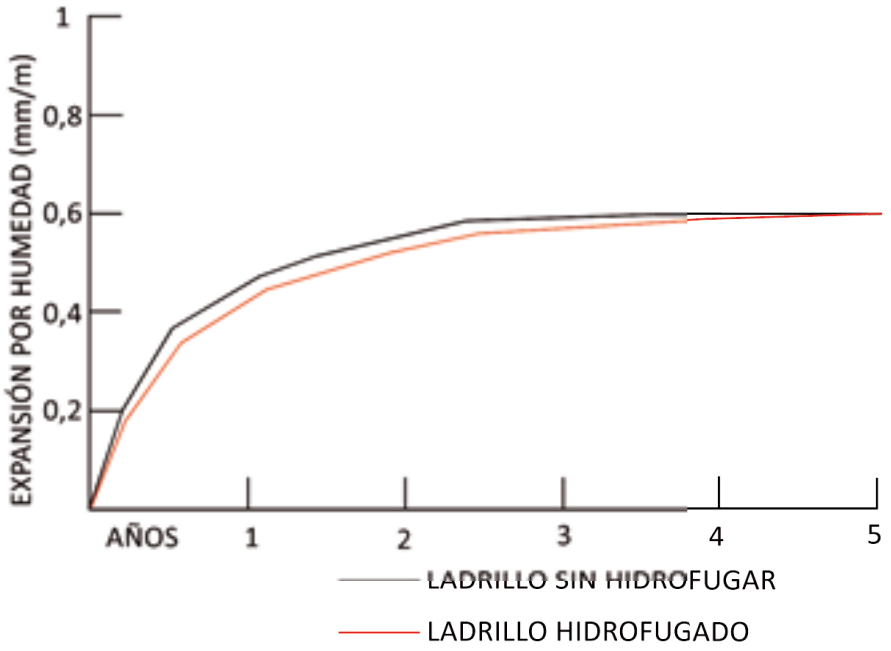
semanas desde su fabricación, y mojarlos antes de colocarlos. El DB SE-F establece explícitamente la obligatoriedad de mojar los ladrillos antes de su puesta en obra, excepto los de baja succión[11].

En el caso de muros de fachada con esquinas en "Z" que contengan paños de longitud menor que 0,75 m, es recomendable prever una junta vertical de movimiento con llaves de atado. Con ello se evita que, por efecto de la expansión por humedad, aparezcan fisuras verticales en la esquina, producidas por el giro diferencial entre ambos paños.

En proyecto, se debe limitar la longitud de los muros entre juntas verticales de movimiento, según se ha indicado en el capítulo correspondiente.

Debido a que el fenómeno está relacionado con las condiciones de interacción entre las piezas y el mortero, una buena medida de prevención consiste en utilizar morteros mixtos de cemento y cal[12], limitando además la resistencia de los mismos en función de la resistencia de las piezas cerámicas.

La utilización de ladrillos hidrofugados tiene la ventaja, con relación a la expansión por humedad, que el propio proceso de inmersión acelera el fenómeno en la primera semana, reduciendo, por consiguiente la expansión potencial de los ladrillos puestos en obra.



Evolución de las expansión por humedad de las piezas cerámicas

8 Este efecto, sin embargo, sí se debe tener en cuenta a la hora de dimensionar el elemento estructural de arranque del muro, en el que se deben prever los efectos de la acumulación de carga.

9 Para dar una idea de la evolución del proceso se indica aquí que, durante las dos o tres primeras semanas desde la salida del horno, se suele producir hasta un 25% de la expansión total. Por ejemplo, un ladrillo cuya expansión total es de 0,6 mm/m puede expandir del orden de 0,15 mm/m en los primeros quince o veinte días.

10 La expansión en piezas cerámicas se mide con el método descrito por la norma UNE 67036:1999 *"Productos cerámicos de arcilla cocida. Ensayo de expansión por humedad"*, si bien no existe ninguna referencia a un valor máximo de expansión por humedad que deba cumplir el ladrillo visto. La norma UNE 67020:1999 *"Bovedillas de arcilla cocida para forjados unidireccionales. Definiciones, clasificación y características"*, sólo de aplicación a bovedillas, establece un valor medio máximo de 0,55 mm/m, no superando individualmente el valor de 0,65 mm/m.

11 La *succión* no se debe confundir con la *capilaridad*, aunque ambos fenómenos están relacionados. Mientras que la capilaridad es la cualidad que posee un material para absorber líquido, la succión da idea de la velocidad inicial con la que el material absorbe el líquido por capilaridad. Por lo tanto, en la medida de la succión ($g/(cm^2 \cdot min)$) interviene, no sólo el peso del líquido absorbido y la superficie expuesta, sino también el tiempo.

12 Una dosificación recomendada para los cementos mixtos de mortero y cal es 1:1:7.

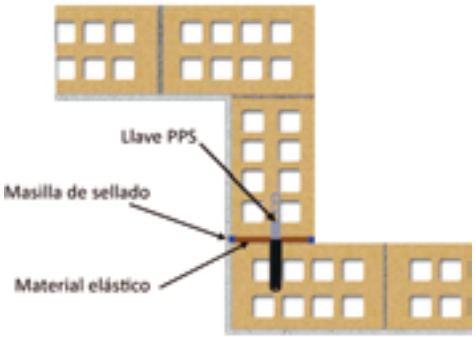
Contracción y dilatación térmicas

Al enfriarse o calentarse un muro se contrae o se dilata y, si el movimiento está coartado en los bordes, queda sometido a un esfuerzo de tracción.

Las grietas originadas por esta causa son generalmente verticales, pues aunque la contracción es uniforme en todas las direcciones, el peso propio de la estructura contrarresta la deformación en sentido vertical.

La ubicación de las grietas puede variar según las condiciones de los vínculos laterales. Si las condiciones son simétricas, las grietas aparecen más o menos centradas.

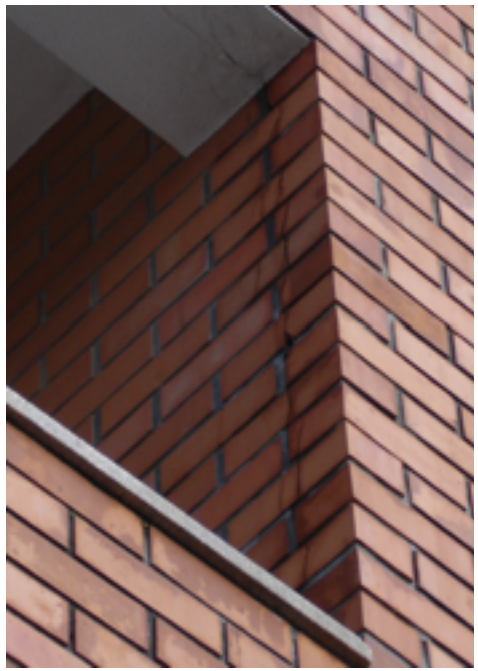
Las fachadas más propensas a manifestar fisuras por esta causa son las que están muy soleadas. También es posible la aparición de fisuras en las esquinas de dos fachadas con diferente soleamiento que, generalmente, se producen en los puntos débiles del muro, como son los estrangulamientos en las zonas de encuentro con soportes o forjados. El proceso patológico por movimientos térmicos propiamente dichos sólo se manifiesta en los muros largos muy expuestos, debido a que la fábrica de ladrillo tienen un coeficiente de dilatación térmica de valor muy bajo ($0{,}5 \cdot 10^{-5}$ m/m°C)[13]. En general,la aparición de la lesión se debe a la acción simultánea de otras causas, como el fenómeno de expansión descrito anteriormente.



Esquina en "Z" con junta de movimiento

Deficiencias del proyecto

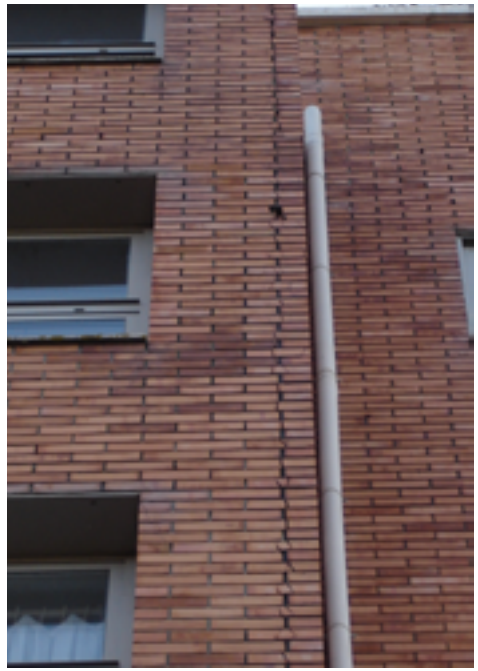
Los procesos patológicos enunciados anteriormente se pueden prevenir si se tienen en cuenta determinados criterios de proyecto imprescindibles cuando se utilizan elementos de fábrica. Los criterios de carácter general se han indicado en la sección que lleva este nombre. Se indican a continuación los errores u omisiones más significativos.



Error de proyecto: uniones constructivas mal resueltas

La unión de dos unidades constructivas distintas (por ejemplo, un muro contra un soporte, o un encuentro en esquina de dos muros con distintas características), a pesar de tener un mismo acabado superficial, es difícil conseguir que trabajen como un solo conjunto. Estos puntos son los más propensos a la aparición de grietas o fisuras, pues cualquier movimiento de un elemento conectado rígidamente al muro es transmitido al mismo.

Si estos movimientos no son considerados en el cálculo, es aconsejable resolver las uniones con elementos específicos que eviten determinados movimientos y permitan otros, para liberar al muro de las tensiones derivadas de la incompatibilidad.

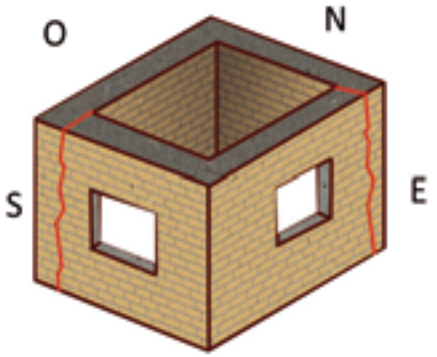


Error de proyecto: falta de juntas verticales de movimiento

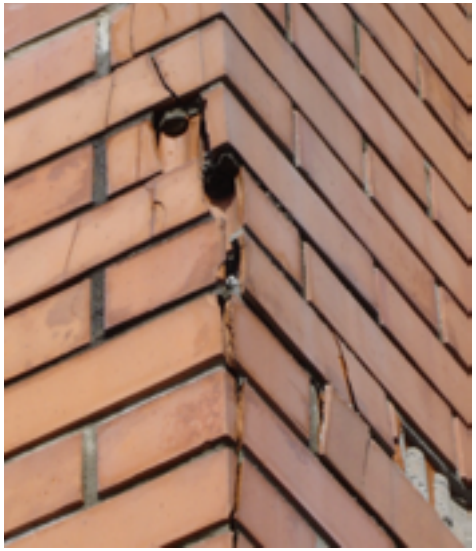
Las juntas se deben ubicar a una distancia tal que los movimientos de contracción o dilatación no superen la cohesión interna o resistencia de la fábrica a la tracción horizontal.

El DB SE-F establece distancias máximas entre juntas verticales de movimiento, para fábricas de ladrillo cerámico, en función de un único parámetro fundamental, que es el índice de expansión por humedad de las piezas.

Además de dividir los muros en tramos de longitud limitada, se pueden resolver con juntas verticales de movimiento los encuentros que tienen una solución constructiva difícil, por ejemplo las uniones entre muros construidos en época diferente o los encuentros no aparejados de esquinas con ángulos agudos.



Las paredes que miran al N y O dilatarán más que las otras pudiendo ocasionar fisuras verticales



13 Este valor es aproximadamente la mitad del correspondiente al hormigón y al yeso. Respecto de los elementos metálicos es tres veces menor.

Error de proyecto: limitación de flecha inadecuada

Los códigos y reglamentos estructurales establecen valores de fecha máxima, generalmente en función de un porcentaje de la luz. Cuando sobre el elemento estructural descarga un muro de fábrica, es conveniente considerar también la limitación de flecha en valor absoluto, sobre todo si se trata de luces elevadas.

Los muros de fábrica son muy rígidos, por lo que es aconsejable que los elementos estructurales sobre los que se sustentan lo sean también.

Cuando el muro se interrumpe en alguna planta, es aconsejable no admitir flechas en el elemento de apoyo de valor superior a 1/1000 de la luz. Esta misma recomendación se puede aplicar para el cálculo de dinteles. Las grietas por esta causa se reconocen fácilmente porque siguen una trayectoria que materializa el arco de descarga.

La deformación excesiva de los forjados o vigas que sirven de sustentación a los muros también pueden producir fisuras por aplastamiento local de los mismos, que tienen una configuración horizontal en la parte superior, acompañada de fisuras verticales en la parte inferior de la zona central del vano.

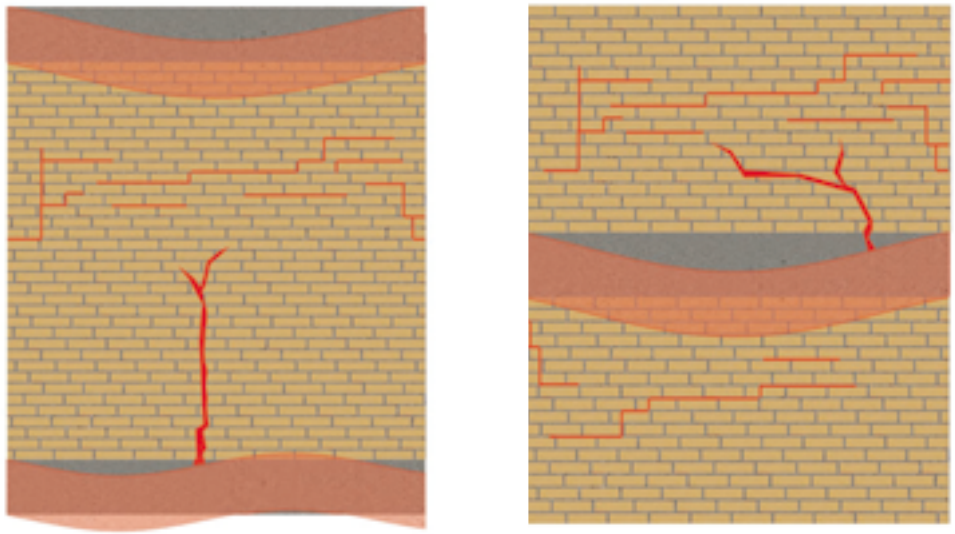
En los edificios que no tienen soportes en el plano de fachada, por estar retranqueados, los forjados en voladizo pueden presentar descensos diferenciales en plantas sucesivas. Si el forjado inferior se deforma más que el superior, se puede manifestar una fisuración en el muro que reproduce el arco de descarga, acompañada de fisuras inclinadas en las esquinas superiores.

Error de ejecución: falta de protección de elementos embutidos

Los elementos embutidos en muros deben estar suficientemente protegidos, pues a veces constituyen la causa directa del proceso patológico.

Se deben evitar muros con instalaciones gruesas embutidas. Especialmente deben tomarse precauciones con la instalación de calefacción y agua caliente, pues los plásticos y metales tienen elevados coeficientes de dilatación térmica.

También los elementos metálicos auxiliares embutidos (anclajes, armaduras o angulares) deben estar protegidos, puesto que la corrosión provoca aumentos importantes de volumen dando lugar a grietas que a su vez permiten el paso de la humedad, acelerando el proceso.



Patrón de fisuras por excesiva deformabilidad de las vigas

7. Fachadas convencionales. Soluciones GEOANC®

7.1 Tradicional o convencional 321

7.2 Razón de ser de las Soluciones GEOANC® 324

7.3 Prestaciones de las Soluciones GEOANC® 325

7.4 Elementos GEOANC® 326

7.4.1 Armadura de tendel tipo cercha FISUFOR® 327
7.4.2 Anclajes tipo GEOANC.P® 332
7.4.3 Anclajes tipo GEOANC.CDM® 334
7.4.4 Llaves de atado para juntas de movimiento ANCONFIX.PPS® 337
7.4.5 Láminas de revestimiento ZETAFLOT® 338

7.5 Soluciones GEOANC® para puntos singulares 339

7.5.1 Arranque sobre forjado 339
7.5.2 Chapado de los frentes de forjado 340
7.5.3 Encuentro con soportes 341
7.5.4 Formación de esquinas 342
7.5.5 Encuentros en “T” 343
7.5.6 Petos de cubierta 343
7.5.7 Formación de huecos 344
7.5.8 Juntas de movimiento 345

7.6 Normas de instalación de los elementos GEOANC® 346

7.6.1 Instalación de la armadura de tendel FISUFOR® 346
7.6.2 Instalación de los anclajes GEOANC® 347
7.6.3 Puesta en obra de las llaves ANCONFIX PPS® para juntas de movimiento 349
7.6.4 Instalación de la lámina de revestimiento ZETAFLOT® 350

7. Fachadas convencionales. Soluciones GEOANC®

Esta sección está dedicada fundamentalmente al análisis y descripción pormenorizada de lo que se entiende por el sistema tradicional de construcción de muros de fábrica, con función exclusiva de cerramiento de fachada; presentando los procedimientos de análisis que determinan las soluciones constructivas y los recursos necesarios para un correcto comportamiento.

7.1 Tradicional o convencional

Calificar de *"tradicional"* a cualquier sistema empleado para la construcción de muros de fábrica, cuando éstos se utilizan con la única función de cerramiento, implica una profunda contradicción.

En primer lugar, lo tradicional de las fábricas es su trabajo básicamente a compresión. Los muros de cerramiento, en general, no están cargados, por lo que, para verificar sus condiciones de estabilidad, se requieren procedimientos de análisis que distan mucho de los procedimientos tradicionales.

En segundo lugar, los muros de fábrica, tradicionalmente, estaban formados por un único material, con suficiente espesor como para dar respuesta a todas las exigencias del edificio encomendadas al cerramiento, tanto las de carácter resistente, como las relacionadas con los aspectos de protección y confort. En este sentido, los muros eran capaces, no sólo de soportar las cargas de los forjados, sino también de proteger el espacio interior de las inclemencias del medio. La función específica de cerramiento se conseguía a base de espesor, y estaba ligada intrínsecamente a la función portante.

A principios del siglo XX se introducen en la construcción el acero y el hormigón armado, como nuevos materiales estructurales, capaces de soportar tensiones muy superiores a los materiales de fábrica, dando origen a las estructuras porticadas, lo que supuso una liberación del espacio disponible respecto de las limitaciones de compartimentación que implican las estructuras de muros.

Ello produjo como consecuencia un cambio radical en la concepción de los edificios, presentando elementos portantes específicos y claramente diferenciados de los elementos de cerramiento.

El cambio en la concepción tradicional de la utilización de las fábricas en los edificios no sólo se debe a la aparición de nuevos materiales estructurales, sino también a la aparición de nuevos productos sintéticos con propiedades físicas y químicas específicas para cumplir los requisitos de aislamiento, sellado, impermeabilización, etc., con espesores extraordinariamente reducidos. Los muros de cerramiento han pasado de ser un elemento único a tener una configuración multicapa; no sólo han perdido su función portante, sino que ha disminuido progresivamente su espesor; todo ello favorecido por la necesidad de conseguir la máxima superficie útil en el interior del edificio, y la máxima economía de medios en su ejecución.

La forma habitual de construir hoy en día los cerramientos de fachada consiste en disponer una hoja exterior de

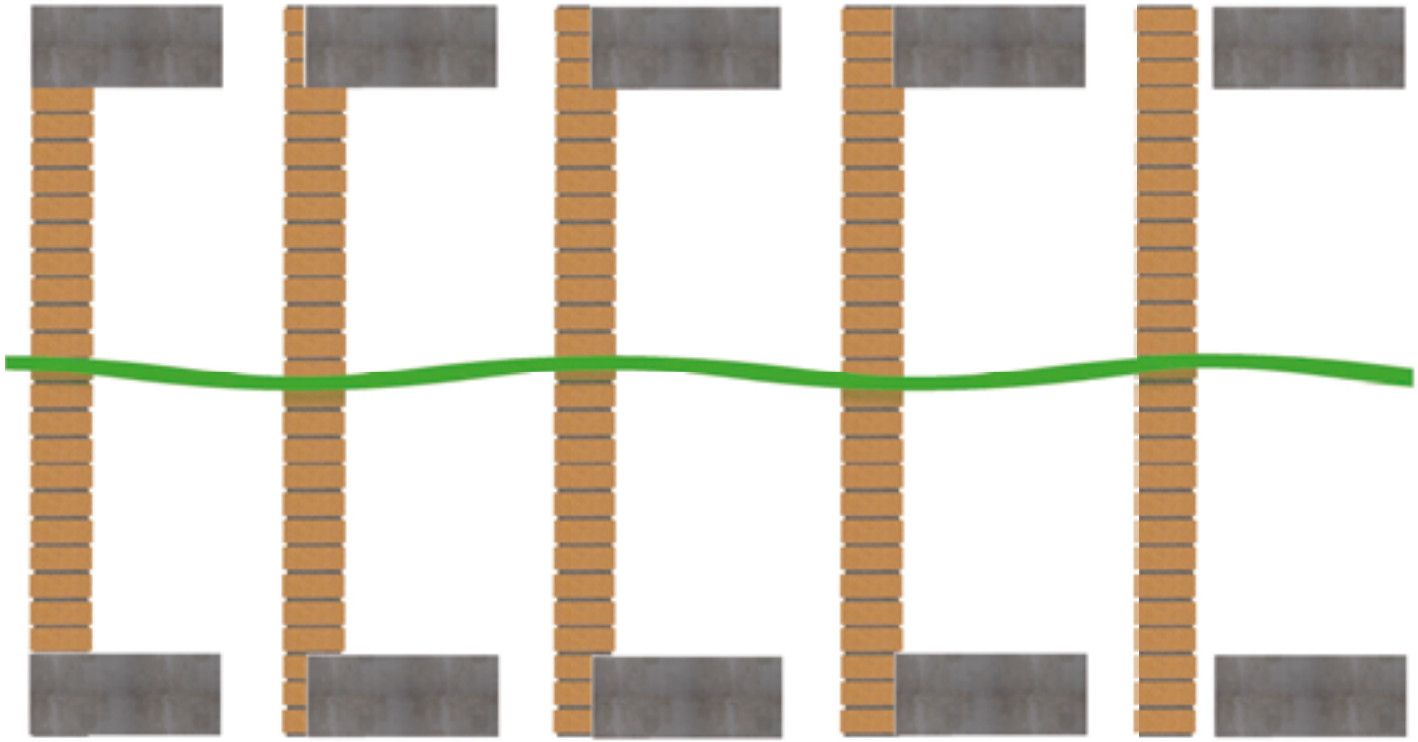
fábrica, de espesor comprendido entre 12 cm y 15 cm, una cámara con aislamiento, y un tabique interior. Todo ello suele estar confinado entre los forjados de piso, y ambas hojas sólo se conectan en torno a los huecos.

Este procedimiento de construir los cerramientos, desde el punto de vista mecánico, supone un comportamiento esencialmente distinto al comportamiento tradicional de las fábricas, incluso cuando los muros de cerramiento se construían con doble hoja. Los muros tradicionales de doble hoja se denominan en la bibliografía especializada sobre el tema *"muros capuchinos"*, y en nuestro país no han tenido demasiada profusión.

La diferencia fundamental entre la solución de cerramiento de doble hoja que se utiliza habitualmente y el *muro capuchino* radica en que en éste último, la hoja interior está cargada por el peso del forjado, por lo que tiene un espesor considerable, y sirve para estabilizar por gravedad a la hoja exterior, que puede ser más delgada, ante las acciones horizontales. En estas condiciones, la verificación de la estabilidad del conjunto es muy sencilla, puesto que la acción horizontal, cuando sólo se debe al viento, simplemente supone una oblicuidad de la acción gravitatoria que, para las situaciones habituales, no es superior al 3%. La hoja interior cargada, aunque tenga que hacer frente a las acciones horizontales, sigue trabajando básicamente a compresión.

Los únicos requisitos adicionales objeto de comprobación o dimensionado de un muro capuchino son: la capacidad de los elementos de anclaje para transmitir los esfuerzos debidos a la acción horizontal, desde la hoja exterior al muro de carga interior; y la capacidad resistente a flexión de la hoja exterior entre puntos de anclaje.

Los elementos de conexión suelen ser llaves metálicas dispuestas a distancias muy limitadas, por lo que la comprobación a flexión de la hoja exterior, que recibe directamente la acción de viento, acaba siendo una comprobación trivial.



Solución convencional **Solución no convencional**

La distancia máxima entre llaves está prescrita en la normativa, y es tan reducida que el esfuerzo que supone para los elementos de anclaje es muy pequeño por lo que, en general, basta con respetar las limitaciones de separación entre puntos de conexión, para conseguir un correcto funcionamiento del sistema, sin necesidad de realizar ningún cálculo específico, más que la comprobación de la capacidad resistente a compresión de la hoja interior.

Desde el momento en que la hoja interior cargada se sustituye por una estructura de pórticos, y las condiciones higrotérmicas se consiguen con láminas muy delgadas de productos específicos, los requisitos de los cerramientos se resuelven con menor espesor total. Además, están desprovistos de la acción gravitatoria estabilizante que suponía la carga de los forjados, por lo que deben hacer frente, por sí mismos, a la flexión originada por la acción de viento. Los únicos puntos de anclaje posibles a la estructura son los soportes y forjados, cuyas distancias tienen un valor considerable, por lo que la resistencia a flexión de la fábrica se convierte en el parámetro fundamental de su comportamiento mecánico, y la verificación de la estabilidad y resistencia del cerramiento no es inmediata.

El hecho de que la verificación del comportamiento mecánico de los cerramientos habituales no sea inmediata, no quiere decir que no sea posible. Pero es importante destacar que no se pueden utilizar los procedimientos y modelos de análisis tradicionales. En los cerramientos no cargados, el trabajo estructural es básicamente a flexión, lo que supone un cambio radical en el planteamiento de los modelos.

Por estas razones, en adelante nos referiremos a la solución habitual de los cerramientos indicada anteriormente con el calificativo de solución *convencional*, en vez de solución *tradicional*. No obstante, es preciso, en cualquier caso, establecer las *convenciones* que delimitan el ámbito de aplicación de la solución para garantizar un correcto comportamiento.

El vacío legal en el que han evolucionado los cerramientos de fachada ha propiciado la aparición de toda clase de reglas para estos elementos basadas en recursos de índole constructiva, cuando en realidad, si fuera posible establecer convenciones, éstas se deberían plantear en términos geométricos, puesto que la geometría constituye la característica fundamental de las fábricas, y el principal condicionante de su comportamiento mecánico.

El Código Técnico de la Edificación, en el Documento Básico de Seguridad Estructural dedicado a las Fábricas, reconoce por primera vez sin precedentes en la normativa de obligado cumplimiento de nuestro país, la capacidad de funcionamiento estructural de las fábricas sin ninguna reserva; sólo con las limitaciones que se deducen del análisis estructural. En la mayoría de los casos, el análisis se puede plantear en términos geométricos, puesto que la resistencia es prácticamente un invariante que condiciona muy poco el resultado.

Los diferentes procedimientos y sistemas constructivos lógicamente condicionan el comportamiento mecánico de los cerramientos, en cuanto que suponen determinadas condiciones de sustentación que deben ser consideradas en el análisis; pero ninguno de ellos se puede imponer o descalificar a priori. Cada sistema o solución particular incide en cumplir mejor un requisito a costa de otro, y ello puede ser objeto de polémica. La solución idónea, en cada caso, tiene que proceder de un pacto para conseguir las condiciones imprescindibles de estabilidad, con tensiones soportables por el material, y minimizando en lo posible el riesgo de fisuración; y todo ello a un coste razonable. Resulta obvio que la solución para cada situación particular no tiene por qué ser única.

7.2 Razón de ser de las Soluciones GEOANC®

Las Soluciones GEOANC® han sido concebidas con el objeto de suministrar los recursos necesarios para un correcto comportamiento de las fábricas convencionales.

Tal como se ha expuesto en secciones anteriores, es posible justificar el cumplimiento de las condiciones resistentes y de estabilidad de los cerramientos convencionales, sin recursos adicionales, cuando se trata de situaciones domésticas.

También se ha mostrado, mediante el análisis, la trascendencia de cada una de las variables que intervienen en el correcto comportamiento mecánico de los cerramientos. Cabe destacar que las variables fundamentales son de índole geométrica[1].

Se ha mostrado, mediante ejemplos que tratan de reproducir situaciones habituales, la enorme sensibilidad que tienen los cerramientos de ½ pie a las condiciones de entrega en los forjados, en relación con la estabilidad necesaria frente a las acciones horizontales. El margen de tolerancia es del orden de 2 cm; lo cual no se corresponde con los márgenes de tolerancias razonables en el replanteo de la estructura.

Por otra parte, el análisis estructural sólo permite la verificación de las condiciones de estabilidad y de resistencia. Las condiciones de fisuración no se pueden verificar mediante el análisis porque no existen modelos establecidos para ello. Sólo es posible plantear el problema en términos de prevención de riesgos.

El conocimiento, cada vez más difundido, de estas circunstancias, unido a la experiencia, cada vez más generalizada, en procesos patológicos ocasionados por un comportamiento deficiente de los cerramientos, ha originado la proliferación de recomendaciones, medidas de prevención e, incluso, improvisaciones en obra, encaminadas todas ellas a paliar posibles efectos perniciosos, sin haber determinado ni cuantificado las causas.

La disposición de recursos adicionales en los cerramientos de forma sistemática, utilizando como único argumento la incertidumbre acerca de su correcto comportamiento, conduce a soluciones innecesariamente costosas para situaciones pretendidamente convencionales.

La ausencia de normativa de obligado cumplimiento sobre el tema suscitó una polémica acerca de la idoneidad de los sistemas constructivos que se utilizan habitualmente en nuestro país para los cerramientos de los edificios domésticos. La polémica, que ya estaba planteada desde hace años y había llegado, incluso, a cuestionar la viabilidad de los sistemas convencionales de cerramientos, ha quedado zanjada con la reciente normativa que no cuestiona la bondad de ningún sistema constructivo siempre que se pueda justificar el cumplimiento de las prestaciones de seguridad y confort que se exige a los edificios.

Las Soluciones GEOANC® salen al paso de esta polémica, presentando un conjunto de elementos y recursos auxiliares para resolver satisfactoriamente cualquier solución de cerramiento, concebida como “co*nvenci*onal”.

Cada componente de las Soluciones GEOANC® cumple una misión específica, y ha sido concebida para incrementar las prestaciones mecánicas del cerramiento en cada uno de los aspectos en los que puede ser deficitario.

Ello no significa que sea preciso utilizar todos los componentes en todos los casos. Los elementos necesarios en cada situación particular, así como el dimensionado y disposición de los mismos deben estar determinados por el análisis.

Todos los elementos y recursos auxiliares GEOANC® tienen una misión estructural asignada que se puede cuantificar. Por consiguiente, con las soluciones GEOANC® se puede calcular, optimizar y, sobre todo, garantizar la solución constructiva del cerramiento. La cuantía y coste de los recursos necesarios sólo dependen de las características particulares de la obra en cuestión, fundamentalmente de sus condiciones geométricas y estructurales. Se pueden determinar exactamente en cada caso, en la fase de proyecto, sin dejar estas cuestiones a merced de incertidumbres, apreciaciones subjetivas o circunstancias imprevistas en obra, que son la principal fuente de conflictos, tanto técnicos como económicos.

7.3 Prestaciones de las Soluciones GEOANC®

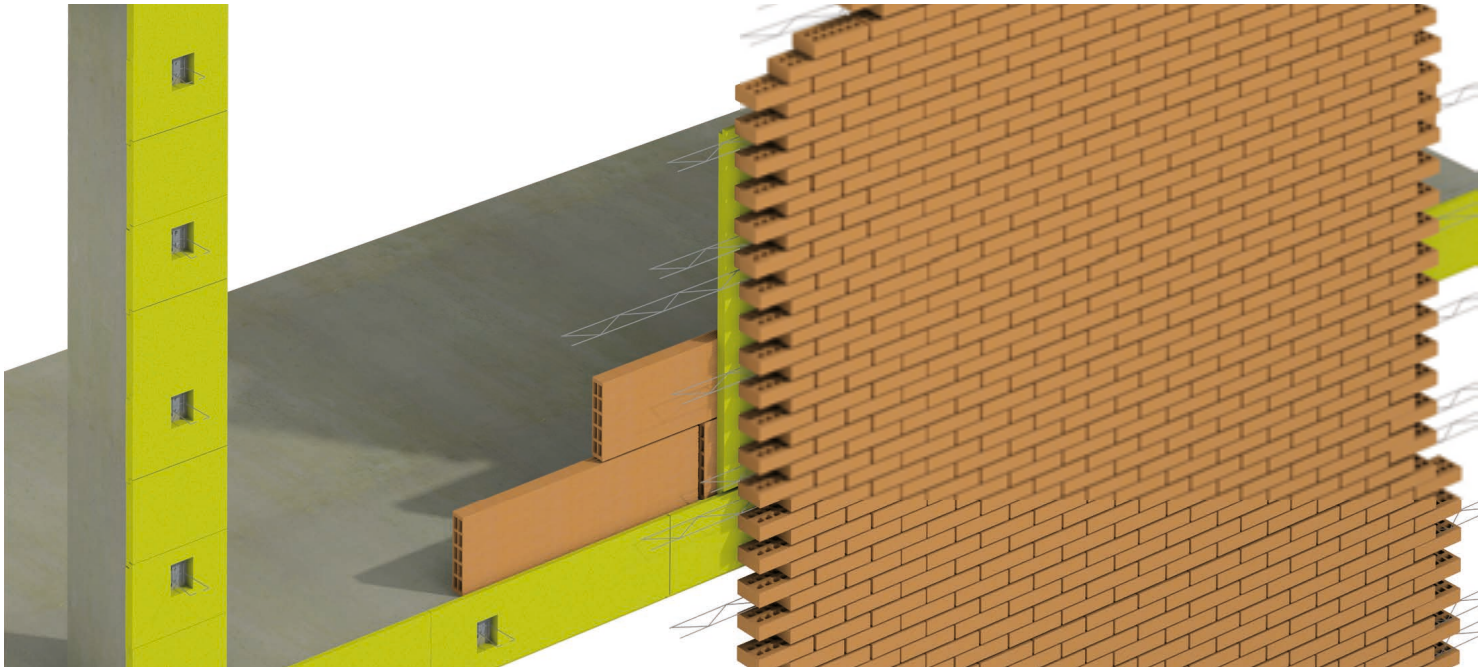
Las soluciones GEOANC® permiten el dimensionado de cualquier tipo de fábrica convencional para cumplir satisfactoriamente tres requisitos fundamentales:

- Resistencia y estabilidad: ante acciones horizontales, considerando los valores de cálculo establecidos por la normativa en cada caso, con posibilidad de dimensionar cada elemento para cumplir satisfactoriamente la misión resistente que tiene asignada como componente del conjunto.

- Control de fisuración: producida por efectos higrotérmicos, posible asientos diferenciales o concentraciones locales de tensión. Las soluciones con armado puntual en las primeras hiladas, huecos y esquinas evitan el progreso de la fisuración iniciada en estos puntos por acumulación de tensiones. Las soluciones con armado homogéneo en los tendeles proporciona a los paños la ductilidad implícita en los modelos de análisis que establece la normativa. Además, las llaves y los dispositivos de anclaje GEOANC® permiten libertad de determinados movimientos en el plano de la fachada para prevenir cualquier riesgo de fisuración por incompatibilidad con la estructura del edificio.

- Durabilidad: todos los elementos metálicos GEOANC® son de acero inoxidable o con la protección adecuada para poder ser utilizados en las distintas clases de exposición, tal como prescribe la normativa acerca de los elementos metálicos embutidos en fábricas.

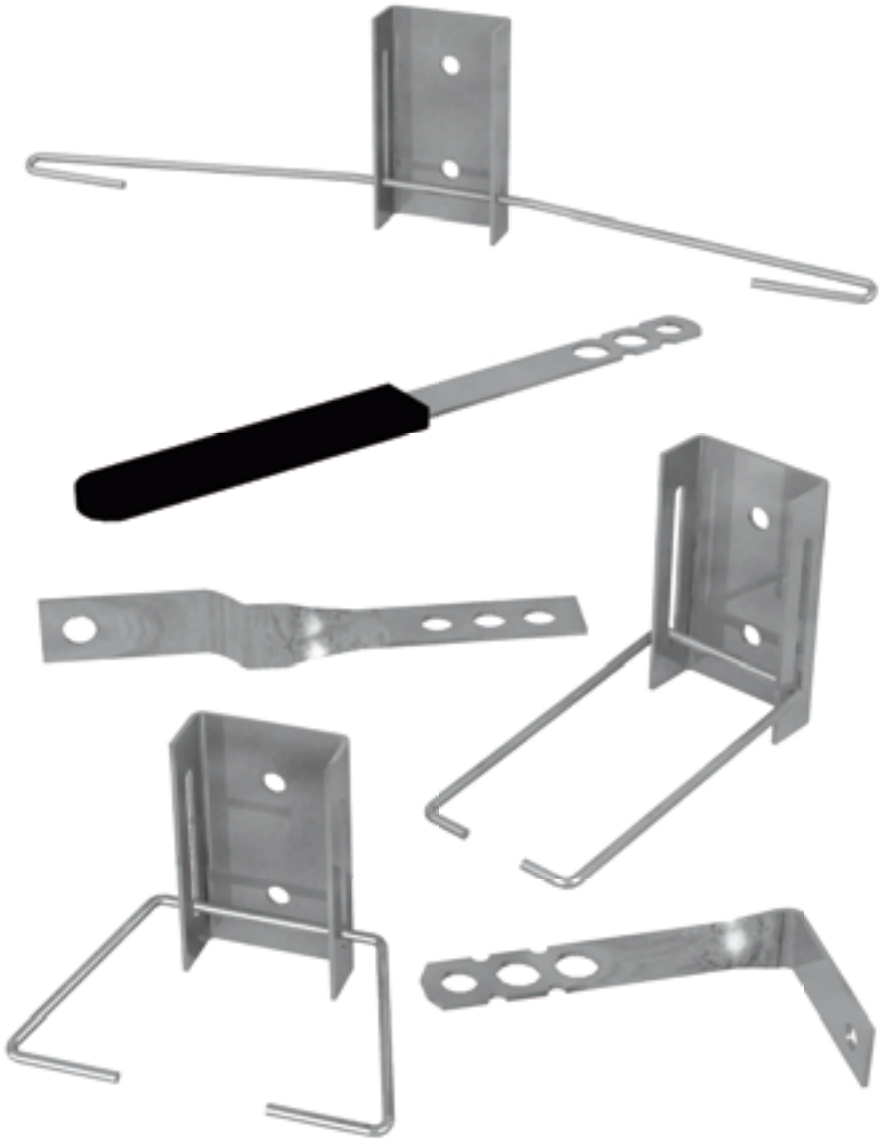
1 Incluso para la verificación de la resistencia, influye decisivamente la geometría de los paños, y apenas tiene trascendencia el valor de la resistencia a compresión de la fábrica. Esto es importante tenerlo en cuenta, porque se pueden evitar engorrosos ensayos para la determinación de la resistencia de los materiales constitutivos de las fábricas, cuando se hayan detectado errores o alteraciones de los parámetros especificados en proyecto.



7.4 Elementos GEOANC®

Para cumplir satisfactoriamente los tres requisitos indicados en el apartado anterior, las soluciones GEOANC® utilizan tres elementos fundamentales:

- Armadura de tendel: se utiliza para prevenir el riesgo de fisuración, con la cuantía mínima establecida en la normativa. Además, en las soluciones GEOANC®, la armadura de tendel tiene asignada la misión estructural de resistir esfuerzos, tantos los producidos por las acciones horizontales, como los producidos por descensos diferenciales en los apoyos.



- Anclajes a forjados y soportes: se utilizan para garantizar la estabilidad ante acciones horizontales. Los anclajes a forjados garantizan la estabilidad independientemente de las condiciones de entrega del cerramiento; los anclajes a soportes son imprescindibles para que se genere el mecanismo de resistencia a viento por flexión horizontal.

- Llaves de atado en juntas de movimiento: se utilizan para la transmisión de determinados esfuerzos a través de las juntas, permitiendo el libre movimiento horizontal en el plano de la fábrica. Eventualmente, y sólo cuando el análisis lo exige, las soluciones GEOANC® se complementan con otros elementos de tipo estándar que sirven para suplir la ausencia de los correspondientes elementos estructurales en fachada. Estos elementos son fundamentalmente los siguientes:

  - Pilastras verticales sustentadas en forjados: se disponen en los casos en los que no existen soportes en el plano de fachada; o en situaciones de luz excesiva entre los soportes estructurales.

  - Angulares de apoyo en el arranque: se disponen cuando existen faldones por debajo del primer forjado o en casos de grandes huecos corridos.

7.4.1 Armadura de tendel tipo cercha FISUFOR®

Descripción del producto

La armadura FISUFOR® es una armadura prefabricada, constituida por una malla plana formada por dos alambres paralelos unidos por otro alambre continuo en forma de zigzag, soldado en el mismo plano a los anteriores, de forma que el espesor total de la malla no es nunca superior al diámetro de los alambres longitudinales. Se incorpora preferentemente en los tendeles de la fábrica.

Características geométricas

Las principales características geométricas que identifican a la armadura FISUFOR® son las siguientes:

- La malla posee una configuración en forma de celosía triangulada. Ello hace que la armadura sea indeformable en su plano, resistiendo por sí misma esfuerzos de flexión y cortante, independientemente del material de relleno.

- Todos los alambres que constituyen la malla están soldados en el mismo plano, por lo que su espesor es igual al diámetro de los alambres longitudinales, consiguiendo el máximo recubrimiento con el mortero del tendel, imprescindible para una adecuada transmisión de esfuerzos por adherencia.

Dimensiones

Existe una gama completa de armaduras FISUFOR® con diferentes anchos, adaptadas a los distintos espesores de la fábrica a realizar.

En la tabla 7.1 se indican los anchos de armaduras FISUFOR® recomendados para utilizar en fábricas de diferentes espesores. En general, el criterio a seguir es que el ancho de la armadura utilizada permita un recubrimiento del mortero de los tendeles entre las barras longitudinales y el exterior, no menor de 15 mm. Por tanto, el ancho *"a"* de la armadura, en función del espesor *"t"* del muro debe ser:

$$a\ (mm) \leq t\ (mm) - 30\ mm$$

Los alambres de la armadura FISUFOR® tienen una sección proporcionada al ancho de la pieza de manera que, si se respeta la distancia máxima entre armaduras establecidas en el DB SE-F (600 mm), se cumpla automáticamente la condición de cuantía mínima superior al 0,03% de la sección vertical de la fábrica, establecida para prevenir fisuración.

Acabados

Las armaduras FISUFOR® se comercializan con los siguientes acabados:

- Galvanizado en caliente (G): los alambres que las conforman son de acero al carbono protegido por una capa de cincado en caliente al 99,5 %. Se pueden utilizar en muros de fábrica protegidos contra la humedad.

- Acero Inoxidable (S): los alambres son de acero inoxidable austenítico macizo. Se recomienda su uso en medios agresivos.

Características mecánicas

Los alambres de la armadura FISUFOR® son de acero corrugado trefilado, que cumplen las especificaciones de la instrucción de hormigón estructural EHE para los aceros de armar, con las características mecánicas que se resumen en la tabla 7.2.

Presentación comercial

Las piezas de armadura FISUFOR® tienen una longitud de 3,05 m. Se presentan en paquetes de 25 unidades. El palé estándar está compuesto por 40 paquetes de 25 piezas colocadas sobre pequeños soportes de madera.

Las características físicas y de presentación estándar de la armadura FISUFOR® se especifican en la tabla 7.3.

Aplicaciones de la armadura de tendel FISUFOR®

La armadura FISUFOR® embutida en los tendeles de las fábricas desempeña un papel similar al de las armaduras embutidas en el hormigón: modifican el comportamiento mecánico del material, de manera que la fábrica armada adquiere las propiedades que caracterizan a un *material compuesto*.

En general, es recomendable su utilización, con carácter preventivo, en todo tipo de fábricas, para evitar los riesgos de fisuración esporádica debidos al carácter frágil de los materiales pétreos. Pero además se le puede encomendar un papel estructural específico, constituyendo, por tanto, un elemento objeto de dimensionado

según los criterios y procedimientos del DB SE-F, para resistir los siguientes tipos de esfuerzos:

- Esfuerzos de flexión por acción gravitatoria: La armadura FISUFOR® desempeña el papel de *tirante* en un elemento de fábrica suspendido entre apoyos.

- Esfuerzos de flexión por acciones horizontales: La armadura FISUFOR® desempeña el papel de viga en celosía triangulada, indeformable en su propio plano, pudiendo resistir esfuerzos de cortante y flexión horizontal, por sí misma, independientemente de la contribución de las bielas comprimidas de mortero.

- Esfuerzos de corte por acciones horizontales en muros transversos: La armadura FISUFOR® desempeña la función de armadura de cosido, incrementando sustancialmente la resistencia al corte en los muros de arriostramiento dispuestos entre soportes.

Las aplicaciones concretas de la armadura de tendel tipo cercha FISUFOR® se resumen en los puntos que se indican a continuación:

- Asientos diferenciales del plano de apoyo: los movimientos diferenciales de la base de sustentación de una fábrica provocan que ésta se quede "*en vano*" debido a la enorme rigidez del muro. La colocación de armaduras FISUFOR® en las primeras hiladas suministran la tracción necesaria en el tirante del arco de descarga, para que éste se produzca sin riesgo de fisuración.

- Esquinas, encuentros y cruces de muros: los enlaces entre muros son zonas propensas a la acumulación de tensiones. Ello se agrava si no se consigue una correcta traba entre los elementos que se conectan. La armadura FISUFOR® restituye la traba interrumpida y disipa las tensiones acumuladas.

- Formación de huecos: los huecos son zonas debilitadas de la superficie del muro, muy propensas a la acumulación de tensiones, principalmente en las esquinas. La armadura FISUFOR® colocadas en las hiladas superiores e inferiores al hueco y prolongadas adecuadamente en el interior del muro disipan las tensiones acumuladas. Con la cuantía necesaria en función de las dimensiones del hueco y la carga del muro, puede servir para eliminar el cargadero.

Tabla 7.1 Ancho recomendado de la armadura FISUFOR®

	Espesor del muro (mm)							
	70	90	115	140	190	240	290	Dos hojas
Ancho de FISUFOR® (mm)	30	50	80	100	150	200	250	250

Tabla 7.2 Características mecánicas de la armadura FISUFOR®

	Acabado	Durabilidad	Límite elástico, f_y	Solape por adherencia	Clase de ductilidad	Resistencia a cortante de la soldadura
FISUFOR 3 mm	Galvanizado	R20	400 N/mm²	250 mm (10 kN)	normal	1,6 kN
FISUFOR 4 mm	Galvanizado	R20	500 N/mm²	250 mm (10 kN)	normal	2,5 kN
	Inoxidable	R3	580 N/mm²	250 mm (10 kN)	alta	2,5 kN
FISUFOR 5 mm	Galvanizado	R20	580 N/mm²	250 mm (10 kN)	normal	2,5 kN
	Inoxidable	R3	580 N/mm²	250 mm (10 kN)	alta	2,5 kN

Tabla 7.3 Características físicas de la armadura FISUFOR®

Tipo	Ancho (mm)	Φ Longitudinal (mm)	Φ Diagonal (mm)	Paso de la celosía (mm)	Sección de los dos alambres longitudinales (mm^2)	Peso por pieza (kg)	Longitud de la pieza (m)	Piezas por paquete	Piezas por palé	Peso por palé (kg)
FISUFOR 3/G	30	3	3	406	14	0,509	3,05	25	1000	519
	50					0,512				522
	80					0,520				530
	100					0,527				537
	150					0,548				558
FISUFOR 4/G	30	4	3,7	406	25	0,861	3,05	25	1000	872
	50					0,866				877
	80					0,879				890
	100					0,890				901
	150					0,926				937
FISUFOR 5/G	50	5	3,7	406	35	1,205	3,05	25	1000	1215
	80					1,217				1227
	100					1,227				1237
	150					1,260				1270
	200					1,301				1311
	250					1,348				1358
FISUFOR 4/S	30	4	3,7	406	25	0,861	3,05	25	1000	872
	50					0,866				877
	80					0,879				890
	100					0,890				901
	150					0,926				937
FISUFOR 5/S	50	5	3,7	406	35	1,205	3,05	25	1000	1215
	80					1,217				1227
	100					1,227				1237
	150					1,260				1270
	200					1,301				1311
	250					1,348				1358

- Presencia de cargas concentradas: la armadura FISUFOR® colocada en las hiladas inmediatamente inferiores a la carga concentrada, permite que ésta se reparta adecuadamente en el resto del paño.

- Muros largos: la colocación de un armado homogéneo con FISUFOR® permite aumentar entre un 30 y un 50% la separación recomendada entre juntas de movimiento para prevenir los efectos producidos por fenómenos higrotérmicos y de retracción en las fábrica.

- Zonas de discontinuidad geométrica: cuando existe un cambio de altura o espesor en el muro, o en zonas debilitadas por la presencia de rebajes o por el encuentro con elementos estructurales, la armadura FISUFOR® permite que se produzca la continuidad de esfuerzos a pesar de la discontinuidad originada por la geometría.

- Presencia de acciones horizontales: las más significativas son los empujes del terreno, en muros de sótano; empujes de material almacenado en silos o depósitos; y acción de viento en fachadas. La armadura FISUFOR® resiste la flexión horizontal originada, siempre y cuando existan los correspondientes contrafuertes o elementos verticales resistentes a flexión, dimensionados para transmitir la reacción correspondiente.

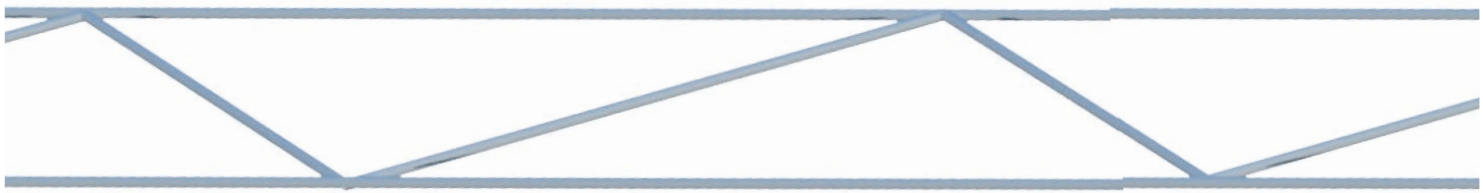
- Encadenados y zunchos perimetrales de forjados: la armadura FISUFOR® dispuesta en las hiladas inmediatamente inferiores al apoyo del forjado, posibilita un adecuado reparto de cargas y puede sustituir al zuncho perimetral que exige la normativa.

- Hastiales: son elementos solicitados a esfuerzos de tracción en los bordes. La armadura FISUFOR® penetrando en el elemento de borde del hastial y complementada con una armadura inclinada de reparto sirve para evitar el riesgo de fisuración en estos elementos.

- Muros doblados y capuchinos: son muros formados por dos hojas adosadas o separadas por una cámara no superior a 11 cm, respectivamente. La armadura FISUFOR® enlazando las dos hojas puede sustituir a las llaves que exige la normativa para poder considerar el trabajo conjunto de las dos hojas desde el punto de vista estructural.

- Fábricas sin aparejar: se suelen diseñar este tipo de fábricas con fines estéticos o cuando se desea combinar diferentes materiales. La armadura FISUFOR® colocada en los tendeles restituye la traba debida al aparejo.

- Muros de arriostramiento: son muros encargados de la estabilidad general del edificio ante acciones horizontales. Su solicitación fundamental es el esfuerzo cortante que es especialmente significativo cuando los muros tienen huecos o no están suficientemente cargados. La armadura FISUFOR® colocada homogéneamente en los tendeles y anclada a soportes verticales, desempeña la función de armadura de cosido entre las zonas traccionada y comprimida del muro, aumentando notablemente su resistencia al corte.



Cuantías recomendadas de la armadura FISUFOR®

En cada tipo de aplicación indicada anteriormente, la armadura FISUFOR® debe ir colocada en la posición adecuada y se deben respetar unas determinadas cuantías mínimas para que pueda desempeñar correctamente la función asignada.

En la mayoría de los casos, la armadura FISUFOR® es objeto de dimensionado, por lo que será el resultado del análisis el principal factor que determine la cuantía de armadura precisa.

Sin embargo, en los casos habituales que se recogen en la tabla 7.4, se puede prescindir del cálculo si se disponen las cuantías recomendadas que se indican.

Prescripciones de carácter general relativas a la utilización de armadura

Cuando se utilizan armaduras de tendel embutidas en el interior de la fábrica es preciso observar una serie de prescripciones; unas encaminadas a conseguir una adecuada protección contra la corrosión, incluso en los casos de utilizar alambres protegidos; y otras referentes a la cuantía mínima para evitar el fenómeno de rotura frágil.

Las prescripciones relacionadas con la protección frente a la corrosión son las siguientes:

- La categoría del mortero a emplear en obras de fábrica armada no debe ser inferior a M5.
- El espesor "e" de las juntas de mortero ordinario debe estar comprendido entre 8 mm y 15 mm.
- El espesor mínimo del recubrimiento de mortero respecto al borde exterior no debe ser menor de 15 mm.
- El recubrimiento de mortero por encima y por debajo de la armadura de tendel no debe ser menor de 2 mm, incluso para los morteros de junta delgada.

Las prescripciones relacionadas con la cuantía mínima son las siguientes:

- La cuantía mínima de la armadura de tendel para controlar la fisuración y dotar de ductilidad a la fábrica es de 0,03% de la sección vertical de la misma
- La separación entre armaduras no debe ser mayor de 60 cm.

Tabla 7.4 Cuantías recomendadas de armadura FISUFOR®

Aplicación	Armadura FISUFOR® recomendada	
	Cuantía	Situación
Muros sobre cimentación	5 hiladas cada 40 ó 50 cm	En arranque En el resto
Muros o tabiques sobre forjados	2 hiladas cada 40 ó 50 cm	En arranque En el resto
Encuentro en esquina	cada 40 ó 50 cm	En esquina
Encuentro en "T"	cada 40 ó 50 cm	Esquinas simétricas en hiladas alternas
Encuentro en cruce	cada 40 ó 50 cm	Contrapeada en cada muro
Huecos	2 hiladas 1 hilada	Sobre el dintel Bajo antepecho
Carga concentrada	3 a 5 hiladas	Bajo la carga
Muros largos	cada 40 ó 50 cm	Armado homogéneo
Cambio de altura	3 hiladas	En cabeza del muro menor
Cambio de espesor	cada 40 ó 50 cm	En toda la altura
Muros de sótano	cada 10 ó 20 cm cada 20 ó 40 cm cada 40 ó 50 cm	En arranque (hasta 1,00 m) En el centro (hasta 2,00 m) En cabeza (hasta 3,00 m)
Fachadas	cada 40 ó 50 cm	Armado homogéneo
Encadenados y zunchos	4 hiladas	Bajo apoyo del forjado
Hastiales	cada 40 cm cada 20 cm (altura>8,00 m) 1 hilada	Armado homogéneo Armado homogéneo Inclinada en borde
Muros de dos hojas	cada 40 ó 50 cm	Armado homogéneo
Muros sin aparejar	cada 1 ó 2 hiladas	Armado homogéneo
Muros transversos	cada 40 ó 50 cm	Armado homogéneo

7.4.2 Anclajes tipo GEOANC.P®

Su misión es la rigidización transversal de paños de fábrica confinados entre forjados. Son elementos de sujeción o retención de la fábrica a los soportes estructurales, capaces de transmitir toda o parte de la reacción horizontal debida a la acción de viento.

Son anclajes mecánicos rígidos, que no permiten movimientos diferenciales entre el paño de fábrica y el elemento estructural al que se conectan, por eso se recomienda su uso sólo en los casos de paños confinados entre forjados que tienen, por esta razón, impedida la posibilidad del libre movimiento vertical.

Presentación del producto

Los anclajes GEOANC.P® se comercializan en varios modelos, que permiten su colocación en fábricas de ½ pie de espesor, en disposición retranqueada respecto de la cara exterior de los soportes.

Se fabrican en acero inoxidable austenítico, por lo que se pueden utilizar, sin ningún tipo de restricción, tanto en paramentos interiores como exteriores.

Aplicaciones

Se recomienda el uso de los anclajes GEOANC.P® en las siguientes situaciones:

- En fábricas que precisen sólo rigidización transversal, porque tienen su estabilidad garantizada por el confinamiento entre forjados.

- Para atado de las fábricas a los soportes, utilizando este recurso de forma sistemática como medida preventiva, con objeto de aumentar las condiciones de estabilidad en paños confinados debilitados por la presencia de grandes huecos y suplir pequeños defectos o errores de ejecución en la entrega de la fábrica en el forjado.

- Cuando no se pueda cumplir la condición de entrega en el forjado por errores en la posición de la tabica del mismo. En este caso, deben ser objeto de dimensionado, puesto que los anclajes deben ser capaces de restituir la condición de entrega precisa para la estabilidad del paño.

En las situaciones indicadas anteriormente, la utilización de los anclajes GEOANC.P® presenta numerosas ventajas frente a la práctica habitual de utilizar dispositivos de amarre improvisados en obra. Las principales ventajas son las siguientes:

- Se instalan con gran facilidad, puesto que se pueden incorporar en los tendeles de la fábrica simultáneamente a su ejecución, pudiéndose realizar la operación de fijación a posteriori.

- Tienen garantizada la protección frente a la corrosión, puesto que son de acero inoxidable.

- Es un producto muy económico.

- Evitan la entrada de humedad en la tabiquería interior.

- Tienen certificado de calidad ISO.

Los elementos improvisados en obra para conseguir la retención de las fábricas tienen, por el contrario, graves inconvenientes, entre los que destacan los siguientes:

- El procedimiento de colocación es engorroso y se precisa la intervención simultánea de, al menos, dos operarios.

- No tienen ninguna protección contra la corrosión, incumpliendo las especificaciones de la norma UNE-EN 845-1:2005 *"Especificación de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 1: Llaves, amarres, colgadores, ménsulas y ángulos"*. Pueden aparecer manchas de óxido en las fachadas o, en casos más graves, las consecuencias del aumento de volumen experimentado por el acero como consecuencia de la corrosión.

- Si se consideran todos los factores que intervienen (material, mano de obra, tiempo de ejecución, etc.) su empleo supone una repercusión económica superior a la que corresponde al uso de anclajes GEOANC.P®.

- La fijación de los elementos improvisados puede constituir una vía

de entrada de agua y, por tanto, de riesgo de humedades en la hoja interior de los cerramientos.

- Su fabricación es artesanal en obra, sin ningún certificado de calidad.

- No pueden incorporarse en los cálculos, bajo ninguna condición.

Es preciso hacer hincapié en el conocido *"fleje"*, que sólo es un elemento de embalaje, y no reúne ninguna característica para ser utilizado como elemento de atado entre fábricas y estructura, por lo que se desaconseja rotundamente su empleo para este cometido.

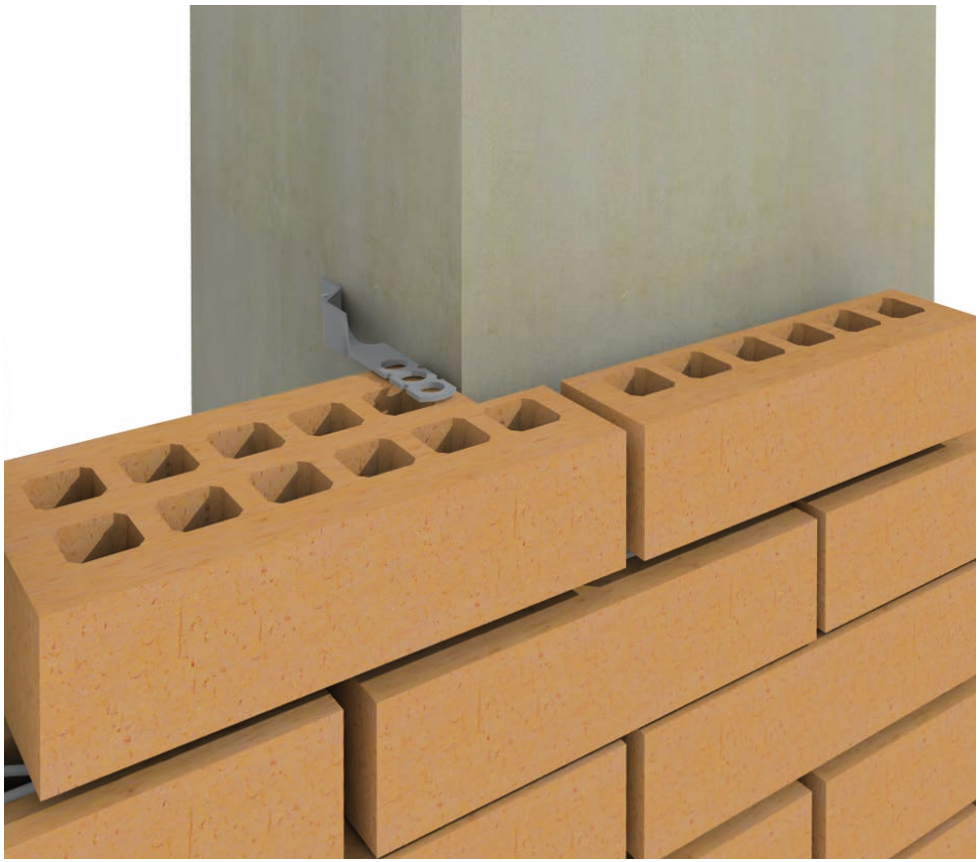
Cuantías recomendadas de GEOANC.P®

Como se ha indicado anteriormente, todos los dispositivos de anclaje deben dimensionarse de acuerdo con el tipo y magnitud de los esfuerzos que deben transmitir. Los procedimientos de análisis aplicables a los casos más frecuentes se han desarrollado en la sección de *"Requisitos"*.

No obstante, en situaciones habituales, en las que los paños de fábrica cuentan con suficiente confinamiento entre forjados, es decir, con un apoyo mínimo en torno a 7 cm para una altura libre no superior a 2,70m, y con una succión de viento no superior a 0,50 kN/m^2 en valor característico, se puede prescindir de los cálculo para la verificación de la estabilidad si se disponen anclajes GEOANC P® a distancias no superiores a las que se indican en la tabla 7.5. En situaciones de entrega deficiente, o de altura o acción de viento superiores a las indicadas, es necesario realizar los cálculos oportunos para su dimensionado.

Tabla 7.5 Cuantía de anclajes en fábricas confinadas

Luz entre soportes, L	Distancia recomendada entre anclajes GEOANC.P®		
	Ladrillo cara vista		Ladrillo tosco
	Formato castellano	Formato catalán	
L ≤ 5,00 m	60 cm (10 hiladas)	60 cm (10 hiladas)	56 cm (7 hiladas)
5,00 m < L < 6,00 m	48 cm (8 hiladas)	54 cm (9 hiladas)	48 cm (6 hiladas)
L ≥ 6,00 m	36 cm (6 hiladas)	48 cm (8 hiladas)	40 cm (5 hiladas)



7.4.3 Anclajes tipo GEOANC.CDM®

Son elementos de sujeción o retención de la fábrica a elementos estructurales (soportes y frentes de forjado) que permiten libertad de movimiento en las dos direcciones (horizontal y vertical) contenidas en el plano del muro, evitando el movimiento de vuelco.

La posibilidad del libre movimiento del paño en su propio plano evita el riesgo de fisuración por acumulación de tensiones en las regiones más solicitadas que son aquellas en las que se impone el vínculo con la estructura del edificio.

Por una parte, al permitir el libre movimiento horizontal en el plano del muro, se evita el riesgo de fisuración debido al fenómeno de expansión por humedad que se manifiesta en los materiales cerámicos.

En segundo lugar, al permitir el libre movimiento vertical en el plano del muro, se evita el riesgo de trasvase de carga gravitatoria de los elementos estructurales (fundamentalmente de los forjados) al muro, por la enorme diferencia de rigidez.

Debida a la propiedad de los anclajes GEOANC.CDM® de posibilitar el libre movimiento vertical del paño, se recomienda su empleo en paños que, por su sistema constructivo, no tienen coaccionado este movimiento, es decir, en fábricas pasantes por delante de la estructura.

Su configuración geométrica, con una amplia holgura vertical en el elemento hembra, para posibilitar el libre movimiento, permite su fijación a los elementos estructurales con anterioridad al inicio de construcción de la fábrica, sin necesidad de precisar con exactitud el punto de fijación, puesto que permiten tolerancias de ±5 cm para colocar la garra en su posición correcta, a posteriori, en la hilada correspondiente.

La capacidad mecánica de cada anclaje, su cuantía y ubicación en la superficie del muro, y el tipo y especificación concreta a utilizar en cada caso, dependen de los siguientes factores:

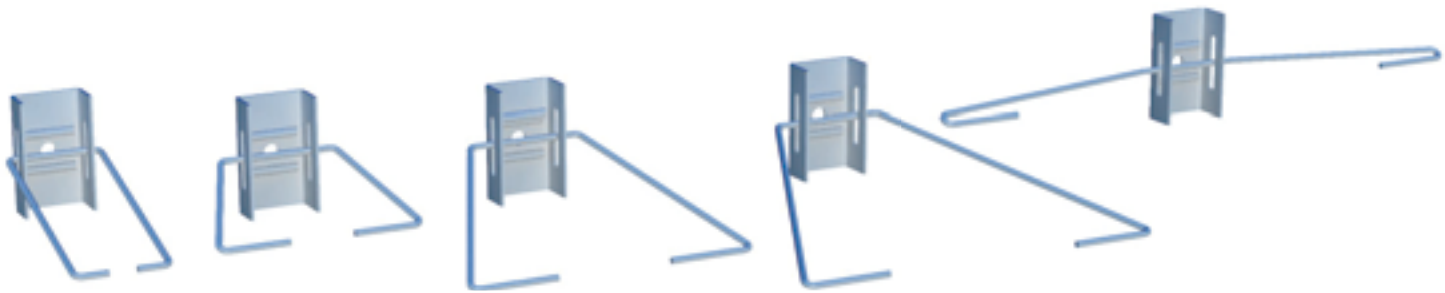
- Movimientos relativos que se pueden admitir entre el paño y el elemento estructural al que se fijan.
- Magnitud de las acciones horizontales perpendiculares al plano del muro.
- Espesor del muro y tamaño de la cámara de aire, si la hubiere.
- Posición de acometida del muro contra el elemento estructural.

En todos los casos, la imposibilidad de realizar operaciones de mantenimiento y la ubicación invadiendo la cámara interior del muro, exige la necesidad de utilizar acero inoxidable en la fabricación de todos los elementos constitutivos de los anclajes.

Presentación del producto

Los anclajes GEOANC.CDM® se comercializan en cinco formatos diferentes, para permitir su colocación en fábricas de distintos espesores, y con diferentes retranqueos respecto de la cara exterior del soporte o frente de forjado.

- Anclaje GEOANC.0CDM®: sirve para su ubicación en fábricas de cualquier espesor que acometen *"a testa"* contra el soporte. Esta



GEOANC.0CDM® GEOANC.1CDM® GEOANC.2CDM® GEOANC.3CDM® GEOANC.4CDM®

disposición hace inviable la posibilidad de movimiento horizontal del paño, puesto que es precisamente el que se trata de restringir; por lo que sólo poseen libertad de movimiento vertical.

- Anclaje GEOANC.1CDM®: sirve para fábricas de ½ pie de espesor que pasan tangentes por delante de los soportes o de los frentes del forjado, sin espacio intermedio para la cámara, por lo que ésta queda interrumpida al paso por esos puntos.

- Anclaje GEOANC.2CDM®: se utiliza en fábricas de espesor superior a ½ pie tangentes a los elementos estructurales; o en fábricas de ½ pie con cámara de aire de 5 cm aproximadamente.

- Anclaje GEOANC.3CDM®: está diseñado fundamentalmente para fachadas ventiladas, con cámara de ancho superior a 5 cm. También sirve para fábricas de 1 pie de espesor tangentes a los elementos estructurales.

- Anclaje GEOANC.4CDM®: es un anclaje concebido para sujetar las *"galletas"* o *"plaquetas"* a los elementos estructurales. Se utiliza en situaciones en las que la cara exterior del elemento estructural (soporte o frente de forjado) está situada a unos 4 cm de la cara exterior de la fábrica.

Todos ellos se fabrican en acero inoxidable austenítico, por lo que se pueden utilizar, sin ningún tipo de restricción, tanto en paramentos interiores como exteriores.

Aplicaciones de los anclajes GEOANC.CDM®

Los anclajes GEOANC.CDM® son dispositivos con una función estructural específica. Ello significa que es imprescindible su utilización, no sólo con carácter preventivo de posibles procesos patológicos, sino para garantizar la estabilidad del cerramiento, en las siguientes situaciones:

- En fábricas no confinadas entre forjados. Esta situación corresponde a los siguientes casos:
  - Cerramientos o tabiques en los que se elimina el *"retacado"* contra el forjado, sustituyéndolo por una junta elástica.
  - Fachadas autoportantes, que no tienen entrega en el forjado de cada planta.
  - Fachadas ventiladas, con cámara continua que las separa de la estructura del edificio.
- Para atado de fábricas de ½ pie de espesor y altura superior a 3,00 m, en las que la estabilidad no se puede garantizar por simple confinamiento, debido a que se sobrepasa la esbeltez límite.
- Como sustitución del angular que habitualmente se coloca en el frente de forjado cuando las condiciones de entrega de la fábrica en el mismo son insuficientes. En este caso se abarata y se simplifica sustancialmente la solución constructiva y la puesta en obra.
- En general, para sujetar las *"plaquetas"* de chapado de los frentes de forjado, tanto si la fábrica está confinada, como si hay junta horizontal de movimiento. En todos los casos, es importante que no se produzca trasvase de carga del forjado al cerramiento, por lo que los anclajes deben permitir el libre movimiento vertical.

También se pueden utilizar en las mismas aplicaciones indicadas para los anclajes GEOANC.P®. Es importante destacar que cualquier dispositivo de anclaje tiene como función específica la de *retención* de la fábrica frente a la tendencia al vuelco. En este sentido, la posibilidad de libre movimiento sólo es una propiedad añadida al dispositivo para evitar fenómenos de acumulación de tensión no deseados, pero nunca supone una restricción a su uso, incluso cuando esta precaución no sea necesaria.

El diseño exclusivo de los anclajes GEOANC.CDM® les confiere numerosas ventajas para su utilización, entre las cuales destacan las siguientes:

- Se instalan con gran facilidad, puesto que se fijan con anterioridad a la ejecución del muro, de manera que el operario no tiene más que incorporarlos en la hilada correspondiente a medida que construye la fábrica.

- Es posible supervisar la correcta puesta en obra de los anclajes con anterioridad al inicio de la ejecución del muro.

- Poseen una holgura en vertical de unos 5 cm, lo cual permite su instalación midiendo *"a palmos"* sin necesidad de utilizar ningún tipo de aparato de precisión para que queden perfectamente alojados en el nivel adecuado.

- Tienen garantizada la protección frente a la corrosión, puesto que son de acero inoxidable.

- Evitan la entrada de humedad en la tabiquería interior.

- Tienen certificado de calidad ISO.

- Son objeto de cálculo, por lo que se puede realizar, para cada caso, un dimensionado estricto de la cuantía necesaria, con total garantía en lo que se refiere al cumplimiento de las condiciones de seguridad exigidas por la normativa.

- Se adaptan a cualquier espesor de la fábrica y a cualquier disposición relativa de la misma respecto a los elementos estructurales.

Cuantías mínimas de los anclajes GEOANC.CDM®

Los anclajes GEOANC.CDM®, cuando se utilizan en las situaciones indicadas anteriormente, tienen encomendada la función de garantizar la estabilidad de la fábrica, por lo que su dimensionado requiere el cálculo y las comprobaciones correspondientes.

En cualquier caso, incluso en situaciones de valores pequeños de solicitación, su funcionamiento se basa en un reparto homogéneo de tensiones, sobre todo en las zonas en las que se desarrolla la reacción correspondiente por parte de los elementos estructurales. Ello hace imprescindible limitar las distancias máximas entre los puntos de anclaje aunque, desde el punto de vista resistente, resulten sobredimensionados los dispositivos correspondientes. Si los anclajes se colocan muy distanciados, su funcionamiento no se corresponde con los modelos de análisis utilizados.

Con carácter general, la separación máxima entre anclajes coincide con la separación máxima entre armaduras de tendel. Este valor está relacionado con la cuantía mínima exigida en la normativa para evitar fisuración que, según el diseño de la armadura FISUFOR®, conduce a separaciones predeterminadas independientemente del espesor de la fábrica en cuestión.

Los valores de distancias máximas que se deben respetar en cualquier caso, por requerimientos de cuantía mínima, se indican en la tabla 7.6.

Tabla 7.6 Cuantía de anclajes en fábricas no confinadas

Situación	Distancia máxima entre anclajes GEOANC.CDM®	
	Ladrillo cara vista	Ladrillo tosco
Interior	60 cm (10 hiladas)	56 cm (7 hiladas)
Exterior	48 cm (8 hiladas)	48 cm (6 hiladas)
Frente de forjado	100 cm (4 piezas)	100 cm (4 piezas)

7.4.4 Llaves de atado para juntas de movimiento ANCONFIX.PPS®

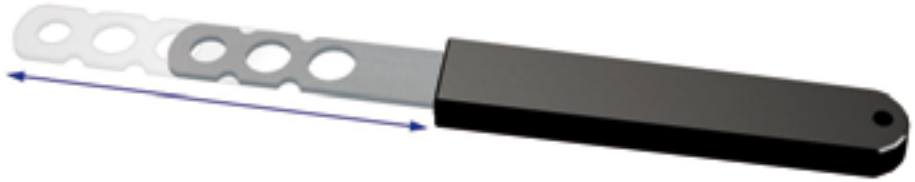
Las llaves de atado son elementos cuya función es la de conectar dos paramentos diferentes de una fábrica separados por una junta vertical de movimiento. Su función es transmitir determinados esfuerzos e impedir otros debidos a deformaciones impuestas.

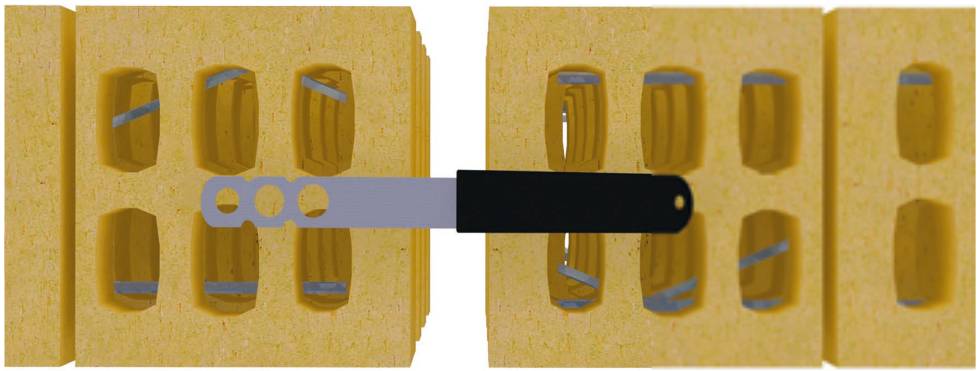
Es importante distinguir las juntas de movimiento de las juntas estructurales.

Las juntas estructurales separan el edificio en dos elementos totalmente independientes desde el punto de vista mecánico. Por el contrario, a través de las juntas de movimiento se puede producir la transmisión de determinados esfuerzos.

Para que esta transmisión se produzca en perfectas condiciones es imprescindible colocar elementos específicos para esta función que se denominan, de forma genérica, *"llaves de atado"*. Sin ellos quedaría interrumpida la continuidad de esfuerzos a través de la junta, de manera que los bordes se comportarían como bordes libres que, ante las acciones horizontales, pueden experimentar un movimiento ortogonal de la fábrica con respecto al plano de fachada, originando la denominada *"ceja"*.

Las llaves de atado ANCONFIX.PPS®, utilizadas en las juntas verticales de movimiento, tienen uno de sus extremos cubiertos por una funda de plástico, para evitar la adherencia con el mortero. La funda de plástico tiene una holgura de, aproximadamente, 1 cm, respecto al extremo de la llave, suficiente para permitir el libre movimiento horizontal en el plano del muro.





La utilización de las llaves de atado ANCONFIX.PPS® en las juntas de movimiento verticales tiene las siguientes ventajas:

- Se garantiza la continuidad en la transmisión de determinados esfuerzos a través de la junta.
- Son elementos de bajo coste que, sin embargo, evitan procesos patológicos aparatosos.
- Se fabrican únicamente en acero inoxidable, por lo que es imposible que se produzca cualquier proceso de corrosión. Para este tipo de elementos es fundamental esta precaución, puesto que quedan, en parte, expuestos al ambiente exterior, en situación de fácil penetración de humedad.
- Poseen certificado de fabricación ISO.
- Su diseño específico garantiza que únicamente se produzca movimiento horizontal del muro dentro de su mismo plano.

Cuantías recomendadas

En general, se recomienda disponer llaves de atado a las mismas distancias en vertical indicadas para los anclajes, sin superar la distancia máxima de 50 cm.

En fábricas de ladrillo de un pie de espesor se recomienda la disposición de llaves por parejas, dos unidades en la hilada correspondiente. En fábricas de ladrillo de ½ pie de espesor es suficiente disponer una llave por hilada.

7.4.5 Láminas de revestimiento ZETAFLOT®

Las láminas de revestimiento son elementos que se disponen a modo de forro de soportes y frentes de forjado, y sirven para desolidarizar los cerramientos respecto de la estructura del edificio. Funcionan también como barreras impermeabilizantes y contribuyen a la eliminación de puentes térmicos y acústicos.

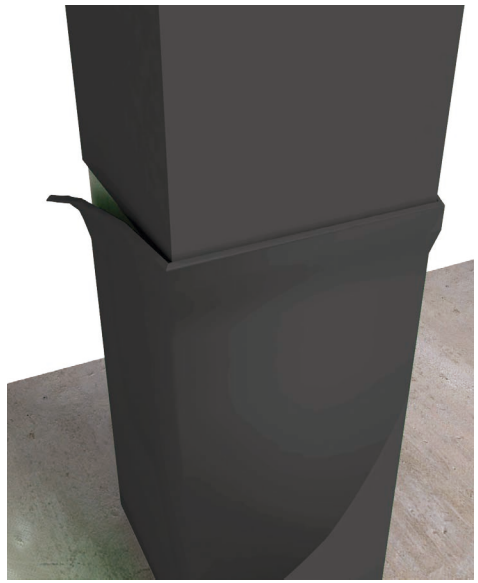
La lámina ZETAFLOT® es una lámina de espuma reticulada que se utiliza como aislamiento acústico bajo solados o tarimas flotantes, debido a su elevada capacidad de amortiguación de los ruidos de impacto. Sus principales características son las siguientes:

- Excelente aislamiento acústico a ruido de impacto.
- Buen aislamiento térmico.
- Barrera antihumedad por su estructura de celdas cerradas.
- Resistente a agentes químicos.
- Resistencia al desgarro y punzonamiento.

Presentación del producto

La lámina ZETAFLOT® se comercializa en tres formatos diferentes, para su aplicación en distintos casos de agresividad del medio:

- ZETAFLOT® STANDARD: compuesta de una lámina de polietileno reticulado, de espesores 3, 5 y 10 mm. Se presenta en rollos de 2 x 50 m.
- ZETAFLOT® SUPER: compuesta por una lámina de polietileno reticulado de 3 mm de espesor, con filme antidesgarro por una cara. Se presenta en rollos de 2 x 50 m.
- ZETAFLOT® PLUS: compuesta por una lámina de espuma reticulada de 4 mm de espesor, un filme antidesgarro por una cara, y 1 mm de PVC por la otra. Se presenta en rollos de 0,75 x 50 m.



Características físicas y mecánicas

En la tabla 7.7 se indican las principales propiedades de la lámina ZETAFLOT®, en cada uno de los tres formatos en los que se comercializa, así como el procedimiento de ensayo utilizado para su determinación.

Tabla 7.7 Características de la lámina ZETAFLOT®

Propiedades		Método de ensayo	Referencia		
			ZetaFlot® Standard	ZetaFlot® Super	ZetaFlot® Plus
Densidad (kg/m³)		ISO 845	25		
Rango de temperatura de operación (°C)		Interno	-40 / +90	-40 / +90	-40 / +90
Resistencia a la compresión (kPa)	10%	ISO 3386	15	20	20
	25%		30	40	40
	50%		90	100	100
Deformación remanente (%)		ISO 1856	7	6	6
Resistencia a la tracción (kPa)	longitudinal	ISO 1798	200	410	1900
	transversal		180	330	
Elongación de rotura (%)	longitudinal	ISO 1798	100	115	90
	transversal			150	75
Absorción de agua (%vol)		DIN 52428	< 2,5	< 2,5	< 2,5
Coeficiente de conductividad térmica (W/m·K)	a 0°C	ISO 2585	0,039	0,039	0,039
	a 20°C		0,041	0,041	0,041

7.5 Soluciones GEOANC® para puntos singulares

En este apartado se presentan las disposiciones constructivas para la ejecución de los puntos singulares de los cerramientos de fábrica convencionales, utilizando los elementos GEOANC® recomendados para evitar procesos patológicos, debidos fundamentalmente a fisuración y humedad.

En capítulos anteriores se han indicado los procedimientos de análisis que determinan si los cerramientos encajan dentro de los límites de lo que se entiende por *"convencional"*, desde el punto de vista de su estabilidad y resistencia frente a acciones horizontales.

Independientemente del dimensionado de los elementos deducido del análisis, las disposiciones que aquí se indican se deben respetar sistemáticamente, pues constituyen procedimientos de prevención de riesgos por causas que no pueden incorporarse en los modelos de análisis.

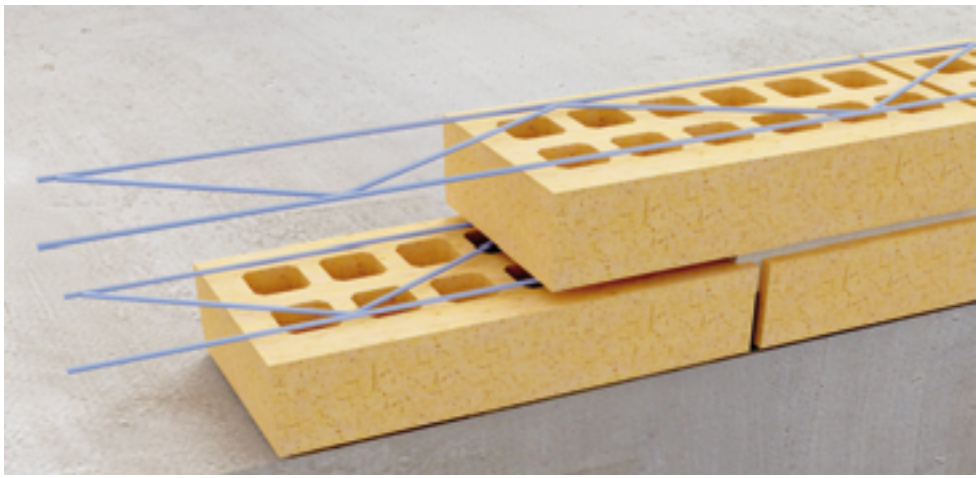
Se representan únicamente los detalles que son comunes a todas las obras con cerramiento de fábrica. Los detalles singulares no pueden ser objeto de catalogación, por lo que se recomienda consultar con el departamento técnico de GeoHidrol, S.A., para solicitar el estudio particularizado, cuando se trate de casos no catalogados.

7.5.1 Arranque sobre forjado

El arranque del cerramiento sobre el forjado constituye un punto delicado.

La condición de entrega, necesaria para la estabilidad ante acciones horizontales, se contrapone con la necesidad de dejar suficiente espacio para las plaquetas de chapado del frente de forjado.

La solución en obra, independientemente de las especificaciones de proyecto, siempre procede de un compromiso para cumplir simultáneamente dos requisitos: la estabilidad del paño y la estabilidad de las plaquetas. En cerramientos de ½ pie de espesor el margen disponible para cumplir ambos requisitos es muy pequeño.



Por otra parte, existe un fuerte condicionante que determina inevitablemente la posición exacta del arranque del paño. Este condicionante es la situación real de la tabica del forjado, que puede oscilar varios centímetros respecto del valor teórico de proyecto.

Todo ello hace que la condición de entrega no siempre se pueda garantizar. Las soluciones GEOANC® incorporan anclajes adicionales para garantizar la estabilidad de los paños, además del confinamiento en los forjados, de manera que una entrega insuficiente no suponga necesariamente riesgo de inestabilidad.

Utilizando este tipo de recurso, la posición exacta de arranque del cerramiento sobre cada forjado se puede determinar con la única condición de mantener la planeidad de la fachada en toda la altura del edificio.

Con objeto de prevenir los riesgos de fisuración debidos a descensos diferenciales del zuncho o viga de borde del forjado, se recomienda la disposición de armadura de tendel FISUFOR® en las dos primeras hiladas de arranque; y armado homogéneo cada 8 hiladas en el resto del paño, si se ejecuta con ladrillo cerámico de 5 cm de grueso.

La armadura dispuesta en las primeras hiladas de la fábrica desempeña el papel de *"tirante"* para que la descarga que se produce en las situaciones de *"falso apoyo"* se pueda producir sin riesgo de fisuración o desprendimiento.

7.5.2 Chapado de los frentes de forjado

La necesidad de chapar con plaquetas los frentes de los forjados en los que se sustenta el cerramiento constituye un punto conflictivo que suele ser una de las causas principales de aparición de procesos patológicos.

En primer lugar, el espesor del cerramiento se debe estrangular en este punto, pasando de 11,5 cm a un valor que rara vez puede superar los 5 cm, por las razones anteriormente expuestas.

Si para garantizar la estabilidad del paño se prescribe una entrega generosa en el forjado, lo que queda en precario es la estabilidad de las plaquetas.

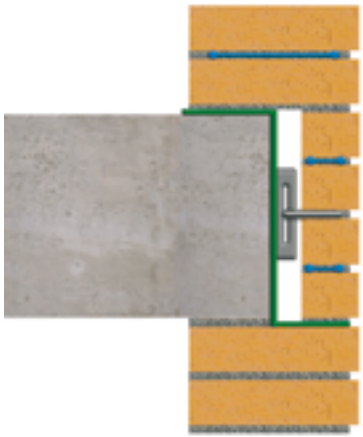
En cualquier caso, si no se prevén suficientes tornapuntas en el encofrado del forjado, es probable que el frente quede irregular debido a los empujes propios del vertido del hormigón. Esto dificulta enormemente la disposición de las plaquetas de chapado, puesto que puede ser necesario disponer piezas de espesor variable a lo largo del mismo.

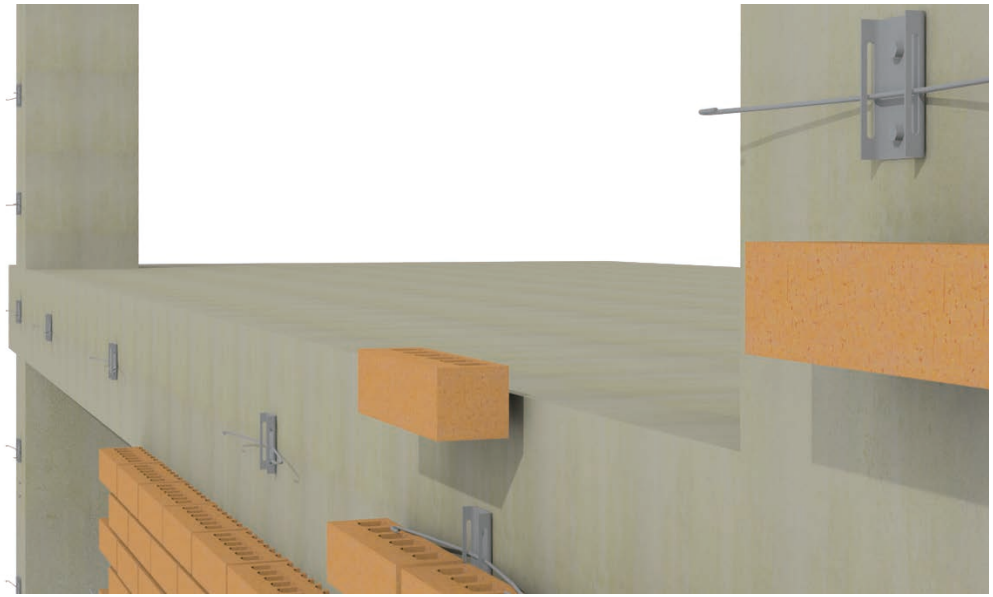
La práctica habitual de solidarizar estos elementos con los forjados y, a su vez, con el resto del paño, origina una incompatibilidad de movimientos cuya consecuencia se manifiesta precisamente en las hiladas de plaquetas, por ser la zona más débil.

Por ello, la sujeción de las plaquetas al frente de los forjados se debe realizar mediante dispositivos que, cuando menos, permitan libertad de movimiento en dirección vertical, para desolidarizar estos elementos del forjado.

Además, los dispositivos de anclaje a los frentes de forjado contribuyen en buena medida, no sólo a la estabilidad de las plaquetas, sino a la estabilidad del paño frente a cargas de viento. La utilización de los mismos permite prescindir de un control minucioso de las condiciones de entrega, y da la posibilidad de admitir tolerancias más amplias en el replanteo de las tabicas de forjados sucesivos.

Conviene insistir en que la misión de los anclajes a los frentes de forjado es evitar el vuelco, por lo que deben restituir la condición de *"entrega"*, no la condición de *"apoyo"*. Por ello, es imprescindible que permitan que el forjado se mueva en vertical sin implicar en este movimiento al cerramiento, para evitar el riesgo de trasvase de carga gravitatoria del forjado a la fábrica. Este requisito es fundamental cuando los forjados son muy flexibles en el plano de fachada, bien por no existir soportes o por estar estos dispuestos a separaciones importantes.





7.5.3 Encuentro con soportes

Este punto puede ser objeto de diferentes soluciones, según la distancia disponible desde el frente de los soportes hasta el borde exterior del cerramiento.

En situaciones de soportes enrasados con el borde del forjado o viga de fachada, se produce una situación conflictiva similar a la indicada en el apartado anterior.

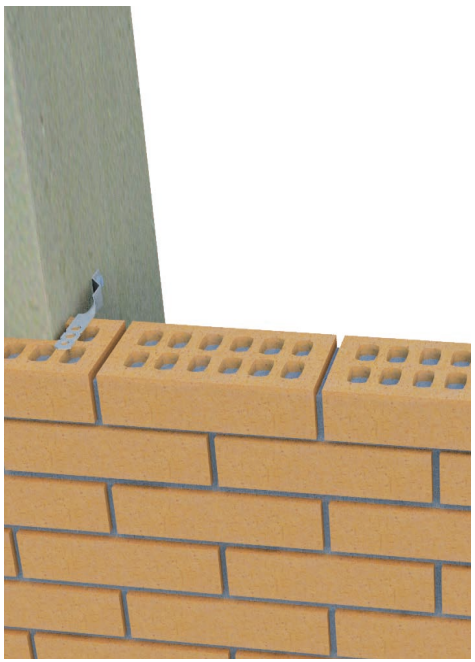
El cerramiento se estrangula no sólo al paso por los forjados, sino también al paso por los soportes, precisamente en donde deben producirse las condiciones requeridas para una correcta sustentación.

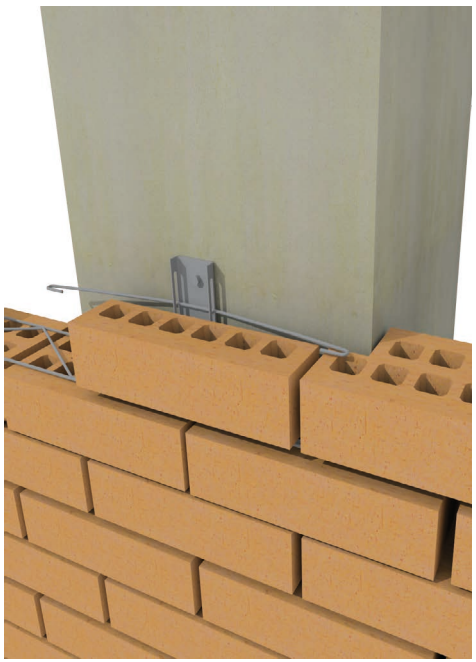
Es una buena práctica retranquear ligeramente el plano del frente de soportes del plano de borde de forjado. Ello ocasiona mochetas algo mayores que las que se originan en posición enrasada; sin embargo apenas tiene trascendencia en el diseño. Un retranqueo de 8 cm es suficiente para evitar que un cerramiento de ½ pie de ladrillo deba estrangularse al paso por los soportes. Este criterio no sólo favorece la situación del cerramiento, sino también permite solucionar con un margen mayor los encuentros entre armaduras de soportes y vigas de borde, y garantizar un buen anclaje en el extremo de las mismas.

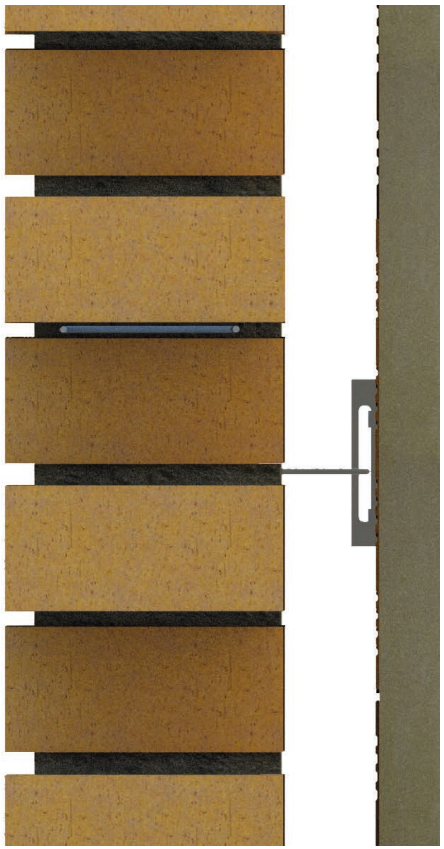
Si los soportes están demasiado retranqueados del plano de fachada, es posible que no se pueda solucionar el anclaje del cerramiento a los mismos. El límite máximo de retranqueo es 10 cm (medido desde el borde interior del cerramiento), y está determinado por el diseño de los dispositivos de anclaje. Con separaciones superiores se debe recurrir a disponer pilastras auxiliares o casquillos intercalados.

Todas las situaciones intermedias son posibles gracias al diseño específico de los anclajes GEOANC.CDM®, que tienen garras de diferentes anchos para adaptarse a cualquier posición relativa entre los soportes y el cerramiento, dentro de los límites establecidos anteriormente.

Es fundamental, en todos los casos, forrar los soportes para desolidarizarlos del cerramiento al que sujetan.







7.5.4 Formación de esquinas

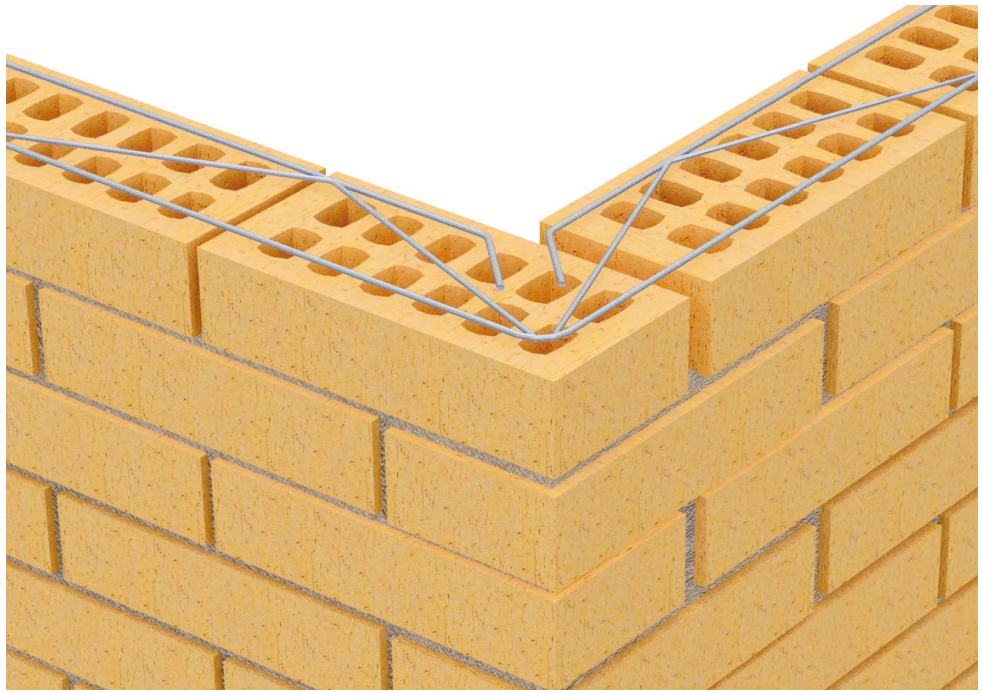
Las esquinas se deben organizar trabadas según el aparejo utilizado. En las esquinas se produce el intercambio de tensiones secundarias que normalmente, y según los procedimientos de análisis descritos, no se tienen en cuenta en el cálculo.

Por esta razón constituyen puntos de elevado riesgo de fisuración, por incompatibilidad de determinados movimientos.

El refuerzo con armadura de tendel en estas zonas es recomendable para garantizar una correcta transmisión de esfuerzos que, aunque no sea imprescindible para el equilibrio, lo es para compatibilizar la deformación, evitando el riesgo de fisuras.

Para controlar la fisuración es suficiente disponer armaduras de tendel tipo cercha FISUFOR® a distancias similares a las recomendadas para armado homogéneo (cada 8 hiladas en fábrica de ladrillo de ½ pie de espesor). Esta armadura puede formar parte de la armadura necesaria por flexión, o se puede disponerse ex-profeso como armado puntual.

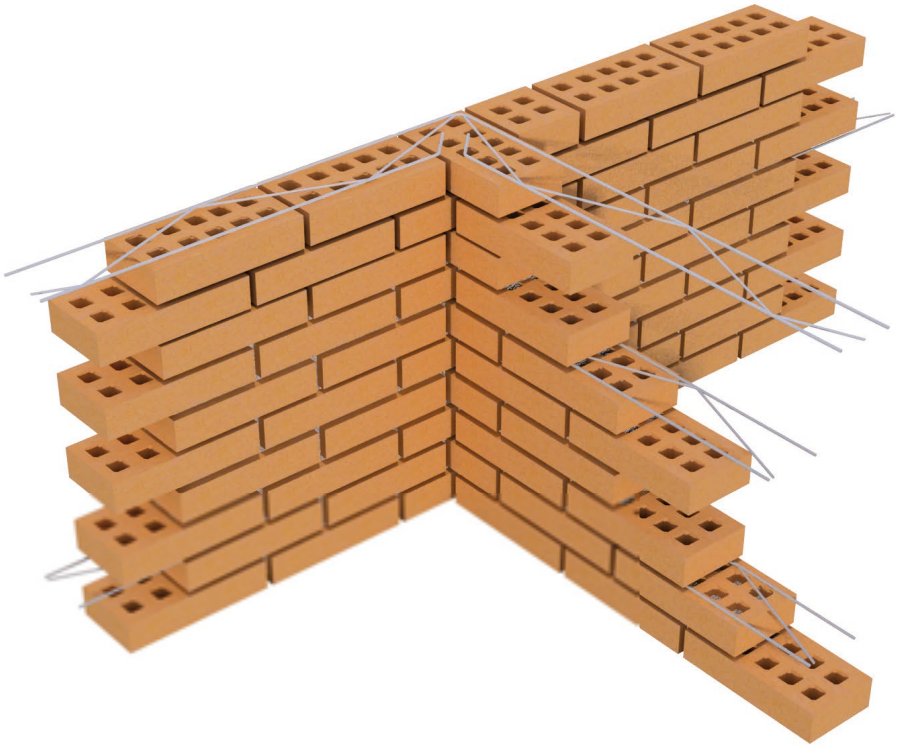
La armadura en esquina debe tener continuidad por la cara exterior. Para ello, se debe utilizar una pieza enteriza, cortando uno de los alambres longitudinales de la cercha FISUFOR® que quedará en la cara interior, procediéndose al doblado según el ángulo correspondiente.



7.5.5 Encuentros en “T”

La misma disposición de armaduras FISUFOR®, cortadas y dobladas en esquina, sirve para reforzar los encuentros de muros en “T”. En este caso, se deben disponer armaduras simétricas, alternativamente.

Esta solución de encuentro, que supone trabazón con aparejo y refuerzo con armadura, es adecuada para muros no cargados. Si uno de los muros es de carga, el encuentro con el cerramiento debe permitir libertad de movimientos verticales, para evitar el efecto de trasvase de carga, y un elevado riesgo de fisuración vertical por cortante. Para estos casos, se recomienda la unión con anclajes tipo GEOANC.0CDM®.



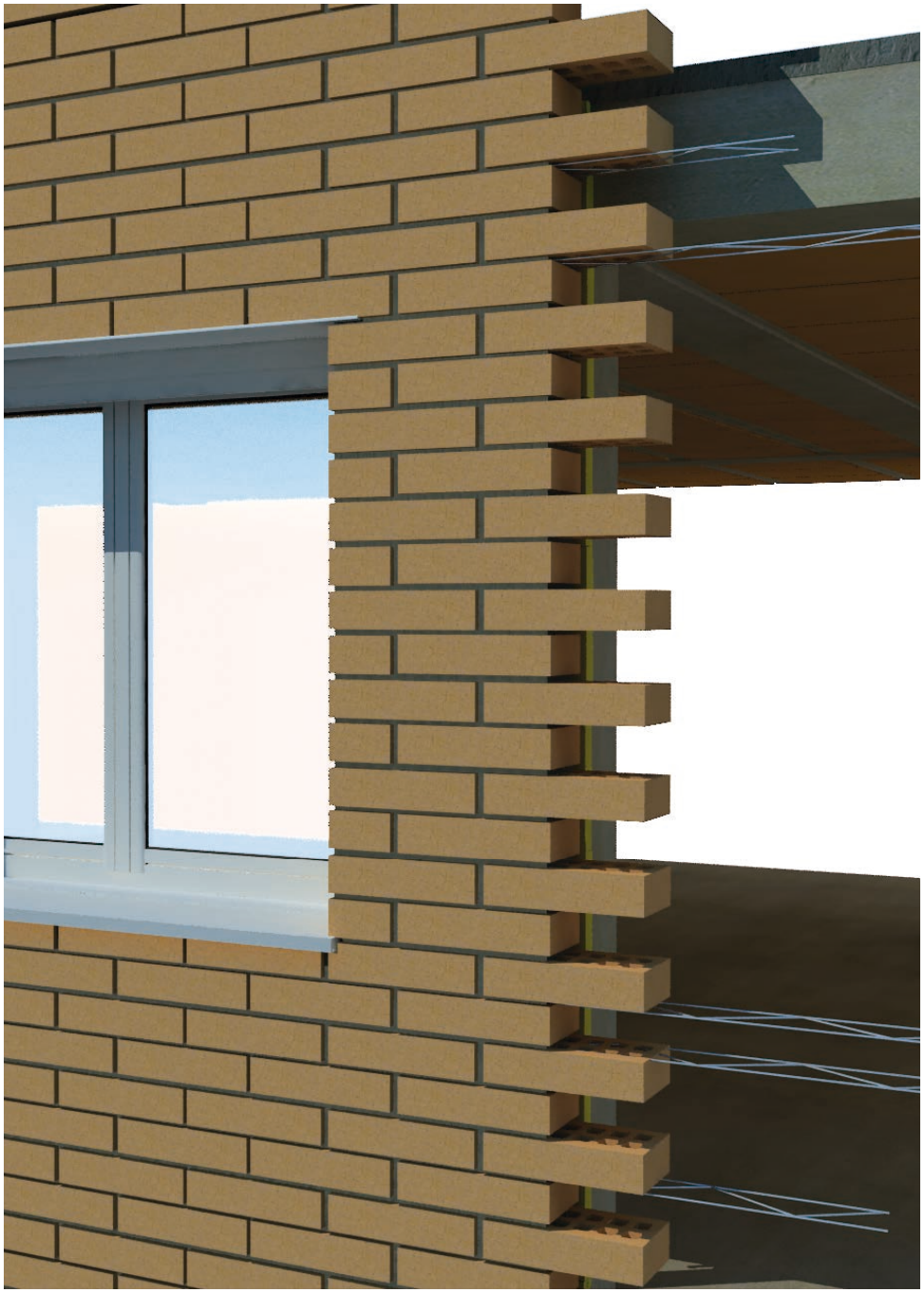
7.5.6 Petos de cubierta

La cubierta es un elemento con propensión a sufrir movimientos debidos a cambios de temperatura.

Las cubiertas planas suelen quedar confinadas entre el peto perimetral, y esta situación puede dar lugar a la aparición de fisuras en fachada si no se toman las debidas precauciones.

Además de los criterios de buen diseño, que aconsejan garantizar un correcto aislamiento y ventilación de la cubierta, así como la utilización de materiales de terminación de color claro, es imprescindible la incorporación de una junta de contorno, rellena de un material compresible, en todo el perímetro de cubiertas planas, para absorber los movimientos e impedir empujes sobre el peto.

Desde el punto de vista de la estabilidad, los petos son los elementos de fábrica que están en peores condiciones, porque no se pueden confinar ni sujetar en cabeza. Por ello, constituye una buena solución doblar el muro, en el tramo que queda sobre el último forjado, atando las dos hojas con armadura FISUFOR®. Una alternativa a esta solución es anclar la hoja exterior del peto con anclajes GEOANC® dispuestos en columnas, a una hoja interior estable.



7.5.7 Formación de huecos

La situación de los huecos debe estar bien estudiada en proyecto, para adaptar sus dimensiones y localización a la modulación de los ladrillos. Una correcta modulación requiere que la dimensión del entrepaño sea múltiplo del módulo menos una junta, y que la dimensión del hueco sea múltiplo del módulo más una junta.

Los huecos constituyen un debilitamiento del paño de fábrica aunque, desde el punto de vista de la resistencia, si los huecos son pequeños las carpinterías actúan de bastidores resistiendo, en general holgadamente, los esfuerzos de borde.

Sin embargo, la presencia de un hueco origina inevitablemente una acumulación de tensiones en las esquinas, que provoca una tendencia a la fisuración diagonal. Este proceso patológico es muy frecuente, aunque se puede evitar con facilidad simplemente cosiendo las esquinas con armadura. Es suficiente armar la última hilada bajo el antepecho, y la primera hilada sobre el dintel, para impedir el progreso de cualquier fisura iniciada en la esquina.

Lo fundamental, en esta situación, no es tanto la cuantía de armadura, sino una entrega generosa de la misma. Por ello, es importante observar los criterios de diseño indicados en el capítulo correspondiente, acerca de las distancias mínimas entre huecos y, sobre todo, las dimensiones mínimas de los machones de esquina. Como criterio de carácter general, la armadura se debe poder prolongar una distancia mínima de 50 cm a cada lado del borde del hueco.

7.5.8 Juntas de movimiento

Las juntas de movimiento suponen interrupciones de la continuidad del paño, provocadas artificialmente para evitar acumulaciones de tensión por diferentes causas.

En las juntas verticales se debe interrumpir tanto el aparejo como la armadura. Los extremos de cada tramo de muro, a ambos lados de la junta, funcionan como bordes libres, con posibilidad de movimiento en sentido perpendicular al plano de la fábrica, frente a acciones horizontales.

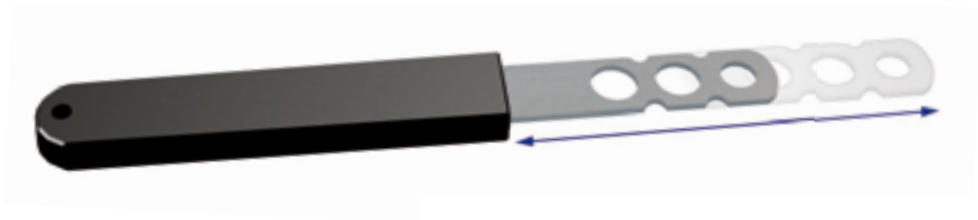
Si la junta se sitúa próxima a un soporte, existen dos posibles soluciones para evitar los movimientos indicados anteriormente:

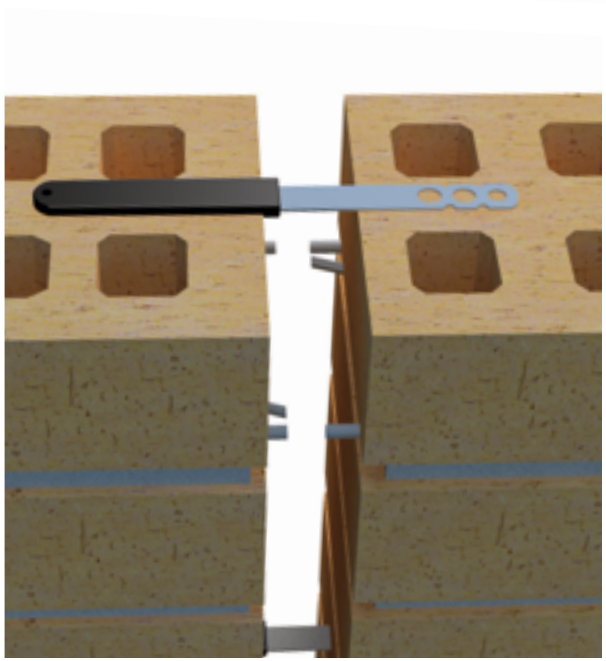
- Con anclajes GEOANC.P®: sujetando ambos lados de la junta con anclajes, uno a cada lado del soporte.

- Con anclajes GEOANC.CDM®: es suficiente sujetar un solo lado de la junta.

En ambos casos es fundamental colocar llaves de atado ANCONFIX.PPS® para evitar movimientos diferenciales perpendiculares a la junta.

No es recomendable utilizar llaves de atado en las juntas estructurales, que deben desconectar, a todos los efectos, cada parte del edificio que separan. En estos casos, debido a que usualmente se duplica el soporte, la estabilidad del cerramiento se consigue duplicando también los anclajes.





7.6 Normas de instalación de los elementos GEOANC®

Los elementos GEOANC® tienen una misión estructural asignada, por lo que son objeto de análisis y dimensionado. Por tanto, para un correcto funcionamiento del conjunto, y con objeto de poder obtener las prestaciones para las cuales han sido diseñados, es imprescindible, no sólo disponer las cuantías obtenidas del cálculo, sino respetar las disposiciones constructivas que aquí se indican, por estar íntimamente relacionadas con las condiciones de sustentación, que determinan el resultado del análisis.

7.6.1 Instalación de la armadura de tendel FISUFOR®

Con carácter general, para un correcto funcionamiento de la armadura FISUFOR® es fundamental que quede perfectamente recubierta de mortero para que trabaje solidariamente con la fábrica, y se respeten los recubrimientos para conseguir los niveles de protección adecuados a la clase de exposición correspondiente a la fábrica en la que se ubican.

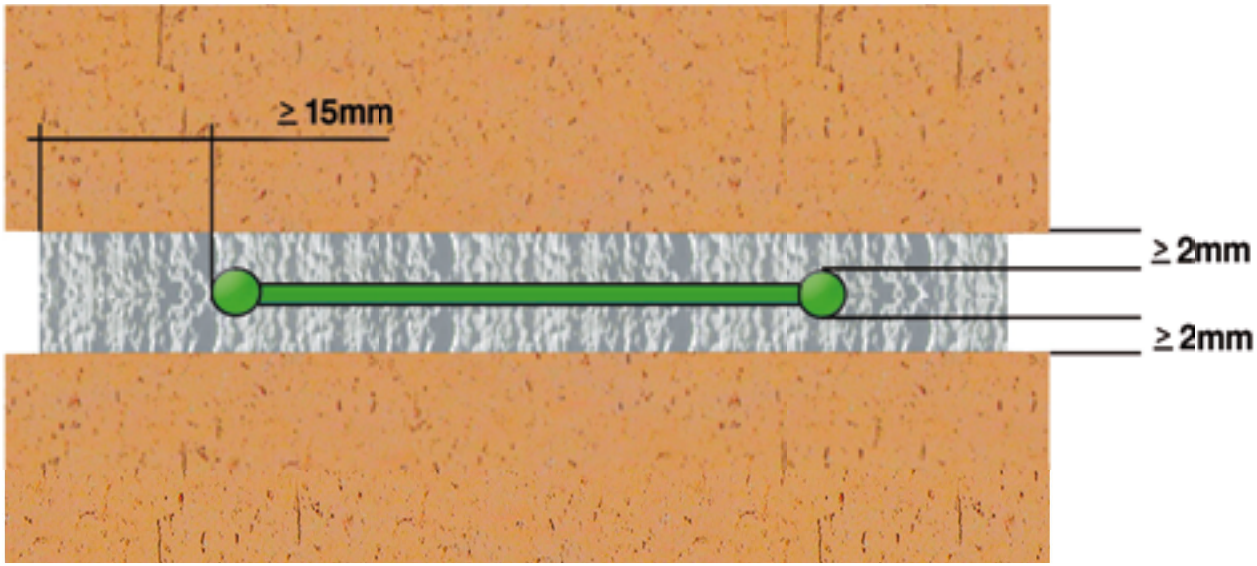
Colocación de la armadura

Antes de colocar las armaduras se debe examinar su superficie, comprobando que está libre de sustancias perjudiciales que puedan afectar al acero, al mortero o a la adherencia entre ellos.

Las armaduras se deben colocar en las hiladas previstas, sobre una capa de mortero previamente dispuesta en el tendel, situando el eje de la armadura en el eje de la fábrica, de forma que el grueso del recubrimiento de mortero se reparta proporcionalmente sobre toda la superficie del ladrillo.

La armadura de tendel debe quedar embebida en el mortero para conseguir el recubrimiento exigido por la especificación de proyecto. Cuando la especificación de proyecto no lo indique, el recubrimiento para fábricas armadas estructurales debe estar de acuerdo con el DB SE-F, artículo 3.3 *"Armaduras"*, en donde se establece, con carácter general, un recubrimiento mínimo de 15 mm respecto al borde exterior; y de 2 mm, respecto a los bordes superior e inferior, para armaduras de acero galvanizado o acero inoxidable austenítico.

Con la armadura correctamente presentada, se echa otra capa de mortero, de forma que los alambres queden totalmente embebidos. Debido a que los alambres longitudinales y el alambre diagonal están soldados en el mismo plano, se consigue una adherencia óptima de la armadura FISUFOR® cuando los tendeles de mortero tienen un espesor no inferior a 8 mm.



Anclaje y solapo de la armadura

El empalme de las armaduras FISUFOR® se debe hacer por solape, nunca por superposición, para garantizar un perfecto recubrimiento del mortero. La longitud mínima de solape es de 250 mm, tanto para las armaduras de acabado galvanizado como inoxidable. Es importante evitar que en el solape queden las armaduras montadas unas sobre otras.

Si, por necesidades constructivas, la longitud de solape tuviera que ser menor que la mínima exigida, se puede recurrir al doblado en patilla de los alambres longitudinales de la armadura.

Las armaduras se deben dejar en espera cuando se ejecuta el muro en dos fases, para poder incorporarlas en los tendeles en la segunda fase.

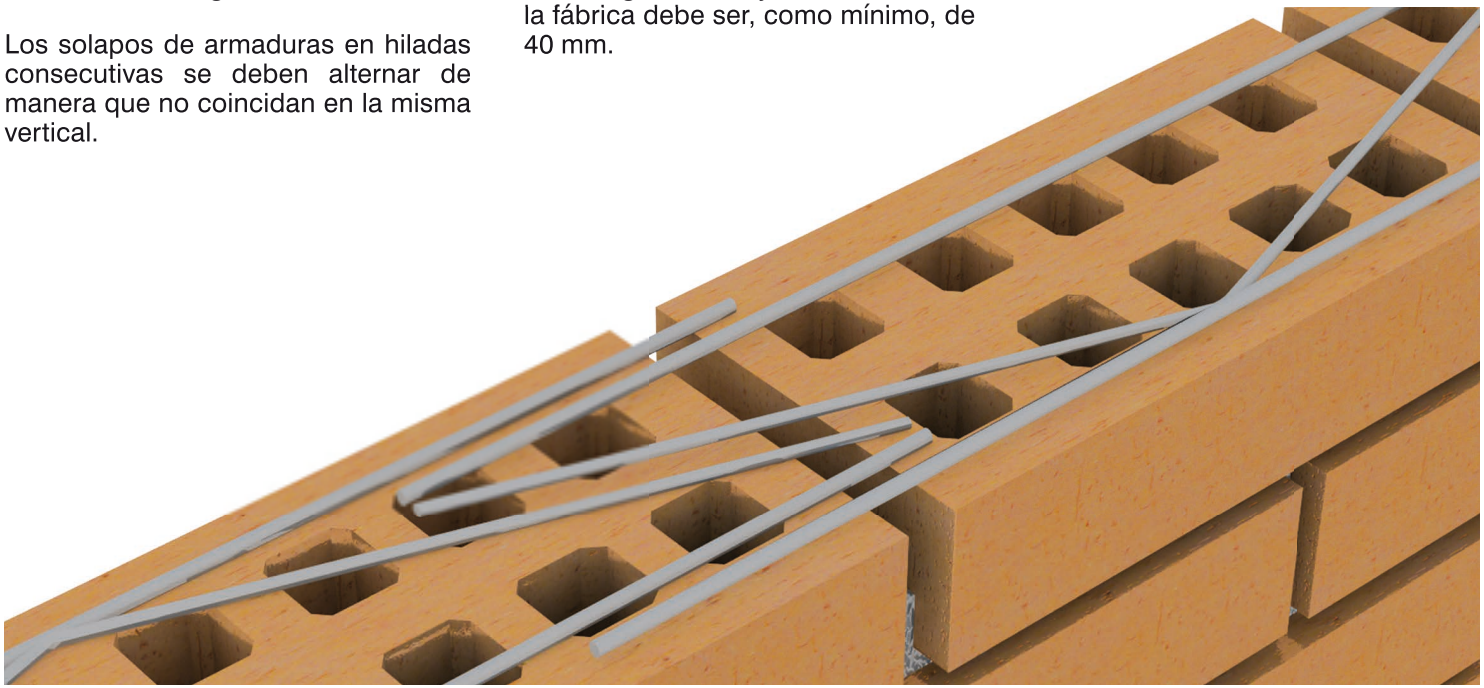
Los solapos de armaduras en hiladas consecutivas se deben alternar de manera que no coincidan en la misma vertical.

7.6.2 Instalación de los anclajes GEOANC®

Para un correcto funcionamiento de las prestaciones de los anclajes GEOANC®, y un buen rendimiento en obra, se recomienda observar las siguientes normas de instalación.

Instalación de los anclajes GEOANC.P®

- Se debe preparar el soporte forrándolo con algún producto que evite su contacto con mortero. Para este fin se puede utilizar la lámina ZETAFLOT®.
- El anclaje GEOANC.P® se coloca en los tendeles de la fábrica al mismo tiempo que se levanta ésta. Todo el proceso puede ser realizado por un único operario.
- La entrega del anclaje GEOANC.P® en la fábrica debe ser, como mínimo, de 40 mm.
- Al colocar el anclaje GEOANC.P® en el tendel de la fábrica, se debe tener especial cuidado en dejarlo pegado al soporte, debiendo actuar la lámina ZETAFLOT® como elemento separador entre ambos.
- Inmediatamente después de construir el muro, se fija mecánicamente el anclaje GEOANC.P® al soporte mediante tiros, tacos o soldadura. Estas fijaciones se deben situar a una distancia mínima de 60 mm respecto de los bordes del soporte.



Instalación de los anclajes GEOANC.CDM®

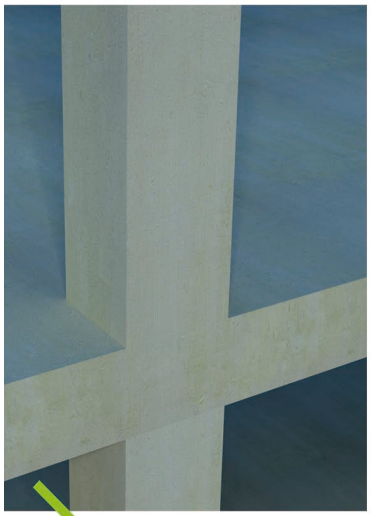
- Se debe preparar el soporte o el frente de forjado forrándolos con algún producto que evite su contacto con mortero. Para este fin se puede utilizar la lámina ZETAFLOT®.

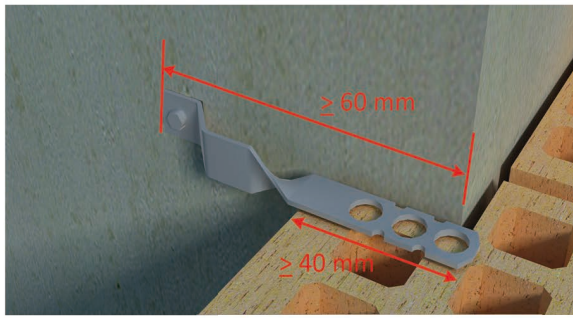
- El anclaje GEOANC.CDM® se instala con anterioridad al inicio de construcción de la fábrica, fijando la hembrilla al elemento estructural mediante tacos, tiros o soldadura.

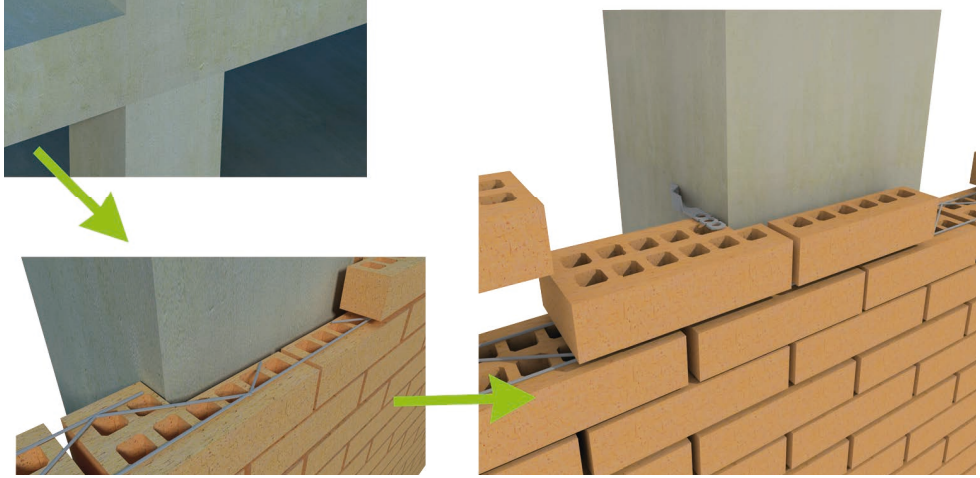
- La garra se deja en espera, introducida en la hembrilla, para asegurarse de que será colocada por el operario cuando llegue a la hilada correspondiente.

- La configuración simétrica del anclaje obliga a que siempre quede en una correcta posición, para que sea efectiva la posibilidad del movimiento que le caracteriza.

- Al colocar la garra del anclaje GEOANC.CDM® en el tendel de la fábrica, se debe procurar que quede perfectamente recubierta de mortero y se respeten los recubrimientos establecidos.







7.6.3 Puesta en obra de las llaves ANCONFIX PPS® para juntas de movimiento

Las juntas de movimiento constituyen un punto delicado en la construcción de fábricas por ser susceptibles a la penetración de humedad. Además pueden presentar al exterior una apariencia antiestética si no se cuida debidamente su ejecución.

Para su correcto funcionamiento, deben observarse las siguientes normas de ejecución:

- Los elementos que constituyen una junta de movimiento son: un relleno interior, un fondo de junta, un material de sellado y llaves de atado ANCONFIX.PPS®.

- Los materiales que se empleen para realizar la junta deben mantener la estanquidad del muro, pese a los movimientos de alargamiento y acortamiento. Además de impermeables, deben ser resistentes a los agentes atmosféricos.

- Si la junta se realiza en un elemento de compartimentación de sectores de incendio diferentes, los materiales empleados en su ejecución deben cumplir las exigencias del DB SI “Seguridad en caso de incendio”.

- Los materiales de relleno y sellado deben tener una deformabilidad suficiente. Se recomienda que no sea inferior al 20%.

- Las juntas de movimiento deben tener el ancho necesario para absorber los movimientos esperados en los paños que separa. Si se respetan las distancias entre juntas verticales recomendadas, es suficiente un ancho de junta comprendido entre 10 y 20 mm, en función de la compresibilidad del material de relleno.

- Antes de introducir el material elástico en la junta y proceder al sellado de la misma, se deben comprobar los siguientes aspectos:

    - La fábrica debe estar seca.

    - La superficie interior de la junta debe estar limpia y libre de mortero.

    - Las juntas de mortero de las hiladas horizontales deben estar perfectamente llenas, para evitar que el material sellante penetre en ellas.

    - El espesor de la junta debe ser constante.

- Ante la complicación que supone introducir el material elástico en las juntas de movimiento, es recomendable proceder de la siguiente manera:

    - Colocar el material elástico, que puede ser poliestireno expandido, de espesor igual al de la junta prevista, en posición vertical y ligeramente retranqueado de la cara exterior del muro para permitir el sellado posterior.

    - Comenzar a ejecutar la fábrica a ambos lados del material elástico, de modo que éste quede perfectamente introducido en la junta.

- Colocar las llaves de atado ANCONFIX.PPS® que traben ambos paramentos de manera que sólo se permita el movimiento horizontal del muro en su mismo plano. Para ello, se debe disponer la funda de plástico de la llave en el tendel de uno de los paños, debiendo quedar vista en la junta, para asegurar de esta forma la posibilidad de movimiento. La separación entre llaves no debe ser superior a 0,50 m.

- Sellar la junta, una vez concluida la ejecución de la fábrica. Para ello se puede utilizar silicona aplicada con pistola, sobre un cordón colocado por delante del material de relleno. Es recomendable que, antes de la aplicación del sellante, se protejan las piezas con algún tipo de cinta adhesiva, para que no se manchen.

- El acabado del sellado debe ser cóncavo y se debe aplicar a la totalidad de la profundidad especificada, evitando burbujas, y cuidando que quede perfectamente adherido a cada lado de la junta.

7.6.4 Instalación de la lámina de revestimiento ZETAFLOT®

Revestimiento de soportes con lámina ZETAFLOT®

- La lámina impermeabilizante ZETAFLOT® se coloca directamente sobre el soporte, que debe estar limpio de restos punzantes y con superficie lisa y seca. Se puede sujetar al mismo con cualquier sistema de fijación mecánica.

- Los rollos se deben solapar 100 mm, quedando unidos por cinta adhesiva.

- La armadura FISUFOR® se debe cajear para permitir el paso por delante del soporte. La entrega a cada lado del soporte debe ser de 0,75 m como mínimo.

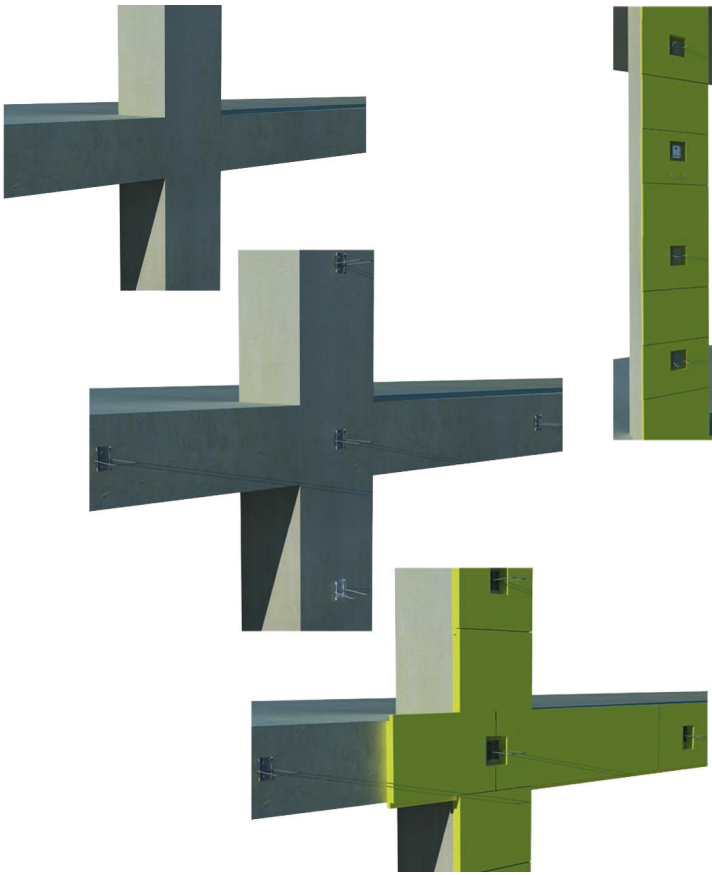
Revestimiento de frentes de forjado con lámina ZETAFLOT®

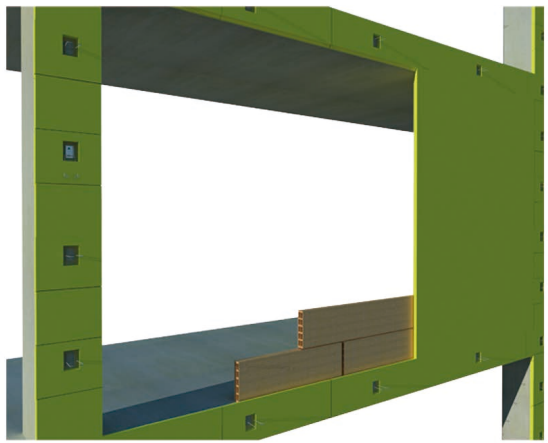
- La lámina impermeabilizante ZETAFLOT® se coloca directamente sobre el frente de forjado, que debe estar limpio de restos punzantes y con superficie lisa. Se puede sujetar al mismo con cualquier sistema de fijación mecánica.

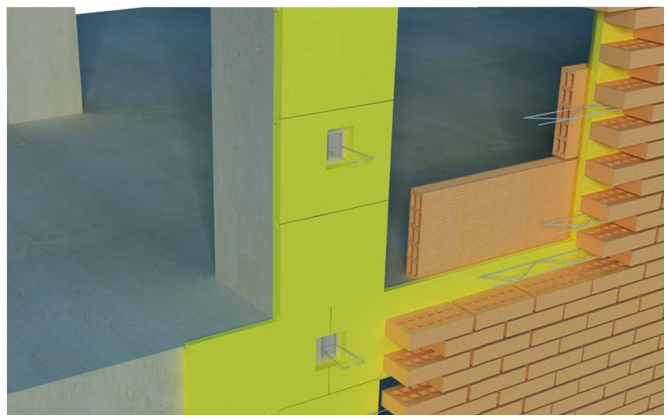
- Los rollos se deben solapar 100 mm, quedando unidos por cinta adhesiva.

- Posteriormente se fijan las hembrillas de los anclajes GEOANC.CDM® aproximadamente en la línea media del canto del forjado.

- Es recomendable, siempre que el ancho de plaquetas lo permita, incorporar una armadura FISUFOR® de 30 mm en las hiladas contiguas a la hilada con anclajes, para un adecuado reparto de esfuerzos.







8. Fachadas no convencionales. Fachadas G.H.A.S.®

8.1 Elementos del *Sistema G.H.A.S.®* 353

8.1.1 Armadura de tendel GEOFOR® de alta protección 353
8.1.2 Anclajes de doble movimiento GEOANC.CDM® 354
8.1.3 Llaves para juntas de movimiento ANCONFIX.PPS® 354
8.1.4 Apoyo ANCON ÓPTIMA® 354
8.1.5 Postes a viento WINDPOST® 355
8.1.6 Lámina impermeabilizante ZETAFLOT® 355

8.2 *Sistema G.H.A.S.®* para cerramientos de ladrillo 356

8.2.1 Cerramiento pasante o autoportante 356
Ejemplo 9 359
Ejemplo 10 362
8.2.2 Edificios en altura. Soluciones de apoyo 366
8.2.3 Huecos corridos horizontales 369
Ejemplo 11 371
Ejemplo 12 375
8.2.4 Fachada ventilada 381

8.3 Proceso constructivo del *Sistema G.H.A.S.®* 384

8.3.1 Formación de huecos 385
8.3.2 Remate de los petos de azotea 385

8. Fachadas no convencionales. Fachadas G.H.A.S.®

Los cerramientos concebidos con los sistemas convencionales tienen limitado su campo de aplicación debido a la propia naturaleza que condiciona su comportamiento mecánico. La dificultad de resistir esfuerzos de flexión o tracción y el carácter frágil de su comportamiento en rotura, son factores que limitan sustancialmente no sólo la posibilidad de su aplicación en situaciones no habituales, sino el rango de sus dimensiones en situaciones cotidianas.

El *Sistema G.H.A.S.®* (*Geohidrol Advanced System*) ofrece soluciones que posibilitan la utilización de elementos de fábrica con dimensiones o en situaciones que sobrepasan el rango de lo que se considera convencional. Evoluciona día a día incorporando nuevos elementos, de diseño exclusivo, con el fin de ofrecer a los proyectistas, constructores y promotores soluciones adaptadas a cada situación, avaladas por el análisis estructural, y con total garantía de ausencia de fisuración y humedades.

8.1 Elementos del *Sistema G.H.A.S.®*

El *Sistema G.H.A.S.®* utiliza componentes auxiliares similares a los descritos para las soluciones convencionales aunque algunos de ellos, como las armaduras, con prestaciones especiales relacionadas con la resistencia a la corrosión. Existen, además, otros elementos disponibles, que pueden ser utilizados o no, según la situación particular de la fachada en el contexto del proyecto.

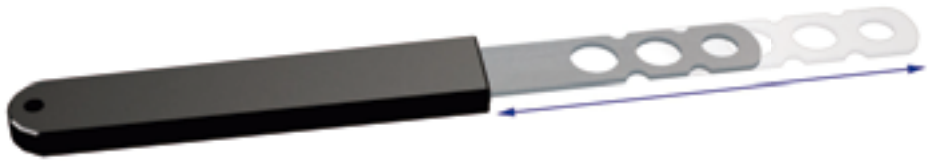
8.1.1 Armadura de tendel GEOFOR® de alta protección

El *Sistema G.H.A.S.®* sirve para todo tipo de fábricas, independientemente de la región en la que se construyan y del grado de exposición al que vayan a estar sometidas. Por esta razón, la armadura de tendel específica para ellas debe tener un acabado de alta protección frente a la corrosión.

La armadura de tendel GEOFOR® tiene un acabado equivalente al *galvanizado fuerte*, para poder ser utilizada en cualquier fábrica sin revestir, situada en cualquier punto del territorio nacional, excepto en edificios situados a menos de 5 kilómetros de la costa, en los que se debe prescribir armadura inoxidable.

El incremento de coste que supone un acabado de alta protección se contrarresta en buena parte con el incremento de las prestaciones mecánicas. La armadura de tendel GEOFOR® está fabricada con acero tipo y clase B 600 S. Ello supone un valor de resistencia mecánica superior en un 20% al correspondiente a la armadura FISUFOR®, lo que se traduce en una menor cuantía de armadura requerida por resistencia, o bien en una mayor distancia viable entre elementos de sustentación vertical.

En la inmensa mayoría de los casos habituales de luces entre soportes, con armadura GEOFOR® se puede prescindir de postes a viento intercalados, lo que supone un ahorro significativo en el coste de la solución.



8.1.2 Anclajes de doble movimiento GEOANC.CDM®

El *Sistema G.H.A.S.*® tiene, como prestación fundamental, la prevención de cualquier riesgo de fisuración. El principal origen de los procesos patológicos que desencadenan la aparición de fisuras es la incompatibilidad de movimientos entre la estructura portante del edificio y el elemento de fábrica.

Por ello, el tipo de anclajes utilizado para la sujeción de la fábrica a la estructura no puede ser rígido, sino que debe transmitir esfuerzos con carácter selectivo, y debe posibilitar determinados movimientos diferenciales entre el muro y el elemento estructural en el que se sustenta, evitando sólo aquellos movimientos para los que se dispone.

El anclaje específico utilizado en el *Sistema G.H.A.S.*® es el anclaje de doble movimiento GEOANC.CDM® que sólo se comercializa en acero inoxidable. Con ello se garantiza, por una parte, la ausencia de fisuración debida a coacciones al libre movimiento, tanto vertical como horizontal, de la fábrica en su propio plano y, por otra parte, cualquier riesgo de procesos patológicos por corrosión.

Es importante destacar que los anclajes son elementos que no pueden ser objeto de mantenimiento y reposición periódica, por lo que no es posible adoptar medidas ante un inicio de corrosión. En la mayoría de los casos del *Sistema G.H.A.S.*® los anclajes quedan expuestos al ambiente exterior, por lo que es imprescindible que sean de acero inoxidable.

8.1.3 Llaves para juntas de movimiento ANCONFIX.PPS®

En el *Sistema G.H.A.S.*® todos los movimientos y esfuerzos en la fábrica están controlados. Las llaves de atado en las juntas de movimiento son fundamentales para ello.

Este componente es idéntico al descrito en las Soluciones GEOANC® para fábricas convencionales.

8.1.4 Apoyo ANCON ÓPTIMA®

Constituye un dispositivo auxiliar para transmitir el peso del cerramiento a la estructura del edificio.

Se compone de dos elementos: el aparato de apoyo propiamente dicho, y un perfil corrido que sirve para sustentar la primera hilada mientras se ejecuta la fábrica.

El perfil corrido sólo tiene una función constructiva, que es la de servir de base para la colocación de la primera hilada. Una vez ejecutada la fábrica y finalizado el proceso de fraguado el mortero, el paño se comporta como una viga de gran canto sustentada puntualmente en los aparatos de apoyo.

El diseño exclusivo del Apoyo ANCON ÓPTIMA® permite ajustar el replanteo de la fachada en las tres direcciones del espacio, para poder adaptar el paño a la posición relativa de los forjados.

Existen disponibles en el mercado diferentes anchos de los aparatos de apoyo, para acomodar el paño de fábrica a cualquier espesor previsto de la cámara comprendido entre 6 cm y 10 cm.

Los aparatos de apoyo se utilizan en las fachadas autoportantes de edificios en altura, para interrumpir la carga del cerramiento cuando lo exige el análisis. Para valores habituales de la acción horizontal esta circunstancia sólo se produce en edificios de más de diez plantas.

8.1.5 Postes a viento WINDPOST®

Su función específica es la retención del cerramiento frente a la acción de viento. Son elementos prefabricados, de acero inoxidable, que se colocan intercalados entre los soportes estructurales existentes en el plano de fachada.

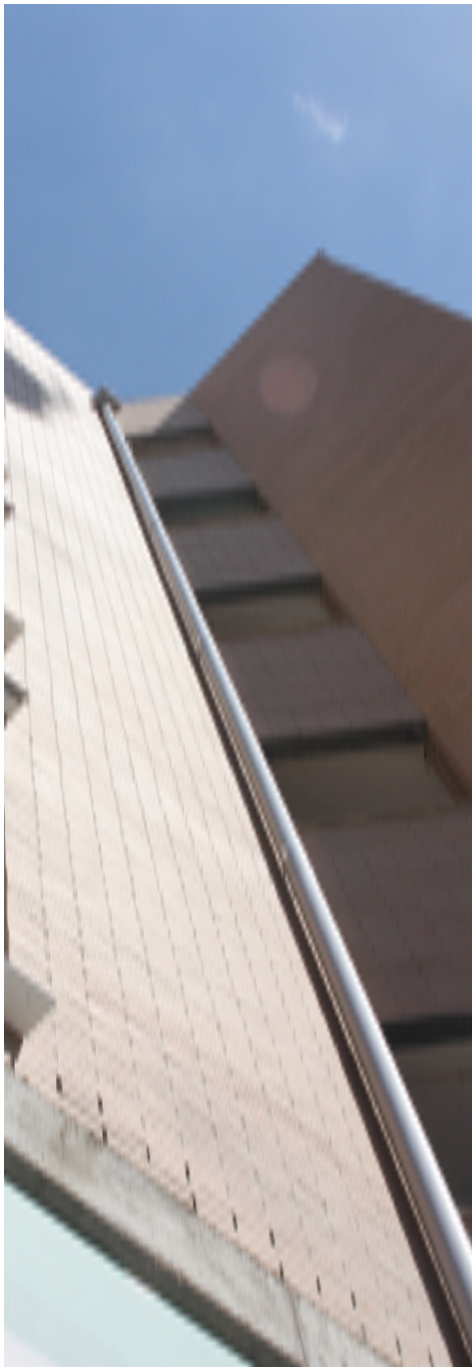
Se conectan a los forjados mediante fijaciones especialmente diseñadas para transmitir las reacciones correspondientes. Su sección es la adecuada para resistir esfuerzos de flexión.

Se utilizan como solución alternativa a la disposición de perfiles estándar de acero protegido, cuando no existen soportes en el plano de fachada o cuando la luz entre ellos es excesiva según el análisis estructural del cerramiento.

8.1.6 Lámina impermeabilizante ZETAFLOT®

Es una membrana impermeable que se coloca en los frentes de forjados y forrando los soportes para desconectar estos elementos de la fachada y evitar la entrada de humedad en el edificio a través de los puntos de contacto con el cerramiento.

Este componente es idéntico al descrito en las Soluciones GEOANC® para fábricas convencionales.



8.2 *Sistema G.H.A.S.*® para cerramientos de ladrillo

El *Sistema G.H.A.S.*® para cerramientos de ladrillo resuelve los tipos que, por sus prestaciones, por su forma de sustentación, o por sus dimensiones, sobrepasan el ámbito de aplicación de los sistemas convencionales.

El *Sistema G.H.A.S.*® garantiza tres requisitos fundamentales en los cerramientos:

- Estabilidad: frente a acciones gravitatorias y horizontales. Dispone, para ello, de los dispositivos adecuados para transmitir las acciones exteriores que inciden en el cerramiento a los elementos estructurales del edificio (forjados y soportes). Debido al diseño específico de los elementos de conexión, las reacciones que se transmiten son selectivas, y las coacciones a los movimientos están controladas.

- Resistencia: frente a los esfuerzos generados en el cerramiento por la transmisión de las acciones, fundamentalmente horizontales, a la estructura del edificio. Casi siempre se trata de esfuerzos de flexión horizontal, que se resisten con armadura de tendel, por lo que se pueden garantizar las condiciones de resistencia mediante el análisis y dimensionado.

- Funcionalidad: garantizando las condiciones de servicio relativas al control de fisuración y control higrotérmico.

8.2.1 Cerramiento pasante o autoportante

La solución constructiva de este tipo de cerramiento consiste en separar la hoja exterior del mismo de la estructura del edificio para permitir el paso de una cámara continua con aislamiento.

Con esta solución se elimina el conflicto constructivo que supone el encuentro con los forjados y se mejora la eficiencia energética del cerramiento puesto que se pueden eliminar los puentes térmicos de los pasos por soportes y forjados.

El aislamiento térmico se puede alojar en la cámara continua, o se puede colocar junto a la hoja interior del cerramiento; en este caso no se precisa la continuidad de la cámara, y la hoja exterior del cerramiento puede estar tangente a la estructura del edificio.

A su vez, la cámara, tanto si es continua como si queda interrumpida entre los forjados, puede estar ventilada o no. El primer caso corresponde a la solución de *"fachada ventilada"* con materiales tradicionales, que se describirá más adelante.

Aunque el tipo de cerramiento autoportante se incluye dentro de las soluciones avanzadas, lo cierto es que el comportamiento mecánico que le corresponde no difiere demasiado de las soluciones pretendidamente convencionales.

Incluso cuando se utilizan soluciones convencionales de cerramientos confinados entre forjados, la fábrica debe resistir en planta baja el efecto de una posible acumulación de carga; lo cual se produce siempre que los zunchos

son demasiado flexibles y el cerramiento arranca de una solera, viga de cimentación, cabeza de muro de sótano o cualquier elemento muy rígido.

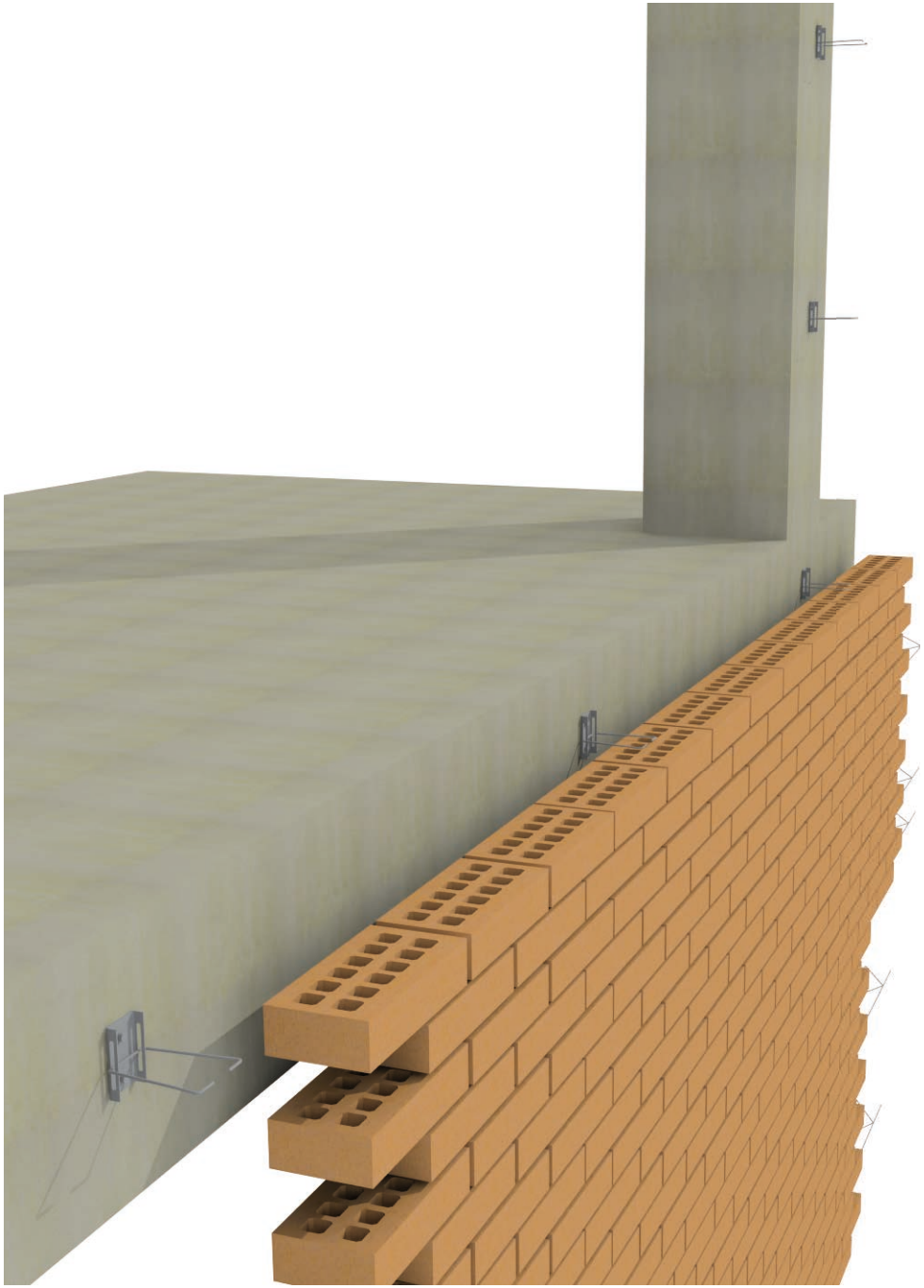
El requisito fundamental del cerramiento pasante es evitar el movimiento de vuelco, que se resuelve con anclajes de retención. Los anclajes constituyen un elemento imprescindible para garantizar la estabilidad, puesto que deben suministrar la totalidad de la reacción correspondiente a las acciones horizontales. Se pueden fijar a los frentes de forjados, a los frentes de soportes o a un muro perimetral exterior.

La resistencia de una fábrica de ladrillo de ½ pie de espesor, frente a la acción gravitatoria debida al propio peso, incluso incorporando la penalización por pandeo, es suficiente para una altura de más de ocho plantas, con alturas de piso del orden de 3,00 m, siempre que se dispongan anclajes al nivel de los forjados, y se evite el efecto de trasvase de carga de la estructura al cerramiento por diferencia de rigidez.

Para evitar el trasvase de carga es imprescindible que los anclajes a la estructura tengan libertad de movimiento en dirección vertical, por lo que se prescribe el uso de anclajes tipo GEOANC.CDM®.

Método de análisis

Cuando se proyectan soluciones de cerramiento autoportante o, en los casos de cerramiento convencional, si existe riesgo de acumulación de carga, además de dimensionar cada paño para resistir la acción horizontal de viento correspondiente a su planta, es preciso realizar una comprobación adicional



de las condiciones de seguridad frente al efecto de la acción gravitatoria.

El estado de solicitación de cada planta evoluciona, desde la flexión simple en plantas altas (con tensiones de compresión despreciables y, en cualquier caso, favorables), hasta la compresión compuesta, cuya sección más solicitada es la correspondiente al arranque.

El objeto de comprobación de la seguridad frente a la acción de viento es el paño de última planta, con tensión normal de compresión despreciable. El procedimiento se ha indicado en el capítulo de sistemas convencionales.

El objeto de la comprobación adicional de las condiciones resistentes frente a la acción gravitatoria es el paño de la planta de arranque. Las plantas intermedias, si sus características geométricas son similares a las de la última planta no requieren una verificación específica, puesto que puede suponerse válido su comportamiento por tratarse de una situación intermedia entre otras dos verificadas.

La sección de arranque es la más solicitada en un análisis a compresión en primer orden, puesto que debe resistir la totalidad del peso que gravita sobre ella con la máxima excentricidad provocada por la acción de viento considerando el paño como *empotrado* en la base.

Es frecuente encontrar indicaciones acerca de la consideración del grado de empotramiento del paño en los extremos en algunos manuales. Algunos de ellos insisten en suponer el borde extremo inferior *"apoyado"*, lo que implica considerar momento nulo (es decir, libertad total de giro) en la sección el arranque. No hay nada más contrario a la realidad. Si el arranque se produce en un elemento muy rígido, lo que realmente tiene valor nulo es el giro; por consiguiente, en muros con carga vertical, que descansan sobre un apoyo firme, las condiciones de sustentación que se deben considerar en la base son las correspondientes a *"empotramiento perfecto"*. Para que no quede duda acerca de este matiz, el DB SE-F, en el artículo 5.2 *"Muros sometidos predominantemente a carga vertical"*, apartado 5.2.1 *"Análisis de solicitaciones"* lo indica de forma explícita. El párrafo 7 dice textualmente: *"A efectos de cálculo, el arranque inferior del muro en la solera, forjado sanitario o zanja, puede considerarse como empotramiento perfecto"*.

Para la comprobación de los efectos de segundo orden (comprobación a *pandeo*) la sección más solicitada es la sección central de la planta inferior. Esta sección tiene algo menos de carga que la sección de arranque, pero en cambio le corresponde la máxima excentricidad adicional por efecto del pandeo; y una vez más es la esbeltez del tramo el parámetro que determina la validez de las condiciones resistentes.

El método de comprobación es análogo al que se utiliza para los muros de carga. Consiste en calcular la máxima solicitación a esfuerzo normal en la sección central de planta baja, y compararla con la capacidad resistente de la fábrica a compresión, reducida por los efectos de la excentricidad y el pandeo. El procedimiento está detallado pormenorizadamente en el DB SE-F, artículo 5.2.2 *"Capacidad portante"*.

A continuación se detalla el proceso operativo, utilizando como pretexto un cerramiento autoportante de ½ de espesor, de diez plantas de altura con anclajes a los frentes de forjado. Se desarrollan dos ejemplos; en el primero se supone que no existen soportes en el plano de fachada, por lo que el modelo de análisis es el correspondiente a *viga vertical* solicitada a compresión compuesta. En el segundo ejemplo se supone el cerramiento anclado en continuidad, tanto a forjados como a soportes de fachada con una luz de cinco metros; en este segundo caso el modelo de análisis es el correspondiente a *placa* con flexión bidireccional combinada con compresión vertical.

EJEMPLO 9

Cerramiento autoportante anclado a frentes de forjado
Análisis en primer y segundo orden. Altura 10 plantas

Características geométricas:

- Cerramiento de ladrillo autoportante anclado a frentes de forjado
- Altura libre de planta: $h = 2{,}70$ m
- Altura desde el arranque a fila de anclajes: $h_i = 2{,}85$ m
- Número de plantas sobre el arranque: 10 plantas
- Altura total (con cantos de forjado de 30 cm): $h_{total} = 30{,}00$ m
- Altura desde la sección central de planta baja: $h_{cri} = 28{,}50$ m
- Espesor del muro (½ pie formato castellano): $t = 115$ mm

Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4$ N/mm² (1)
- Valor característico de la acción de viento: $q_e = 0{,}8$ kN/m²
- Coeficiente de seguridad de la fábrica: $\gamma_M = 2{,}5$
- Coeficiente de seguridad de acciones: $\gamma_Q = 1{,}50$ (variables desfavorables)
  $\gamma_G = 1{,}35$ (permanentes desfavorables)
- Peso específico de la fábrica: $\rho = 18$ kN/m³ (2)

Análisis:

Comprobación de la sección de arranque (en primer orden):

- Esfuerzo normal debido a peso propio: $N_{Sd} = \rho \cdot t \cdot h_{total} \cdot \gamma_G$ = 83,84 kN / metro
- Momento flector debido a la presión de viento: $M_{Sd} = q_e \cdot \gamma_Q \cdot h_i^2 / 12$ = 0,812 m·kN / metro

(Se supone que en el arranque hay empotramiento perfecto según DB SE-F, artículo 5.2.1, párrafo 7)

- Excentricidad en la sección de arranque: $e_0 = M_{Sd} / N_{Sd}$ = 9,69 mm
- Altura de cálculo del paño: $h_d = 0{,}75 \cdot h_i$ (según DB SE-F, 5.2.4) = 2,14 m
- Incremento de excentricidad por ejecución: $e_a = h_d / 450$ (según DB SE-F, 5.2.3) = 4,75 mm
- Excentricidad total: $e_{total} = e_0 + e_a$ (no menor de $0{,}05 \cdot t_d$) = 14,44 mm
- Factor de reducción por excentricidad: $\Phi = (1 - 2 \cdot e_{total} / t)$ (según DB SE-F, 5.2.3) = 0,749
- Capacidad resistente de la sección: $N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot f_k / \gamma_M$ (según DB SE-F, 5.2.2) = 137,8 kN / metro
- Comprobación de la capacidad portante: $N_{Sd} \leq N_{Rd}$ (según DB SE-F, 5.2.2)

$$N_{Sd} = \rho \cdot t \cdot h_{total} \cdot \gamma_G = 83{,}84 \text{ kN / metro} < N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot f_k / \gamma_M = 137{,}8 \text{ kN / metro. VALE}$$

1 Obtenida en el ejemplo 1.

2 Se utilizan los mismos valores del ejemplo 7, excepto el coeficiente de seguridad de la acción gravitatoria. En este caso, como la comprobación es a compresión y pandeo, la acción gravitatoria se considera desfavorable.

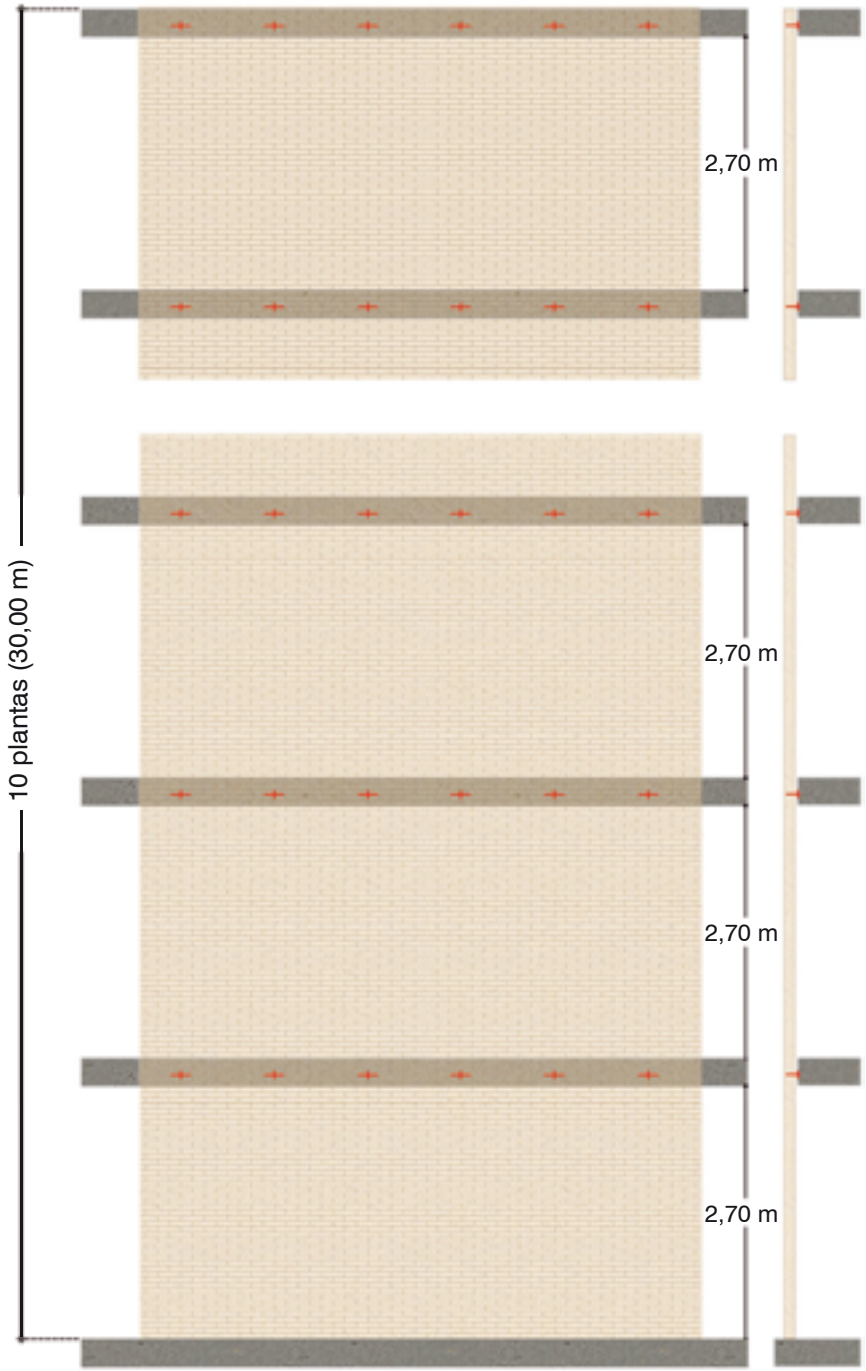
Comprobación de la sección central de planta baja (en segundo orden):

- Esfuerzo normal debido a peso propio: $N_{Sd} = \rho \cdot t \cdot h_{cri} \cdot \gamma_G$ = 79,64 kN / metro
- Momento flector debido a la presión de viento: $M_{Sd} = q_e \cdot \gamma_Q \cdot h_i^2 / 24$ = 0,406 m·kN/metro

(Máximo momento de vano de pieza empotrada en continuidad)

- Excentricidad en la sección central: $e_m = M_{Sd} / N_{Sd}$ = 5,10 mm
- Incremento de excentricidad por ejecución: $e_a = h_d / 450$ (según DB SE-F, 5.2.3) = 4,75 mm
- Incremento de excentricidad por pandeo: $e_p = 0{,}00035 \cdot t \cdot (h_d / t)^2$ (según DB SE-F, 5.2.3) = 13,9 mm
- Excentricidad total: $e_{total} = e_m + e_a + e_p$ = 23,75 mm
- Factor de reducción por excentricidad y esbeltez: $\Phi_m = (1 - 2 \cdot e_{total} / t)$ (según DB SE-F, 5.2.3) = 0,587
- Capacidad resistente de la sección: $N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot f_k / \gamma_M$ (según DB SE-F, 5.2.2) = 108,0 kN / metro
- Comprobación de la capacidad portante: $N_{Sd} \leq N_{Rd}$ (según DB SE-F, 5.2.2)

$N_{Sd} = \rho \cdot t \cdot h_{cri} \cdot \gamma_G$ = 79,64 kN / metro < $N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot f_k / \gamma_M$ = 108,0 kN / metro. VALE



En el ejemplo anterior se cumplen las condiciones de seguridad, tanto en primer como en segundo orden, con margen suficiente. La variable fundamental que condiciona la validez de la solución es la esbeltez de cada planta. Con altura libre de 2,70 m, en planta baja la esbeltez es de 18,6. Si la planta baja tuviera una altura libre igual o superior a 4,00 m, la esbeltez superaría el valor límite permitido (27), por lo que habría que recurrir a elementos de rigidización transversal que, en ese caso, serían imprescindibles para reducir la altura de pandeo del muro.

En el siguiente ejemplo se supone que la altura libre de planta baja es de 5,00 m y la rigidización transversal necesaria se consigue con anclajes GEOANC.CDM® a los soportes de fachada o a perfiles verticales auxiliares. Se mantiene la altura total de diez plantas.

EJEMPLO 10

Cerramiento autoportante anclado a soportes y frentes de forjado
Análisis en primer y segundo orden. Altura 10 plantas.
Luz entre soportes 5,00 m

Características geométricas:

- Paño sustentado en cuatro bordes con laterales en continuidad (DB SE-F tabla G.3)
- Luz entre soportes: $L = 5{,}00$ m
- Altura libre de planta tipo: $h = 2{,}70$ m
- Altura libre de planta baja: $h_0 = 5{,}00$ m
- Altura desde el arranque a fila de anclajes: $h_i = 5{,}15$ m
- Número de plantas sobre el arranque: 10 plantas
- Altura total (con cantos de forjado de 30 cm): $h_{total} = 32{,}30$ m
- Altura desde la sección central de planta baja: $h_{cri} = 29{,}65$ m
- Espesor del muro (½ pie formato castellano): $t = 115$ mm

Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4$ N/mm² (3)
- Resistencia a flexión paralela los tendeles: $f_{xk1} = 0{,}10$ N/mm²
- Resistencia a flexión perpendicular a los tendeles: $f_{xk2} = 0{,}40$ N/mm² (4)
- Módulo resistente por unidad de longitud /altura: $Z_1 = Z_2 = t^2 / 6 = 2204$ mm²·m / metro
- Valor característico de la acción de viento: $q_e = 0{,}8$ kN/m²
- Coeficiente de seguridad de la fábrica: $\gamma_M = 2{,}5$
- Coeficiente de seguridad de acciones: $\gamma_Q = 1{,}50$ (variables desfavorables)
  $\gamma_G = 0{,}8$ (permanentes favorables)
  $\gamma_G = 1{,}35$ (permanentes desfavorables) (5)
- Peso específico de la fábrica: $\rho = 18$ kN/m³

3 Obtenida en el ejemplo 1.

4 Valores obtenidos de la tabla 4.6 *"Resistencia a flexión de la fábrica"* del DB SE-F.

5 Según DB SE tabla 4.1 *"Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones"*. La carga gravitatoria se considera favorable en el análisis a flexión y desfavorable en el análisis a compresión y pandeo.

Análisis a flexión:

- Tensión normal debida a peso propio (a media altura): $\sigma_d = \rho \cdot \gamma_G \cdot h_{cri}$ (con $\gamma_G = 0{,}8$) $= 0{,}427$ N/mm²
- Capacidad resistente a flexión vertical: $M_{Rd1} = Z_1 \cdot (f_{xk1} / \gamma_M + \sigma_d)$ $= 1{,}029$ m·kN/metro
- Capacidad resistente a flexión horizontal: $M_{Rd,2} = Z_2 \cdot f_{xk2} / \gamma_M$ $= 0{,}353$ m·kN/metro
- Razón entre resistencias: $\mu = M_{Rd1} / M_{Rd2}$ $= 2{,}92$
- Razón entre dimensiones: h_i / L $= 1{,}03$
- Coeficiente de flexión (extrapolando en DB SE-F tabla G.3): α $= 0{,}0116$
- Valor de cálculo del momento flector vertical:

$$M_{Sd1} = \mu \cdot \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 = 2{,}92 \cdot 0{,}0116 \cdot 0{,}8 \text{ kN/m}^2 \cdot 1{,}50 \cdot (5{,}00 \text{ m})^2 = 1{,}011 \text{ m·kN / metro de longitud}$$

- Valor de cálculo del momento flector horizontal:

$$M_{Sd2} = \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 = 0{,}0116 \cdot 0{,}8 \text{ kN/m}^2 \cdot 1{,}50 \cdot (5{,}00 \text{ m})^2 = 0{,}347 \text{ m·kN / metro de altura}$$

- Comprobación de resistencia:

$M_{Sd1} = 1{,}011$ m·kN / metro $< M_{Rd1} = 1{,}029$ m·kN / metro. VALE

$M_{Sd2} = 0{,}347$ m·kN / metro $< M_{Rd2} = 0{,}353$ m·kN / metro. VALE

Análisis a compresión:

Comprobación de la sección de arranque (en primer orden):

- Esfuerzo normal debido a peso propio: $N_{Sd} = \rho \cdot t \cdot h_{total} \cdot \gamma_G$ (con $\gamma_G = 1{,}35$) $= 90{,}26$ kN/metro
- Momento flector debido a la presión de viento: $M_{Sd1} =$ $= 1{,}011$ m·kN/metro

  (Valor obtenido en el análisis a flexión)

- Excentricidad en la sección de arranque: $e_0 = M_{Sd1} / N_{Sd}$ $= 11{,}2$ mm
- Altura de cálculo del paño (según DB SE-F, Anejo E): $h_d = 0{,}75 \cdot h_i / [1 + (0{,}75 \cdot h_i / L)^2]$ $= 2{,}42$ m
- Incremento de excentricidad por ejecución: $e_a = h_d / 450$ (según DB SE-F, 5.2.3) $= 5{,}38$ mm
- Excentricidad total: $e_{total} = e_0 + e_a$ (no menor de $0{,}05 \cdot t_d$) $= 16{,}58$ mm
- Factor de reducción por excentricidad: $\Phi = (1 - 2 \cdot e_{total} / t)$ (según DB SE-F, 5.2.3) $= 0{,}712$
- Capacidad resistente de la sección: $N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot f_k / \gamma_M$ (según DB SE-F, 5.2.2) $= 131{,}0$ kN/metro
- Comprobación de la capacidad portante: $N_{Sd} \leq N_{Rd}$ (según DB SE-F, 5.2.2)

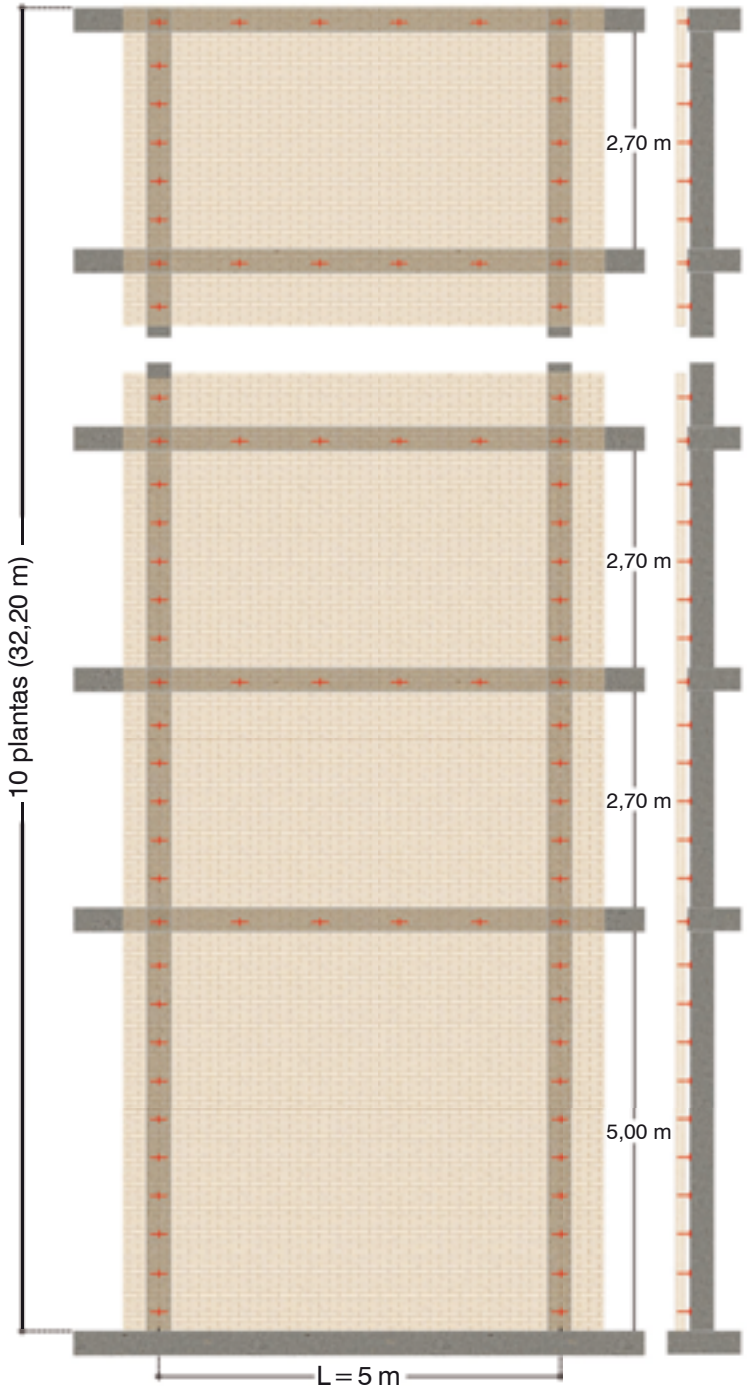
$N_{Sd} = \rho \cdot t \cdot h_{total} \cdot \gamma_G = 90{,}26$ kN / metro $< N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot f_k / \gamma_M = 131{,}0$ kN / metro. VALE

Comprobación de la sección central de planta baja (en segundo orden):

- Esfuerzo normal debido a peso propio: $N_{Sd} = \rho \cdot t \cdot h_{cri} \cdot \gamma_G$ (con $\gamma_G = 1{,}35$) $= 82{,}86$ kN/metro
- Momento flector debido a la presión de viento: $M_{Sd1} =$ $= 1{,}011$ m·kN/metro
  (Valor obtenido en el análisis a flexión)
- Excentricidad en la sección central: $e_m = M_{Sd} / N_{Sd}$ $= 12{,}2$ mm
- Incremento de excentricidad por ejecución: $e_a = h_d / 450$ (según DB SE-F, 5.2.3) $= 5{,}38$ mm
- Incremento de excentricidad por pandeo: $e_p = 0{,}00035 \cdot t \cdot (h_d / t)^2$ (según DB SE-F, 5.2.3) $= 17{,}8$ mm
- Excentricidad total: $e_{total} = e_m + e_a + e_p$ $= 35{,}38$ mm
- Factor de reducción por excentricidad y esbeltez: $\Phi_m = (1 - 2 \cdot e_{total} / t)$ (según DB SE-F, 5.2.3) $= 0{,}385$
- Capacidad resistente de la sección: $N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot f_k / \gamma_M$ (según DB SE-F, 5.2.2) $= 70{,}78$ kN/metro
- Comprobación de la capacidad portante: $N_{Sd} \leq N_{Rd}$ (según DB SE-F, 5.2.2)

$$N_{Sd} = \rho \cdot t \cdot h_{cri} \cdot \gamma_G = 82{,}86 \text{ kN/metro} > N_{Rd} = \Phi \cdot t \cdot f_k / \gamma_M = 70{,}78 \text{ kN/metro. NO VALE}$$

- Capacidad resistente con $f_k = 5$ N/mm^2: $N_{Rd} = 0{,}385 \cdot 115 \text{ mm} \cdot 5 \text{ N/mm}^2 / 2{,}50$ $= 88{,}48$ kN/metro
- Comprobación de la capacidad portante: $N_{Sd} = 82{,}86 \text{ kN/metro} < N_{Rd} = 88{,}48 \text{ kN/metro. VALE}$



En el último ejemplo la comprobación a resistencia es conforme para un valor de resistencia a compresión f_k igual o superior a 5 N/mm^2 que, según el DB SE-F, tabla 4.4 *"Resistencia característica a la compresión de fábricas usuales"* se puede obtener utilizando piezas de resistencia normalizada a compresión $f_b = 15$ N/mm^2 y mortero M7,5.

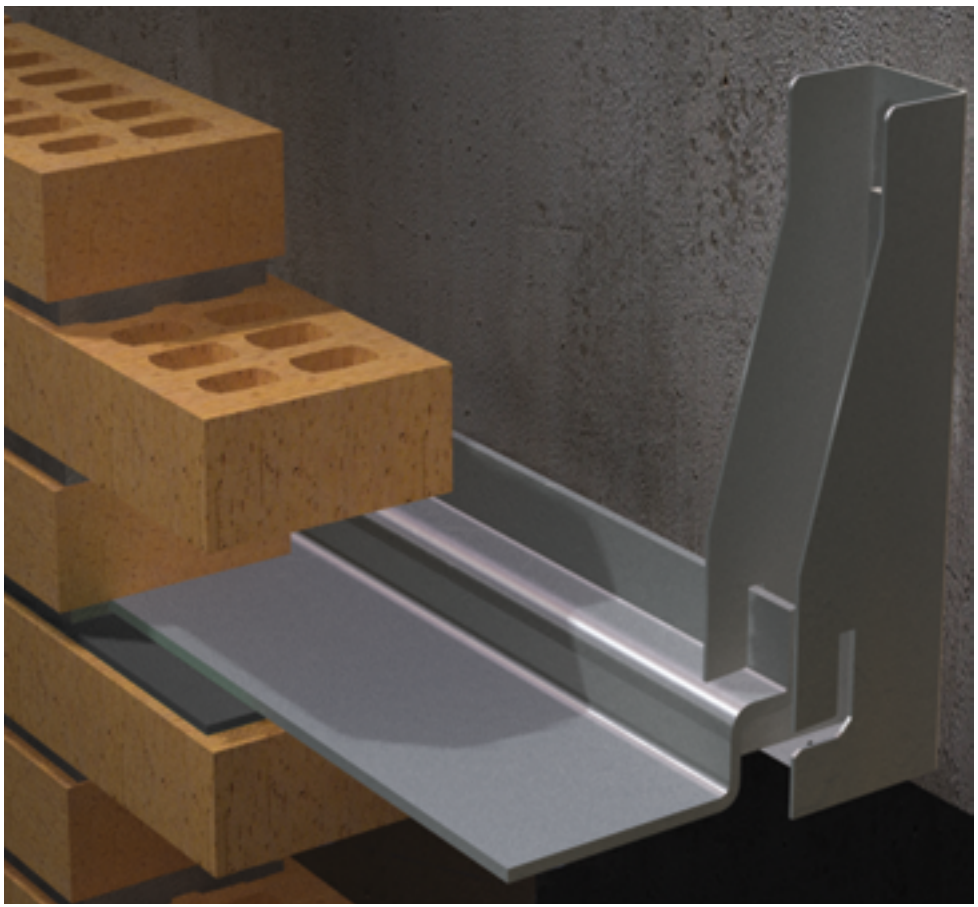
Para los valores mínimos de resistencia de los materiales y disponiendo rigidización transversal cada 5,00 m aproximadamente, el límite para un correcto funcionamiento cuando el cerramiento debe comportarse como autoportante, se decanta en torno a las ocho plantas, incluso para una altura de la planta baja importante. Si se utiliza armadura GEOFOR® y se contabiliza en el análisis, se puede llegar holgadamente hasta diez plantas. Las comprobaciones en este sentido hay que hacerlas cuando la altura total del edificio esté en torno a estos valores. En el resto de los casos la comprobación se puede omitir.

La comprobación a flexión debida a la acción de viento, en la peor situación, corresponde a la última planta. En este caso, la acción gravitatoria por peso propio es despreciable. El modelo de análisis es el de placa a flexión bidireccional, idéntico al descrito en la sección de *"Requisitos"*.

8.2.2 Edificios en altura. Soluciones de apoyo

Cuando se proyecta un cerramiento continuo sobre un elemento muy rígido no se puede evitar la acumulación de la carga gravitatoria en la sección del arranque. En los edificios de un elevado número de plantas (superior a ocho o diez, en función del resto de los parámetros), el requisito de seguridad estructural a compresión con pandeo puede exigir resistencias elevadas de los materiales o limitar las dimensiones de los paños de la planta inferior.

En estas situaciones puede ser rentable interrumpir la continuidad del cerramiento en altura. Sin embargo, esta circunstancia no supone la necesidad de renunciar a la solución de cerramiento autoportante. Se indican a continuación dos propuestas alternativas para resolver los casos en los que es preciso limitar la carga gravitatoria en la planta de arranque. La elección entre una u otra depende sustancialmente de las condiciones de diseño de la fachada y del aspecto exterior que se desee conseguir.



Solución de apoyo sobre forjado de planta intermedia

El procedimiento más sencillo y directo para resolver un cerramiento autoportante de un edificio con más de ocho o diez plantas de altura, y el que menos recursos adicionales consume, consiste en prever, además del apoyo en el arranque, otro apoyo adicional en el forjado de una planta intermedia.

Este procedimiento requiere dimensionar el elemento de borde del forjado correspondiente con la suficiente rigidez para considerar *apoyo firme* en el tramo de muro que sustenta. Se recuerda aquí que la condición de rigidez supone limitar la flecha a 1/1000 de la luz.

La solución es muy económica puesto que no exige ningún dispositivo adicional de apoyo para el cerramiento, puesto que se utiliza para ello uno de los forjados del edificio; basta con replantear la tabica del borde en la posición adecuada para que el cerramiento descanse directamente sobre él, que es la forma más natural y segura de transmisión de cargas. Tiene como contrapartida que se debe resolver el encuentro con el forjado en la planta intermedia de forma similar a lo indicado para los cerramientos convencionales, con las prescripciones que ello supone.

Si se desea conseguir un aspecto de continuidad del cerramiento, el apoyo[6] en la planta intermedia no puede ser total. El muro debe apoyar parcialmente para reservar el espacio correspondiente al aplacado del frente del forjado. Un apoyo parcial supone

reducir la capacidad resistente a compresión y esta circunstancia puede limitar el comportamiento mecánico a dimensiones geométricas notablemente inferiores a las utilizadas en los ejemplos analizados.

Por ello esta solución es recomendable sólo en los casos en los que el excedente de altura total es ligeramente superior al máximo determinado por cálculo. Por ejemplo, si el edificio tiene doce plantas y, por cálculo a compresión el cerramiento puede llegar hasta nueve plantas, la solución consiste en construir las nueve primeras plantas continuas sobre el arranque, y las tres restantes construirlas sobre el forjado de la planta novena, que llevará el correspondiente aplacado en el frente.

El encuentro del forjado con el cerramiento en la planta intermedia se resuelve con mayor facilidad sin disminuir la capacidad resistente de la fábrica, si apoya la sección completa del muro. En este caso no es posible conseguir el aspecto de continuidad del cerramiento en toda su altura, por lo que se debe incorporar esta circunstancia en el diseño de la fachada, utilizando en la composición recursos tales como una cornisa o imposta. La contrapartida es la extraordinaria economía de la solución.

Solución de apoyo sobre ANCON ÓPTIMA®

La solución alternativa al apoyo directo en el forjado, cuando se desea mantener la posición del cerramiento tangente a la estructura, consiste en sustentarlo en un elemento auxiliar que transporte la carga al forjado cada un cierto número de plantas[7].

También en este caso, el requisito fundamental del elemento estructural que actúa de soporte se refiere a su rigidez. El recurso que parece más inmediato es utilizar, como elemento auxiliar interpuesto, un perfil angular continuo recibido con tacos al forjado. Sin embargo, este procedimiento, además de costoso, resulta ineficaz cuando se trata de sostener tramos de altura correspondiente a una planta completa, a menos que los perfiles tuvieran un canto exageradamente grande en relación con su luz. Un perfil de acero puede ser muy resistente, pero no puede competir en rigidez con un paño de fábrica de una o más plantas de altura. Si la flecha del perfil que sirve de sostén a un paño de fábrica es de un orden de magnitud superior a la flecha del propio paño, el apoyo en la zona central del vano no llega a producirse. En el mejor de los casos, sólo funciona eficazmente como apoyo propiamente dicho la zona de angular que esté próxima a los tacos.

Para conseguir que todo el angular sea eficaz en el transporte de carga es fundamental disponer los tacos o puntos de conexión al forjado a distancias relativamente cortas; pero en este caso, aunque la luz de flexión del angular se reduzca todo lo deseable, es imposible evitar que acompañe al forjado en su deformación. El aumento de rigidez del sistema sólo se consigue aumentando la rigidez del propio forjado. El paño de fábrica jamás podrá *"sustentarse"* en un angular flectado; por el contrario, si no se toman las debidas precauciones para evitar el contacto físico, es muy probable que acabe siendo el forjado el que se *"sustente"* en el paño de fábrica inferior mediante el angular interpuesto, produciendo el efecto contrario al que se desea conseguir.

Desde el punto de vista de la rigidez, un paño de cerramiento sustentado en un elemento deformable se comporta como una viga de gran canto, por eso tiene poca eficacia utilizar una viga, aunque sea metálica, para apoyar otra viga de rigidez mucho mayor. Solamente la sustentación en elementos muy rígidos, como puede ser una zapata corrida de cimentación, una solera o la cabeza de un muro de sótano, pueden considerarse verdaderos *"apoyos"* para un paño de fábrica de cierta entidad, los cuales, por tener impedida su deformación, pueden desarrollar la reacción continua correspondiente.

6 En este caso la palabra *"apoyo"* indica la función estructural que debe tener el elemento interpuesto. Ahora, si se trata de *"sostener"* el cerramiento, en el sentido literal de la palabra; a diferencia de la *"entrega"* requerida cuando se trata de *"agarrar"* para evitar el vuelco en los casos de soluciones convencionales.

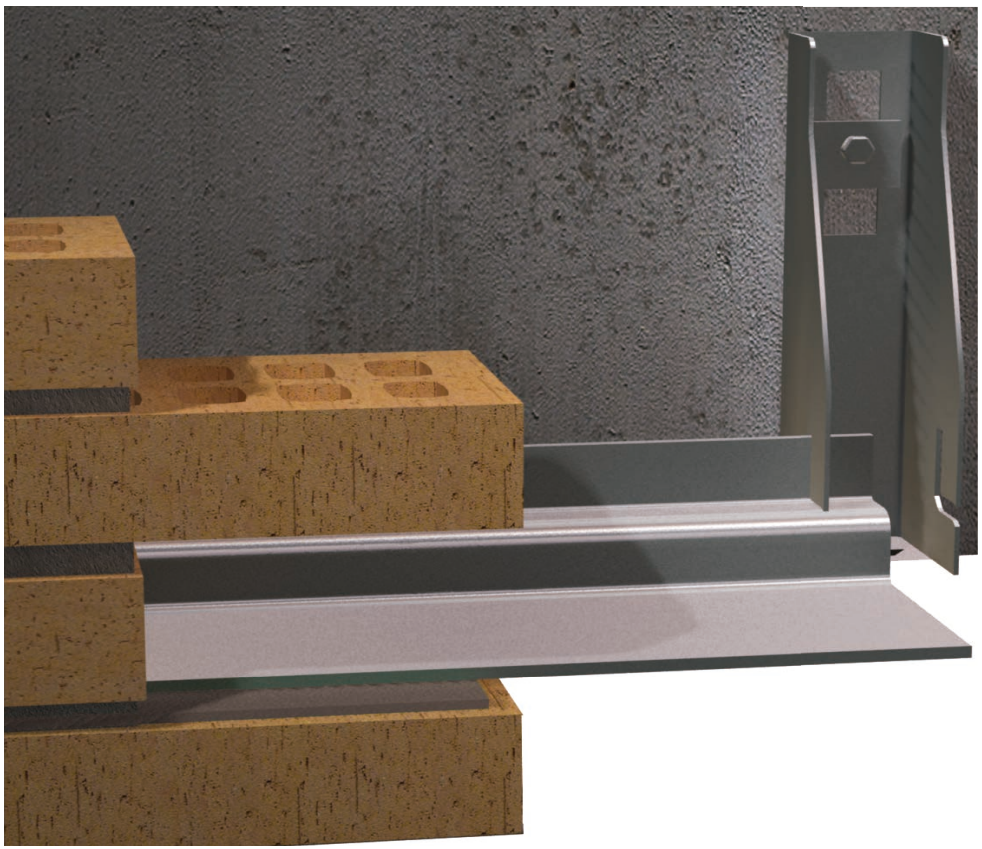
7 El análisis determinará el número máximo de plantas entre apoyos, aunque constructivamente no es operativo pasar de dos porque, para mayor peso, el tamaño de la junta requerida entre cada tramo sería excesivamente grande.

Si el cerramiento, desde el punto de vista de su posibilidad de deformación, se comporta como una viga de gran canto, el recurso más rentable es habilitar un funcionamiento en viga también desde el punto de vista resistente. Para ello, basta con incorporar en el muro la armadura de tracción necesaria. Una pequeña cuantía de armadura dispuesta en las primeras hiladas suele ser suficiente.

Aparte de la armadura de tracción, el paño de fábrica sólo precisa, como cualquier viga, puntos discontinuos de apoyo, resultando innecesaria la presencia del perfil auxiliar entre ellos.

De esta forma, con una mínima parte del acero que se puede ahorrar en el perfil innecesario, incorporándolo en el interior de la fábrica con la función de armadura de tracción, se consigue un aumento enorme del rendimiento mecánico de la solución. Y, lo que es incluso más importante, se habilita un funcionamiento estructural compatible en todo momento con las posibilidades de deformación del elemento de fábrica, evitando el riesgo de fisuración.

La distancia máxima a la que se pueden disponer los aparatos auxiliares de apoyo determina decisivamente el coste unitario de la solución. Desde el punto de vista del rendimiento de los elementos de acero, siempre es rentable concentrar carga, y la solución más económica sería la que conduce al menor número de apoyos posible. Sin embargo, cuando se trata de aplicar este criterio a la solución que estamos analizando, existe una fuerte restricción a la luz entre apoyos impuesta por razones de estabilidad del propio paño de fábrica cuando funciona como viga.



En este sentido, el DB SE-F en el artículo 5.6 *"Fábrica armada a flexión"* indica las pautas para determinar, tanto las solicitaciones, como la capacidad resistente de un paño de fábrica sustentado en apoyos puntuales. En el apartado 5.6.1 *"Análisis de solicitaciones",* párrafo 6, se explicitan las limitaciones de las dimensiones geométricas del paño para asegurar la estabilidad lateral. Este requisito limita la distancia libre entre apoyos al menor de los dos valores siguientes:

- $L \leq 60 \cdot b_c$
- $L \leq 250 \cdot b_c^2 / d$

siendo:

- $L \rightarrow$ la distancia libre entre apoyos
- $b_c \rightarrow$ el ancho de la sección comprimida a mitad del vano (espesor del muro)
- $d \rightarrow$ el canto útil de la viga (aproximadamente la altura del paño)

Es importante destacar que la limitación de la distancia máxima entre apoyos es una limitación geométrica, y no depende de las características

resistentes de los materiales ni de la cuantía de la armadura de tendel. Se trata de prevenir un fenómeno de inestabilidad lateral por pandeo de la zona comprimida del muro, que no depende de ningún parámetro resistente.

Para un cerramiento de ½ pie de espesor, la condición anterior conduce a los siguientes valores de luz máxima entre apoyos:

- Paño de 1 planta → (altura 3,00 m) → Luz máxima entre apoyos 1,10 m
- Paño de 2 plantas → (altura 6,00 m) → Luz máxima entre apoyos 0,55 m
- Paño de 3 plantas → (altura 9,00 m) → Luz máxima entre apoyos 0,37 m

De lo anterior se deduce que la solución de sostener un muro de fábrica armada a flexión en apoyos discontinuos es viable para una altura máxima de una o dos plantas, con apoyos dispuestos en torno a 1,00 m o 0,50 m respectivamente.

Los apoyos ANCON ÓPTIMA® están diseñados para posibilitar su disposición cada dos plantas. Se componen del aparato de apoyo propiamente dicho que se fija en el forjado cada 0,50 m y queda alojado en el espacio reservado para la cámara de aire del cerramiento. El dispositivo se fabrica en diferentes anchos para que se pueda utilizar con un espesor de cámara comprendido entre 60 mm y 100 mm. Es regulable en las tres direcciones del espacio para ajustarse a cualquier replanteo de tendeles y a la posición exacta de la línea exterior de la fachada, con independencia de las irregularidades que pueda tener el frente del forjado.

Se complementan con una bandeja de 0,50 m de longitud que se ajusta manualmente entre los dispositivos de apoyo y sirve para sostener la primera hilada cuando se ejecuta el paño, evitando en todo momento el contacto físico con el paño de la planta inferior. Es importante resolver la junta a posteriori, una vez haya fraguado la fábrica, para tener la certeza que no se produce una indeseable acumulación de carga hacia los apoyos de plantas inferiores.

Conviene destacar que la bandeja que complementa a los aparatos de apoyo ANCON ÓPTIMA® sólo tiene una función de sostén, a modo de encofrado perdido, mientras se ejecuta el muro. El mecanismo de trasporte de carga hacia los apoyos, una vez transcurrido el período de fraguado, se realiza a través de la propia fábrica trabajando como viga con la armadura de tracción necesaria alojada en las primeras hiladas. La bandeja se podría omitir, de la misma manera que se ha indicado para el angular estándar, aunque desde el punto de vista operativo no resulta rentable hacerlo puesto que, como contrapartida, habría que tener apeado el muro, al menos catorce días, hasta conseguir que se habilite el mecanismo resistente.

8.2.3 Huecos corridos horizontales

La configuración de huecos corridos en horizontal supone interrumpir la continuidad vertical de la fachada. Esta circunstancia tiene una importante repercusión en el análisis por dos razones fundamentales. En primer lugar no es posible utilizar el efecto beneficioso que supone en la mayoría de los casos la carga gravitatoria acumulada de todo el peso del cerramiento, puesto que la interrupción que suponen los huecos implica la necesidad de descargar el peso planta a planta; en segundo lugar, no es posible contar con la sustentación en cabeza de los antepechos, lo que supone una penalización importante a la hora de calcular las solicitaciones de los paños.

La solución estructural difiere ligeramente si se trata de fachadas sustentadas en los forjados respecto a la utilizada en el caso de cerramientos pasantes por delante de la estructura.

En ambas situaciones se precisa un elemento estructural de descarga o dintel y un sistema de retención frente a las acciones horizontales. Si se trata de una fachada sustentada en forjados, sólo hay que descargar en el dintel el faldón comprendido entre el borde superior del hueco y el forjado. Si se trata de una fachada pasante, la descarga se debe hacer para el paño completo entre huecos, incluido el antepecho. El sistema de retención frente a acciones horizontales es prácticamente el mismo; en ambos casos es imprescindible contar con la presencia de soportes o elementos verticales para conseguir la reacción necesaria.

El análisis estructural demanda mayor capacidad resistente a flexión de la fábrica respecto a la necesaria para

paños ciegos o con huecos puntuales, por las razones expuestas anteriormente. Sin embargo, el principal requisito del análisis estructural es conseguir limitar los movimientos del muro, fundamentalmente la tendencia al vuelco o *"cabeceo"*, puesto que la pérdida de la verticalidad de los paños, por insignificante que sea, constituye un fenómeno irreversible y progresivo.

En las fachadas con huecos corridos en horizontal, por tratarse de una sucesión de entrepaños sueltos en cabeza, la pérdida de la verticalidad se debe fundamentalmente al giro de la sección de apoyo en el dintel.

La forma más eficaz de evitar el giro en la sección de apoyo consiste en actuar en el origen, es decir, impedir la torsión del cargadero. Esto se consigue fácilmente utilizando como tirantes o dispositivos de cuelgue elementos con rigidez a flexión, en lugar de tirantillas o redondos suspendidos que, si bien pueden transmitir la carga, no pueden impedir el giro del dintel. El objeto fundamental del análisis en estos casos es, por una parte, limitar debidamente la deformación o flecha del dintel y, por otra evitar el giro de la sección apoyo. Además, no hay que perder de vista que la interrupción de la continuidad vertical del cerramiento supone disminuir sus condiciones de sustentación, por lo que es necesario un estudio más minucioso de la estabilidad y resistencia, que el requerido para las soluciones convencionales.

Frente a la acción gravitatoria, debido a que el entrepaño entre huecos no tiene coaccionado el movimiento en cabeza, es imprescindible para su estabilidad un ancho de apoyo suficientemente holgado con objeto de que la vertical, desde el centro de gravedad del muro, caiga dentro de la base de sustentación. En este caso, la esbeltez no es la variable que condiciona la estabilidad, sino el ancho de apoyo referido al ancho total del muro, sea cual sea su altura. Para esta situación, tiene sentido la recomendación de algunos manuales al uso, de disponer un ancho de apoyo igual o superior a los 2/3 del ancho total[8].

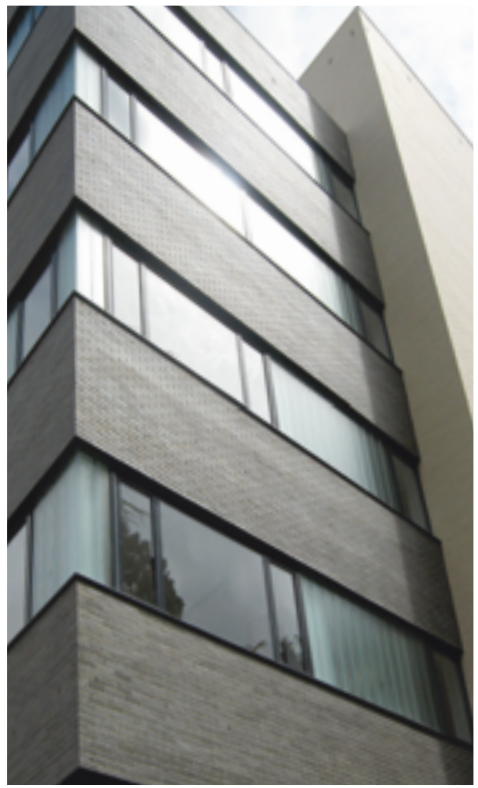
Frente a la acción de viento, el cerramiento con huecos corridos en horizontal, aun en el caso de que esté sustentado en los forjados, no puede funcionar en arco, puesto que no existe la reacción correspondiente en uno de los extremos. El único modelo estructural posible es el de placa sustentada en tres bordes. El tipo de esfuerzo que se origina en el traslado de fuerzas a los bordes coaccionados sigue siendo el de flexión bidireccional, en mayor o menor medida, según las dimensiones del paño.

Si también se reduce o se destruye la reacción horizontal en la base del muro, por la interposición de una barrera antihumedad, por ejemplo, el esfuerzo degenera en flexión unidireccional; de manera que el cerramiento se comporta, ante la acción de viento, como una viga entre soportes, a flexión horizontal.

En cualquier caso, la presencia de un borde libre en cabeza, hace imprescindible para la estabilidad del cerramiento la existencia de soportes o, en su defecto, de elementos verticales resistentes a flexión, denominados genéricamente *"windpost"*.

A continuación se expone el método de análisis y comprobación que corresponde a cada uno de los casos descritos, utilizando como pretexto un caso de cerramiento de proporciones geométricas similares al utilizado para explicar el comportamiento de los cerramientos convencionales.

En los dos casos que se analizan, se supone que el cerramiento pasa por delante de los soportes manteniendo todo su espesor, y que la conexión se realiza mediante anclajes tipo GEOANC.CDM®; si hubiera que disponer *"windpost"* intercalados, éstos irían alojados, bien en la cámara de aire, o bien en los bordes de forjados; pero, en cualquier caso, sin interrumpir la continuidad horizontal en la sustentación.



EJEMPLO 11

Cerramiento apoyado en forjados con huecos corridos en horizontal *Cálculo del antepecho*. Altura 1,10 m. Luz entre soportes 5,00 m Solución G.H.A.S.® con armadura de TENDEL GEOFOR® y anclajes GEOANC.CDM®

Características geométricas:

- Paño sustentado en tres bordes con laterales en continuidad (DB SE-F, tabla G.1)
- Luz entre soportes: $L = 5{,}00$ m
- Altura libre de planta: $h = 2{,}70$ m
- Altura del antepecho: $h_0 = 1{,}10$ m
- Altura del hueco: $h_1 = 1{,}20$ m
- Altura del dintel: $h_2 = 0{,}40$ m
- Altura de cálculo del paño: $h_d = h_0 + (0{,}5 \cdot h_1) = 1{,}70$ m (9)
- Espesor del muro (½ pie formato castellano): $t = 115$ mm
- Armadura de tendel (GEOFOR® 4080/GF): Φ 4 mm cada 0,48 m

Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4$ N/mm² (10)
- Resistencia a flexión paralela a los tendeles: $f_{xk1} = 0{,}10$ N/mm² (11)
- Módulo resistente por unidad de longitud: $Z_1 = t^2 / 6 = 2204$ mm²·m / metro
- Cuantía de la armadura de tendel (Φ 4 cada 0,48 m): $A_s = 26{,}18$ mm² / metro
- Resistencia a tracción de la armadura: $f_{yk} = 600$ N/mm² (12)
- Brazo mecánico de la armadura: $z_s = 80$ mm
- Valor característico de la acción de viento: $q_e = 0{,}8$ kN/m² (13)
- Coeficiente de seguridad de la fábrica: $\gamma_M = 2{,}5$
- Coeficiente de seguridad de la armadura: $\gamma_s = 1{,}15$
- Coeficiente de seguridad de acciones: $\gamma_Q = 1{,}50$ (variables desfavorables)
  $\gamma_G = 0{,}8$ (permanentes favorables) (14)
- Peso específico de la fábrica: $\rho = 18$ kN/m³

8 Para que la vertical desde el centro de gravedad del muro caiga dentro de la base de sustentación sería suficiente que el apoyo fuera superior a la mitad del espesor. La condición de apoyo superior a 2/3 del espesor es para no superar el núcleo central de inercia de la sección de arranque y conseguir con ello que todo el muro resulte comprimido frente a la acción de su propio peso.

9 Repercutiendo la mitad del hueco sobre el antepecho.

10 Obtenida en el ejemplo 1.

11 Valor obtenido de la tabla 4.6 *"Resistencia a flexión de la fábrica"* del DB SE-F.

12 La armadura GEOFOR® tiene una resistencia garantizada a tracción de 600 N/mm².

13 Valor utilizado en los ejemplos anteriores.

14 Según DB SE tabla 4.1 *"Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones"*. La carga gravitatoria se considera favorable en el análisis a flexión por viento.

Análisis a flexión:

- Tensión normal debida a peso propio (en base): $\sigma_d = \rho \cdot \gamma_G \cdot h_0$ $= 0{,}0158\ N/mm^2$
- Capacidad resistente a flexión vertical: $M_{Rd1} = Z_1 \cdot (f_{xk1} / \gamma_M + \sigma_d)$ $= 0{,}123\ m{\cdot}kN / metro$
- Capacidad resistente a flexión horizontal: $M_{Rd2} = A_s \cdot f_{yk} \cdot z_s / \gamma_s$ $= 1{,}093\ m{\cdot}kN / metro$
- Razón entre resistencias: $\mu = M_{Rd1} / M_{Rd2}$ $= 0{,}113$
- Razón entre dimensiones: h_d / L $= 0{,}34$
- Coeficiente de flexión (DB SE-F tabla G.1): α $= 0{,}0360$
- Valor de cálculo del momento flector vertical:

$$M_{Sd1} = \mu \cdot \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 = 0{,}113 \cdot 0{,}0360 \cdot 0{,}8\ kN/m^2 \cdot 1{,}50 \cdot (5{,}00\ m)^2 = 0{,}122\ m{\cdot}kN / metro\ de\ longitud$$

- Valor de cálculo del momento flector horizontal:

$$M_{Sd2} = \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 = 0{,}0360 \cdot 0{,}8\ kN/m^2 \cdot 1{,}50 \cdot (5{,}00\ m)^2 = 1{,}079\ m{\cdot}kN / metro\ de\ altura$$

- Comprobación de resistencia:

$$M_{Sd1} = 0{,}122\ m{\cdot}kN/metro < M_{Rd1} = 0{,}123\ m{\cdot}kN/metro.\ VALE$$

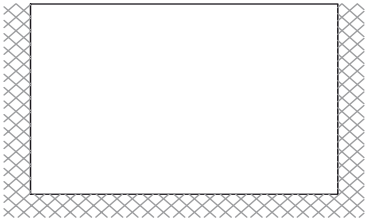
$$M_{Sd2} = 1{,}079\ m{\cdot}kN/metro < M_{Rd2} = 1{,}093\ m{\cdot}kN/metro.\ VALE$$

***Cálculo del dintel*. Altura 0,40 m. Luz entre soportes 5,00 m**
Solución con perfil LPN 100.10 recibido en frentes de soportes

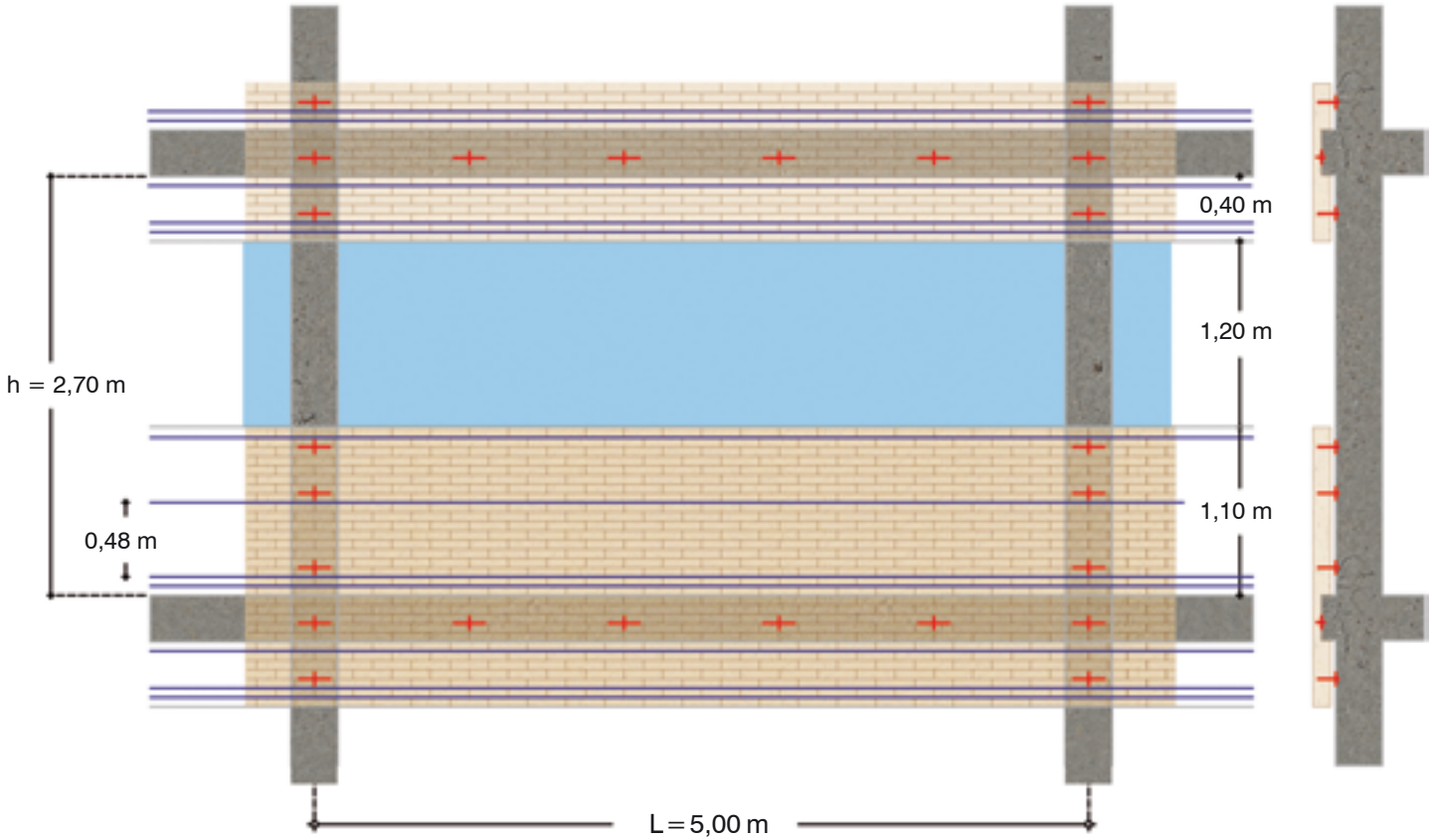
Características geométricas:

- Altura del paño que carga sobre perfil: $h = 0{,}40\ m$
- Luz entre soportes: $L = 5{,}00\ m$
- Tipo de sustentación del perfil: En continuidad al paso por soportes
- Espesor del muro (½ pie formato castellano): $t = 115\ mm$

Tabla G.1



μ	h/L							
	0,3	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2
1	0,013	0,021	0,029	0,035	0,040	0,043	0,045	0,047
0,9	0,014	0,022	0,031	0,036	0,040	0,043	0,046	0,048
0,8	0,015	0,023	0,032	0,038	0,041	0,044	0,047	0,048
0,7	0,016	0,025	0,033	0,039	0,043	0,045	0,047	0,049
0,6	0,017	0,026	0,035	0,040	0,044	0,046	0,048	0,050
0,5	0,018	0,028	0,037	0,042	0,045	0,048	0,050	0,051
0,4	0,020	0,031	0,039	0,043	0,047	0,049	0,051	0,052
0,35	0,022	0,032	0,040	0,044	0,048	0,050	0,051	0,053
0,3	0,023	0,034	0,041	0,046	0,049	0,051	0,052	0,053
0,25	0,025	0,035	0,043	0,047	0,050	0,052	0,053	0,054
0,2	0,027	0,038	0,044	0,048	0,051	0,053	0,054	0,055
0,15	0,030	0,040	0,046	0,050	0,052	0,054	0,055	0,056
0,1	0,034	0,043	0,049	0,052	0,054	0,055	0,056	0,057
0,05	0,041	0,048	0,053	0,056	0,056	0,057	0,058	0,059



Características mecánicas:

- Módulo resistente del perfil (LPN 100.10): $W = 24{,}6\ cm^3$
- Momento de inercia del perfil (LPN 100.10): $I = 177\ cm^4$
- Tipo de acero: S 275
- Módulo de elasticidad del acero: $E_s = 200.000\ N/mm^2$
- Tensión correspondiente al límite elástico: $f_{yk} = 275\ N/mm^2$
- Coeficiente de seguridad del acero en perfiles: $\gamma_M = 1{,}05$
- Coeficiente de seguridad de acciones: $\gamma_G = 1{,}35$ (permanentes desfavorables) (15)
- Peso específico de la fábrica: $\rho = 18\ kN/m^3$

15 Según DB SE tabla 4.1 *"Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones"*. La carga gravitatoria se considera desfavorable en el análisis del dintel.

Análisis del dintel a flexión:

- Carga lineal sobre el dintel debida a peso propio: $q_d = \rho \cdot \gamma_G \cdot t \cdot h$ = 1,12 kN/metro
- Momento flector máximo: $M_{Sd} = q_d \cdot L^2 / 16$ = 1,75 m·kN
- Capacidad resistente a flexión del perfil: $M_{Rd} = W \cdot f_{yk} / \gamma_M$ = 6,44 m·kN
- Comprobación de resistencia: $M_{Sd} \leq M_{Rd}$

$$M_{Sd} = 1{,}75\ m{\cdot}kN < M_{Rd} = 6{,}44\ m{\cdot}kN.\ VALE$$

- Flecha del dintel: $\delta_{máxima} = (q_d / \gamma_G) \cdot L^4 / (384\ E_s \cdot I)$ = 3,8 mm
- Flecha máxima admisible: $\delta_{admisible} = L / 1000$ = 5,0 mm
- Comprobación de deformación: $\delta_{máxima} \leq \delta_{admisible}$

$$\delta_{máxima} = 3{,}8\ mm < \delta_{admisible} = 5{,}0\ mm.\ VALE$$

EJEMPLO 12

Cerramiento pasante con huecos corridos en horizontal
Cálculo del faldón (antepecho+dintel).
Altura 1,80 m. Luz entre soportes 5,00 m
Solución G.H.A.S.® con armadura de tendel GEOFOR® y anclajes GEOANC CDM®

Características geométricas:

- Paño sustentado en tres bordes con laterales en continuidad (DB SE-F, tabla G.1)
- Luz entre soportes: $L = 5{,}00$ m
- Altura libre de planta: $h = 2{,}70$ m
- Altura del antepecho: $h_0 = 1{,}10$ m
- Altura del hueco: $h_1 = 1{,}20$ m
- Altura del dintel: $h_2 = 0{,}40$ m
- Canto del forjado: $h_3 = 0{,}30$ m
- Altura de cálculo: $h_d = h_0 + h_1 + h_2 + h_3 = 3{,}00$ m (16)
- Espesor del muro (½ pie formato castellano): $t = 115$ mm
- Armadura de tendel (GEOFOR® 4080/GF): Φ 4 mm cada 0,36 m

Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4$ N/mm² (17)
- Resistencia a flexión paralela a los tendeles: $f_{xk1} = 0{,}10$ N/mm² (18)
- Módulo resistente por unidad de longitud: $Z_1 = t^2 / 6 = 2204$ mm²·m/metro
- Cuantía de la armadura de tendel (Φ 4 cada 0,36 m): $A_s = 34{,}91$ mm²/metro
- Resistencia a tracción de la armadura: $f_{yk} = 600$ N/mm² (19)
- Brazo mecánico de la armadura: $z_s = 80$ mm
- Valor característico de la acción de viento: $q_e = 0{,}8$ kN/m² (20)
- Coeficiente de seguridad de la fábrica: $\gamma_M = 2{,}5$
- Coeficiente de seguridad de la armadura: $\gamma_s = 1{,}15$
- Coeficiente de seguridad de acciones: $\gamma_Q = 1{,}50$ (variables desfavorables)
  $\gamma_G = 0{,}8$ (permanentes favorables) (21)
- Peso específico de la fábrica: $\rho = 18$ kN/m³

16 En el cálculo del faldón a viento se ha repercutido el hueco.

17 Obtenida en el ejemplo 1.

18 Valor obtenido de la tabla 4.6 "*Resistencia a flexión de la fábrica*" del DB SE-F.

19 La armadura GEOFOR® tiene una resistencia garantizada a tracción de 600 N/mm².

20 Valor utilizado en los ejemplos anteriores.

21 Según DB SE tabla 4.1 *"Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones"*. La carga gravitatoria se considera favorable en el análisis a flexión por viento.

Análisis a flexión:

- Tensión normal debida a peso propio (en base): $\sigma_d = \rho \cdot \gamma_G \cdot (h_0 + h_2 + h_3)$ $= 0{,}0259\ N/mm^2$
- Capacidad resistente a flexión vertical: $M_{Rd1} = Z_1 \cdot (f_{xk1} / \gamma_M + \sigma_d)$ $= 0{,}145\ m{\cdot}kN / metro$
- Capacidad resistente a flexión horizontal: $M_{Rd2} = A_s \cdot f_{yk} \cdot z_s / \gamma_s$ $= 1{,}457\ m{\cdot}kN / metro$
- Razón entre resistencias: $\mu = M_{Rd1} / M_{Rd2}$ $= 0{,}100$
- Razón entre dimensiones: h_d / L $= 0{,}60$
- Coeficiente de flexión (DB SE-F tabla G.1): α $= 0{,}0469$
- Valor de cálculo del momento flector vertical:

$$M_{Sd1} = \mu \cdot \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 = 0{,}100 \cdot 0{,}0469 \cdot 0{,}8\ kN/m^2 \cdot 1{,}50 \cdot (5{,}00\ m)^2 = 0{,}140\ m{\cdot}kN/metro\ de\ longitud$$

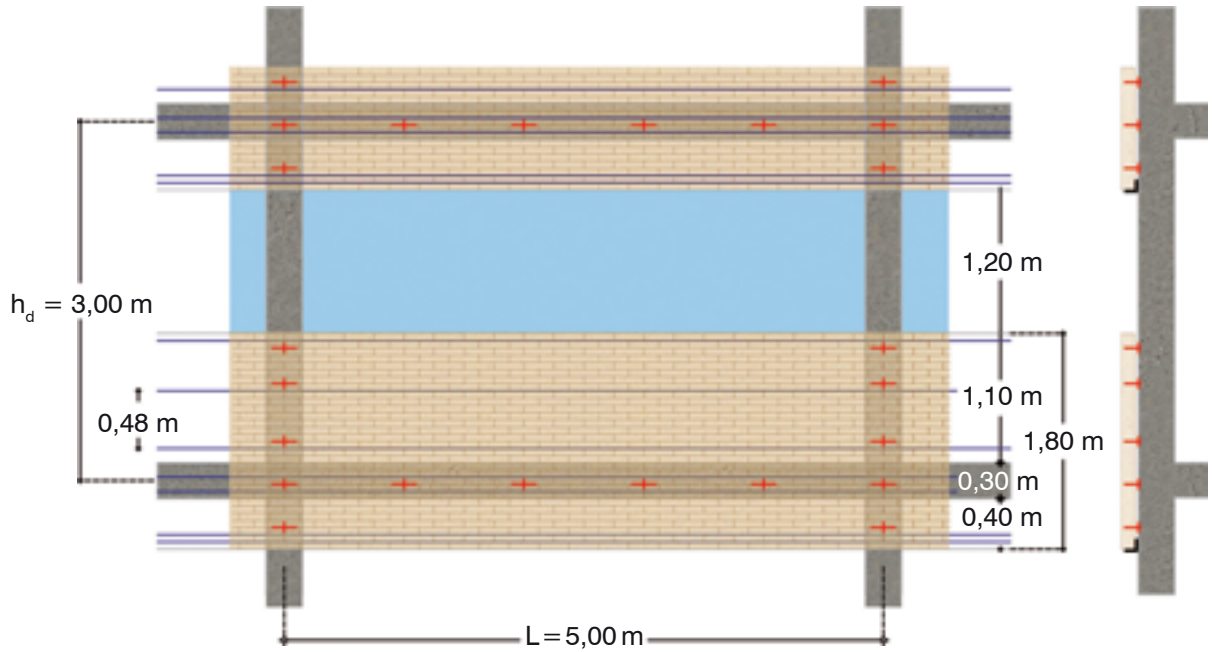
- Valor de cálculo del momento flector horizontal:

$$M_{Sd2} = \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 = 0{,}0469 \cdot 0{,}8\ kN/m^2 \cdot 1{,}50 \cdot (5{,}00\ m)^2 = 1{,}407\ m{\cdot}kN/metro\ de\ altura$$

- Comprobación de resistencia:

$M_{Sd1} = 0{,}140\ m{\cdot}kN/metro < M_{Rd1} = 0{,}145\ m{\cdot}kN/metro$. VALE

$M_{Sd2} = 1{,}407\ m{\cdot}kN/metro < M_{Rd2} = 1{,}457\ m{\cdot}kN/metro$. VALE



Cálculo del dintel. Altura 1,80 m. Luz entre soportes 5,00 m
Solución con perfil LPN 100.10 recibido en frentes de soportes

22 Según DB SE tabla 4.1 "Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones". La carga gravitatoria se considera desfavorable en el análisis del dintel.

Características geométricas:

- Altura del paño que carga sobre perfil: $h = h_0 + h_2 + h_3 = 1{,}80$ m
- Luz entre soportes: $L = 5{,}00$ m
- Tipo de sustentación del perfil: En continuidad al paso por soportes
- Espesor de muro (½ pie formato castellano): $t = 115$ mm

Características mecánicas:

- Módulo resistente del perfil (LPN 100.10): $W = 24{,}6\ cm^3$
- Momento de inercia del perfil (LPN 100.10): $I = 177\ cm^4$
- Tipo de acero: S 275
- Módulo de elasticidad del acero: $E_s = 200.000\ N/mm^2$
- Tensión correspondiente al límite elástico: $f_{yk} = 275\ N/mm^2$
- Coeficiente de seguridad del acero en perfiles: $\gamma_M = 1{,}05$
- Coeficiente de seguridad de acciones: $\gamma_G = 1{,}35$ (permanentes desfavorables) (22)
- Peso específico de la fábrica: $\rho = 18\ kN/m^3$

Análisis del dintel a flexión:

- Carga lineal sobre el dintel debida a peso propio: $q_d = \rho \cdot \gamma_G \cdot t_d \cdot h$ = 5,03 kN/metro
- Momento flector máximo: $M_{Sd} = q_d \cdot L^2 / 16$ = 7,86 m·kN
- Capacidad resistente a flexión del perfil: $M_{Rd} = W \cdot f_{yk} / \gamma_M$ = 6,44 m·kN
- Comprobación de resistencia: $M_{Sd} \leq M_{Rd}$

$M_{Sd} = 7{,}86$ m·kN $> M_{Rd} = 6{,}44$ m·kN. NO VALE

- Flecha del dintel: $\delta_{máxima} = (q_d / \gamma_G) \cdot L^4 / (384\ E_s \cdot I)$ = 17,1 mm
- Flecha máxima admisible: $\delta_{admisible} = L / 1000$ = 5,0 mm
- Comprobación de deformación: $\delta_{máxima} \leq \delta_{admisible}$

$\delta_{máxima} = 17{,}1$ mm $> \delta_{admisible} = 5{,}0$ mm. NO VALE

Cálculo corregido del dintel. **Altura 1,80 m. Luz entre soportes 5,00 m**
Solución G.H.A.S. con perfil LPN 100.10 recibido en frentes de soportes y en tubos PHC 60.4 intercalados a media luz

Análisis del dintel a flexión:

- Carga lineal sobre el dintel debida a peso propio: $q_d = \rho \cdot \gamma_G \cdot t_d \cdot h$ = 5,03 kN/metro
- Luz de cálculo a flexión: $L / 2$ = 2,50 m
- Momento flector máximo: $M_{Sd} = q_d \cdot (L / 2)^2 / 16$ = 1,96 m·kN
- Capacidad resistente a flexión del perfil: $M_{Rd} = W \cdot f_{yk} / \gamma_M$ = 6,44 m·kN
- Comprobación de resistencia: $M_{Sd} \leq M_{Rd}$

$M_{Sd} = 1{,}96$ m·kN $< M_{Rd} = 6{,}44$ m·kN. VALE

- Flecha del dintel: $\delta_{máxima} = (q_d / \gamma_G) \cdot (L / 2)^4 / (384\ E_s \cdot I)$ = 1,1 mm
- Flecha máxima admisible: $\delta_{admisible} = (L / 2) / 1000$ = 2,5 mm
- Comprobación de deformación: $\delta_{máxima} \leq \delta_{admisible}$

$\delta_{máxima} = 1{,}1$ mm $< \delta_{admisible} = 2{,}5$ mm. VALE

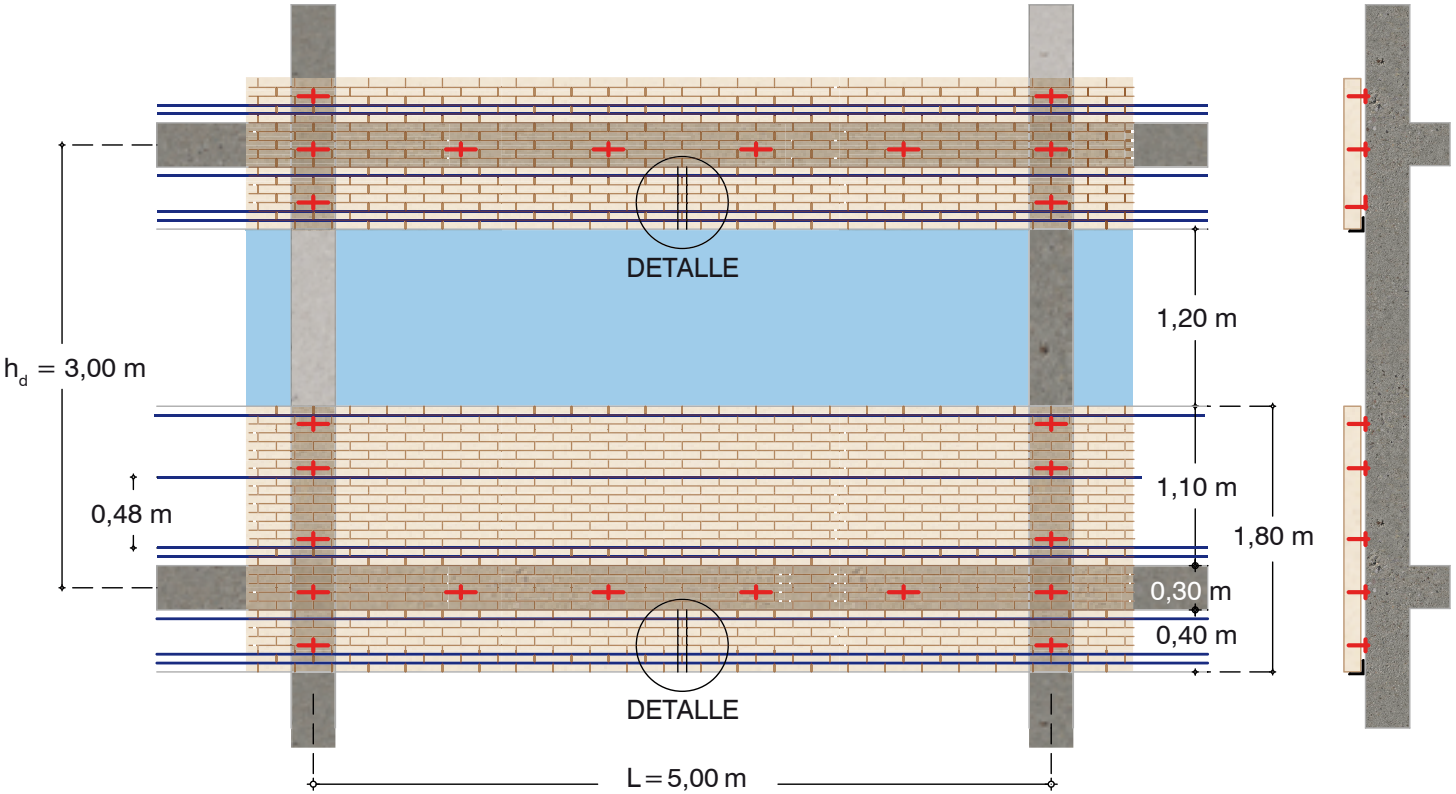
Análisis del tirante a flexión (para evitar la torsión del dintel):

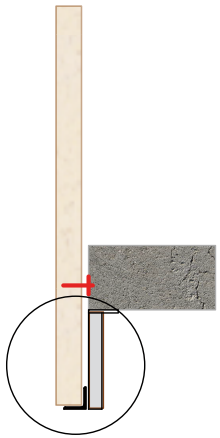
- Carga lineal sobre el dintel debida a peso propio: $q_d = \rho \cdot \gamma_G \cdot t_d \cdot h$ = 5,03 kN/metro
- Excentricidad de la carga gravitatoria: $e = 60$ mm + 10 mm + 30 mm = 100 mm
- Esfuerzo normal de tracción: $N_{Sd} = q_d \cdot (L / 2)$ = 12,58 kN
- Momento flector debido a la excentricidad de la carga: $M_{Sd} = q_d \cdot (L / 2) \cdot e$ = 1,26 m·KN
- Área de la sección recta del perfil (PHC 60.4): S = 8,41 cm^2
- Módulo resistente del perfil (PHC 60.4): W = 14,10 cm^3
- Valor de cálculo de la resistencia del acero (S 275) $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_M = 275$ N/mm^2 / 1,05 = 262 N/mm^2

Comprobación de la resistencia a flexotracción:

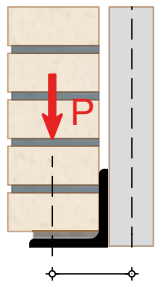
- Valor de cálculo de la tensión normal máxima: $\sigma_{d,\ máxima} = (N_{Sd} / S) + (M_{Sd} / W)$ = 104 N/mm^2
- Comprobación de resistencia: $\sigma_{d,\ máxima} \leq f_{yd}$

$\sigma_{d,\ máxima} = 104$ N/mm^2 $< f_{yd} = 262$ N/mm^2. VALE





DETALLE



DETALLE

Si el dintel se resuelve con fábrica armada en las primeras hiladas, se podría eliminar sólo en parte el perfil angular de apoyo, utilizando la capacidad resistente a flexión de la propia fábrica trabajando como viga.

Sin embargo, habría que aumentar el número de tubos verticales para limitar la luz máxima entre apoyos por estabilidad lateral del dintel. En el ejemplo analizado, con una altura de dintel de 1,80 m, la distancia máxima entre apoyos, según DB SE-F, artículo 5.6.1, párrafo 6, es $L_{máx} = 250 \cdot (0{,}115\ m)^2 / 1{,}80\ m = 1{,}83$ m. Se precisarían dos tubos intercalados por cada tramo entre soportes, en lugar de uno, lo que supone duplicar la cuantía de acero en perfiles verticales.

En estos casos no resulta rentable recurrir a fábrica armada sustentada en apoyos puntuales puesto que el ahorro en acero no es significativo y tiene, como contrapartida, la complejidad constructiva que supone mantener apeado el muro hasta que finalice el proceso de fraguado y endurecimiento del mortero.

Funcionamiento en viga

Esta situación corresponde al caso de cerramientos en los que se interrumpe la continuidad de la fábrica en cabeza, y con reacción en base poco fiable, por la presencia de láminas o barreras interpuestas.

El modelo de análisis es muy sencillo, aunque el rendimiento mecánico es el menor de todos los descritos anteriormente.

En este caso, ante la acción de viento, el cerramiento funciona como una viga horizontal, sustentada en soportes o *"windpost"*, solicitada a flexión unidireccional.

Debido a que la resistencia a flexión vertical no interviene en el análisis, no es necesario realizar prorrateo de resistencia, por lo que se pueden omitir los tanteos previos en el proceso de dimensionado, obteniéndose directamente la luz máxima entre soportes, en función de la capacidad resistente suministrada por la armadura de tendel; o, viceversa, obtener la capacidad resistente necesaria (cuantía de armadura) para una luz entre soportes predeterminada.

Los resultados no difieren sustancialmente de los obtenidos en el ejemplo anterior, en el que la resistencia a flexión vertical contribuye poco en el comportamiento mecánico.

La comprobación de resistencia se puede plantearse en los siguientes términos:

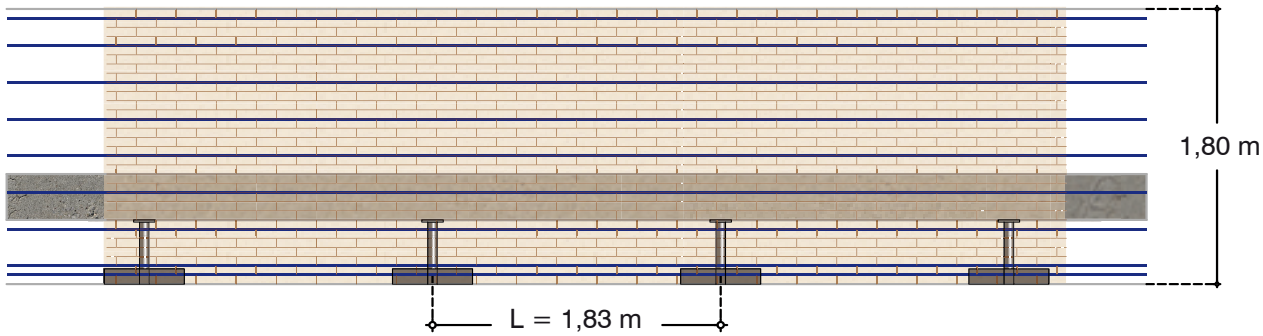
$M_{Sd} \leq M_{Rd}$

siendo:

- $M_{Sd} \rightarrow$ momento flector de cálculo por la acción de viento $= q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 / 16$
- $M_{Rd} \rightarrow$ capacidad resistente de la sección con armadura $= A_s \cdot f_{yk} \cdot z_s / \gamma_s$

donde:

- $q_e \rightarrow$ es la presión de viento (por unidad de superficie)
- $\gamma_Q \rightarrow$ es el coeficiente de seguridad de la acción de viento



Solución de arranque con fábrica armada y apoyos puntuales

- L → es la distancia entre elementos verticales de sustentación
- A_s → es el área de armadura por unidad de altura = $\pi \cdot \Phi^2 / 4 \cdot s$
- s → es la separación vertical entre armaduras
- f_{yk} → es el límite elástico de la armadura
- z_s → es el brazo mecánico de la armadura
- γ_s → es el coeficiente de seguridad del acero

Debido a la sencillez del procedimiento, en lugar de ilustrarlo con un ejemplo, se indica a continuación una tabla de valores de distancias máximas entre soportes o *"windpost"* para diferentes cuantías de armadura GEOFOR®. Los parámetros relativos a las características geométricas y mecánicas son los mismos que se han utilizado en los ejemplos anteriores, con objeto de poder comparar los resultados.

En un cerramiento de ½ pie castellano, y para una presión de viento q_e = 0,80 kN/m², se obtienen las siguientes distancias máximas entre elementos verticales de sustentación (soportes o *"windpost"*):

- Con armadura GEOFOR® 4080 cada 60 cm: $L_{máx}$ = 3,40 m
- Con armadura GEOFOR® 4080 cada 48 cm: $L_{máx}$ = 3,80 m
- Con armadura GEOFOR® 4080 cada 36 cm: $L_{máx}$ = 4,40 m
- Con armadura GEOFOR® 5080 cada 60 cm: $L_{máx}$ = 4,25 m
- Con armadura GEOFOR® 5080 cada 48 cm: $L_{máx}$ = 4,75 m
- Con armadura GEOFOR® 5080 cada 36 cm: $L_{máx}$ = 5,50 m

El único cálculo adicional que requiere esta solución se refiere al dimensionado de los elementos auxiliares, tales como los anclajes a los soportes y, en caso de ser necesarios, los *"windpost"* intercalados entre los mismos.

Los anclajes deben resistir un esfuerzo normal (de compresión o tracción, según se trate de presión o succión, respectivamente) igual a la resultante de la acción total de viento entre sustentaciones verticales.

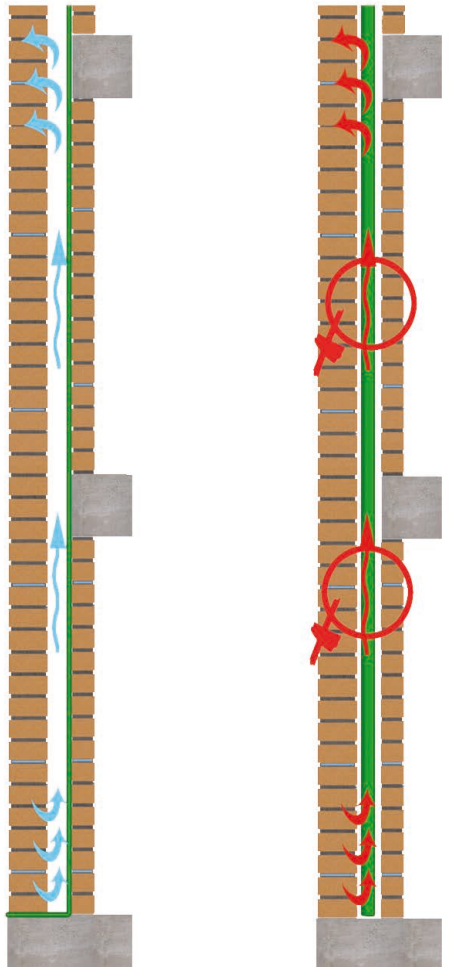
Los *"windpost"* intercalados deben transmitir, por flexión vertical, esa misma resultante a los forjados en los que se sustentan.

8.2.4 Fachada ventilada

La fachada ventilada es una solución constructiva que supone una mejora del comportamiento en servicio del cerramiento debido a la posibilidad de eliminación de los puentes térmicos en los encuentros de la fachada con los forjados y los soportes.

La fachada ventilada no difiere, desde el punto de vista constructivo y estructural, de las soluciones de fachada autoportante que se han descrito y analizado pormenorizadamente. El aspecto fundamental que caracteriza una fachada ventilada está relacionado con el comportamiento higrotérmico del cerramiento.

La fachada ventilada se compone esencialmente de una cámara interpuesta entre el edificio y la hoja exterior del cerramiento, por la que puede discurrir una corriente de aire entre la parte inferior y la superior, que evita la formación de humedades intersticiales, de forma que se preserven las condiciones idóneas del aislamiento térmico incorporado.



Fachadas ventilada y pasante

Respecto al control de la transferencia de energía en el cerramiento, el material de acabado de una fachada ventilada supone una primera barrera frente a las inclemencias del ambiente exterior y contribuye al aislamiento térmico, en mayor o menor medida, según sea su espesor y los procedimientos que se utilicen para conseguir la ventilación de la cámara.

La hoja exterior del cerramiento representa una segunda epidermis para el edificio, adelantando en el espacio el plano de incidencia de los efectos de la intemperie, lo que supone una mejora de las prestaciones referentes al ahorro energético, disipando en verano por convección la energía procedente de la radiación solar directa, y comportándose durante el invierno como un estrato de aislamiento térmico ventilado, lo que evita la infiltración de humedad en el material aislante.

Componentes de la fachada ventilada

Está formada por los siguientes elementos fundamentales:

- Una hoja exterior continua que no se apoya directamente en la estructura del edificio, con libertad de movimiento independiente de los movimientos propios de los demás elementos constructivos. Esta hoja exterior puede ser de material pesado de fábrica (*fachadas pesadas*); de placas delgadas de materiales pesados (*fachadas semipesadas*), o de placas de resinas o paneles sándwich metal / plástico / metal (*fachadas ligeras*). Su función fundamental es conformar la cámara ventilada, además de definir la imagen exterior del edificio.

- Una cámara de aire ventilada y drenada, cuya misión es impedir el paso del agua desde la hoja exterior hasta el interior del edificio, y evacuar la humedad hacia el exterior. Para ello, el espesor de la cámara debe tener un ancho mínimo de 4 cm (bastarían 3 cm según el C.T.E.).

- Una capa de material aislante térmico y barrera de vapor, cuando sea necesario, que debe ir adosada a la cara exterior de la hoja interior. Es conveniente que el material aislante sea continuo en toda la altura de la fachada, pasando por delante de los frentes de forjado, para evitar el puente térmico.

- Una hoja interior apoyada directamente en la estructura del edificio, que constituye el verdadero cerramiento del espacio interno habitable.

Requisitos de proyecto de la fachada ventilada

En las fachadas ventiladas con revestimiento pesado de fábrica, el requisito de estabilidad está determinado fundamentalmente por el peso propio de la hoja exterior y por la acción del viento. Las fachadas semipesadas y ligeras requieren ser soportadas por una subestructura de elementos portantes.

En cuanto a los requisitos funcionales, existen dos aspectos importantes que se deben tener en cuenta en el proyecto de fachada ventilada, cuya importancia depende del tipo al que pertenezca.

Uno de ellos se refiere a la necesidad de garantizar unas condiciones correctas de ventilación. Para ello, se debe

diseñar el encuentro de la parte superior de la fachada con el alero o con los elementos de la carpintería exterior, de manera que, si se disponen viseras de protección, éstas no impidan el tiro de la ventilación.

El otro aspecto está relacionado con la prevención frente al fuego. En las fachadas ventiladas de junta seca, el aislamiento térmico debe ser ignífugo, debido a que este material conforma una pared situada detrás del revestimiento exterior, en la que las láminas de corriente producidas por el efecto tiro, tal y como sucede en una chimenea, determinan condiciones propicias para la propagación de la llama. En las fachadas estancas formadas por piezas de albañilería recibidas con mortero, la posibilidad de propagación de llama en el interior de la cámara es similar a la de las fachadas convencionales.

En lo referente al comportamiento acústico del cerramiento, no cabe duda de que la fachada ventilada representa una contribución al requisito de protección frente al ruido exterior, como cualquier otra; sin embargo, este aspecto no constituye un determinante esencial en el proyecto de la fachada.

Por la configuración abierta de la fachada, cabe la posibilidad de que entre insectos, lo cual se puede evitar interponiendo rejillas que, sin impedir la ventilación, dificulten el acceso de los mismos.

Comportamiento térmico de la fachada ventilada

A los efectos de cuantificar la demanda energética del edificio, la fachada ventilada configura un sistema constructivo de aislamiento térmico por el exterior, desplazando el riesgo de condensaciones intersticiales desde la hoja interior y atenuándolo en la capa de aislamiento, debido a que la corriente de aire que se establece entre la hoja exterior y el aislamiento propicia la ventilación de la superficie exterior del aislante.

La masa y el color del material de acabado son factores que contribuyen a la inercia térmica de este componente. El revestimiento pesado determina una inercia térmica elevada en las transmisiones térmicas entre el ambiente exterior y la parte posterior de la cámara de aire.

Sin embargo, estos aspectos de las fachada ventiladas, como en cualquier otro sistema de cerramiento multicapa, tienen poca incidencia en la inercia térmica en el interior del edificio. Las consideraciones indicadas anteriormente son importantes sólo desde el punto de vista de la durabilidad del cerramiento.

La principal ventaja de las fachadas ventiladas desde el punto de vista de la demanda energética es que constituyen un elemento de atenuación de la radiación solar directa. El efecto de disipación de calor por convección predomina sobre el resto de los fenómenos de transferencia. Esta ventaja es especialmente notable en los climas cálidos.

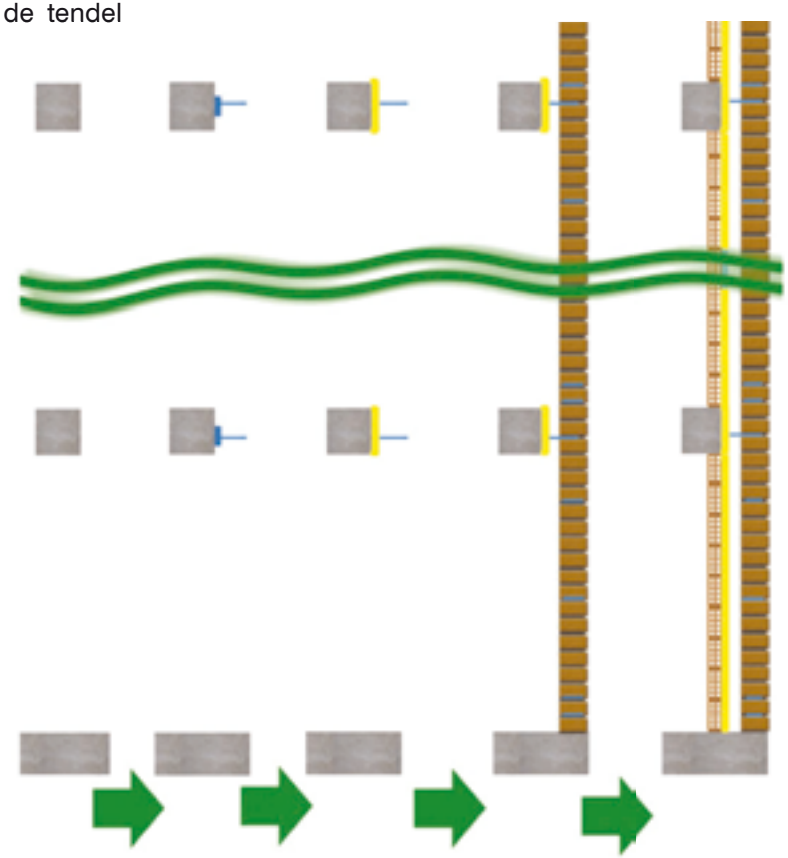
8.3 Proceso constructivo del *Sistema G.H.A.S.*®

Con el *Sistema G.H.A.S.*® es posible construir la fachada, tanto si es pasante como si es ventilada, siguiendo el mismo proceso que en las soluciones convencionales; es decir, ejecutando en primer lugar la hoja exterior. Para evitar puentes térmicos basta con revestir previamente los frentes de forjado y soportes con material aislante.

La hembrilla de los anclajes se fija en los elementos estructurales con anterioridad a la ejecución de la fachada, en la que se incorporan las *garras* de los mismos y la armadura de tendel que se precise por cálculo, a medida que se levanta el muro por el procedimiento habitual. De esta forma se facilita la supervisión y el *caravistero* no tiene que coordinar su trabajo con ningún operario de otro oficio.

La hoja interior se realiza en último lugar. El aislamiento térmico puede alojarse en la cámara continua, o puede colocarse adosado a la hoja interior; en este último caso no se precisa la continuidad de la cámara, y la hoja exterior del cerramiento puede estar en posición tangente a la estructura del edificio, sin separación significativa entre ambos elementos.

Tanto si la fachada es pasante como si es ventilada, es fundamental que el aislamiento quede lo más próximo posible de la hoja interior. Esto se puede conseguir colocando planchas rígidas procurando que quede la distancia necesaria de cámara mediante separadores, o utilizando para la hoja interior piezas cerámicas de gran formato que llevan el aislamiento incorporado por una de las caras. Son piezas machihembradas, que se reciben con yeso. El panel aislante o, en su caso, el machihembrado de las piezas de la hoja interior evita la caída de pasta en la cámara, que queda perfectamente limpia.



8.3.1 Formación de huecos

En el *Sistema G.H.A.S.*® los huecos son, aparte del elemento de arranque y coronación, los únicos puntos de contacto de las dos hojas del cerramiento.

Se deben tener en cuenta todas las prescripciones de carácter general indicadas para los huecos de las fachadas convencionales, haciendo especial hincapié en dos puntos fundamentales, que tienen una solución específica para el *Sistema G.H.A.S.*®: la impermeabilización y drenaje de la cámara en los dinteles, y el encuentro con los elementos rígidos tales como los vierteaguas, umbrales o albardillas.

Otro punto singular lo constituye el dintel, que es el elemento estructural que conforma la parte superior del hueco y debe servir para transmitir la carga que gravita sobre él. Sea cual sea el procedimiento utilizado para resolver el elemento estructural, es fundamental que exista uno para la hoja exterior y otro independiente para la hoja interior, puesto que el estado de solicitaciones de ambos es muy diferente. En el caso de que el hueco tenga que alojar una caja para la persiana y ésta continúe hasta el forjado no es necesario el dintel interior.

Como elemento estructural para la formación del dintel de la hoja exterior se puede utilizar un elemento específico o *cargadero*, o bien la propia fábrica constituida en viga, con armadura de tendel en las primeras hiladas. Independientemente de que se utilice uno u otro sistema, el modelo de análisis para la obtención de solicitaciones corresponde al de *viga ordinaria* o al de *viga de gran canto* en función de la relación entre la luz y la altura del dintel.

Si el cargadero está constituido por un perfil metálico, debe estar debidamente protegido contra la corrosión según el grado de exposición de la fachada.

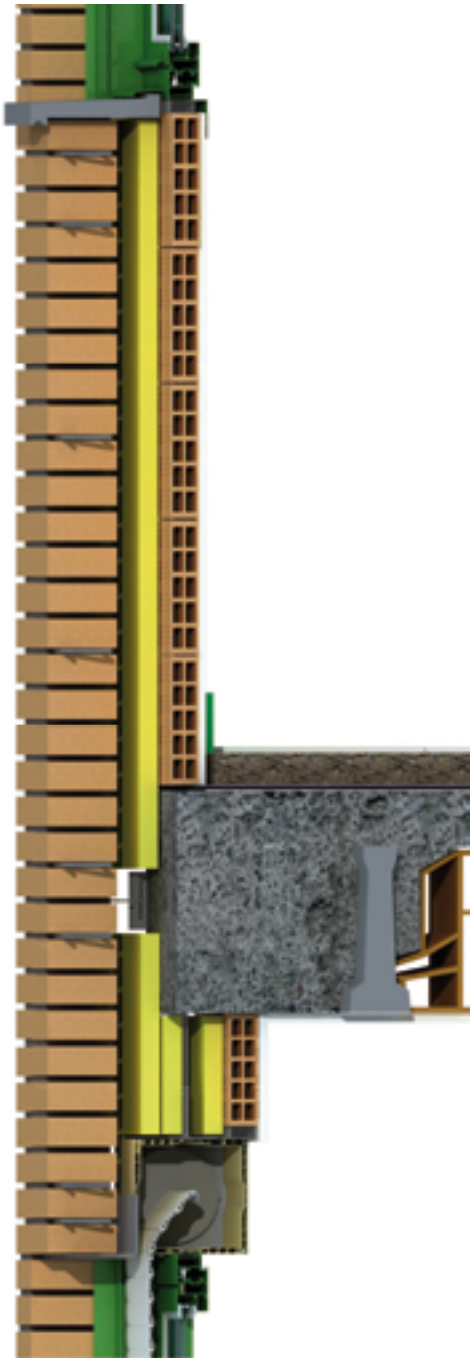
El perfil puede ir colgado del forjado, que es la solución habitual para los huecos corridos en horizontal, o entregado en las jambas, si la dimensión del hueco lo permite. La entrega debe asegurar un buen reparto de la carga; suele ser suficiente con 10 cm o el canto del dintel. La junta de encuentro debe coincidir con uno de los tendeles del resto del muro y mantener el mismo espesor.

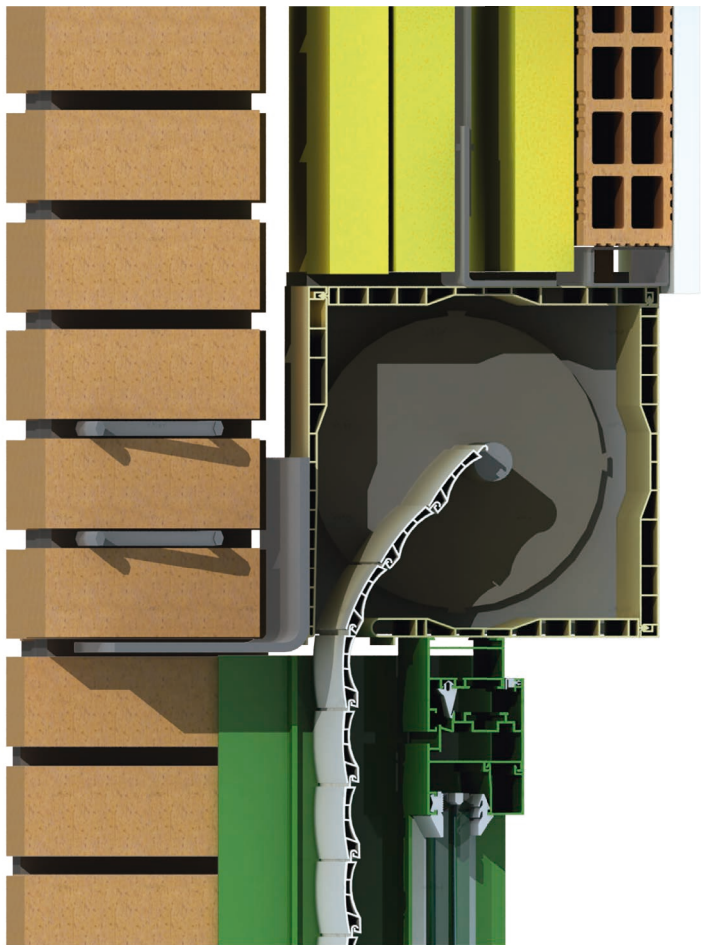
Para las soluciones de dintel con fábrica armada existen piezas cerámicas especiales para conformar la primera hilada, en las que se puede alojar la armadura necesaria, y que se aparejan con el resto de la fábrica, dando un aspecto estético de continuidad.

Los alféizares y umbrales no se deben apoyar simultáneamente en las dos hojas del cerramiento. Cuando la carpintería se sitúa a haces interiores, la solución consiste en apoyar el elemento en la hoja exterior y resolver el encuentro con la carpintería mediante solape. Es importante que la carpintería tenga su propio vierteaguas.

8.3.2 Remate de los petos de azotea

La pieza de remate de los petos es la albardilla. Si el peto se resuelve doblando la hoja una buena solución consiste en resolver la albardilla con dos elementos diferentes, solapados para evitar la entrada de agua y apoyados cada uno en cada hoja.





9. *Sistema STRUCTURA®*

9.1 Razón de ser del *Sistema STRUCTURA®* 390

9.2 Descripción del *Sistema STRUCTURA®* 392

9.2.1 Características constructivas 394
9.2.2 Características estructurales 394
9.2.3 Características higrotérmicas 397

9.3 *Sistema STRUCTURA®* para fachadas ventiladas de ladrillo cara vista 398

9. Sistema STRUCTURA®

La aprobación del Código Técnico de la Edificación ha supuesto un hito importante en la manera de concebir, proyectar y resolver una buena parte de las unidades constructivas de los edificios. En este sentido, los cerramientos de ladrillo cara vista constituyen una de las unidades más afectadas por la nueva normativa.

El Código Técnico ha cubierto el vacío legal en el que estaban sumidos los cerramientos de fábrica desde que dejaron de ser muros de carga. En el marco normativo actual esta unidad constructiva se ve afectada por cinco Documentos Básicos: *Seguridad Estructural*, *Ahorro de Energía*, *Salubridad*, *Seguridad en caso de Incendio* y *Protección frente al Ruido*. Este cambio sustancial en el panorama normativo, contra lo que pudiera parecer, no supone ninguna restricción al uso del ladrillo cara vista como material de acabado de los cerramientos sino que, por el contrario, abre un amplio campo de posibilidades para el uso de este material. Porque, si bien es cierto que las exigencias en cuanto a prestaciones se han elevado considerablemente, sobre todo las relacionadas con la seguridad estructural y la eficiencia energética, no es menos cierto que la misma normativa que impone más requisitos aporta también las vías adecuadas para conseguirlos.

Simultáneamente a la gestación del Código Técnico, los fabricantes de ladrillo agrupados en la *Sección Cara Vista* de Hispalyt, en estrecha colaboración con el Departamento Técnico de GeoHidrol, S.A., han llevado a cabo rigurosos estudios para optimizar el empleo del ladrillo cara vista en los cerramientos de fachada, explorando las posibilidades y recursos que ofrece la nueva normativa. El resultado de estos estudios junto con la experiencia acumulada durante décadas por la empresa GeoHidrol, S.A. en la investigación y comercialización de sistemas para fábricas, se han decantado en el *Sistema Structura*®, que constituye una propuesta de extraordinaria simplicidad constructiva para afrontar el reto que supone la nueva normativa con soluciones competitivas y de elevadas prestaciones, para los cerramientos de fachada de ladrillo tradicional.

El *Sistema Structura*® se fundamenta en el aprovechamiento del potencial que tienen los muros de fábrica de ladrillo para ser utilizados como elementos estructurales. La innovación más destacada del sistema es la recuperación del carácter tradicional de las fábricas de material cerámico como elementos portantes de sí mismos. El *Sistema Structura*® utiliza el propio muro de fábrica como elemento estructural fundamental y los elementos *G.H.A.S.*® como recursos adicionales para resolver requisitos de estabilidad, estanquidad y ahorro de energía. El resultado final es una propuesta que concilia la tradición milenaria de las piezas de ladrillo con la innovación y modernidad de una solución que goza de altas prestaciones técnicas y funcionales.

El tipo constructivo que desarrolla el *Sistema Structura*® es el *cerramiento autoportante*, que tiene como principal elemento de sustentación al propio muro de ladrillo y permite el paso de una cámara continua con aislamiento. Las prestaciones estructurales y funcionales que requiere el cerramiento se consiguen con los elementos *G.H.A.S.*® dimensionados en cada caso para los requisitos de estabilidad, resistencia, estanqueidad y control energético exigidos por la normativa.

La posibilidad de disponer aislamiento continuo supone una importante mejora en la eficiencia energética del cerramiento respecto de los sistemas convencionales. El *Sistema Structura*® permite, además, dotar de ventilación a la cámara interpuesta entre la hoja exterior del cerramiento y el edificio, lo que incrementa notablemente las prestaciones higrométricas, incorporando a la fachada de ladrillo cara vista todas las prestaciones de las *fachadas ventiladas*.

El campo de aplicación del *Sistema Structura*® es muy amplio. Con los procedimientos del análisis disponibles en la normativa y los recursos auxiliares disponibles en el mercado, ofrece soluciones viables para una amplia gama de edificios que abarca, desde los destinados a uso residencial o de oficina, con paños de fachada de proporciones geométricas relativamente modestas, hasta los edificios de uso industrial o superficies comerciales, con grandes lienzos de fachada, pasando por obras de carácter singular como revestimiento de túneles o trabajos de rehabilitación.

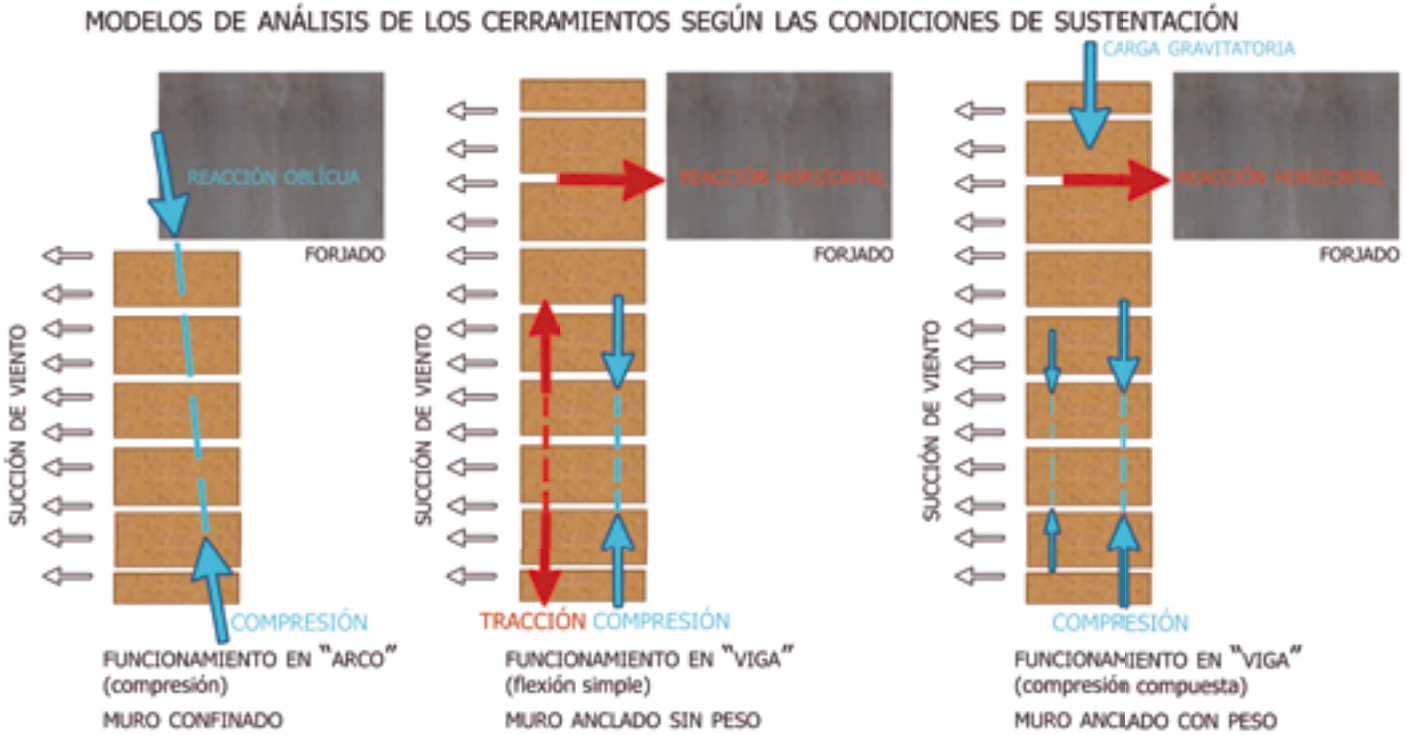
9.1 Razón de ser del Sistema *STRUCTURA*®

La normativa actual no deja duda acerca de la viabilidad, a priori, de cualquier solución constructiva para los cerramientos de fachada.

Desde el punto de vista del comportamiento mecánico, los diferentes sistemas que se vienen utilizando para resolver los cerramientos se pueden agrupar en dos tipos fundamentales. El primer tipo corresponde a los cerramientos que se sustentan sobre sí mismos, en el que se pueden incluir todos los concebidos como muros de carga. El otro tipo corresponde a los cerramientos que se sustentan en los forjados planta a planta, bien por confinamiento cuando se componen de materiales que toleran aceptablemente la compresión, o bien por suspensión como es el caso de los muros cortina, idóneos para materiales que toleran las tracciones.

No cabe duda de que, si el cerramiento está constituido por láminas o piezas de muy pequeño espesor, no existe alternativa posible y su sustentación se debe realizar a intervalos muy pequeños. A veces incluso la modesta distancia entre forjados o soportes resulta excesiva y requieren una subestructura auxiliar para disponer las conexiones necesarias a la estructura del edificio.

Este no es el caso de los muros de fábrica de ladrillo tradicional. No tiene sentido recurrir a dispositivos adicionales para sustentar elementos que han servido tradicionalmente de soporte. Incluso los muros de ½ pie de espesor se han utilizado desde tiempo inmemorial para soportar, no sólo su propio peso, sino una significativa carga gravitatoria procedente de los forjados. Y nunca han dado muestras de un comportamiento deficitario cuando su misión estructural era la transmisión de carga gravitatoria. Por el contrario, desde antiguo se sabe que el mejor recurso para resolver situaciones comprometidas en los muros, procedentes de empujes o acciones horizontales, era la aportación de carga gravitatoria *extra*.



Por otra parte, si se exploran y analizan los modelos disponibles en la normativa actual para verificar el comportamiento mecánico de los cerramientos de fábrica, se puede extraer una importante conclusión de carácter general que ya ha sido destacada en el capítulo de *"Requisito de seguridad estructural"*. Esta importante conclusión es que, sea cual sea el procedimiento constructivo que se utilice y sea cual sea el modelo de análisis que le corresponda, la carga gravitatoria es fundamental para el comportamiento mecánico, y siempre tiene carácter favorable ante las acciones horizontales. En los cerramientos confinados la carga gravitatoria es imprescindible para generar *empujes* y en los cerramientos anclados es beneficiosa para contrarrestar *tracciones*.

Este tipo de reflexiones y una mirada hacia la forma de concebir los elementos de fábrica que tenían nuestros mayores son argumentos suficientes para replantear la forma de resolver los cerramientos de ladrillo de los edificios modernos. Si el cerramiento de fábrica se concibe como una piel es un contrasentido encastrarla en la estructura del edificio porque tarde o temprano acabará formando parte de ella. Por otra parte, si la piel está constituida por un material pétreo con suficiente porte, es un dislate intentar suspenderlo como si de una cortina se tratase, por muy sofisticado o ingenioso que sea el artilugio que se utilice para ello. Y, por último, si el material utilizado como cerramiento tiene capacidad para trasportar carga ajena, no hay razón para rehuir su propio peso intentando disiparlo en cada planta del edificio con difíciles detalles de encuentro o engorrosos aparatos de apoyo.

De los sucesivos ejemplos analizados en capítulos anteriores se puede extraer como conclusión general que los procedimientos constructivos que tienen como objetivo transmitir el peso del cerramiento a los forjados planta a planta, o que interrumpen de alguna manera la transmisión del propio peso hacia las plantas bajas, aunque pueden ser viables, si se examinan con rigor resultan cuando menos innecesarios siempre que no lo exija el diseño de la fachada, en muchos casos contraproducentes y siempre costosos, bien por la complejidad constructiva que supone el detalle de encuentro del cerramiento con los forjados, o bien por la necesidad de aparatos de apoyo adicionales. Interrumpir en cada planta la continuidad vertical del cerramiento no tiene ninguna justificación desde el punto de vista del comportamiento mecánico, ni tiene tampoco ninguna contraprestación explícita en la normativa.

Las soluciones más sencillas desde el punto de vista constructivo y las más seguras desde el punto de vista del análisis estructural, son aquellas en las que el peso propio del cerramiento se transmite sin interrupción de continuidad a la planta de arranque.

Es importante destacar aquí que el recurso más rentable de todos los incorporados en el DB SE-F para verificar las prestaciones estructurales de los cerramientos es la posibilidad de incorporar el peso en el análisis. Este recurso no supone un coste adicional ni una mayor complejidad constructiva de la solución.

La incorporación del peso del cerramiento como carga gravitatoria es rentable, desde el punto de vista del análisis, porque se consigue incrementar gratuitamente la resistencia a flexión de la fábrica, lo que permite aumentar el rango geométrico de soluciones viables con espesor de ½ pie; y desde el punto de vista del coste de la solución, por el ahorro en dispositivos auxiliares de apoyo y una enorme simplificación del proceso constructivo.

Procurar que los cerramientos tengan peso, el mayor posible dentro de los límites determinados por su capacidad resistente a compresión, significa recuperar para estos elementos constructivos el máximo potencial que tienen como elementos estructurales portantes de sí mismos. Si la tracción debida a las acciones horizontales se contrarresta con la compresión debida al peso, se reduce en la misma medida y gratuitamente el riesgo de fisuración.

Además, con la fábrica comprimida y la posibilidad de intercambiar flexión horizontal por flexión vertical, se puede eliminar o, al menos, reducir la necesidad de armadura adicional en paños largos. En la búsqueda de optimizar el coste de cualquier solución constructiva no hay que perder de vista que las compresiones en las fábricas se resuelven sin coste adicional; mientras que las tracciones precisan suplemento con armaduras de acero, además de llevar implícito el inevitable riesgo de fisuración[1].

1 Con la formulación del CTE, hasta un máximo en torno a ocho o diez plantas, el paño de fachada que resulta en mejores condiciones estructurales siempre es el paño de la planta baja.

Todo lo anterior viene a confirmar lo que ha sido tradicionalmente la regla de oro del comportamiento mecánico de las fábricas: *"cuanto más peso, mejor".*

Estas razones y numerosos análisis realizados para fachadas de ladrillo en diferentes condiciones de sustentación y geometría, constituyen el fundamento del *Sistema Structura®* que utiliza como tipo constructivo el *cerramiento autoportante*, cuyas características específicas se han detallado en capítulos precedentes y se matizarán en apartados posteriores.

El *Sistema Structura®* para construir fachadas de ladrillo cara vista constituye una muestra de las numerosas posibilidades que ofrece la nueva normativa en la optimización del uso de los materiales cerámicos, con objeto de conseguir soluciones avanzadas en lo que se refiere a sus prestaciones mecánicas y funcionales, utilizando piezas cuya larga tradición supone la mejor garantía de idoneidad para su empleo en la construcción de elementos de cerramiento, y sin necesidad de incrementar sensiblemente el coste del producto final.

El análisis riguroso y sistemático, tanto del comportamiento de los materiales como de los procedimientos que ofrece la técnica actual, para afrontar el reto que supone la nueva normativa, debe producir como resultado la posibilidad de utilizar los sistemas tradicionales con la confianza que proporciona el conocimiento de lo que se utiliza, y aumentar el campo de aplicación de las unidades constructivas con sistemas innovadores y, no por ello, más costosos.

9.2 Descripción del *Sistema STRUCTURA®*

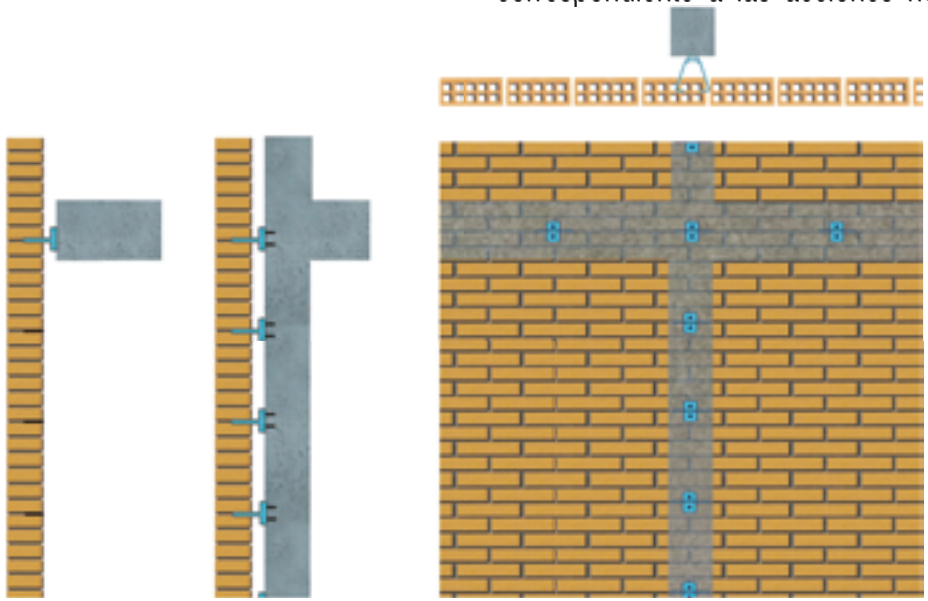
El *Sistema Structura®* desarrolla el tipo de *cerramiento autoportante* de ladrillo cara vista, en el que el principal elemento de sustentación lo constituye el propio muro de ladrillo.

El sistema se caracteriza fundamentalmente porque la hoja exterior del cerramiento se construye paralela a la estructura del edificio y la transmisión del peso se realiza a través de la propia fábrica, aprovechando su capacidad resistente a compresión y contribuyendo a la resistencia frente a las acciones horizontales. Las prestaciones que requiere el sistema se resuelven con el procedimiento constructivo *G.H.A.S.® (GeoHidrol Advanced System)* que aporta los dispositivos auxiliares necesarios para garantizar los requisitos de estabilidad, estanquidad y control energético.

El sistema permite, en los casos en los que se considere oportuno, el paso de una cámara con aislamiento continuo en toda la altura del cerramiento.

Con esta solución se consiguen tres objetivos fundamentales: aprovechar el peso de toda la hoja exterior en el análisis frente a acciones horizontales; mejorar el comportamiento higrotérmico del cerramiento; y eliminar el conflicto constructivo que supone su confinamiento entre los elementos estructurales del edificio.

El único elemento auxiliar imprescindible del sistema, relacionado con el requisito de seguridad estructural lo constituye el dispositivo de anclaje o retención frente a la tendencia al vuelco[2]. Los anclajes cumplen dos misiones fundamentales: garantizan la estabilidad de la hoja exterior, suministrando la totalidad de la reacción correspondiente a las acciones hori-



zontales; y limitan la esbeltez del paño frente al fenómeno del pandeo que constituye, en este caso, una de las principales restricciones del comportamiento mecánico de la fachada en edificios de altura.

Los dispositivos de anclaje deben conectar la hoja exterior a los elementos estructurales previstos para resistir y transmitir las acciones horizontales hasta la cimentación. Se pueden fijar, por consiguiente, a soportes, frentes de forjado o a un muro perimetral exterior.

Para poder analizar rigurosamente este tipo constructivo es muy importante que no exista incertidumbre acerca del valor de la carga gravitatoria asignada al cerramiento. Ello se consigue evitando el efecto de trasvase de carga de los forjados al cerramiento a través de los dispositivos de anclaje, que constituyen el único punto de contacto entre ambos elementos[3].

El trasvase de carga se evita impidiendo la posibilidad de desarrollar reacción vertical en la sustentación. Por esta razón es fundamental, para conseguir que los esfuerzos del cerramiento estén controlados, que los anclajes suministren una reacción de forma selectiva, impidiendo determinados movimientos y permitiendo otros.

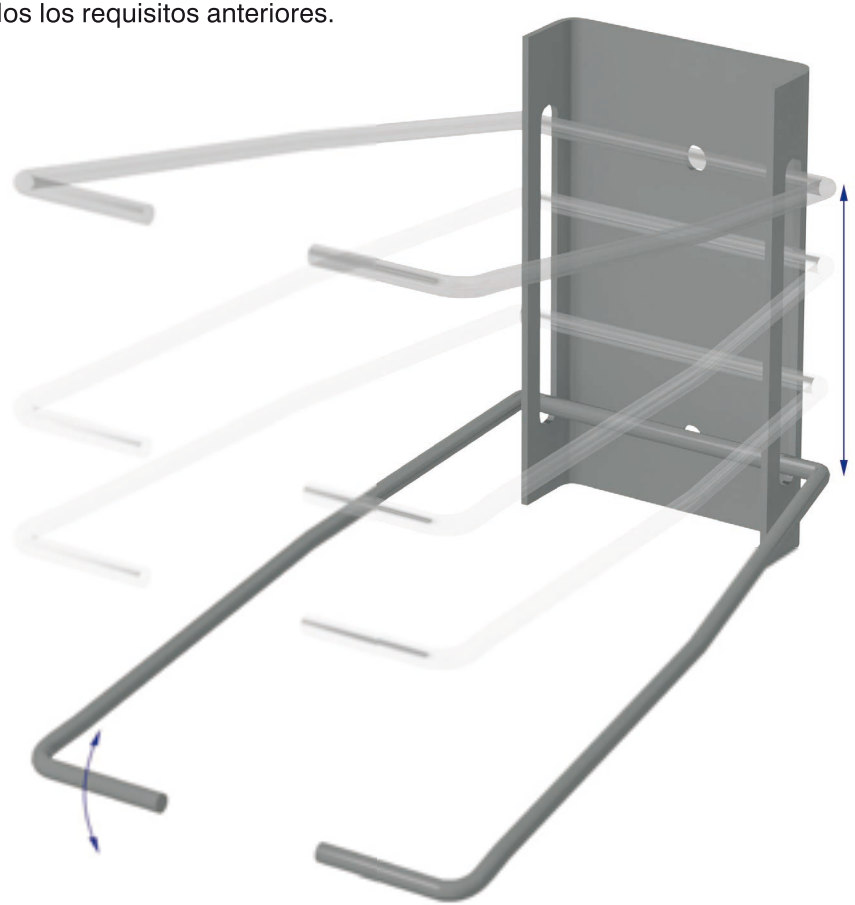
El mejor diseño de anclaje es el que permite libertad total de los movimientos contenidos en el plano del cerramiento (vertical y horizontal), evitando únicamente el movimiento de vuelco. De esta forma, no sólo se evita el trasvase de carga mencionado, sino el riesgo de acumulación de tensiones por coacción a movimientos horizontales, como pueden ser los debidos a la expansión por humedad.

Desde el punto de vista de la durabilidad, los dispositivos de anclaje son elementos sometidos en cierta medida al ambiente exterior, y de imposible mantenimiento. Por ello, deben tener la protección adecuada a la clase de exposición correspondiente al cerramiento en el que se ubican.

Los anclajes GEOANC CDM® específicamente diseñados para soluciones de cerramiento autoportante cumplen todos los requisitos anteriores.

2 Los dispositivos de anclaje se utilizan también como recursos auxiliares en soluciones convencionales para restituir la condición de *"entrega"* cuando es localmente deficitaria. Sólo en el caso de *cerramientos autoportantes* son imprescindibles.

3 Si la fachada está apoyada en el arranque en un elemento rígido, el trasvase de carga gravitatoria, en caso de producirse, siempre es del forjado al muro, y no al revés, como predican algunas reglas al uso.



9.2.1 Características constructivas

La principal característica constructiva del *Sistema Structura*® es la eliminación del conflicto que supone el encuentro de la hoja exterior del cerramiento con los elementos estructurales del edificio.

La hoja exterior del cerramiento se construye sin interrumpir su continuidad en toda la altura que permita el cálculo y en toda la longitud limitada por la necesidad de juntas verticales de movimiento. El espesor del cerramiento no se estrangula al paso por forjados o soportes.

Su posición respecto de la estructura del edificio es paralela a la tabica exterior de los forjados, por lo que no se precisan plaquetas de revestimiento del frente de los mismos, ni cortes o piezas especiales para ajustar el replanteo a la altura de cada planta. Además se puede conseguir un perfecto plomo y planeidad, con independencia de las tolerancias geométricas de la estructura.

La sustentación en el arranque se realiza sobre un elemento estructural que, a efectos del análisis, se debe considerar con rigidez infinita. Esta situación puede corresponder al arranque del cerramiento sobre la cabeza de un muro de sótano, una solera de hormigón, una viga de borde de forjado o una zapata corrida de cimentación. Si hubiere soportales o grandes huecos en planta baja, puede arrancar sobre una viga cargadero, con suficientes puntos de anclaje a la estructura del edificio[4].

La condición de entrega en los forjados o soportes se sustituye por dispositivos de anclaje, que se colocan previamente, por lo que es posible supervisar su correcta puesta en obra con anterioridad a la ejecución del muro. Este proceso constructivo de conexión evita que los forjados y soportes se acusen al exterior.

Si la hoja exterior se separa convenientemente de la estructura del edificio se puede conseguir una cámara de aire continua que, a su vez, puede estar ventilada o no, según se precise para cumplir el resto de condiciones relativas a la eficiencia higrotérmica del cerramiento.

9.2.2 Características estructurales

La continuidad constructiva de la hoja exterior del cerramiento, que caracteriza el *Sistema Structura*®, se traduce en la continuidad de la acción gravitatoria debida a su propio peso, lo que posibilita que la fábrica trabaje en buena medida a compresión, que constituye el comportamiento estructural más eficaz de los materiales pétreos. En la misma medida, el contrarresto de las acciones horizontales se consigue reduciendo el coste en armaduras adicionales y el riesgo de fisuración.

El modelo estructural de referencia para el análisis de la hoja exterior es el *modelo placa* sustentada en los cuatro bordes, con cargas perpendiculares a su plano, que es el modelo más rentable de los sancionados por el DB SE-F, tal como ha quedado de manifiesto en los ejemplos analizados. Los dispositivos de anclaje a soportes y forjados suministran la reacción necesaria en las sustentaciones frente a las acciones horizontales.

La reacción selectiva que suministran los anclajes permite el control de todos los movimientos y esfuerzos del cerramiento, lo que supone poder realizar un análisis y dimensionado estricto, optimizando al máximo el coste de la solución.

Con objeto de dar una idea de las proporciones de paños a los que se puede llegar en cerramientos autoportantes de ½ pie de ladrillo, aplicando el método de las líneas de rotura sancionado por el DB SE-F y expuesto en el capítulo de *Requisitos*, se presentan a continuación las soluciones tabuladas para los valores habituales de resistencia de fábricas de ladrillo cerámico perforado, con junta de mortero ordinario y con una cuantía media de armadura de tendel[5]. Las soluciones tabuladas permiten deducir, a simple vista, la influencia que tienen los parámetros geométricos y la presencia de carga gravitatoria en la viabilidad y economía de la solución constructiva.

Para reducir el número de las variables de la tabla, se han considerado los valores pésimos, tanto para la obtención de solicitaciones (máxima presión de viento deducida de la aplicación del DB SE-AE), como para determinar la capacidad resistente (mínima resistencia a compresión y flexión de la fábrica deducidas de las tablas 4.4 y 4.6 del DB SE-F), de forma que se puedan aplicar, a favor de la seguridad, en cualquier caso sin restringir su generalidad.

Debido a que la condición de sustentación del borde superior es fundamental en los resultados del análisis, en la tabla se destacan los valores que corresponden a la última planta (sin continuidad en cabeza). También conviene indicar que, aunque en las tablas aparece la notación de *"altura máxima de planta de arranque"*, los valores de

la tabla sirven para comprobar cualquier planta tipo intermedia, cuya cota medida desde la coronación sea la indicada en la cabecera[6].

La principal conclusión, fundamental para el proyectista en la fase de diseño, que se puede extraer de la tabla adjunta, es que las verdaderas variables que condicionan el dimensionado frente a las acciones horizontales son de tipo geométrico. En términos cuantitativos, y refiriéndonos a un paño tipo con ladrillo perforado de formato castellano, la última planta con altura típica de vivienda (en torno a 2,70 m) necesita una cuantía media de armadura a partir de luces medias (5,00 m); mientras que la penúltima sólo necesitaría una cuantía mínima; y el resto se podría resolver sin armadura, con luces de paños de 6,00 m. Si se utiliza formato catalán los rangos viables de luces y alturas son mayores.

Para luces modestas (en torno a 4,50 m) el paño de la penúltima planta y todos los inferiores pueden adquirir alturas significativamente elevadas, lo que permite utilizar esta solución constructiva en situaciones singulares, como puede ser el revestimiento de túneles o las obras de rehabilitación, sin forjados aparentes en el plano de fachada.

Otra conclusión fundamental, que puede resultar interesante para la dirección facultativa en la fase de ejecución, es que la resistencia a compresión de la fábrica, incluso con la correspondiente penalización que supone el pandeo, sólo determina el dimensionado de la fachada en edificios de un número elevado de plantas, y sólo si se trata de paños con luces considerables (entre 5,00 y 6,00 m). Esta circunstancia permite omitir engorros ensayos en obra para verificar la resistencia de los materiales (piezas y mortero) en casos de edificios con altura moderada.

La resistencia a flexión vertical es prácticamente un invariante para los muros de fábrica de ladrillo (sólo oscila entre 0,10 N/mm^2 y 0,15 N/mm^2). Además, el valor es tan bajo que, cuando se considera el peso en el análisis, sólo tiene un carácter testimonial, por lo que también se pueden omitir los ensayos necesarios para la constatación de este parámetro. La tabla se ha confeccionado con el valor más bajo del rango permitido.

La resistencia a flexión horizontal tiene una horquilla más amplia de valores (oscila entre 0,40 N/mm^2 para morteros ordinarios y 0,15 N/mm^2 para morteros de junta delgada). Pero esta circunstancia sólo tiene trascendencia en fábricas no armadas, puesto que cuando existe armadura de tendel no se contabiliza la resistencia a flexión horizontal de la propia fábrica.

Por último, es interesante destacar el enorme rango de valores viables para resistir acciones horizontales utilizando como único recurso la capacidad resistente de la propia fábrica. En la mayoría de los casos en los que se dispone del peso correspondiente a dos o tres plantas, y la altura del paño no supera los 3,00 m, no se precisa armadura adicional para resistir los valores de acción horizontal que establece la normativa en las situaciones más agresivas.

Hay que destacar también que en la solución constructiva de fachada autoportante anclada a la estructura la condición de *"entrega"* no se refiere a la fábrica en los forjados, sino a los anclajes en la fábrica. Por consiguiente, para cumplir esta condición basta con utilizar una garra con suficiente ancho, pero no existe conflicto con las tolerancias en el replanteo de las tabicas de los forjados. Tampoco se requiere ninguna condición de rigidez o limitación de flecha en los forjados, excepto en el elemento de arranque, pudiéndose garantizar en todo momento el valor de las solicitaciones y los movimientos de la fachada.

4 En el caso de arranque sobre elementos flectados (viga de forjado, zapata corrida o viga cargadero) la condición de rigidez infinita supone limitar la flecha activa del elemento al valor de 1/1000 de la luz.

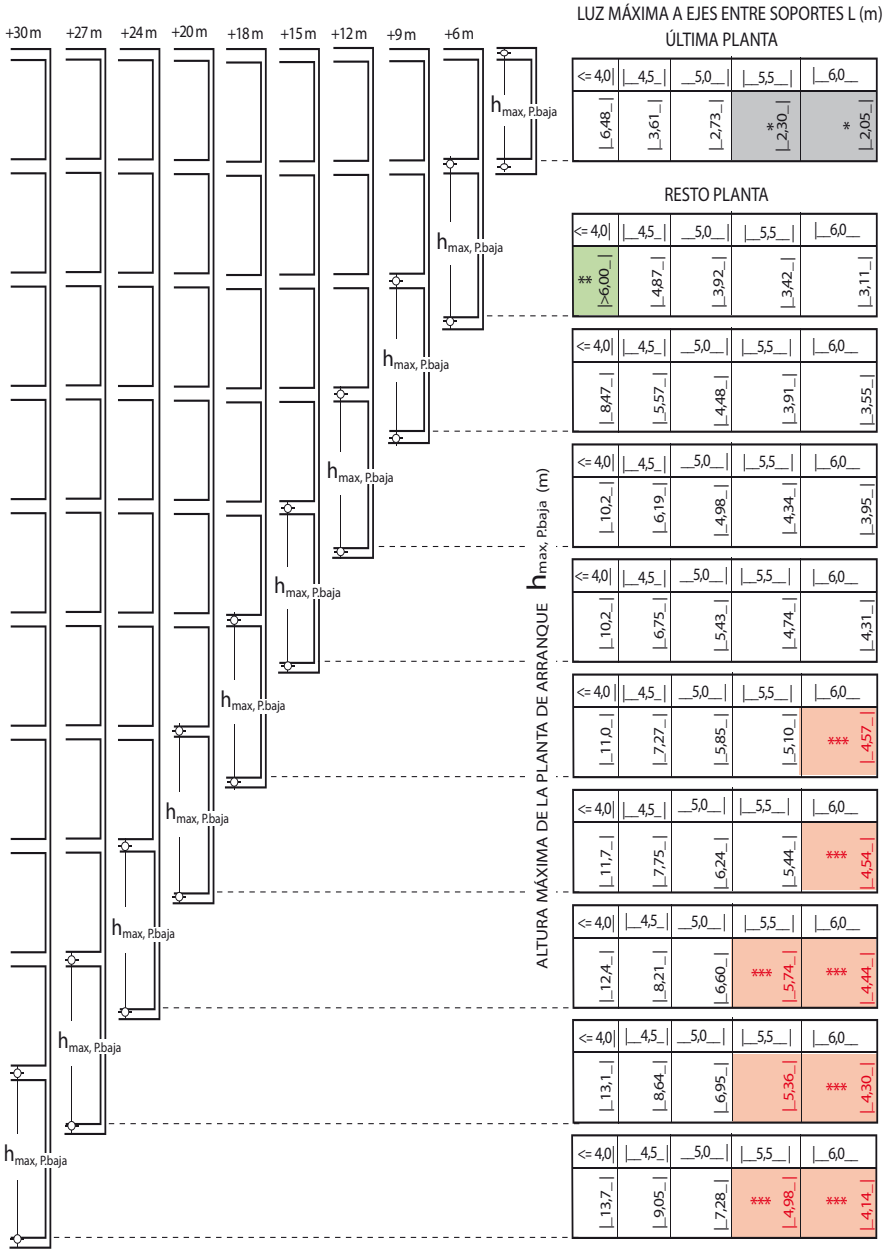
5 Fuente: *"Proyecto cooperativo de análisis de la problemática y las soluciones más adecuadas para la construcción de muros no portantes de fábrica de ladrillo cerámico"*. PROFIT liderado por Hispalyt . Año 2006: *"Cerramientos Autoportantes"*. Estudio realizado por M.C. del Río Vega y E. Sánchez Amillategui.

6 La indicación de *"altura máxima de planta de arranque"* es oportuna porque, generalmente, la planta baja tiene una altura mayor que el resto de las plantas tipo y, siempre, es la que tiene mayor solicitación a esfuerzo normal con pandeo, por lo que debe ser objeto de un análisis específico. Lógicamente, los resultados valen para cualquier nivel aunque, en rigor, no sea el nivel de arranque.

* ALTURA INFERIOR A 2,50 m (vale para espacios aprovechados bajo cubierta)

** LA ALTURA NO INTERVIENE (vale para cualquier altura dentro del rango establecido)

*** LA ALTURA ESTÁ POR PANDEO(se puede incrementar utilizando piezas o morteros más resistentes)



LUZ MÁXIMA A EJES ENTRE SOPORTES L (m)

ÚLTIMA PLANTA

<= 4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
6,48	3,61	2,73	** 2,30	* 2,05

RESTO PLANTA

<= 4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
** >6,00	4,87	3,92	3,42	3,11
8,47	5,57	4,48	3,91	3,55
10,2	6,19	4,98	4,34	3,95
10,2	6,75	5,43	4,74	4,31
11,0	7,27	5,85	5,10	*** 4,57
11,7	7,75	6,24	5,44	*** 4,54
12,4	8,21	6,60	*** 5,74	*** 4,44
13,1	8,64	6,95	5,36	*** 4,30
13,7	9,05	7,28	*** 4,98	*** 4,14

FORMATO CASTELLANO

SERIE: LADRILLO PERFORADO CON JUNTA NORMAL DENSIDAD 15 kN/m^3

ZONAS EÓLICAS: A,B y C

ESBELTEZ DEL EDIFICIO:<=5

Presión cinámica q_b=0,52kN/m^2

Coeficiente Eólico c_p=0,8

Presión del viento $c_e=q_t \cdot c_e \cdot c_p$=C.52[<N/m^2]·2,0·0,8= 0,832 [kN/m^2]

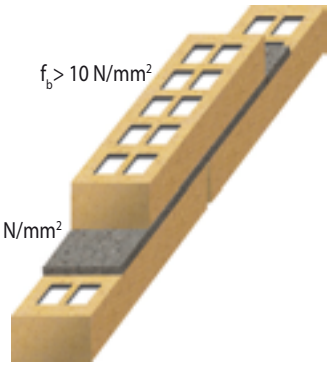
*NOTA: coeficiente de exposición ce=2,0
(Según DE SE-AE 3.2.2, para edificios urbanos de hasta 8 plantas)
coef. seg. material γ_{ly}=2,2 (categorías: piezas I; ejecución B)
coef. seg. acciones γ_q=1,5

f_b> 10 N/mm^2

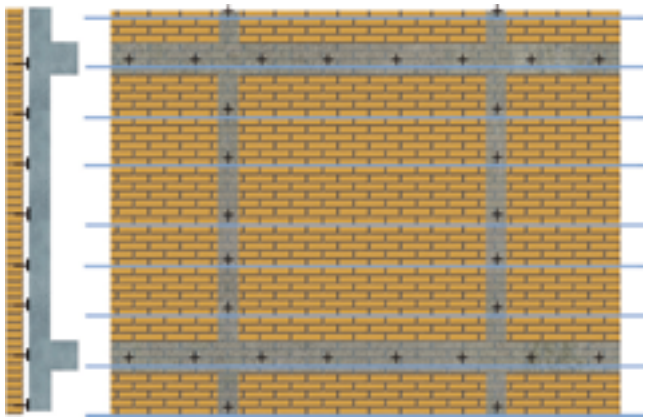
f_k= 4 N/mm^2

f_{xk1}= 0,10 N/mm^2

f_m> 5 N/mm^2



PAÑO INTERIOR



FÁBRICA ARMADA CON CUANTÍA MEDIA

ϕ4 mm; ancho 80 mm cada 48 cm (8 hiladas)

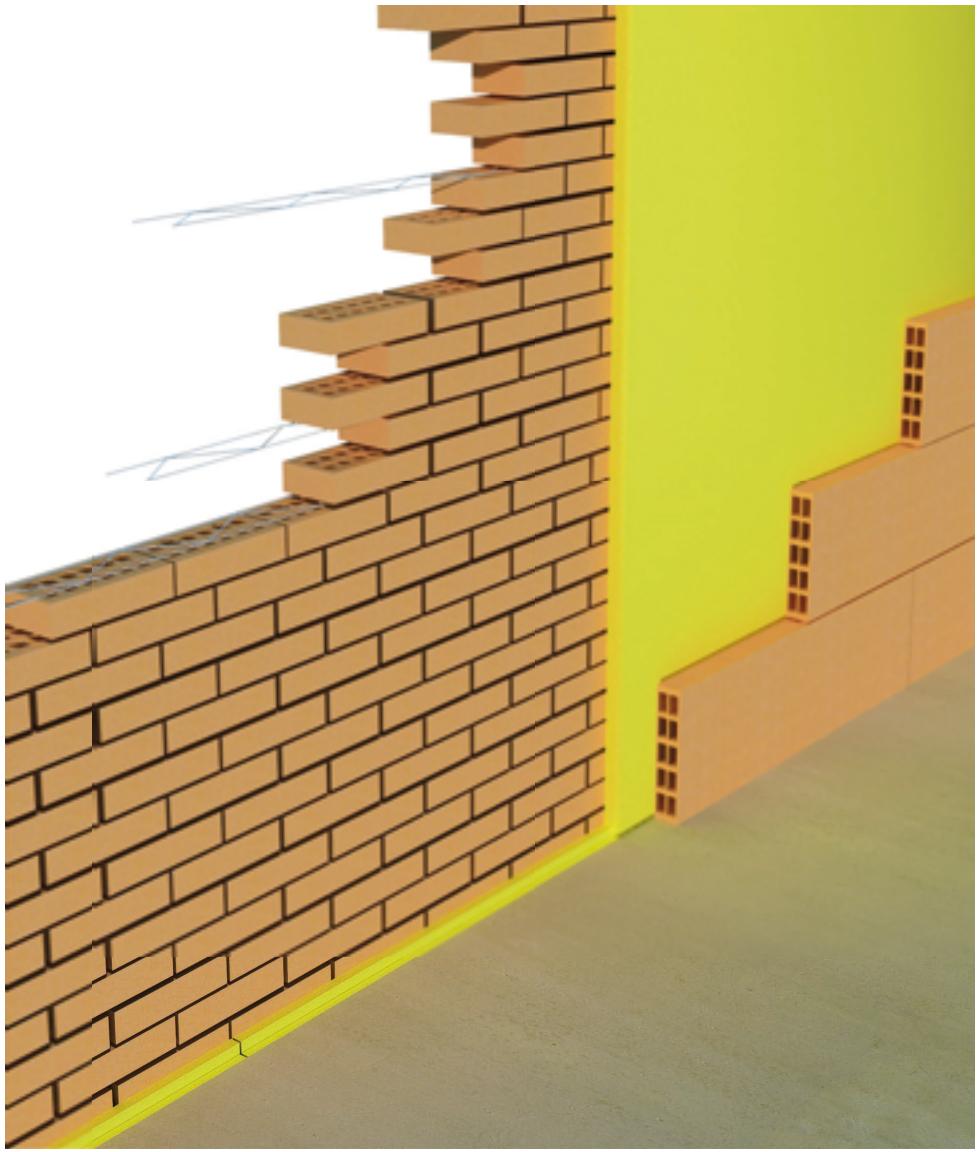
Debido al beneficio que supone la carga gravitatoria se puede admitir que, a igualdad del resto de condiciones (acción horizontal, luces, altura, espesor, etc.), una vez verificado el requisito de resistencia frente a la acción de viento en la última planta, el requisito se cumple en todas las demás, siempre que las condiciones de sustentación de los paños sean similares.

No obstante, la planta de arranque debe ser objeto de una comprobación adicional a compresión con pandeo, que se puede obviar en edificios de menos de cuatro plantas. En la tabla se destacan mediante sombreado las situaciones en las que el dimensionado está condicionado por la compresión incluyendo pandeo. Para valores bajos de resistencia, esta circunstancia se produce a partir de unas ocho plantas. Utilizando piezas que existen en el mercado con resistencias mucho mayores, y en situaciones de esbeltez habitual, el límite por compresión y pandeo de una fachada autoportante puede estar en torno a las doce plantas.

9.2.3 Características higrotérmicas

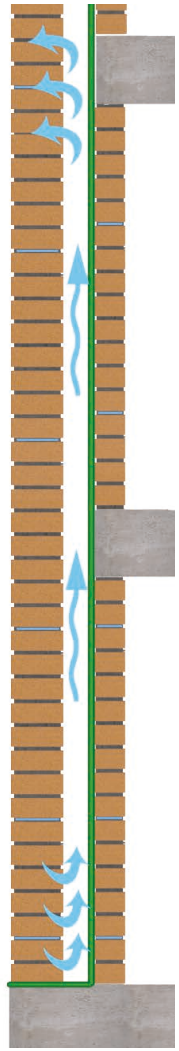
La continuidad del cerramiento en toda su altura no sólo supone una acumulación de carga beneficiosa desde el punto de vista mecánico, sino que habilita la posibilidad de conseguir la misma continuidad en otros elementos que constituyen la fachada, como por ejemplo el aislamiento, mejorando la eficiencia energética de la solución y evitando complicados detalles de encuentro con la estructura.

La principal característica del *Sistema Structura*® relacionada con el comportamiento higrotérmico del cerramiento es la eliminación del puente térmico en los frentes de forjados y soportes, debido a que se puede dar continuidad al aislamiento. Si los requisitos de impermeabilidad lo aconsejan, además se puede dotar de ventilación a la cámara, consiguiendo una fachada que participa de las principales ventajas de las *fachadas ventiladas* y de otras adicionales por tener como material de acabado el ladrillo cara vista (durabilidad, bajo mantenimiento, calidad estética, etc.).



9.3 *Sistema STRUCTURA®* para fachadas ventiladas de ladrillo cara vista

Lo que caracteriza esencialmente a una fachada ventilada es la existencia de una cámara de aire con ventilación y drenaje, interpuesta entre la hoja exterior del cerramiento y el edificio terminado, para mejorar su comportamiento



higrotérmico. Tanto la hoja interior del cerramiento como la exterior pueden ser de cualquier formato, material o acabado. Con el *Sistema Structura®* se pueden construir fachadas ventiladas cuyo material de acabado es el ladrillo cara vista.

La principal función de la cámara es la protección del edificio contra la humedad y contra la radiación solar directa. Ello se consigue posibilitando su ventilación por efecto *Venturi.* Para ello es suficiente que tenga un ancho determinado (no menor de 4 cm sin incluir el aislamiento), y dejar llagas de ventilación (sin rellenar) en la primera y última hiladas. En verano, el calor acumulado en la hoja exterior se disipa por convección a través de la cámara, disminuyendo la necesidad de aislamiento; y en invierno, la posición del aislamiento adosado por el exterior de la hoja caliente, evita el riesgo de humedad por condensación. La ventilación de la cámara impide que la humedad llegue al material aislante y la consiguiente degradación del mismo.

Todas las características anteriores son comunes a cualquier fachada ventilada con cualquier material de acabado; pero, además, si la hoja exterior es de ladrillo cara vista, existen ventajas adicionales que repercuten sustancialmente en el coste de la solución.

La ventaja fundamental es que la hoja exterior puede ser *autoportante*, que es el tipo constructivo que caracteriza al *Sistema Structura®*, y se puede dimensionar aprovechando al máximo las posibilidades de las fábricas de ladrillo reconocidas en la normativa como material estructural. Esto supone reducir al mínimo el coste en dispositivos auxiliares, eliminando los perfiles y aparatos de apoyo, que en otras soluciones se utilizan para transmitir la carga planta a planta. Como consecuencia tampoco se precisa personal especializado diferente del que se usa para una fachada convencional.

La hoja exterior se recibe con mortero, por lo que es en cierta medida estanca al agua de lluvia, lo que la convierte en una solución adecuada para regiones con fuertes lluvias torrenciales (por ejemplo en las que se produce el fenómeno atmosférico de la *"gota fría"*).

Desde el punto de vista de la eficiencia energética, se puede contabilizar en la transmitancia del cerramiento, tanto la contribución de la hoja exterior (½ pie de ladrillo perforado no es desdeñable), como el 50% de la contribución de la cámara, por ser considerada *ligeramente ventilada* en el *Documento Básico de Ahorro de Energía* (DB HE, Apéndice E *"Cálculo de los parámetros característicos de la demanda"*, artículo E.1 *"Transmitancia térmica"*). Esto se traduce, lógicamente, en un valor menor de la transmitancia térmica del cerramiento a igualdad de espesor del aislante.

La fachada ventilada de ladrillo cara vista cumple para el grado de impermeabilidad cinco, el máximo exigido en el *Documento Básico de Salubridad* (DB HS 1), sin necesidad de revestimientos adicionales de ninguna de las caras en contacto con la cámara.

Desde el punto de vista estético, el aspecto y el acabado son idénticos a los de las fachadas convencionales, pudiéndose utilizar cualquier pieza cerámica tradicional.

10. Obras realizadas

Promoción 86 viviendas libres, locales, trasteros y garaje en la parcela 45. Plan parcial "el Bercial-Universidad", Getafe, Madrid.

Arquitecto
Carlos Exposito

Centro Social Intergeneracional OMA (Orfanato Minero Asturias) Oviedo

Arquitectos
Antonio Morales Secades y Marijke Berndsen

100 Viviendas con garage VPPA. Consorcio de Móstoles Sur.

Arquitecto
Mateo Corrales

Edificio dotacional escolar, Colegio Montealbir.

Arquitecto
Martín de Lucio Arquitectos

GEO HIDROL

10. Obras realizadas

Promoción 86 viviendas libres, locales, trasteros y garaje en la parcela 45. Plan parcial "el Bercial-Universidad", Getafe, Madrid.

Se trata de una promoción desarrollada en régimen de cooperativa, iniciándose las obras el 15 de julio del 2005, y finalizándose el 22 de junio del 2007.

El Proyecto de Ejecución se redactó en el año 2004 y, aunque no existía la obligatoriedad municipal de instalación solar para ACS, ni resultaba de aplicación el Código Técnico, éste sirvió de referente en cuanto a criterios de eficiencia energética.

Las superficies generales de la promoción son: 11.230 m² de viviendas, de tres y cuatro dormitorios; 1.275 m² de trasteros; 475 m² de locales comerciales y 6.565 m² de garaje.

Criterios medioambientales y constructivos

El objetivo final, dentro de las condiciones de mercado de una promoción privada, ha sido conseguir niveles de eficiencia energética elevados asociados a mejoras en las condiciones de confort, tanto en el interior como en los espacios exteriores, más allá de las obligaciones derivadas de la normativa vigente anterior al CTE (NBE-CT-79).

Para ello los recursos y soluciones utilizadas han sido:

- *Adecuación de la volumetría, desde las condiciones de planeamiento, a la optimización del soleamiento y la ventilación natural, alcanzando un 87% de viviendas con fachadas de orientación sur, y un 100% de viviendas con ventilación cruzada, en contraposición a tipologías usuales en el área de manzana cerrada o con viviendas sin ventilación cruzada.*

- *Los tipos de viviendas sitúan las piezas vivideras en las fachadas sur, asociadas a elementos de captación pasiva con doble carpintería (miradores acristalados), de sombreamiento (vuelos, toldos, persianas exteriores de aluminio), y de estancia al exterior (terrazas).*

- *Como criterio general se han adecuado los porcentajes y características de los huecos en cada fachada a su orientación geográfica; minimizando superficies en orientaciones N, E Y O; y maximizando huecos en fachadas Sur para favorecer la captación pasiva.*

- *Toda la carpintería de aluminio, salvo la parte exterior de los miradores, cuenta con rotura de puente térmico,*

acristalamiento doble y persianas térmicas, con capialzados aislados; asegurándose las condiciones de ventilación con carpinterías oscilobatientes en ventanas, y correderas en huecos de terrazas y miradores.

- *El sistema de fachada, para minimizar los puentes térmicos, se resuelve con el sistema GeoHidrol de fábrica armada de ladrillo klínker independiente de la estructura, con aislamiento continuo de 6 cm de lana mineral, y hoja interior de bloque de hormigón de 7 cm para aumentar la inercia térmica.*

- *La instalación de calefacción y ACS se resuelve con un sistema centralizado, con contaje individual, de dos calderas de gas natural, una de ellas de condensación; y apoyo de paneles solares térmicos (no obligatorios) para abastecer un 65% del ACS.*

• *La impermeabilización se resuelve con lámina de caucho EPDM con carácter general, y se han utilizado pinturas de base acuosa en viviendas, y al silicato en garaje.*

• *Para reducir el consumo de agua se han incorporado válvulas reductoras en grupos de presión; cisternas de doble descarga en inodoros y griferías monomando con aireadores en el resto de aparatos.*

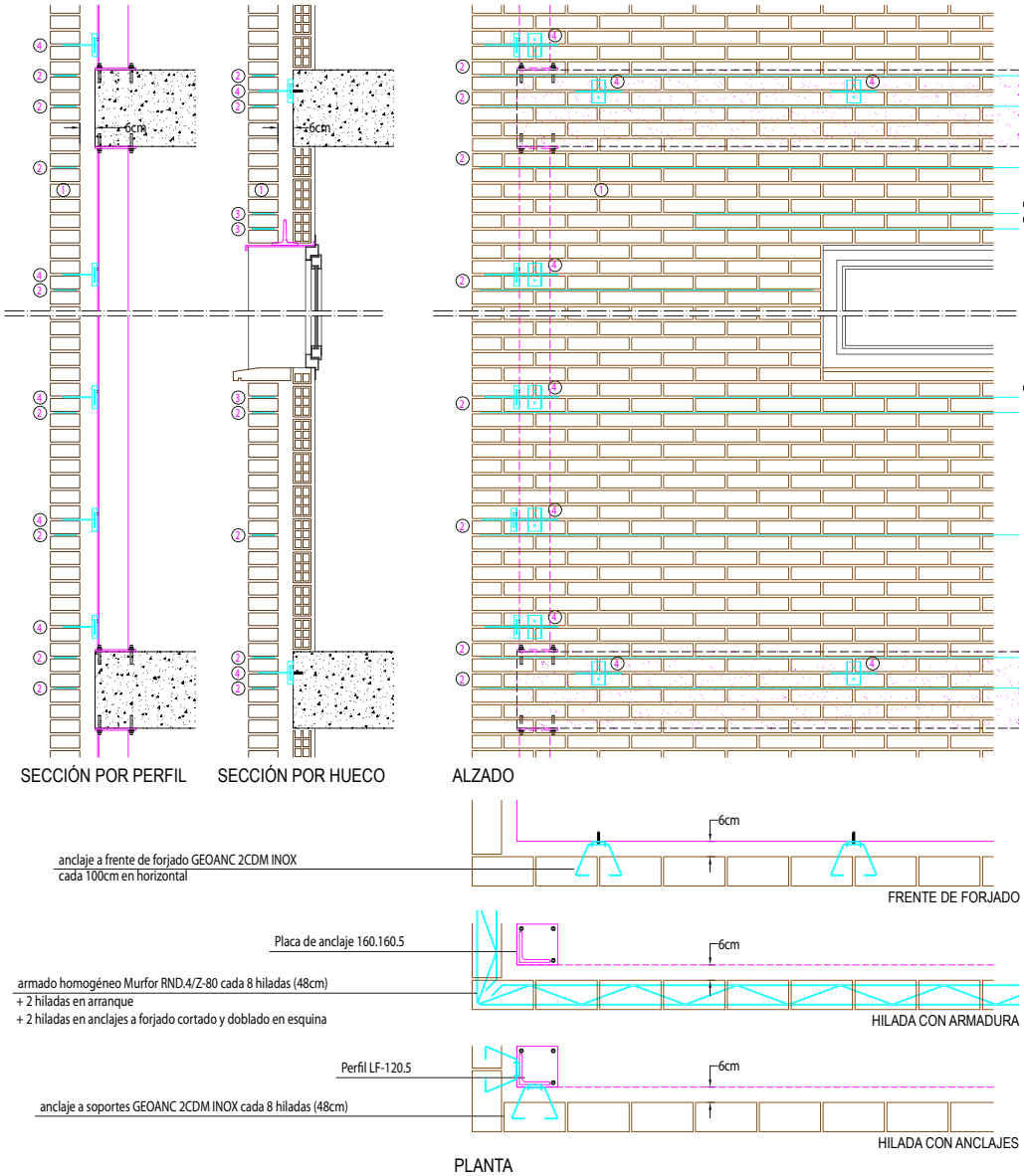
• *El jardín y piscina colectivos se han resuelto como elementos que mejoran las condiciones de confort en época cálida. La vegetación es adecuada al clima madrileño, y conlleva un consumo controlado de agua, favorecido por la capacidad de retención de las grandes jardineras, de hasta 2,5 cm de profundidad en la zona de arbolado frondoso (ciruelos y almendros), y una red de riego por goteo.*

• *La recogida de residuos se realiza en contenedores exteriores enterrados, contando la promoción con cuartos propios para almacenamiento previo.*

• *Se han previsto condiciones favorables de mantenimiento de las instalaciones, adecuando su trazado por zonas comunes a condiciones de registrabilidad; así como asociando la instalación centralizada de calefacción y ACS a un contrato de gestión energética que garantice su correcto funcionamiento*.

Texto del Arquitecto autor del proyecto
Carlos Exposito

LADRILLO CARA VISTA. ESPESOR 1/2 PIE. ANCHO DE CÁMARA 6cm SISTEMA G.H.A.S. (FACHADA AUTOPORTANTE)



Ficha Técnica

Promotores
Punto y Coma de Gestión Inmobiliaria y Urbanística

Sociedad Cooperativa Madrileña Jardines de El Bercial

Proyecto y Dirección de Obra
Alia, Arquitectura, Energía y Medio Ambiente, S.L.

Arquitectos
Carlos Expósito Mora.

Emilio Miguel Mitre.

Arquitectos Colaboradores
Dario Assante

Oscar Beade Pereda

Paula Caballero García

Arquitectos Técnicos
José Miguel Morea Nuñez

José Manuel Zaragoza Angulo

Ingeniería
Carlos Martínez Martínez

Cáculo y Diseño de Estructura
RUA rehabilitación, urbanismo y arquitectura, S.L.

Fachada Autoportante
Concepción del Río. GeoHidrol.

Empresa Constructora
CMS Construcciones S.A.

Centro Social Intergeneracional OMA (Orfanato Minero Asturias) Oviedo

Arquitectos: Antonio Morales Secades y Marijke Berndsen

El Orfanato Minero de Asturias es un complejo pionero de los años 30 inspirado en instituciones similares centroeuropeas compuesto por más de una decena de edificaciones en una parcela de 60.000 m2 próximo al centro de Oviedo.

Aletargado desde hace décadas, la fundación inició una etapa de renovación recientemente para convertirlo en un Centro Social Intergeneracional para personas dependientes con capacidad para más de 200 residentes y centro de día para 60 usuarios.

La sustitución de los antiguos pabellones de literas era inevitable y su demolición estuvo condicionada a mantener la trama cartesiana original sobre la que estaban dispuestos.

Los servicios de cocina y lavandería se mantuvieron en el edificio centralizado y sustituimos las antiguas calderas de carbón por una caldera de biomasa de 1500 kw dispuesta en una nave existente para proporcionar ACS y calefacción mediante energía renovable a los nuevos edificios (e incluso alguno de los originales) a través de una red de agua caliente extendida por el complejo similar a las usadas en los países escandinavos.

El Centro Residencial para menores con discapacidad psíquica fue la primera fase de este ambicioso proyecto.

Buscamos eliminar la imagen de hospital o psiquiátrico a la que se le suele asociar este tipo de centros y acercarnos a la tipología de edificio de viviendas, que contribuyese al bienestar del usuario y potenciase las visitas de familiares y amigos.

La privilegiada situación en el corazón de este campus verde permitió que el uso interior dominase la fachada. Nos abrimos al exterior para que ese magnífico entorno penetrase en el interior.

Mediante 2 materiales (ladrillo y vidrio) compusimos una envolvente continua e independiente de la estructura en la que la masividad del prisma que formamos con el ladrillo (dormitorios) fue equilibrado por la ligereza del vidrio en las zonas comunes.

El muro autoportante de caravista de 15 m de altura se apoya en el forjado de planta primera y "flota" sobre un perímetro de U-glass corrido en planta baja que aporta abundante cantidad de luz natural al Centro de Día alojado en ella. Aquí los espacios se perciben con una amplitud superior a lo que refleja su superficie y la incidencia variable de la luz sensibiliza al usuario respecto a la hora y al entorno.

El contraste de color de los ladrillos "Blanco" y "Klínker Flaseado Negro" introdujo un matiz en la fachada distinguiendo los usos en los que se divide la planta.

La planta tipo se organiza a lo largo de un pasillo con los dormitorios orientados dirección Este-Oeste, prácticamente ciega al Norte y con la sala de estar orientada al Sur.

En esta fachada Sur nos servimos de grandes ventanales y paños de U-glass como colectores pasivos de energía solar que al mismo tiempo proporcionan magníficas vistas a la Catedral de Oviedo y a la Sierra del Aramo.

La ventilación cruzada a través de la única ventana Norte por planta evita la necesidad de Aire Acondicionado en el verano de Asturias mientras que la calefacción de los espacios en invierno se tratará gracias a un sistema de suelo radiante.

Nuestra colaboración previa en diversos proyectos en los Países Bajos donde la fachada ventilada de ladrillo es de uso común fue determinante para la elección del tipo de fachada.

Sin embargo, la introducción de un sistema a base de estructura de metálica auxiliar no iba a ser tarea fácil en un sector en el que el "yo lo hice así toda la vida" lastra cualquier innovación. Se trataba de la primera fachada ventilada de fábrica de ladrillo construida en Asturias y cuando se nos presentó la manera de convertir la propia fábrica en autoportante mediante el sistema "STRUCTURA" con una ejecución muy similar a la de confinamiento "de toda la vida" para el caravistero no lo dudamos.

Al recuperar el máximo potencial que tiene fachada de fábrica como elemento estructural portante, la tracción debida a las acciones horizontales se contrarresta con la compresión debida al peso, por lo que con más peso (dentro de su capacidad resistente) reducimos gratuitamente el riesgo de fisuración.

Así se independizó de la fachada con respecto a la estructura, permitiendo el

aislamiento continuo evitando puentes térmicos y la ventilación de la cara interior del ladrillo.

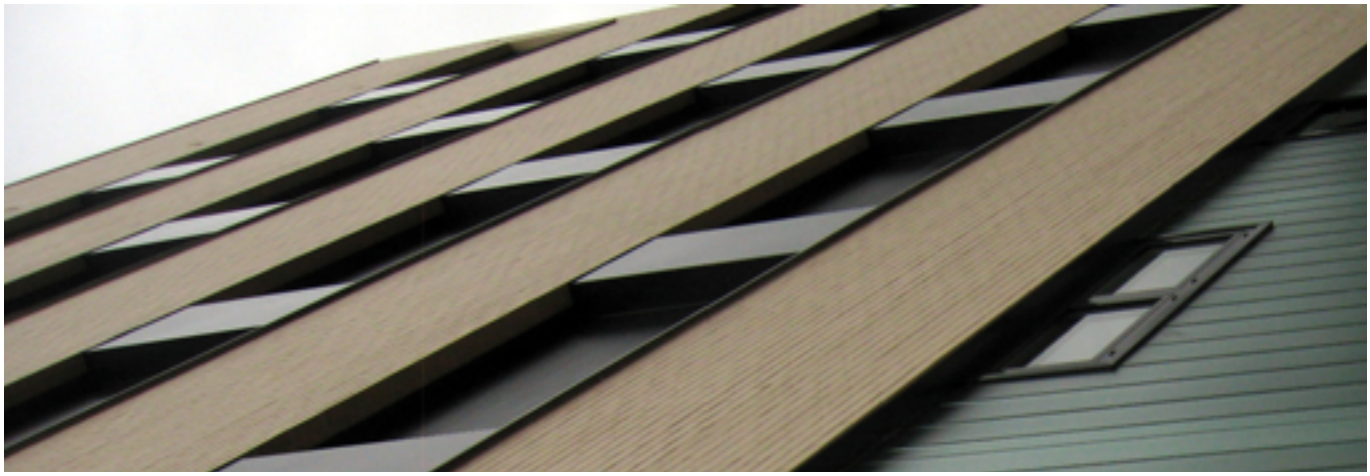
Para la carpintería exterior elegimos el aluminio con rotura de puente térmico con marco de módulo de 65 mm y perfiles de hoja de módulo 75 mm con 3 cámaras que dotase de gran robustez y gran aislamiento térmico-acústico. Un aspecto fundamental fue la colocación de un herraje lógico que permite impedir mediante llave la apertura de manera batiente (por seguridad) pero permitiera ventilar de manera oscilo (por humanidad).

La cubierta fue resuelta con un sistema invertido y transitable mediante "losa filtrón" permitiendo un aislamiento continuo y disminuyendo el mantenimiento de los sumideros al convertir toda la cubierta en una rejilla.

La ausencia de paneles solares en cubierta sorprendió inicialmente (en la zona con menor rendimiento solar de la Península Ibérica), pero creímos interesante destinar más recursos a aislar más la envolvente y particiones del edificio haciéndolo menos insostenible y reduciendo el consumo de biomasa.

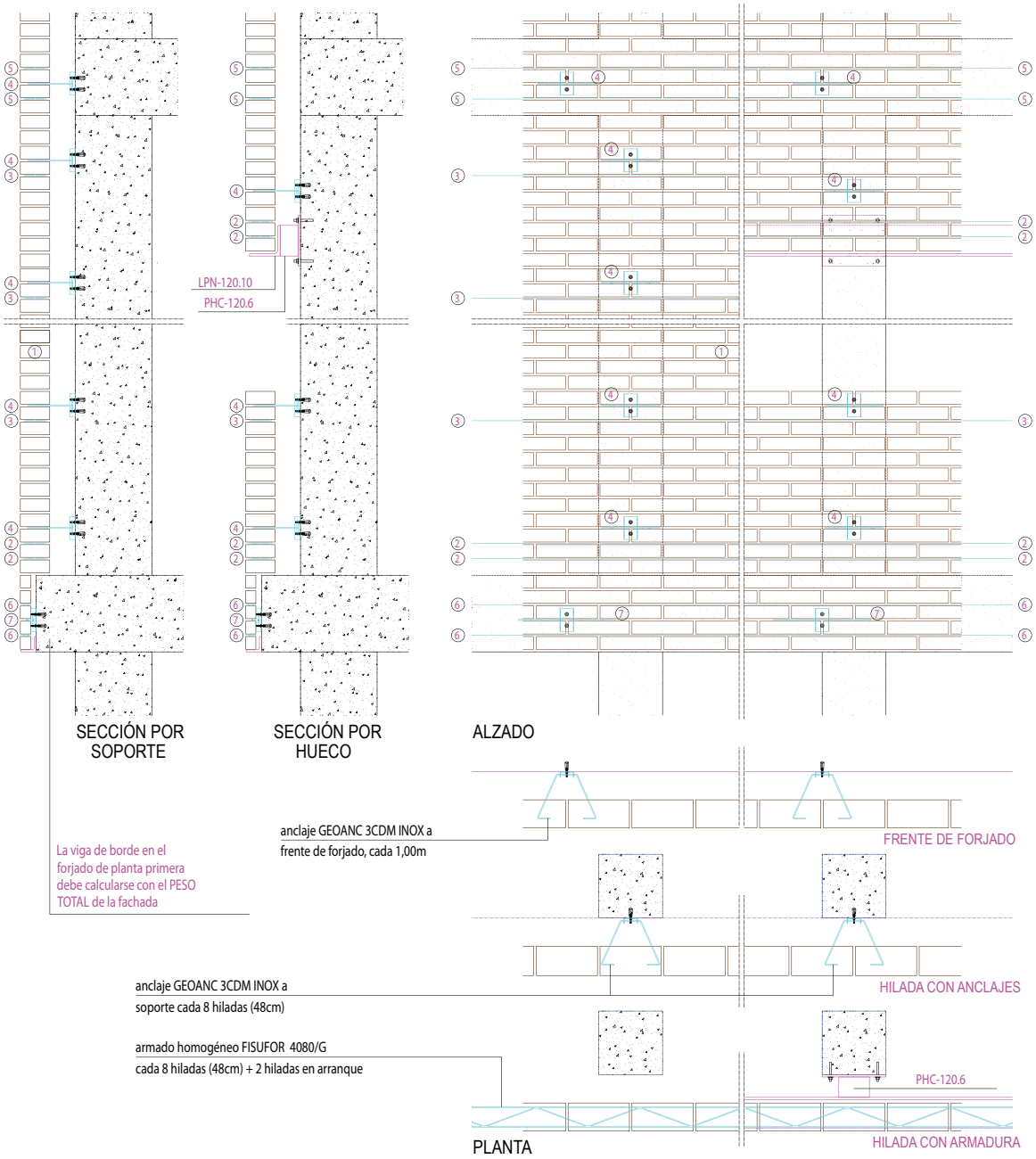
Las soluciones adoptadas en este proyecto tuvieron en cuenta el mínimo mantenimiento al que suelen condenarse este tipo de edificios en nuestro país y se ajustaron al estrecho margen que permite un presupuesto equiparable a una VPO y un plazo de ejecución real que fue de 11 meses.

Texto del Arquitecto autor del proyecto
Antonio Morales



LADRILLO CARA VISTA MALPESA. ESPESOR 1/2 PIE

SISTEMA G.H.A.S. (FACHADA AUTOPORTANTE)



100 Viviendas con garage VPPA. Consorcio de Móstoles Sur.

El proyecto del edificio, realizado en el año 2007, fue adjudicado por concurso, cuyas bases primaban la consideración de criterios de diseño bioclimático. En particular, una de las condiciones primordiales era la incorporación de *fachada ventilada* como solución constructiva del cerramiento exterior.

El sistema de fachada ventilada adoptado, de todos los que se barajaron en su día, es el *Sistema G.H.A.S.*, que utiliza piezas tradicionales de ladrillo cerámico cara vista como material de acabado de la hoja exterior.

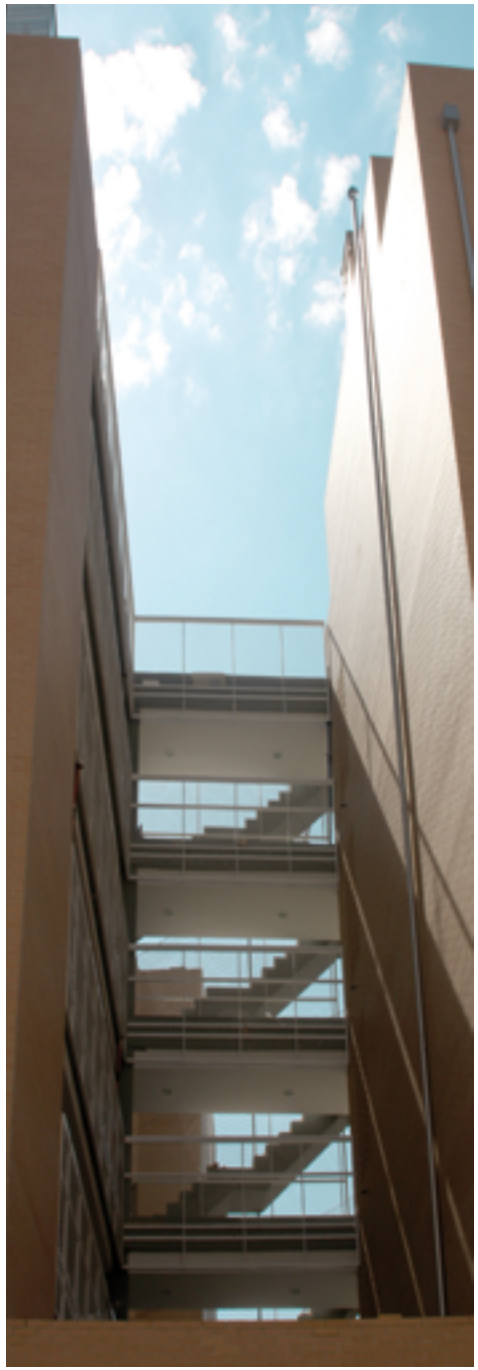
La solución constructiva de fachada ventilada de ladrillo cara vista, aplicada al caso particular de este edificio, destaca por su competitividad, medida en términos de relación entre el coste de la unidad y las prestaciones mecánicas y funcionales del cerramiento. Ello se debe a las condiciones geométricas del edificio, con un número de plantas y dimensiones de entrepaños que lo hacen singularmente idóneo para la implementación de este sistema constructivo.

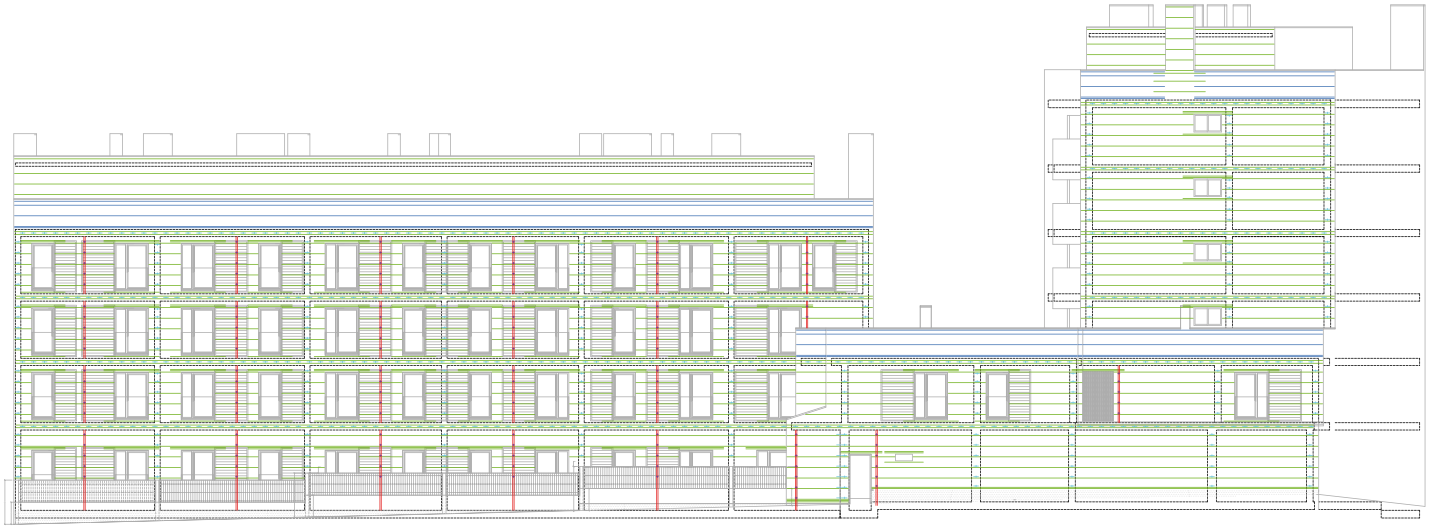
La hoja exterior del cerramiento es de fábrica de ladrillo cerámico cara vista, apoyada sobre sí misma en la planta de arranque. El peso propio del muro de siete plantas de altura, gravitando sobre sí mismo, constituye la contribución fundamental a la resistencia y estabilidad frente a la acción de viento.

El proceso constructivo de la fachada fue similar al que se utiliza en las soluciones convencionales. En primer lugar se construyó la hoja exterior, eliminando con facilidad la posible caída de mortero en la cámara ventilada; y, posteriormente se cerró el edificio construyendo la hoja interior.

La ventilación y drenaje de la cámara se consiguen mediante llagas sin rellenar con mortero, situadas en las hiladas superior e inferior, y la incorporación de una lámina impermeabilizante que puede drenar por las mencionadas llagas.

Con objeto de conseguir la mayor eficiencia energética del muro, el aislante térmico se ubica en la cara exterior de la hoja interior. Para ello, y debido al proceso constructivo, se utilizaron piezas cerámicas de gran formato con el aislamiento incorporado en una de las caras de las propias piezas. El objetivo de mantener el fondo de la cámara limpio, se consiguió sin dificultad construyendo en primer lugar la hoja interior de las últimas plantas. La planta baja se cerró en última lugar, comprobando previamente la ausencia de mortero o de otras impurezas en el fondo de la cámara, que pudieran mermar la eficiencia higrométrica de la solución.

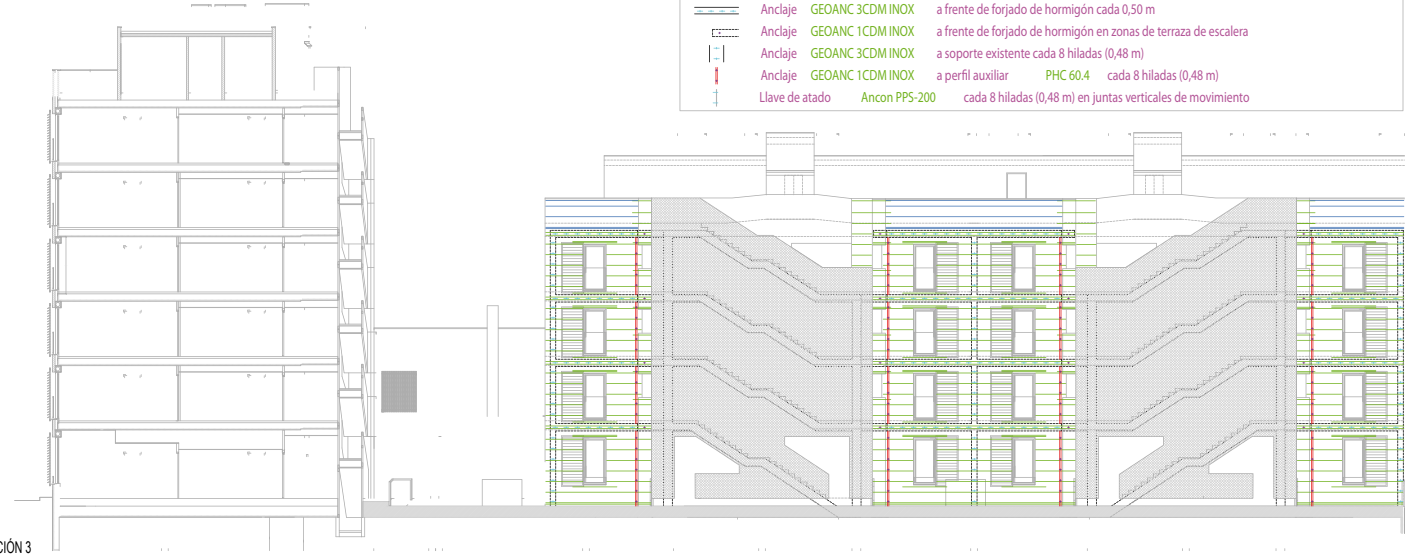




ALZADO SUR

LEYENDA

Armadura	FISUFOR 4080/G	cada 8 hiladas (0,48 m) más refuerzos en arranque, dinteles y frentes de forjado	
Armadura	FISUFOR 5200/G	en petos cada 8 hiladas (0,48 m) + 2 hiladas en el arranque (total 5 hiladas armadas)	
Anclaje	GEOANC 3CDM INOX	a frente de forjado de hormigón cada 0,50 m	
Anclaje	GEOANC 1CDM INOX	a frente de forjado de hormigón en zonas de terraza de escalera	
Anclaje	GEOANC 3CDM INOX	a soporte existente cada 8 hiladas (0,48 m)	
Anclaje	GEOANC 1CDM INOX	a perfil auxiliar PHC 60.4	cada 8 hiladas (0,48 m)
Llave de atado	Ancon PPS-200	cada 8 hiladas (0,48 m) en juntas verticales de movimiento	



SECCIÓN 3

Ficha Técnica

Promotor
Inmobiliaria Espacio

Proyecto y Dirección de Obra
Mateo Corrales

Arquitecto director ejecutivo
Ángel Lloret

Arquitectos Técnicos
Luís Meléndez

Ingeniería
Carlos Martínez Martínez

Fachada Autoportante
Sistema G.H.A.S. GeoHidrol.

Empresa Constructora
Arpada SA

Edificio dotacional escolar, Colegio Montealbir.

El centro de enseñanza Montealbir presenta dos líneas en infantil, primaria, secundaria y bachillerato. El edificio lineal de ladrillo negro marca el acceso a los cuatro volúmenes blancos: escuela infantil, aulario I, aulario II, y polideportivo.

La zona de niños de infantil se desarrolla de modo independiente entorno a un patio central. Este patio queda definido en el perímetro por el torreón y el auditorio abierto que baja hasta la cubierta verde.

El edificio lineal presenta a su vez tres cuerpos: la biblioteca o primer volumen horizontal, el de administración y talleres, y el de auditorio comedor y oratorio.

La fachada principal se ha construido con ladrillo Klínker negro Palau y sistema G.H.A.S, consiguiendo una hoja exterior continua y sin resaltos en el apoyo del forjado. Con este sistema se presenta un paño homogéneo, continuo y limpio, en el que según el volumen al que pertenecen y su uso se han proyectado los distintos huecos:

- *Horizontales para la biblioteca*
- *Modulados verticales para administración y talleres*
- *Suelo techo, para comedor e infantil.*

La fachada norte también presenta dos gestos blancos que marcan y distinguen los accesos de padres y alumnos.

La estructura por plazos de ejecución y por la luces de más de diez metros que marcan el volumen central se decidió que fuera en su totalidad prefabricada.

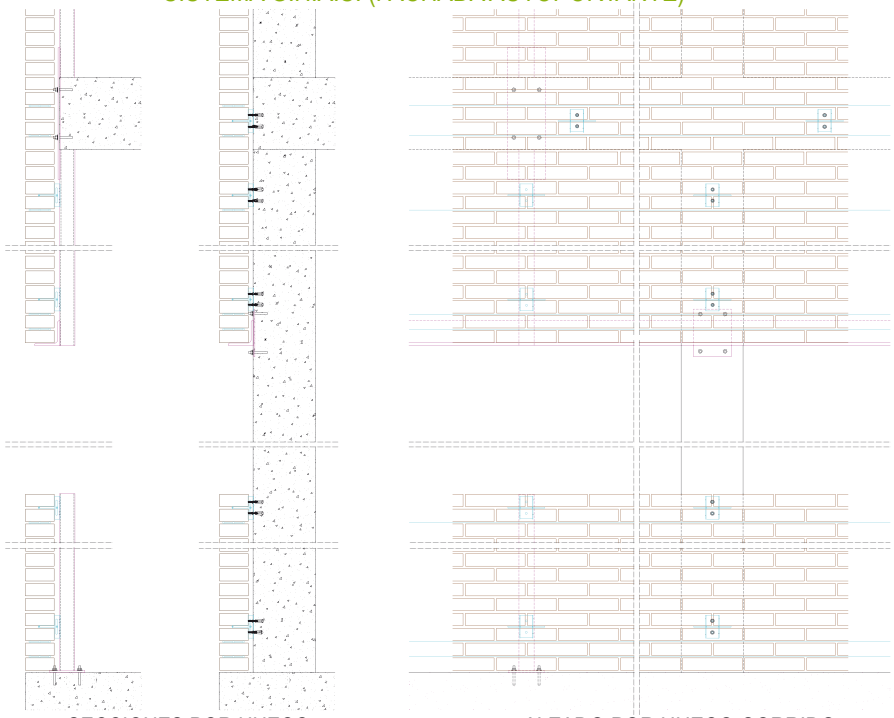
La fachada de la biblioteca, que presenta una altura libre de siete metros, ha sido resuelta con paños de ladrillo sujetos por cerchas verticales que desarrollan el concepto de muro cortina pero tratado como una placa mixta de ladrillo y vidrio.

El edificio se define en su alzado principal por un trazado lineal, solo interrumpido en sus dos plantas por el torreón de acceso al auditorio al aire libre, por esta misma fachada sólo se accede al centro mediante tres anchas pasarelas, ya que en todo el alzado presenta el corte absoluto en cota por la creación de un patio ingles, que da solución a diversos tipos de aulas.

El corte y definición de los materiales, se han definido siempre desde el paño negro dejando blancos todos los volúmenes que crean los soportales y las líneas de sombra hacia el jardín, y las pistas deportivas.

Texto del autor del proyecto
Martín de Lucio Arquitectos

SISTEMA G.H.A.S. (FACHADA AUTOPORTANTE)



SECCIONES POR HUECO

ALZADO POR HUECO CORRIDO

Ficha Técnica

Situación:
Los Arenales II, el Casar de Salamanca, Guadalajara.

Proyecto Básico y Ejecución:
Martín de Lucio Arquitectos

Arquitectos:
Alberto Martín de Lucio
Carlos Rodríguez Pérez

Colaboradores en proyecto:
Loreto Álvarez, Arquitecto
Pablo Ferrer, Arquitecto
Javier Blanco, Arquitecto
Bárbara Blanco, Arquitecto

Dirección de obra:
Arquitecto:
Alberto Martín de Lucio
Arquitecto técnico:
Carlos Rodríguez Pérez

Superficie parcela:
12.200 m^2

Superficie construida:
8.000 m^2

Presupuesto:
6.000.000

Cronología:
Proyecto 2006
Inauguración 2007/2008

Propiedad:
Colegio Montealbir S.L.

Constructora:
Tomillar
Fernando Gauche, jefe de obra.
Juan Barrero, delegado.

11. ANEJOS

ANEJO 1. Normativa 421

A1.1 Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) 422
A1.2 Código Técnico de la Edificación 422
A1.3 Normas Armonizadas EN 429
A1.4 Marcado CE 429
A1.5 Marcas de calidad 441
A1.6 Etiquetas ecológicas 442

ANEJO 2. Bibliografía 445

ANEJO 1. Normativa

Los productos constitutivos de las fábricas están regulados por normas de carácter obligatorio en las que se especifican los valores de los parámetros que deben alcanzar cada una de sus características y por otras normas que dan derecho a ostentar determinadas *etiquetas* o *marcas de producto,* en general de carácter voluntario, que garantizan su calidad y la de los edificios en los que se utilizan.

La normativa más generalizada relativa a productos para la construcción está constituida por las normas UNE, en las que se especifican, no sólo las características técnicas de los elementos, sino los procedimientos de ensayo para su certificación. La marca voluntaria de producto más generalizada es la Marca N de AENOR, que garantiza la calidad del producto que posee este distintivo.

La tarea de preparación de la normativa técnica de los edificios se inició en nuestro país en el año 1937 y corría a cargo de la Dirección General de Arquitectura del Ministerio de la Gobernación, creada para este fin. Desde 1957 esta responsabilidad recayó en el Ministerio de la Vivienda, que elaboró una colección de normas (*Normas MV*) que regulaban, cada una de ellas, distintos aspectos y requisitos técnicos en el campo de la edificación.

Con el cambio de régimen, en 1977, el nuevo Gobierno aprobó un marco unificado para la normativa de la edificación compuesto por las *Normas Básicas de la Edificación (NBE)*, de obligado cumplimiento, dando rango de NBE a las entonces vigentes normas básicas *MV*; las *Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE)*, que desarrollaban a las anteriores con objeto de facilitar su aplicación, aprobadas en esa misma década y de carácter voluntario; y las *Soluciones Homologadas de la Edificación (SHE)*, cuyo desarrollo no se produjo, que hubieran complementado, en el campo de las soluciones constructivas convencionales o tradicionales, a los *Documentos de Idoneidad Técnica (DIT)*, que otorgan evaluaciones favorables a las soluciones innovadoras.

Todo este cuerpo normativo que regulaba el proceso de la edificación en nuestro hasta la entrada en vigor de la *Ley de Ordenación de la Edificación (LOE)* ha sido sustituido por el Código Técnico de la Edificación, y el *marcado CE*. Ello ha supuesto un profundo cambio en el enfoque, en los objetivos y en la esencia misma de la normativa.

Tradicionalmente la normativa había sido de carácter prescriptivo, estableciendo procedimientos aceptados o guías técnicas. Esta circunstancia puede suponer un impedimento a la innovación y al desarrollo tecnológico y representar barreras técnicas, por lo que el enfoque basado en prescripciones no es aceptable en el contexto internacional.

En consecuencia, como alternativa a los códigos prescriptivos, se impuso en la generación de la nueva normativa el enfoque basado en el concepto de las prestaciones[1], estableciendo explícitamente los objetivos y el modo de alcanzarlos, sin obligar al uso de un procedimiento o solución determinados, fomentando así la innovación y el progreso tecnológico en la edificación.

El enfoque basado en prestaciones se adoptó en la Unión Europea con la aplicación de la Resolución del Consejo de 5 de mayo de 1985 sobre el "*Nuevo Enfoque*" en asuntos de reglamentación técnica. En otros foros internacionales, en los que España ha participado y participa activamente[2], se plantea como la tendencia más avanzada la reglamentación en términos de prestaciones u objetivos.

1 Las prestaciones son el conjunto de características del edificio, cualitativas o cuantitativas, identificables objetivamente, que contribuyen a determinar su aptitud para responder a diferentes funciones para las que ha sido diseñado.

2 Como ejemplos, se citan la Comisión Económica para Europa de Naciones Unidas, que produjo el "*Compendio de Disposiciones Modelo de Reglamentos de Edificación*", CEPE/HBP/WP2 (1990); y el Congreso Internacional de la Edificación CIB, a quien se debe el CIB/TG11 "*Códigos de edificación basados en prestaciones*".

A1.1 Ley de Ordenación de la Edificación (LOE)

El 6 de mayo de 2000 entró en vigor la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE). Esta Ley "*tiene por objeto regular en sus aspectos esenciales el proceso de la edificación, estableciendo las obligaciones y responsabilidades de los agentes que intervienen en dicho proceso, así como las garantías necesarias para el adecuado desarrollo del mismo, con el fin de asegurar la calidad mediante el cumplimiento de los requisitos básicos de los edificios y la adecuada protección de los intereses de los usuarios*".

Según la LOE *"tendrán la consideración de edificación…, y requerirán un proyecto… las obras de edificación de nueva construcción, …las obras de ampliación, modificación, reforma o rehabilitación…, las obras que tengan carácter de intervención total en edificaciones catalogadas o que dispongan de algún tipo de protección de carácter ambiental o histórico-artístico…"* y considera *"comprendidas en la edificación sus instalaciones fijas y el equipamiento propio, así como los elementos de urbanización que permanezcan adscritos al edificio"*.

Los requisitos básicos que establece la LOE, que se deben satisfacer con el fin de garantizar la seguridad de las personas, el bienestar de la sociedad y la protección del medio ambiente, son los siguientes:

- Requisitos relativos a la funcionalidad: utilización, accesibilidad y acceso a los servicios de telecomunicación, audiovisuales y de información.
- Requisitos relativos a la seguridad: estructural, en caso de incendio y de utilización.
- Requisitos relativos a la habitabilidad: higiene, salud y protección del medio ambiente, protección contra el ruido, ahorro de energía y aislamiento térmico.

En la *Disposición Final Segunda* de la LOE se autoriza al Gobierno para la aprobación de un *Código Técnico de la Edificación (CTE)*.

A1.2 Código Técnico de la Edificación

El Código Técnico de la Edificación[3] constituye el nuevo marco normativo estructurado, en coordinación con la normativa europea, que identifica, ordena y completa la reglamentación técnica existente en nuestro país en materia de edificación, y que pretende facilitar su aplicación y cumplimiento.

Es un compendio coordinado de normas, elaborado y aprobado por mandato de la LOE, en el que se establecen las exigencias mínimas que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad, dejando los requisitos de funcionalidad para que sean desarrollados por otros órganos competentes[4].

Los documentos de referencia del CTE han sido, además de la propia LOE, la Directiva Comunitaria 89/106/CEE sobre "*Productos de Construcción*" y la Directiva 93/68/CEE que la modifica; el Real Decreto 1630/1992 sobre la "*Libre circulación de productos de construcción*" y el Real Decreto 1328/1995 que lo modifica; los "*Documentos Interpretativos*" que desarrollan los requisitos esenciales (existe uno por cada requisito) y los *Eurocódigos*.

Para fomentar la innovación y el desarrollo tecnológico, el CTE adopta el enfoque internacional basado en prestaciones u objetivos, que es el más moderno en materia normativa de edificación. El uso de esta nueva reglamentación supone la configuración de un entorno más flexible, que se puede actualizar fácilmente conforme a la evolución de la técnica y la demanda de la sociedad, aunque fundamentado en la experiencia de la normativa tradicional.

La elaboración del Código Técnico de la Edificación ha sido competencia de la Dirección General de Arquitectura y Política de Vivienda del Ministerio de Vivienda, en colaboración con el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc) perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Destaca, además, la participación de importantes organismos como el CEDEX del Ministerio de Fomento, el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía IDAE del Ministerio de Industria, el Instituto Valenciano de la Edificación IVE, el Instituto de la Construcción de Castilla y León ICCL, Labein Tecnalia, el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña ITEc, así como distintas universidades y expertos de la industria de la construcción.

Igualmente merece una especial mención por su valía, la participación de los Colegios Profesionales y las Asociaciones del Sector.

La Administración General del Estado (AEG) y las Administraciones Autonómicas (CCAA) han cooperado en el campo del control de calidad de la edificación a través de la Comisión Técnica para la Calidad de la Edificación (CTCE), que colaboró en la elaboración del CTE y sirvió de cauce para la participación de todas las Comunidades Autónomas.

El CTE está estructurado en dos partes diferenciadas, ambas de carácter obligatorio.

La primera parte (*Parte I*) contiene, además de las disposiciones de carácter general (ámbito de aplicación, estructura, clasificación de usos, etc.), los objetivos que se deben alcanzar en los edificios para cumplir los requisitos básicos establecidos en la LOE y que hacen que éstos sean adecuados para el uso previsto, identificando las respuestas de sus funciones de acuerdo con las necesidades de la sociedad.

Asimismo, en la *Parte I* se enuncian las *exigencias básicas* que desarrollan los *requisitos básicos* y que deben satisfacer los edificios para alcanzar los mencionados objetivos, entendidas aquéllas como las condiciones específicas que se deben cumplir en el diseño, la construcción, el mantenimiento y la conservación de los edificios y sus instalaciones, en sus sistemas constructivos y en los productos que los integran.

Las exigencias básicas enunciadas en la *Parte I* del CTE en número representan: dos de seguridad estructural; seis de seguridad en caso de incendio; ocho de seguridad de utilización; cinco de higiene, salud y protección del medio ambiente; una de protección frente al ruido; y cinco de ahorro de energía.

En la *Parte I* el CTE definen además los llamados "*Documentos Reconocidos*", de singular importancia previsible en este nuevo marco normativo que quiere fomentar la innovación.

La segunda parte del CTE (*Parte II*) está constituida por los Documentos Básicos (DB), cuya adecuada utilización garantiza el cumplimiento de las exigencias básicas. En ellos se indican los procedimientos, reglas técnicas y ejemplos de soluciones que permiten determinar si el edificio cumple con los niveles de prestación establecidos. Los Documentos Básicos, fundamentados en el conocimiento consolidado de las distintas técnicas constructivas, se pueden actualizar en función de los avances técnicos y las demandas sociales.

3 En adelante, CTE.

4 Está previsto incluir los requisitos de accesibilidad según lo establecido en la Ley 51/2003 sobre *"Igualdad de oportunidades, no discriminación y accesibilidad universal para las personas con discapacidad"*.

MINISTERIO DE VIVIENDA

CTE
CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN
NORMATIVA DE SEGURIDAD HABITABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD DE LAS EDIFICACIONES

Los Documentos Básicos contienen la caracterización de las exigencias básicas y su cuantificación, en la medida en que el desarrollo científico y técnico de la edificación lo permite, mediante el establecimiento de los niveles o *valores límite* de las prestaciones de los edificios o sus partes. Contienen también los procedimientos cuya utilización acredita el cumplimiento de aquellas exigencias básicas, concretadas en forma de métodos de verificación o soluciones sancionadas por la práctica. También pueden tener remisión o referencia a instrucciones, reglamentos u otras normas técnicas a los efectos de especificación y control de los materiales, métodos de ensayo y datos o procedimientos de cálculo, que deben ser tenidos en cuenta en la redacción del proyecto del edificio y su construcción.

Los Documentos Básicos, redactados para dar respuesta a cada uno de los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la LOE, deberían ser seis, uno por cada requisito. Sin embargo el requisito de *seguridad estructural* tiene una peculiaridad. Al glosar estos Documento Básicos, la parte estructural del Código se compone de dos documentos comunes (Seguridad Estructural y Acciones) un documento referido a elementos (Cimentaciones) y otros tres por cada tipo constructivo identificado por el material estructural correspondiente (Acero, Madera y Fábrica).

No existe un Documento Básico sobre estructuras de hormigón, aunque se hace referencia a la normativa española de hormigón estructural, EHE, que abarca en su ámbito a todo tipo de obras de construcción, incluidas las de edificación. Tampoco se incluye la normativa de construcción sismoresistente, que es objeto de una reglamentación específica recogida actualmente en la norma NCSE-2002, que coexiste con los Documentos Básicos del CTE.

El enfoque del Código, basado en prestaciones y objetivos, hace que los mencionados Documentos Básicos no tengan carácter excluyente, por lo que el proyectista o el director de obra, bajo su responsabilidad y previa conformidad del promotor, pueden adoptar soluciones alternativas, siempre que justifiquen documentalmente que el edificio proyectado cumple las exigencias básicas del CTE porque sus prestaciones son, al menos, equivalentes a las que se obtendrían por la aplicación de los Documentos Básicos[5].

El CTE es de observancia obligada en todos los proyectos y obras de edificación pública o privada, en los términos establecidos por la LOE; y quedan responsabilizados de su cumplimiento, además de los agentes que participan en el proceso de la edificación, las instituciones y entidades que intervienen en el visado, supervisión o informe de los proyectos.

Cambios normativos que afectan a los elementos de fábrica de ladrillo

En relación con los elementos de fábrica de ladrillo de los edificios, la aparición del CTE en la escena reglamentaria supone una serie de cambios importantes.

El CTE recoge el contenido, convenientemente actualizado y reestructurado, de las *Normas Básicas de la Edificación* (NBE) que desaparecen como tales. Las NBE que se estaban desarrollando en el momento de aprobación de la LOE así como las revisiones en curso de otras NBE existentes han sido incorporadas en los apartados pertinentes del CTE. Las NBE que han quedado derogadas y que afectaban en algún aspecto a los elementos de fábrica de ladrillo y a los cerramientos de fachada son las siguientes:

- NBE-FL/90 "*Muros resistentes de fábrica de ladrillo*".
- NBE-AE/88 "*Acciones en la edificación*".
- NBE-CT/79 "*Condiciones térmicas en los edificios*".
- NBE-CA/88 "*Condiciones acústicas en la edificación*".
- NBE-CPI/96 "*Condiciones de protección contra incendios en los edificios*".

Existen otras reglamentaciones técnicas de carácter básico que coexisten con el CTE, como por ejemplo la "*Instrucción de Hormigón Estructura*l" que se cita como referencia externa en el Documento Básico "*Seguridad Estructural: Fábrica*".

Seguridad Estructural: Fábrica (DB SE-F)

Los aspectos relativos al comportamiento estructural de los elementos de fábrica quedan regulados por el Documento Básico SE-F "*Seguridad estructural. Fábrica*", que incluye las prestaciones relacionadas con la respuesta mecánica y la durabilidad de los materiales, que deben ser considerados para cumplir las exigencias establecidas en el CTE, de acuerdo

con los criterios del correspondiente Eurocódigo EN-1995. El precedente de este Documento Básico ha sido la Norma Básica FL/90 a la que ha sustituido.

La NBE-FL/90 "*Muros resistentes de fábrica de ladrillo*", a pesar de haber perdurado prácticamente en su forma original, en sucesivas versiones y durante varias décadas, como norma básica de obligado cumplimiento, tenía dos importante restricciones relativas a su ámbito de aplicación.

En primer lugar, sólo se refería a "*fábricas de ladrillo*"[6], dejando fuera de su ámbito al resto de piezas y materiales. Se precisaba, por tanto, una revisión global que permitiera incluir materiales, formatos de piezas y elementos estructurales no regulados, como el bloque de cerámica aligerada, el gran formato o los cerramientos de fachada, y que recogiera de forma adecuada los significativos avances que se han producido en este campo. El DB SE-F amplía el ámbito de aplicación de la antigua NBE-FL/90 a todo tipo de piezas y materiales que existen actualmente en el mercado para la construcción de elementos de fábrica, incluyendo los bloques de hormigón, la piedra natural y la fábrica armada.

La segunda restricción es más profunda porque está relacionada con la función estructural que el proyectista puede encomendar a los elementos de fábrica. Desde este punto de vista, el tratamiento con el que la NBE-FL/90 presentaba las estructuras de fábrica tenía un enfoque tradicional. Lo tradicional en las fábricas es su trabajo básicamente a compresión; por lo que el resto de posibles prestaciones estructurales quedaban fuera del ámbito de aplicación de la norma y, en no pocas ocasiones, esto se ha interpretado como prestaciones no reconocidas o no permitidas.

El DB SE-F realiza una aproximación por tipos estructurales y establece métodos generales y simplificados para su análisis y dimensionado. Reconoce explícitamente la capacidad resistente de las fábricas ante cualquier tipo de solicitación, incluyendo flexotracción y cortadura, sin imponer otras limitaciones distintas de las que se deriven del propio análisis. Ello supone que las fábricas se pueden considerar como elementos estructurales de categoría similar a los de acero o de hormigón armado, con un Documento Básico de carácter estructural que sirve de respaldo al proyecto, cálculo y ejecución de las mismas.

Seguridad en caso de Incendio (DB SI)

Los aspectos relacionados con la protección contra incendios están regulados en el Documento Básico SI "*Seguridad en caso de Incendio*" que actualiza y sustituye a la Norma Básica CPI/96, adaptándose a la normativa europea dentro del marco normativo basado en prestaciones, así como a los avances técnicos en esta materia experimentados durante los últimos años.

El Documento Básico reestructura el contenido de la antigua Norma Básica, agrupando las medidas a adoptar en función de los posibles riesgos identificados. El documento se organiza en distintos apartados que se corresponden con los diferentes aspectos de la protección contra el fuego en los edificios. Los que afectan directamente a los cerramientos de fachada son: la propagación de un incendio, tanto interior como exterior al edificio; la evacuación de ocupantes del edificio en condiciones de seguridad; la accesibilidad de los servicios de extinción y la resistencia al fuego de los elementos constructivos.

Por otra parte, el DB SI establece las condiciones de reacción y de resistencia al fuego que deben cumplir los elementos y materiales constitutivos de las fachadas, conforme a los nuevos sistemas de clasificación armonizados en el ámbito europeo ("*euroclases*") como consecuencia de la aplicación de la Directiva 89/106/CEE sobre productos de construcción, abandonando los anteriores sistemas nacionales de clasificación aplicados por la NBE-CPI/96.

5 Las exigencias tienen el carácter de mínimos, por lo que cualquier propuesta constructiva de un proyecto debe igualar o mejorar los niveles establecidos para cada una de ellas.

6 En el contexto de la NBE-FL/90, la restricción dejaba fuera de su alcance a los ladrillos que no fueran de material cerámico.

Salubridad (DB HS)

El Documento Básico HS "*Salubridad*" regula los aspectos de los edificios que afectan a la higiene y salud de las personas y a la protección del medio ambiente en el entorno edificatorio. En particular, los aspectos que tienen relación directa con los cerramientos de fachada son los que ocasionan problemas de humedad en los edificios.

En este ámbito, la reglamentación relativa a la protección frente a la humedad, en las distintas formas y partes del edificio, era incompleta y poco actualizada. Por otra parte, existe constancia de un elevado número de litigios derivados del problema de aparición de procesos patológicos debidos a la humedad en los edificios [7]. Muchas veces los problemas de humedad son causados por el mal diseño o mantenimiento de los elementos constructivos que forman el cerramiento del edificio, aspectos éstos que precisaban una urgente regulación en la normativa.

En la sección HS-1 del Documento Básico "*Salubridad*" se tratan los criterios y procedimientos encaminados a disminuir el riesgo de procesos patológicos por humedad debidos al mal diseño y mantenimiento de los elementos constructivos, entre ellos las fachadas.

Protección frente al Ruido (DB HR)

La aparición de reglamentación relacionada con los problemas del ruido en la edificación, tanto de rango europeo como estatal (LOE, Ley del ruido), hacía necesaria una adecuada actualización de la normativa acústica existente. El Documento Básico HR "*Protección contra el Ruido*" trata las condiciones acústicas de los edificios en todos sus aspectos, sustituyendo a la Norma Básica NBE-CA/88 sobre "*Condiciones Acústicas de los Edificios*", que únicamente regulaba las condiciones relacionadas con el aislamiento acústico.

El DB HR incluye en la regulación, además de la transmisión del ruido aéreo y de impactos, otros aspectos de similar importancia como son la reverberación y la absorción acústica en determinados recintos, y la protección frente al ruido y vibraciones transmitidos por las instalaciones.

El DB HR propone dos opciones, "*opción simplificada*" y "*opción general*", para la verificación de las exigencias, ambas basadas en la norma europea UNE-EN 12354 "*Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos*", partes 1, 2 y 3.

La "*opción simplificada*" contiene un conjunto de soluciones de aislamiento para los elementos horizontales y verticales de separación (fachadas y cubiertas), que se consideran suficientemente fiables. La "*opción general*" contiene un procedimiento de cálculo, basado en un modelo contenido en la citada norma UNE para la transmisión acústica estructural.

La novedad más significativa del DB HR respecto a la antigua NBE-CA/88 es que en esta última se expresaban los *valores límite* de cumplimiento de las exigencias de aislamiento en términos de valores verificables en laboratorio de las soluciones constructivas. Por el contrario, en el Documento Básico se expresan las exigencias de aislamiento a ruido aéreo y a ruido de impactos mediante parámetros verificables con una medición in situ, además de haber aumentado sus niveles de aislamiento.

Por otra parte, el planteamiento de las soluciones de aislamiento en el DB RH es nuevo, puesto que se considera que una solución de aislamiento es el conjunto de todos los elementos constructivos que conforman un recinto, y no sólo el elemento de separación entre recintos. Este nuevo planteamiento afecta a los cerramientos de fachada en el sentido de que constituyen elementos de flanco para transmisión de ruido entre recintos, por lo que se deben considerar, tanto los factores que intervienen en la transmisión directa del ruido aéreo procedente del exterior, como los que afectan a la transmisión del ruido interior por flancos.

Ahorro de Energía (DB HE)

La preocupación medioambiental asociada a la energía consumida por los edificios, y el objetivo de limitar las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficiencia energética, cristalizaron en la Unión Europea en la Directiva 93/76/CEE y posteriormente en la 2002/91/CE relativa a la "*Eficiencia energética en los edificios*", en la que se obliga a los Estados miembros a fijar unos requisitos mínimos de eficiencia energética para los edificios nuevos y para los grandes edificios existentes que se reformen.

Una parte de los requisitos de la citada Directiva de *"Eficiencia Energética*" se regulaban en la norma básica NBE-CT/79 sobre "*Condiciones Térmicas de los edificios*" y en el "*Reglamento de*

Instalaciones Térmicas" (RITE) aprobado en 1998. El nuevo Documento Básico de "*Ahorro de Energía*" (DB HE) que ha sustituido a la antigua Norma Básica citada tiene como objetivo conseguir un uso racional de la energía necesaria para la utilización de los edificios, reduciendo el consumo energético y utilizando para ello fuentes de energía renovables, incorporando los requisitos de eficiencia energética que la mencionada Directiva establece en los artículos 4, 5 y 6.

El objetivo final del DB HE es promover una construcción más sostenible aumentando los niveles de exigencia respecto de la Norma Básica, a partir de la mejora de la envolvente térmica de los edificios y la eficiencia de sus instalaciones, exigiendo unas condiciones higrotérmicas aptas para el uso de los mismos, reduciendo las necesidades de consumo de energía fósil y avanzando hacia el uso generalizado de las energías renovables.

Con la entrada en vigor del DB HE se pretende dar cumplimiento a la Directiva europea actuando sobre la demanda energética de los edificios, que se requiere de los sistemas de calefacción[8] y refrigeración, en función del diseño, configuración, construcción, orientación y situación climática, para alcanzar unos niveles aceptables y suficientes de bienestar térmico. Para ello, el DB HE establece unas limitaciones que conducen a un control de la demanda mediante dos opciones.

Con la denominada "*opción simplificada*", basada en un control indirecto de la demanda energética del edificio, se limitan los parámetros característicos de los cerramientos y particiones que componen su envolvente térmica. Con la "*opción general*", mucho más precisa, se evalúa la demanda energética del edificio mediante la comparación de ésta con la correspondiente a un edificio de referencia que define la propia opción.

En ambas opciones se limita la presencia de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos y se limitan las pérdidas energéticas debidas a las infiltraciones de aire, lo que podría perjudicar al sistema de aislamiento haciéndolo ineficaz, o provocar molestias por humedades de condensación que generan crecimiento de mohos y, en cualquier caso, incrementar las pérdidas de calor en ambos casos.

Documentos Reconocidos

Con el fin de facilitar el cumplimiento de las exigencias básicas del CTE, la Parte I del mismo incorpora la figura de los *Documentos Reconocidos*, definidos como documentos externos al CTE, que cuentan con el reconocimiento del Ministerio competente y que sirven de complemento a los Documentos Básicos. Su objetivo es permitir el mejor cumplimiento del CTE contribuyendo al fomento de la calidad de la edificación.

Los Documentos Reconocidos pueden ser:

- Especificaciones y guías técnicas o códigos de buena práctica que incluyan procedimientos de diseño, cálculo, ejecución, mantenimiento y conservación de productos, elementos y sistemas constructivos.
- Métodos de evaluación y soluciones constructivas, programas informáticos, datos estadísticos sobre siniestralidad en la edificación u otras bases de datos.
- Comentarios sobre la aplicación del CTE.
- Cualquier otro documento que facilite la aplicación del CTE, excluidos los que se refieran a la utilización de un producto o sistema constructivo particular o bajo patente.

7 Las estadísticas demuestran que el agua es la responsable directa de una de cada tres reclamaciones que se plantean a las aseguradoras, e indirecta de otra de cada tres.

8 Concretamente, el objetivo del documento es una reducción media de la demanda de calefacción en un 25% en relación con la situación anterior. Las previsiones según el estudio de impacto realizado son que la demanda de calefacción experimentará a nivel de todo el país una reducción media que oscila entre el 21%, como valor mínimo esperado para las viviendas en bloque y el 37%, valor máximo esperado en viviendas unifamiliares.

Programa informático LIDER

La evaluación de la exigencia de limitación de la demanda energética que establece el DB HE mediante la "*opción general*" se puede realizar con una aplicación informática de referencia que desarrolla el método de cálculo fijado en el propio Documento Básico.

La versión oficial de este programa, ofrecida por el Ministerio de la Vivienda y por el IDAE, se denomina "*Limitación de la Demanda Energética*" (LIDER) y tiene la consideración de documento reconocido del CTE, estando disponible al público para su libre disposición.

Catálogo de elementos constructivos

Es un Documento Reconocido de ayuda al proyectista que recoge un conjunto de soluciones constructivas, productos y materiales caracterizados con las prestaciones pertinentes en relación al CTE, para facilitar su aplicación.

Las prestaciones de los elementos constructivos que se detallan son las necesarias para aplicar las exigencias relativas a los requisitos de habitabilidad: el grado de impermeabilidad (Protección frente a la humedad), la transmitancia (Demanda energética), el índice de reducción acústica, el índice global de reducción acústica ponderado A y la masa (Protección frente al ruido), etc.

Herramienta de cálculo del DB HR

La formulación del DB HR para la aplicación de la "opción general" está contenida y desarrollada en una herramienta informática que permite verificar el cumplimiento de los casos más frecuentes. Ha sido desarrollada por el Ministerio de la Vivienda con la ayuda del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, del CSIC y la colaboración de expertos entre los que cabe destacar el equipo de *Sonitum* de la Universidad de Vigo.

No se trata de un programa de ordenador propiamente dicho por lo que no es necesaria su instalación, sino de una herramienta que sólo precisa contar con una aplicación residente en el ordenador para el trabajo con hojas de cálculo.

La herramienta sirve para realizar uno a uno el chequeo del aislamiento acústico de parejas de recintos, a ruido aéreo y de impactos o simultáneamente, y para calcular la absorción acústica y el tiempo de reverberación. Se compone de un conjunto de hojas de cálculo que persigue el objetivo de familiarizar a los usuarios con el método a través de su aplicación. Además incluye una serie de tutoriales que muestran de forma sencilla cómo se utiliza. Incorpora también los datos del "*Catálogo de Elementos Constructivos*", aunque el usuario puede añadir sus propias soluciones caracterizadas.

Otros Documentos Reconocidos en tramitación

Actualmente están en tramitación los siguientes documentos que guardan relación con el proyecto y cálculo de elementos de fábrica:

- *"Documento de Aplicación a Vivienda del CTE. Seguridad Estructural: Fábricas"*. Elaborado por el Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España.
- *"Catálogo de soluciones cerámicas para el cumplimiento del CTE".* Elaborado por la Asociación Española de Fabricantes de Ladrillos y Tejas de Arcilla Cocida (Hispalyt) en colaboración con el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja y una amplia comisión de expertos constituida por representantes de las instituciones más significativas del sector de la edificación. Proporciona de forma "*horizontal*" la información que el proyectista necesita conocer para cada uno de los elementos constructivos con materiales cerámicos.
- *"Herramienta Acústica Silensis".* Promocionada también por Hispalyt y elaborada por LABEIN. Es una herramienta informática para el diseño y verificación acústica del edificio. Proporciona soluciones de aislamiento acústico, es decir, combinaciones de elementos constructivos del "*Catálogo de Soluciones Cerámicas*" que cumplen las exigencias de aislamiento acústico a ruido exterior y a ruido interior (aéreo y de impactos) establecidos en el DB HR.

La utilización de los criterios, tablas y soluciones particulares de estos documentos, cuando se hayan cumplimentado las gestiones para ser considerados "*Documentos Reconocidos*" suponen el cumplimiento de las exigencias del CTE en el ámbito que les compete, sin necesidad de justificaciones adicionales.

A1.3 Normas Armonizadas EN

Las Normas Armonizadas EN son normas establecidas por el Comité Europeo de Normalización (CEN), de acuerdo con mandatos conferidos por la Comisión Europea y adoptadas por los organismos de normalización de los Estados miembros de la Unión Europea. En el caso de España, este organismo es la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

La publicación de títulos y referencias de normas armonizadas según las diversas comunicaciones de la Comisión Europea, en el marco de la implementación de la Directiva 89/106/CEE, se ha realizado a través de distintas "*Resoluciones de la Dirección General de Política Tecnológica del Ministerio de Ciencia y Tecnología*", aparecidas en el B.O.E.

Los anexos ZA de las normas armonizadas recogen los capítulos relacionados con los *requisitos esenciales* u otras disposiciones de las Directivas de la Unión Europea.

En general, presentan el siguiente índice:

1. Campo de aplicación y características asociadas
2. Procedimientos para la certificación de conformidad:
   - Sistemas para la evaluación de conformidad
   - Certificado CE y declaración de conformidad
3. Marcado y etiquetado CE.

El cumplimiento de los requisitos establecidos en el anexo ZA de la norma armonizada correspondiente a cada producto, confiere presunción de conformidad del producto con la Directiva 89/106/CEE, pudiendo ostentar el *Marcado CE*. Por tanto, la información de los productos de construcción (según el uso previsto), que acompaña al *Marcado CE*, debe estar referida a lo establecido en dicho anexo.

A1.4 *Marcado CE*

Con el objeto de eliminar barreras comerciales de los productos de construcción dentro del territorio comunitario europeo, los Estados miembros se comprometieron a adoptar medidas basadas en el principio de la libre circulación de bienes, que quedaron recogidas en la *Directiva Europea 89/106/CEE* del Consejo de 21 de diciembre, relativa a la "*Aproximación de las Disposiciones Legales, Reglamentarias y Administrativas de los Estados Miembros sobre Productos de Construcción*", conocida como la *Directiva de Productos de Construcción*, publicada en el Diario Oficial de las Comunidades Europeas N° L 40/12 de 11 de febrero de 1988; que fue modificada por la "*Directiva 93/68/CEE del Consejo de 22 de julio de 1993*".

Estas Directivas disponen que los productos de construcción que se incorporen con carácter permanente a las obras, se deben adaptar, en todos los países de la Unión Europea, mediante una adecuada armonización de su normativa (normas de ensayos y de especificaciones), a los requisitos esenciales de seguridad y salud, así como a otros requisitos que deberán ser exigidos para garantizar la calidad de los mismos.

La trasposición de dichas directivas para los productos de construcción al ordenamiento jurídico español quedó recogida en el Real Decreto 1630/1992 en el que se dictan "*Las Disposiciones para la Libre Circulación de los Productos para la Construcción*", que establecen los requisitos esenciales para la comercialización de estos productos; y en el Real Decreto 1328/1995 que lo modifica. Los contenidos desarrollados en esta legislación son los siguientes:

- Las condiciones para la libre circulación de los productos en el estado español.
- Los requisitos esenciales que deben cumplir los edificios y las obras de ingeniería civil a las que se incorporen tales productos.
- Las características que deben reunir para obtener el *Marcado CE*.
- Los sistemas de conformidad a normas para los productos de construcción, donde se establecen las condiciones y procedimientos a seguir por los fabricantes o sus representantes.

En el artículo 2, apartado 1 del mencionado Real Decreto se indica textualmente que:

"Los productos … que cumplan las prescripciones del presente Real Decreto podrán importarse, comercializarse y utilizarse en todo el territorio español, siempre que sean idóneos

para el uso a que estén destinados, es decir, que cumplan las condiciones siguientes:

a. *Que tengan unas características que permitan que las obras a las que deban ser incorporados, puedan satisfacer los requisitos esenciales … siempre que dichas obras estén adecuadamente proyectadas y construidas y estén sujetas a una reglamentación que contenga dichos requisitos; y*

b. *Que lleven el Marcado CE… el cual indica que satisfacen las disposiciones del presente Real Decreto, incluidos los procedimientos de evaluación de la conformidad…".*

En virtud de lo anterior el *Marcado CE* es el requisito indispensable para que un producto se pueda comercializar en su país de fabricación y dentro de la Unión Europea. Es una certificación obligatoria que indica la conformidad del producto con los *requisitos esenciales* de las mencionadas Directivas 89/106/CEE y 93/68/CEE sobre *Productos de Construcción*, cuyo objetivo primordial es la libre circulación de productos de la construcción en el mercado de la Unión Europea.

Desde el año 2004 comenzó a ser operativo en todos los países de la Unión Europea, para diversos productos de la construcción, la aplicación obligatoria del *Marcado CE*. En España este proceso se realiza sobre las bases de los Reales Decretos 1630/1992 y 1328/1995, desarrollados por una serie de resoluciones del Ministerio de Ciencia y Tecnología (MICYT).

A partir del 1 de abril de 2007, todos los productos de construcción que son incorporados con carácter permanente a las obras de edificación y de infraestructura, en particular los elementos destinados a su uso en albañilería, deben poseer obligatoriamente, *el Marcado CE de Conformidad*, dentro del marco de la mencionadas Directivas Europeas 89/106/CEE y 93/68/CEE. *El Marcado CE* establece procedimientos armonizados de evaluación de la conformidad de los productos industriales con los niveles de protección fijados por las directivas de armonización técnica, sobre todo en lo que respecta a la seguridad, a la salud pública y a la protección de los consumidores.

El *Marcado CE* es una marca de conformidad que no debe confundirse con un certificado de calidad ni con una denominación de origen. Es, esencialmente, una certificación de que los productos cumplen los *requisitos esenciales* y que han sido objeto de un procedimiento de evaluación de la conformidad de los contemplados en las mencionadas directivas sobre *"Productos de la Construcción".* Es obligatorio para una familia de productos una vez que dispone de especificación técnica armonizada, como ocurre con los cementos, morteros, piezas para fábricas y elementos auxiliares.

Requisitos esenciales

De acuerdo con las Directivas Comunitarias sobre "*Productos de la Construcción*", con los Reales Decretos 1630/1992 y 1328/1995 y con la Resolución de 14 de enero de 2004 de la Dirección General de Política Tecnológica, los productos de construcción sólo se pueden comercializar si son idóneos para el uso al que se destinan. A este respecto, deben permitir la construcción de obras que cumplan, durante un período de vida económicamente razonable, unos *requisitos esenciales.*

A continuación se enumeran los *requisitos esenciales* que deben cumplir los productos de construcción con *Marcado CE*, cuando las obras estén sujetas a una normativa que contenga tales requisitos.

1. Resistencia mecánica y estabilidad

Las obras se deben proyectar y construir de forma que las cargas a que pueda verse sometidas durante su construcción y utilización no produzcan ninguno de los siguientes resultados:

a. Derrumbe de toda o parte de la obra.

b. Deformaciones importantes en grado inadmisible.

c. Deterioro de otras partes de la obra, de los accesos o del equipo instalado como consecuencia de una deformación importante de los elementos sustentantes.

d. Daño por accidente de consecuencias desproporcionadas respecto a la causa original.

2. Seguridad en caso de incendio

Las obras se deben proyectar y construir de forma que, en caso de incendio:

- La capacidad de sustentación de la obra se mantenga durante un periodo de tiempo determinado.
- La aparición y la propagación del fuego y del humo dentro de la obra estén limitados.
- La propagación del fuego a obras vecinas esté limitada.
- Los ocupantes puedan abandonar la obra o ser rescatados por otros medios.
- Se tenga en cuenta la seguridad de los equipos de rescate.

3. Higiene, salud y medio ambiente

Las obras se deben proyectar y construir de forma que no supongan una amenaza para la higiene o para la salud de los ocupantes o vecinos, en particular como consecuencia de cualquiera de las siguientes circunstancias:

- Fuga de gas tóxico.
- Presencia de partículas o gases peligrosos en el aire.
- Emisión de radiaciones peligrosas.
- Contaminación o envenenamiento del agua o del suelo.
- Defectos de evacuación de aguas residuales, humos y residuos sólidos o líquidos.
- Presencia de humedad en partes de la obra o en superficies interiores de la misma.

4. Seguridad de utilización

Las obras se deben proyectar y construir de forma que su utilización o funcionamiento no supongan riesgos inadmisibles de accidentes como resbalones, caídas, colisiones, quemaduras, electrocución o heridas originadas por explosión.

5. Protección contra el ruido

Las obras se deben proyectar y construir de forma que el ruido percibido por los ocupantes y las personas que se encuentren en las proximidades se mantenga a un nivel que no ponga en peligro su salud y que les permita vivir, descansar y trabajar en condiciones satisfactorias.

6. Ahorro de energía y aislamiento térmico

Las obras y sus sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación se deben proyectar y construir de forma que la cantidad de energía necesaria para su utilización sea moderada, habida cuenta las condiciones climáticas del lugar, y de sus ocupantes.

Sin perjuicio del mantenimiento normal[9] estos requisitos esenciales se deben cumplir durante un período de vida económicamente razonable[10].

Los *requisitos esenciales* se desarrollan en los respectivos *Documentos Interpretativos* establecidos y publicados por la Comisión de la Comunidades Europeas, y elaborados con

9 Se entiende por *"mantenimiento normal"* una serie de medidas preventivas y de otro tipo que se aplican a la obra a fin de hacer posible que cumpla todas sus funciones a lo largo de su vida útil. Entre estas medidas, cabe citar la limpieza, revisión, mantenimiento, repintado, reparación y sustitución de partes de la obra en caso necesario. El *mantenimiento normal* incluye generalmente inspecciones, y se lleva a cabo en un momento en el que el coste de la intervención que debe efectuarse no es desproporcionado con respecto al valor de la parte de la obra de que se trata, por lo que se debe tener en cuenta en el coste del mantenimiento.

10 Una *vida útil económicamente razonable* supone tener en cuenta todos los aspectos pertinentes, por ejemplo, los costes de proyecto, construcción y uso; los costes ocasionados por una imposibilidad de uso; los riesgos y consecuencias de un fallo de la obra durante su periodo de vida y los costes del seguro para cubrir estos riesgos; la renovación parcial planificada; los costes de inspección, mantenimiento, cuidado y reparación de la obra, los costes de funcionamiento y administración, la evacuación de residuos y los aspectos medioambientales.

la participación de todos los Estados miembros. Existen seis *Documentos Interpretativos*, uno por cada requisito.

Certificación de conformidad con las especificaciones técnicas

Para la obtención del *Marcado CE* es necesario llevar a cabo una evaluación de la conformidad de los productos con las especificaciones técnicas, de acuerdo con los métodos que se enumeran a continuación.

La elección de los métodos que se deben utilizar para un sistema y la combinación de éstos depende de los requisitos exigidos al producto o familia de productos de que se trate, de acuerdo con los criterios de la Directiva.

Métodos de control de la conformidad

Los métodos de control indicados por la Directiva son los siguientes:

- Ensayo inicial del producto por el fabricante o por un organismo autorizado.
- Ensayo de muestras tomadas en la fábrica de acuerdo con un plan determinado de ensayos, por el fabricante o por un organismo autorizado.
- Ensayo mediante sondeo (audit-testing) de muestras tomadas en la fábrica, en el mercado o en obra, por el fabricante o por un organismo autorizado.
- Ensayo de muestras procedentes de un lote a entregar o ya entregado, por el fabricante o por un organismo autorizado.
- Control de producción de la fábrica[11].
- Inspección inicial de la fábrica y control de producción de la fábrica por un organismo autorizado.
- Vigilancia, apreciación y evaluación constantes del control de producción de la fábrica por un organismo autorizado.

El conjunto de los elementos, los requisitos y las disposiciones adoptadas por el fabricante se deben documentar sistemáticamente en forma de medidas y procedimientos escritos. Esta documentación del sistema de control de producción garantiza la calidad y permite comprobar que se han conseguido las características requeridas para un producto así como la eficacia del sistema de control de la producción.

Sistemas de evaluación de conformidad

La certificación de conformidad de un producto presupone:

a. que el fabricante dispone de un sistema de control de producción en la fábrica mediante el cual garantiza que la producción es conforme con las especificaciones técnicas correspondientes, o

b. que para productos especiales mencionados en las especificaciones técnicas correspondientes, además del sistema de control de producción en la fábrica, ha intervenido en la evaluación y vigilancia del control de producción o del propio producto un organismo autorizado a dichos efectos.

La evaluación de conformidad se realiza en dos etapas: en la fase de diseño del producto y en la fase de fabricación. Los sistemas de evaluación y certificación de conformidad, indicados como preferentes en la Directiva, son los siguientes:

A) Certificación de conformidad del producto por un organismo autorizado (Sistema 1) sobre la base de:

a. (por parte del fabricante)
   - Control de producción en fábrica
   - Ensayos complementarios de muestras tomadas en fábrica por el fabricante de acuerdo con un plan de ensayo determinado

b. (por parte del organismo autorizado)
   - Ensayo inicial de tipo del producto
   - Inspección de la fábrica y del control de producción de la fábrica
   - Vigilancia, evaluación y autorización permanentes del control de la producción de la fábrica
   - Eventualmente, ensayo por sondeo de muestras tomadas en la fábrica, en el mercado o en la obra (Sistema 1+).

B) Declaración de conformidad del producto por el fabricante sobre la base de:

- *Primera posibilidad (Sistema 2):*

a. (por parte del fabricante)
   - Ensayo inicial de tipo del producto

- Control de producción de la fábrica

- Eventualmente, ensayo de muestras tomadas de la fábrica, de acuerdo con un plan de ensayo determinado (Sistema 2+).

b. (por parte del organismo autorizado)

- Certificación del control de producción de la fábrica sobre la base de:

  - Inspección inicial de la fábrica y del control de producción

  - Eventualmente, vigilancia, evaluación y autorización permanentes del control de producción de la fábrica (Sistema 2+)

- *Segunda posibilidad (Sistema 3):*

  - Ensayo inicial de tipo del producto por un laboratorio autorizado

  - Control de producción de la fábrica

- *Tercera posibilidad (Sistema 4):*

  - Ensayo inicial de tipo del producto por el fabricante

  - Control de producción de la fábrica

La elección del procedimiento previsto para un determinado producto o familia de productos lo efectúa la Comisión, previa consulta al Comité, con arreglo a la importancia del papel que desempeña el producto respecto a los requisitos esenciales, en particular en lo referente a la salud y la seguridad; la naturaleza del producto; la influencia de la variabilidad de las características del producto sobre su idoneidad para el uso a que está destinado; y las posibilidades de que se produzcan defectos en la fabricación del producto.

En los anexos ZA de las normas armonizadas de aplicación a cada uno de productos se indica el sistema de evaluación designado.

Organismos autorizados

En los sistemas de evaluación de la conformidad interviene la figura de los "*Organismos Autorizados*", con tareas asignadas de certificación, inspección y ensayo. Se trata de organismos de control, denominados "*autorizados*" porque deben obtener la autorización de su correspondiente Estado para llevar a cabo estas tareas, notificando la autorización a la Comisión Europea y a los demás Estados miembros.

En función de sus competencias, se pueden distinguir los siguientes tipos:

Organismo de certificación

Es un organismo imparcial, gubernamental o no gubernamental, con la competencia y responsabilidad necesarias para efectuar la certificación de conformidad del producto o del control de producción en fábrica, de acuerdo con las normas de procedimiento y gestión establecidas.

Organismo de inspección

Es un organismo imparcial, que dispone de la organización, personal, competencia e integridad necesaria para llevar a cabo, de acuerdo con criterios específicos, tareas de vigilancia, evaluación e inspección de las operaciones de control de calidad del fabricante, la selección y evaluación de los productos in situ, en la fábrica o en otro lugar, y realizar la toma de muestras cuando sea necesario.

Laboratorio de ensayo

Es un laboratorio que mide, examina, prueba, calibra o determina por otros medios las características o el rendimiento de los materiales o de los productos. El laboratorio puede ser del propio fabricante o externo pero, en cualquier caso, el fabricante debe comprobar que tiene competencia técnica para realizar las tareas de ensayo de conformidad de los productos.

11 Con arreglo a la Directiva se entiende por *"control de producción de la fábrica"* el control interno permanente de la producción efectuado por el fabricante.

Asimismo, el empresario ha de tener documentación que pruebe que los ensayos se efectúan de acuerdo con las normas y que los equipos de control, medida y ensayo están debidamente calibrados y verificados. Esta acreditación se realiza por ensayo y no de forma genérica.

Organismos Notificados

Los *"Organismos Notificados"* son los organismos de certificación responsables de llevar a cabo los procedimientos de evaluación de conformidad en el *caso 2+*, siendo los Estados Miembros los que regulan la autorización de los mismos, siempre que cumplan los requisitos establecidos en la Directiva 93/456/CEE. En el caso español, deben cumplir los requisitos previstos en la Ley de Industria.

Expediente técnico

Una vez que el fabricante conoce los requisitos que deben cumplir sus productos, cómo debe cumplirlos y quién lo certifica, para la obtención del *Marcado CE* debe iniciar un "*expediente técnico*".

El *expediente técnico* constituye el elemento esencial para los procedimientos de evaluación de la conformidad de un producto, especialmente cuando se aplique una evaluación en la que no intervenga un organismo autorizado.

Debe contener la información necesaria desde el punto de vista técnico para demostrar la conformidad del producto, de forma clara y concisa, redactado en una de las lenguas de la Unión Europea, y debe estar a disposición de las autoridades nacionales para fines de inspección y control.

Los datos generales que debe incluir son los siguientes:

Datos técnicos esenciales y útiles para el control de la evaluación de la conformidad:

- Nombre y dirección del fabricante
- Identificación del producto
- Lista de normas armonizadas aplicadas

Documentación completa que incluya:

- Descripción del producto y procedimientos
- Informes de ensayos realizados
- Información sobre el sistema de calidad
- Planos
- Lista de normas aplicadas, además de las armonizadas

Declaración de conformidad

Si el procedimiento de evaluación muestra que el producto cumple los requisitos que les son aplicables, el fabricante debe redactar y conservar una "*Declaración de Conformidad*" que le da derecho a estampar el *Marcado CE.*

La Declaración de Conformidad debe incluir:

- Nombre y dirección del fabricante o de su mandatario establecido en la Comunidad, y lugar de fabricación
- Descripción del producto: tipo, identificación, uso, denominación y copia de la información que acompaña al *Marcado CE*
- Disposiciones a las que se justa el producto
- Condiciones específicas aplicables a la utilización prevista del producto (por ejemplo, el uso en determinadas circunstancias)
- Nombre y cargo de la persona facultada para firmar la declaración en nombre del fabricante o de su mandatario
- Fecha y firma

En los casos que sea de aplicación el sistema de evaluación 2+, la Declaración de Conformidad se debe acompañar del Certificado del control de producción en fábrica redactado por un Organismo Notificado, que debe incluir, además de la información anterior, la siguiente:

- Nombre y dirección del organismo de certificación
- Número del certificado del control de producción en fábrica
- Condiciones y período de vigencia del certificado
- Nombre y cargo de la persona autorizada para la firma del certificado

Debido a la importancia de la Declaración de Conformidad y de la documentación técnica, es preciso mantenerlas al día, debiendo reflejar en ellas los cambios que puede sufrir el producto

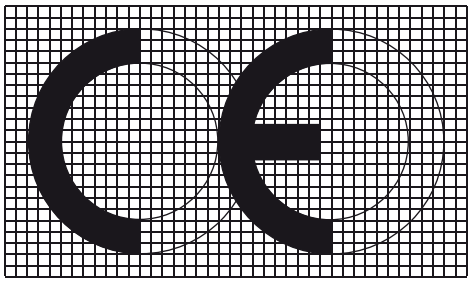
y actualizarlas para que no contengan información inadecuada o incompleta (por ejemplo: nuevo nombre o designación del producto, modificación del uso previsto o cambio en la lista de normas con las que se declara la conformidad).

La Declaración y el Certificado de Conformidad se deben presentarse en la lengua o lenguas oficiales del Estado miembro en el que se vaya a usar el producto.

Marcado y etiquetado CE

La fijación del *Marcado CE* es responsabilidad del fabricante, de su agente o representante autorizado establecido dentro de la Unión Europea. El símbolo del *Marcado CE* se debe estampar conforme a lo previsto en la Directiva 93/68/CE y se debe mostrar en la etiqueta acompañante, en el embalaje o en los documentos mercantiles que acompañan al producto (por ejemplo, el albarán de entrega).

El *Marcado CE* está compuesto de las iniciales *"CE"* diseñadas de la siguiente manera:



En caso de reducirse o aumentarse el tamaño del *Marcado CE*, se deben conservar las propiedades de este logotipo.

Los diferentes elementos del *Marcado CE* deben tener una dimensión vertical apreciablemente igual, nunca inferior a 5 mm.

El símbolo del *Marcado CE* debe ir seguido del número de identificación del organismo encargado de la fase de control de producción. También debe ir acompañado por el nombre o la marca distintiva del fabricante, por las dos últimas cifras del año de colocación del marcado y, cuando proceda, por el número del Certificado de Conformidad y, en su caso, por la información sobre las características esenciales de las tablas ZA de las normas armonizadas de aplicación (los valores declarados, categorías, cumple o no cumple, denominaciones, etc.).

Piezas cerámicas

El *Marcado CE* para "*Productos de Construcción*" articulado a través de la Directivas Europeas 89/106/CEE y 93/68/CE, supone la implantación de este distintivo para la comercialización de tales materiales en todos los países de la Unión Europea. En España, su trasposición a través de los Reales Decretos 1630/1992 y 1328/1995, viene obligando a disponer del *Marcado CE* según los plazos de entrada en vigor que se vienen sucediendo desde los últimos años.

El *Marcado CE* para la comercialización de ladrillos y bloques cerámicos es exigible desde diciembre de 2005. La norma armonizada de aplicación que articula los requisitos de marcado para estos productos es la norma UNE-EN 771-1:2003 "*Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Piezas de arcilla cocida*", elaborada por el comité técnico AEN/CTN 136 Materiales Cerámicos de Arcilla Cocida para la Construcción, cuya Secretaría desempeña HISPALYT[12].

Las piezas de arcilla cocida afectadas por la Norma EN 771-1 se clasifican en dos grupos:

- Piezas LD: incluye las piezas con una *densidad aparente baja*, menor o igual que 1000 kg/m^3, para uso en fábricas revestidas.

- Piezas HD: incluye todas las piezas *cara vista* y las que tienen una *densidad aparente alta*, mayor de 1000 kg/m^3, para su uso en fábricas revestidas.

12 La mencionada norma es la versión oficial en español de la Norma Europea EN 771-1 de abril de 2003. La relación con las Directivas Europeas sobre *"Productos de la Construcción"* se recoge en el anexo ZA que forma parte integrante de esta norma. Tiene además en cuenta las reglas generales del Eurocódigo 5 para fábrica armada y sin armar.

Los productos comerciales de arcilla cocida afectados por la Norma EN 771-1 y sujetos al *Marcado CE* son los siguientes:

- Ladrillo perforado
- Ladrillo perforado cara vista
- Ladrillo macizo
- Ladrillo macizo manual
- Ladrillo macizo prensado
- Ladrillo hueco
- Ladrillo hueco gran formato
- Bloque cerámico aligerado

Esta norma europea incluye también las piezas de arcilla cocida con forma distinta al paralelepípedo rectangular.

Sistemas para la Certificación de la Conformidad

Existen dos sistemas posibles para la certificación de conformidad de las piezas de arcilla cocida para albañilería, según la Decisión de la Comisión 97/740/EC del 14 de octubre de 1997, tal como se indica en el *Anexo II del Mandato "Albañilería y productos relacionados".*

La utilización de uno u otro sistema depende de la *"Categoría"* de las piezas, que debe ser declara por el fabricante, y que tiene trascendencia en el valor del *coeficiente parcial de seguridad del material* que se debe aplicar en los cálculos según el DB SE-F. Existen dos categorías de piezas:

- Piezas de Categoría I: son piezas con una resistencia a compresión declarada con probabilidad de no alcanzarse inferior al 5%.

- Piezas de Categoría II: son piezas que no cumplen el nivel de confianza especificado para las piezas de Categoría I.

Los dos sistemas posibles para la Certificación de la Conformidad, de todos los previstos en el Anexo III de la *Directiva de Productos de Construcción* son los siguientes:

- Sistema 2+:
  aplicable a piezas de Categoría I

  Supone realizar, por parte del fabricante, los ensayos de tipo inicial de producto y el control de producción en fábrica, que se debe diseñar de manera que la probabilidad de cumplimiento con la resistencia a compresión declarada alcance un nivel de confianza del 95%.

  Además, debe intervenir un organismo notificado que emita el *Certificado del Control de Producción en Fábrica*, lo cual incluye las tareas de inspección inicial de la fábrica y la vigilancia continua, evaluación y aprobación de dicho control.

- Sistema 4:
  aplicable a piezas de Categoría II

  Supone una *autocertificación* por parte del fabricante. Sólo incluye las tareas de realizar, por parte del fabricante, el ensayo inicial de tipo del producto en un laboratorio propio o externo; y el control de producción en fábrica.

Parámetros relacionados con los requisitos esenciales

La posesión del *Marcado CE* confiere a las piezas cerámicas una presunción de conformidad para los usos indicados en la norma armonizada UNE-EN 771-1, así como el cumplimiento de los *requisitos esenciales* definidos en las Directivas Europeas sobre *"Productos para la Construcción"*. Ello supone la declaración por parte del fabricante de determinados parámetros relacionados con las características técnicas del producto, que se debe incluir en la información que acompaña al *Marcado CE*.

En la tabla A.1 se resumen los parámetros que debe declarar el fabricante, así como la norma armonizada de referencia para la realización de ensayos, que están relacionados con el cumplimiento de los *requisitos esenciales* que afectan a las piezas cerámicas pertenecientes al grupo HD, en el que se incluyen los ladrillos *"cara vista"*.

Morteros de albañilería

El *Marcado CE* para la comercialización de morteros es obligatorio desde el 1 de abril de 2004 en el caso de algunos productos como los adhesivos cementosos (morteros-cola), y desde el 1 de febrero de 2005 en el caso de los morteros de albañilería, de acuerdo con un periodo de transición de un año.

Las normas que articulan el *Marcado CE* para los morteros de albañilería son las Normas Armonizadas UNE-EN 998-1:2003 "*Morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido*", y UNE-EN 998-2:2004 "*Morte-*

Tabla A.1 Parámetros a declarar en el *Marcado CE* relativos a piezas HD

Producto: PIEZAS HD Uso: muros de fábrica, pilares y particiones				
Características esenciales	**Requisitos y apartados de la UNE-EN 771-1**	**Norma armonizada de ensayo**	**Niveles y/o clases exigidos**	**Tipo de declaración**
Resistencia a compresión [1]	5.3.4 Resistencia a compresión	UNE-EN 772-1	Ninguno	Valor declarado en N/mm^2 (especificando la dirección de aplicación de la carga y la categoría de la pieza)
Estabilidad dimensional [1]	5.3.10 Expansión por humedad	a)	Ninguno	Valor declarado en mm/m
Adherencia [1]	5.3.13 Adherencia	UNE-EN 1052-3	Ninguno	Valor fijo; o valor declarado de la resistencia inicial a cortante en N/mm^2
Contenido de sales solubles [1]	5.3.9 Contenido de sales solubles activas	UNE-EN 772-5	Ninguno	Valor declarado de contenido de sales solubles según las clases S0, S1, S2
Reacción al fuego [2]	5.3.11 Reacción al fuego	UNE-EN 13501-1	Euroclases A1 a F	Declaración de reacción al fuego Clase (A1 a F)
Absorción de agua [3]	5.3.7.1 Elementos exteriores	UNE-EN 772-7	Ninguno	Valor declarado en %
	5.3.7.2 Barreras anticapilaridad	UNE-EN 772-11		
Permeabilidad al vapor de agua [4]	5.3.12 Permeabilidad al vapor de agua	UNE-EN 1745	Ninguno	Valor declarado (coeficiente tabulado de difusión del vapor de agua)
Aislamiento acústico a ruido aéreo directo (en condiciones finales) [5]	5.3.3 Densidad	UNE-EN 772-13	Ninguno	Valor declarado de densidad aparente en kg/m^3 y categoría de tolerancia
	5.3.2 Geometría y forma	UNE-EN 772-16 UNE-EN 772-3	Ninguno	Declaración de la configuración mediante dibujo o descripción
	5.3.1 Dimensiones y tolerancias	UNE-EN 772-16		
Resistencia térmica [6]	5.3.5 Propiedades térmicas	UNE EN 1745	Ninguno	Valor declarado de resistencia térmica en $m^2 \cdot K/W$; o conductividad térmica equivalente en $W/(m \cdot K)$ y los medios de evaluación empleados
Durabilidad (resistencia al hielo/deshielo)	5.3.6 Resistencia a la heladicidad	b)	Ninguno	Exposición a la que va a estar sometida la pieza y valor declarado de resistencia a la heladicidad [a]
Sustancias peligrosas	ZA.1 Nota		Ninguno	Información complementaria en materia de sustancias peligrosas

[1] Para piezas que vayan a ser utilizadas en elementos con exigencias estructurales
[2] Para piezas que vayan a ser utilizadas en elementos con exigencias frente al fuego
[3] Para piezas que vayan a ser utilizadas como barreras anticapilaridad o en elementos exteriores con una cara expuesta
[4] Para piezas que vayan a ser utilizadas en elementos exteriores
[5] Para piezas que vayan a ser utilizadas en elementos con exigencias acústicas
[6] Para piezas que vayan a ser utilizadas en elementos con exigencias térmicas
[a] La expansión por humedad se debe evaluar y declarar según las disposiciones del lugar donde vayan a ser utilizadas las piezas
[b] Cuando se requiera, se empleará el método de ensayo designado a tal efecto
*Fuente: *Norma UNE-EN 771-1. Anejo ZA*

ros para albañilería. Parte 2: Morteros para Albañilería"[13]. Desde la entrada en vigor de estas normas quedan relegadas a un segundo plano las indicaciones existentes sobre este material de construcción en la antigua Norma Básica NBE FL-90. Todos los proyectos de edificación deben tener en cuenta esta Normativa Europea Armonizada, traspuesta ya a derecho español; y los morteros destinados a la formación de fábricas deben disponer del *Marcado CE* antes de ser puestos en el mercado.

Las diferencias más importantes respecto a la legislación anterior son:

1. Las clasificaciones de los distintos tipos de morteros para albañilería.

2. El cambio de denominación de los morteros, que pasan a expresarse por la resistencia en N/mm^2: M1; M2,5; M5; M7,5; M15, M20 y Md[14]; en lugar de los M20; M40, M80 y M160 que existía hasta la fecha, denominados por la resistencia en kp/cm^2). También se admite la designación M7,5 referida a morteros con resistencia superior a 7,5 N/mm^2.

3. Las especificaciones y los requisitos de los morteros

4. La evaluación de la conformidad mediante ensayos iniciales de tipo y un control de producción en fábrica, con el consiguiente aumento de la garantía de calidad del producto.

5. La obligación por parte del fabricante de expresar las recomendaciones de uso de sus morteros, lo que asegura un adecuado empleo de los mismos.

Para cumplir las condiciones de la nueva normativa, los centros productores de mortero deben contar con un sistema de control de producción de fábrica, así como cumplir y exhibir los valores exigidos para los diferentes requisitos estipulados. Los morteros hechos en obra sin *Marcado CE* deben ser objeto de los ensayos que acrediten las características especificadas en su correspondiente norma.

Sistemas para la Certificación de la Conformidad

Existen dos sistemas posibles para la certificación de conformidad de los morteros para albañilería, según la decisión de la Comisión 97/740/EC del 14 de octubre de 1997, que figura en el *Anexo III del mandato "Productos M 116 para albañilería y productos relacionados".*

La utilización de uno u otro sistema depende del tipo de mortero definido según el *"concepto"*. Existen dos tipos de mortero según la clasificación de la norma UNE-EN 998-2:

- Mortero para albañilería *diseñado*: es un mortero cuya composición y sistema de fabricación se han elegido por el fabricante en el fin de obtener las propiedades especificadas *(concepto de prestación)*.

- Mortero para albañilería *prescrito:* es un mortero que se fabrica en unas proporciones predeterminadas y cuyas propiedades dependen de las proporciones de los componentes que se han declarado *(concepto de receta).*

Los dos sistemas posibles para la Certificación de la Conformidad, de todos los previstos en el *Anexo III de la Directiva de Productos de Construcción s*on los siguientes:

- Sistema 2+:
aplicable a morteros industriales para albañilería diseñados

  Supone realizar, por parte del fabricante, los ensayos de tipo inicial de producto y de muestras tomadas en la fábrica; y el control de producción en fábrica.

  Además, debe intervenir un organismo notificado que emita el *Certificado del Control de Producción en Fábrica*, lo cual incluye las tareas de inspección inicial de la fábrica y la vigilancia continua, evaluación y aprobación de dicho control.

- Sistema 4:
aplicable a morteros industriales para albañilería prescritos

  Supone una *autocertificación* por parte del fabricante. Sólo incluye las tareas de realizar, por parte del fabricante, el ensayo inicial de tipo del producto en un laboratorio propio o externo; y el control de producción en fábrica.

Parámetros relacionados con los *requisitos esenciales*

La posesión del *Marcado CE* confiere a los morteros para albañilería una presunción de conformidad para los usos indicados en la norma armonizada UNE-EN 998-2, así como el cumplimiento de los requisitos esenciales definidos en las Directivas Europeas

sobre "*Productos para la Construcción*". Ello supone la declaración por parte del fabricante de determinados parámetros relacionados con las características técnicas del producto, que se debe incluir en la información que acompaña al *Marcado CE.*

En la tabla A.2 se resumen los parámetros que debe declarar el fabricante, así como la norma armonizada de referencia para la realización de ensayos, que están relacionados con el cumplimiento de los *requisitos esenciales* que afectan a los morteros para albañilería utilizados en la ejecución de las fábricas de ladrillo.

Armadura de tendel

La norma armonizada que regula la tramitación del *Marcado CE* para la comercialización de las armaduras de tendel es la norma UNE-EN 845-3:2006

13 Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 998-2 de abril de 2003. Ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 83 *Hormigón* cuya Secretaría desempeña ANEFHOP. Su preparación se ha llevado a cabo en virtud del mandato M 116 *"Albañilería y productos relacionados"* dado al CEN por la Comisión Europea y la Asociación Europea del Libre Cambio.

14 La designación *"Md"* indica un resistencia a compresión mayor de 25 N/mm² declarada por el fabricante.

Tabla A.2 Parámetros a declarar en el *Marcado CE* relativos a morteros para albañilería industriales

Producto: MORTEROS PARA ALBAÑILERÍA INDUSTRIALES: Mortero para uso corriente (G); mortero para juntas y capas finas (T) y mortero ligero (L) Uso: muros de fábrica, pilares y particiones				
Características esenciales	**Requisitos y apartados de la UNE-EN 998-2**	**Norma armonizada de ensayo**	**Niveles y/o clases exigidos**	**Tipo de declaración**
Resistencia a compresión (1)	5.4.1 Resistencia a compresión	UNE-EN 1015-11	Ninguno	Categorías o valores declarados en N/mm²
Proporción de los componentes (2)	5.3 Proporción de los componentes		Ninguno	Proporciones de la mezcla en volumen o en peso
Adhesión o resistencia de unión (3)	5.4.2 Adherencia	UNE-EN 1052-3	Ninguno	Valor declarado de la resistencia inicial al cizallamiento en N/mm², medida o tabulada
Contenido en cloruros (4)	5.2.2 Contenido en iones cloruro	UNE-EN 1015-17	Ninguno	Valor declarado como una fracción en % en masa
Reacción al fuego (5)	5.6 Reacción frente al fuego	UNE-EN 13501-1	Euroclases A1 a F	Declaración de reacción al fuego Clase (A1 a F)
Absorción de agua (6)	5.4.3 Absorción de agua	UNE-EN 1015-18	Ninguno	Valor declarado en [kg/(m²•min 0,5)]
Permeabilidad al vapor de agua (6)	5.4.4 Permeabilidad al vapor de agua	UNE-EN 1745	Ninguno	Valor declarado (coeficiente tabulado de difusión del vapor de agua)
Conductividad térmica (7)	5.4.6 Conductividad térmica	UNE EN 1745	Ninguno	Valor declarado o tabulado medido en W/(m•K)
Durabilidad	5.4.7 Durabilidad	(a)	Ninguno	Valor declarado como pertinente
Sustancias peligrosas	ZA.1 Nota		Ninguno	Información complementaria en materia de sustancias peligrosas

(1)y (2) Para todos los morteros de albañilería diseñados y prescritos
(3) Para los morteros diseñados que vayan a ser utilizados en elementos con exigencias estructurales
(4) Para los morteros que vayan a ser utilizados en fábrica armada
(5) Para los morteros que vayan a ser utilizados en elementos con exigencias frente al fuego
(6) Para los morteros que vayan a ser utilizados en elementos exteriores
(7) Para los morteros que vayan a ser utilizados en elementos con exigencias térmicas
(a) La resistencia a los ciclos hielo/deshielo se debe evaluar y declarar conforme a las disposiciones válidas en el lugar de utilización
*Fuente: Norma UNE-EN 998-2. Anejo ZA

"Especificación de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 3: Armaduras de junta de tendel de malla de acero"[15] . El anexo ZA de esta norma se refiere solamente a mallas de alambre soldado para uso estructural, no existiendo requisitos regulados conocidos para productos de esta familia para uso no estructural.

Sistema para la Certificación de la Conformidad

El sistema indicado en el anexo ZA de la norma UNE-EN 845-3 para la certificación de la conformidad de las armaduras de tendel prefabricadas es el Sistema 3, que supone realizar, por parte del fabricante, el control de producción en fábrica; y, por parte de un organismo notificado, los ensayos de tipo inicial de producto para la determinación de los valores declarados de los parámetros relacionados con los requisitos esenciales que se indican en la tabla A3.

Anclajes y llaves

La norma armonizada que regula la tramitación del *Marcado CE* para la comercialización de las llaves y dispositivos de anclaje es la norma UNE-EN 845-1:2005 *"Especificación de componentes auxiliares para fábricas de albañilería. Parte 1: Llaves, amarres, colgadores, ménsulas y ángulos"*[16].

Sistema para la Certificación de la Conformidad

El sistema indicado en el anexo ZA de la norma UNE-EN 845-1 para la certificación de la conformidad de las llaves y dispositivos de anclaje es el Sistema 3, que supone realizar, por parte del fabricante, el control de producción en fábrica; y, por parte de un organismo notificado, los ensayos de tipo inicial de producto para la determinación de los valores declarados de

Tabla A.3 Parámetros a declarar en el *Marcado CE* relativos a las armaduras de tendel prefabricadas

Producto: ARMADURAS DE JUNTA DE TENDEL SOLDADAS EN MALLA DE ACERO Uso: estructural en muros y medianerías				
Características esenciales	**Requisitos y apartados de la UNE-EN 845-3**	**Norma armonizada de ensayo**	**Niveles y/o tipos exigidos**	**Tipo de declaración**
Resistencia a tracción (de la armadura)	5.4.1.1 Límite elástico característico de los alambres longitudinales	UNE-EN 10002-1 UNE-EN 10002-2 UNE-EN 10002-4 ISO 10606	Ninguno	Valor declarado del límite elástico característico expresado en N/mm² Porcentaje de elongación total a fuerza máxima Relación entre la resistencia a tracción y el límite elástico
	5.4.1.2 Ductilidad de los alambres longitudinales	UNE-EN 10002-1 UNE-EN 10002-2 UNE-EN 10002-4 ISO 10606	Ninguno	Categoría de ductilidad (alta, normal o baja)
	5.4.1.3 Límite elástico característico de los alambres longitudinales	UNE-EN 10002-1 UNE-EN 10002-2 UNE-EN 10002-4 ISO 10606	Ninguno	Valor declarado del límite elástico característico expresado en N/mm²
Adhesión	5.5 Adhesión y longitud de solape	UNE-EN 846-2	Ninguno	Adhesión expresada en N y longitud de solapo en expresada en mm [a]
Durabilidad (anticorrosión)	5.6 Durabilidad		Ninguno	Referencia al material o revestimiento [b]
Sustancias peligrosas	ZA.1 Nota		Ninguno	Información complementaria en materia de sustancias peligrosas

[a] La adhesión se define como la longitud de solape necesaria para obtener el máximo rendimiento de la armadura de acuerdo con el uso para el que fue diseñada

[b] Las condiciones de durabilidad contra la corrosión dependen tanto del tipo de exposición de la fábrica de albañilería como de la especificación sobre el material o su revestimiento

*Fuente: *Norma UNE-EN 845-3. Anejo ZA*

los parámetros relacionados con los requisitos esenciales que se indican en la tabla A4.

A1.5 Marcas de calidad

La política de calidad no se limita a los productos, procesos o materiales, sino que se puede referir también a la actividad global de la empresa fabricante o suministradora. La implantación de un sistema "*normalizado*" de gestión de calidad, además de facilitar la inserción de la empresa en el mercado, mejora la relación calidad/precio, reduce errores, mejora el sistema de producción y aumenta la credibilidad técnica.

La tramitación de la certificación del sistema de calidad en las empresas se realiza, a través de los centros de certificación, de acuerdo con las normas ISO-9000, que son Normas de la Organización Internacional de Normalización, o sus equivalentes normas europeas EN y normas españolas UNE.

15 Esta norma es la versión oficial en español de la Norma Europea EN 845-3 de abril de 2003. Ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 41 *Construcción* cuya Secretaría desempeña AENOR.

16 Esta norma es la versión oficial en español de la Norma Europea EN 845-1 de abril de 2003. Ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 41 Construcción cuya Secretaría desempeña AENOR.

Tabla A.4 Parámetros a declarar en el *Marcado CE* relativos a las llaves y anclajes

Producto: LLAVES PARA MURO Uso: muros y tabiques de fábrica de albañilería amado)				
Características esenciales	**Requisitos y apartados de la UNE-EN 845-1**	**Norma armonizada de ensayo**	**Niveles y/o tipos exigidos**	**Tipo de declaración**
Resistencia a compresión	5.3.1.3 Capacidad de carga a compresión	UNE-EN 10002-1 UNE-EN 10002-2 UNE-EN 10002-4 ISO 10606	Ninguno	Valor declarado de la capacidad de carga en N Dimensiones en mm [a]
Resistencia a tracción	5.3.1.2 Capacidad de carga a tracción	UNE-EN 10002-1 UNE-EN 10002-2 UNE-EN 10002-4 ISO 10606	Ninguno	Valor declarado de la capacidad de carga en N Dimensiones en mm [a]
Resistencia al pandeo o alabeo	5.3.1.4 Desplazamiento bajo carga	UNE-EN 10002-1 UNE-EN 10002-2 UNE-EN 10002-4 ISO 10606	Ninguno	[a] [b]
Capacidad de protección contra el agua	5.4 Resistencia al paso del agua a través de la cámara	UNE-EN 846-2	Ninguno	Resistente o no resistente
Durabilidad (anticorrosión)	5.6 Durabilidad		Ninguno	Referencia al material o revestimiento [c]
Sustancias peligrosas	ZA.1 Nota	Ninguno	Información complementaria en materia de sustancias peligrosas	

[a] La resistencia mecánica del producto depende de sus dimensiones, alojamiento y de sus anclajes o fijaciones

[b] Los requisitos asignados para la resistencia al pandeo o alabeo se aplican por medio de una condición que limita el desplazamiento bajo resistencia a compresión o a tracción a un valor especificado y relacionado con los valores declarados de resistencia a compresión o a tracción

[c] Las condiciones de durabilidad contra la corrosión dependen tanto del tipo de exposición de la fábrica de albañilería como de la especificación sobre el material o su revestimiento

*Fuente: Norma UNE-EN 845-1. Anejo ZA

Un sistema de certificación consta de una parte escrita en la se describe el sistema de producción ajustado a una norma ISO; y otra parte práctica que comprende los aspectos humanos, como el adiestramiento del personal, y aspectos físicos, como los locales, maquinaria o instrumentos de control.

La certificación de un sistema de calidad da derecho a una marca calidad que es un distintivo voluntario del producto que complementa la garantía del cumplimiento de determinados requisitos.

Para emitir el certificado de una *marca de calidad* es necesario verificar que éste incluye a las actividades definidas en el control de producción en fábrica, y que se refiere a los productos sujetos a *Marcado CE*. Asimismo, hay que comprobar que el plan de control responde a lo requerido para el *Marcado CE.*

Las marcas de calidad y los sistemas de gestión certificados cumplen una función diferente al *Marcado CE*. Son conformes con objetivos diferentes o adicionales, en general con mayor nivel de exigencia, por lo que representan un valor añadido al producto.

Las marcas de calidad son voluntarias y no se deben prestar a confusión con el *Marcado CE* obligatorio, ni reducir ni obstaculizar la legibilidad y visibilidad del mismo.

Marca *"AENOR"*

La *Marca "N"* de AENOR es una marca voluntaria de producto, que exige el establecimiento de un sistema de calidad basado en las normas UNE-EN-ISO-9000, lo que conlleva una serie de controles, tanto en el proceso de producción, como en el producto fabricado.

Los productos finales deben estar sometidos a un control interno por parte del fabricante, y a un control externo realizado por laboratorios acreditados.

Además, los productos con *Marca "N"* son sometidos a inspecciones externas, llevadas a cabo por entidades de inspección pertenecientes al Comité Técnico de Certificación, que consisten en la revisión de los ensayos internos efectuados por el fabricante, y en la toma de muestras de los productos fabricados para la realización de los ensayos normativos en un laboratorio externo acreditado.

Los productos con *Marca "N"* de AENOR no precisan controles de recepción en obra, debido a que han sido sometidos a un proceso de control y se han fabricado de acuerdo con un sistema de calidad auditado periódicamente; es decir, que se puede considerar asegurado el cumplimiento de las normas vigentes para cada tipo de producto. No obstante, queda a criterio de la dirección facultativa la decisión de realizar controles de recepción de productos en obra, independientemente de que posean o no la *Marca "N".*

A1.6 Etiquetas ecológicas

Son certificados y distintivos aplicables a productos para garantizar que han sido fabricados bajo criterios de calidad y respeto medioambiental, y que han sido verificados por organismos independientes.

Las principales etiquetas reglamentadas son *European Union Eco-label* (etiqueta ecológica de la Unión Europea) y *AENOR Medio Ambiente* (Asociación Española de Normalización y Certificación). Estos sellos certificados no se deben confundir con los numerosos distintivos que se marcan en los productos con carácter informativo y que, habitualmente, sólo son incentivos de venta.

Estos logotipos indican que los materiales son reciclables, pero no que son reciclados.

El logotipo "*punto verde*" informa que el envase está fabricado según las especificaciones legales y que, si se deposita en el contenedor correspondiente, pasará por un proceso de reciclaje.

Los procedimientos para la obtención de etiquetas ecológicas están regulados por las siguientes normas:

UNE-EN ISO 14020:2002. *"Etiquetas ecológicas y declaraciones ambientales. Principios generales"*.

UNE-EN ISO 14021:2002. "*Etiquetas ecológicas y declaraciones ambientales. Autodeclaraciones ambientales (Etiquetado ecológico Tipo II").*

UNE-EN ISO 14024:2001. "*Etiquetas ecológicas y declaraciones medioambientales. Etiquetado ecológico Tipo I. Principios generales y procedimientos*".

UNE-ISO 14025:2007 "*Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos*".

Las etiquetas ecológicas del tipo I (ISO 14024) y del tipo III (ISO 14025) pertenecen al grupo de *etiquetas reglamentadas*. Este grupo ofrece al usuario serias garantías, puesto que en las gestiones para la obtención del distintivo correspondiente es imprescindible la presencia de un organismo competente que verifique el cumplimiento de los requisitos preestablecidos.

Las etiquetas del tipo I responden a un programa específico de los requisitos a cumplir para diferentes categorías de productos. Actualmente existe una extensa gama de productos de construcción con etiquetas ecológicas del tipo I, de las cuales las más habituales son la etiqueta *ecológica europea* y el *distintivo de calidad ambiental de AENOR Medio Ambiente.*

Distintivo de Garantia de Calidad Ambiental
(Distintiu de Garantia de Qualitat Ambiental)
Departamento de Medio Ambiente y Vivienda de la Generalitat de Cataluña
www.gencat.net

- Materias primas y productos de plástico reciclado
- Productos de madera
- Productos y transformados de corcho
- Productos y sistemas que favorencen el ahorro de agua (grifería, limitadores de caudal, inodoros, sistema de recirculación de aguas grises, etc.)
- Materias primas y productos de caucho reciclado (baldosas elásticas)
- Etc.

Etiqueta ecológica de la Unión Europea
(European Union Eco-label)
Equipo de ecoetiquetaje de la Unión Europea
www.eco-label.com

- Pinturas y barnices de interior
- Baldosas rígidas para el suelo
- Productos de limpieza de uso general
- Bombillas eléctricas
- Etc.

Ángel Azul (Blauer Engel)
Ministerio Federeal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania
www.blauer-engel.de

- Maquinaria de construcción de baja sonoridad
- Pinturas y barnices menos contamienantes
- Materiales de construcción que incorporan restos de vidrio
- Materiales de construcción que incorporan restos de papel
- Productos de madera y derivados de baja emisividad
- Productos de plástico reciclado
- Pavimentos flexibles
- Productos de sellador de baja emisividad
- Lubricantes de rápida biodegradabilidad
- Productos fotovoltaicos
- Sistemas de ahorro de agua
- Etc.

AENOR Medio Ambiente
Asociación Española de Normalización y Certificación
www.aenor.es

- Pinturas y barnices
- Módulos Fotovoltaicos
- Centros de Eliminación y valorización de los residuos inertes de derribo y demás residuos de construcción
- Etc.

Ejemplos de etiquetas del tipo I.

Las etiquetas ecológicas de tipo III aportan información cuantitativa de los distintos impactos ambientales que puede ocasionar un producto a lo largo de su ciclo de vida. Constituye, sin duda el distintivo ambiental más interesante, puesto que más que una etiqueta propiamente dicha, se trata de una documentación en la que se establece la incidencia que tiene un determinado producto en nuestro entorno.

Las etiquetas ecológicas de tipo II pertenecen al grupo de *etiquetas no reglamentadas*. A diferencia de los toros tipos, éstas se gestionan exclusivamente por los beneficiarios de dichas declaraciones sin la intervención de ningún organismo reconocido. Tienen poca fiabilidad y se colocan como un argumento de venta, aprovechando la consideración que tienen en nuestro entorno la ecología y el medio ambiente.

Ejemplos de etiquetas del tipo II

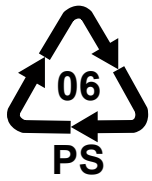
Para poder comparar productos de construcción de la misma categoría es necesaria la unificación de criterios. En este sentido, se está llevando a cabo por los distintos comités técnicos de normalización, las normas ISO relativas a declaraciones ambientales, por normas UNE o UNE-EN de ámbito europeo.

Reciclable

El bucle de Möbius es el recomendado por la ISO14021:1999 para indicar que un producto es reciclable. Sin embargo, existen otros muchos símbolos diseñados por otros fabricantes para destacar que un determinado producto es reciclable

Aluminio reciclable

Aluminio reciclable



Plástico reciclable

Contenido de reciclado

El bucle de Möbius acompañado del porcentaje de contenido de reciclado es el criterio recomendado por la ISO 14021:1999. Sin embargo, en muchas ocasiones este símbolo comporta confusión pues suele incorporarse a los envases, y crea dudas sobre el que incorpora cierto porcentaje de reciclado es el envase o el producto envasado. En el mercado también existen muchos símbolos que pretenden transmitir una información similar.

Gestión de envases

El punto verde indica que los fabricantes pagan y participan en el funcionamiento de sistema de gestión de envases.

Nocivo e irritante

Tóxico

Corrosivo

Inflamable

Comburente

Explosivo

ANEJO 2. Bibliografía

Teoría de las estructuras. Thimoshenko. 1945. Espasa Calpe.

Resistencia de materiales. W.A. Nash. 1969. Compendios Schaum. McGraw Hill.

Diseño estructural en arquitectura. M.Salvadori y M.Levy. 1970. CECSA (México).

PIET 70, Obras de fábrica. 1970. Instituto Eduardo Torroja para la Construcción y el Cemento (Madrid).

Estudio de materiales: II el yeso; II cales. F. Arredondo. 1972. Instituto Eduardo Torroja para la Construcción y el Cemento (Madrid).

Pathologie del ouvraes en maçonerie. Deuxième partie: Les maçoneries dans leur fonction de paroi. L. Logelais. 1973. Annales de l'Institut Technique de Batiment et des Travaux Publics. Suplemento nº 303.

Elasticidad. A. Arangoá. 1974. I.G.C.

Disesti statici delle structure edilizie. S. Mastrodicasa. 1974. Hoepli (Milán).

Morteros de cemento para la albañilería. Mª Teresa Valdehita. 1976. Monografías del Instituto Eduardo Torroja, nº 337. I.E.T.c.c. (Madrid).

La humedad en la construcción. R.T. Gratwick. 1976. Editores Técnicos Asociados.

Structures or why things don't fall down. J.E. Gordon. 1978. Penguin Books.

Fallos en los edificios. Lyall Addeleson. 1982. Consejo General de Aparejadores y Arquitectos Técnicos.

Estanqueidad e impermeabilización en la edificación. 1983. Editores Técnicos Asociados S.A. Barcelona.

Materiales de construcción. Morteros. L. Galán y J. Garralón. 1983. Universidad Politécnica de Madrid.

Nuevas técnicas en la obra de fábrica. D. Bernstein, J.P. Champetier, F. Peiffer. 1985. Editorial Gustavo Gilí.

Manual Murfor®. Reinforcement for masonry. 1987. N.V. Bekaert S.A.

Estructuras para arquitectos. M. Salvadori y R. Heller. 1987. CP67 (Buenos Aires).

Estructuras varias: Estructuras de ladrillo. R. Fombella. 1988. Fundación Escuela de la Edificación (UNED).

Produits de terre cuite. Caracteristiques, emploi et mise en oeuvre. H. Berebesson, T. Fontaine, J. Clauzon. 1988.

Structural Masonry. A.W. Hendry. 1990. Macmillan (Londres).

El muro de ladrillo. Parte I: Recomendaciones para el proyecto, cálculo, ejecución y control de los muros resistentes de fábrica de ladrillo y bloque cerámico. 1992. Hispalyt (Madrid).

Los diez libros de arquitectura. Facsímil de la edición de 1787. M. Vitrubio. Editoria Alta Fulla. 1993 (Barcelona).

Achieving successful brickwork. The Brick Development Association. 1993. Technical Editir Terry Knight.

La realizzazione di murature in laterizio. Nomberto Tubi. 1993. Edicioni Laterconsult, Andil sezione Murature (Roma).

Understanding structures. Derek Seward. 1994. MacMillan Press.

Estructuras de fábrica. Jacques Heyman. 1995. Instituto Juan de Herrera (Madrid).

Cerramientos de fábrica. Grietas y fisuras. J. Monjo. Curso de patología, conservación y restauración de edificios. 1995. COAM (Madrid).

La fachada ventilada con ladrillo cara vista. I. Paricio. Nueva Arquitectura con Arcilla Cocida, nº 2. 1995. Faenza Editrice Ibérica S.L., Hispalyt (Madrid).

Construire senza difetti. Giorgio Zanarni. 1996. Alveolater (Bologna).

Manual de control de calidad total en la edificación. F. Merchán Gabaldón. 1997. CIE Dossat 2000.

Patología de cerramientos y acabados arquitectónicos. J. Monjo. 1997. Munilla-Leira (Madrid).

Diccionario básico de la construcción. J. Zurita. 1998. Monografías CEAC de la construcción. CEAC (Barcelona).

La fachada de ladrillo. I. Paricio. 1998. Bisagra.

Manual de ejecución de fachadas con ladrillo cara vista. 1998. Hispalyt (Madrid).

Razón y ser de los tipos estructurales. E. Torroja Millet. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 2000 (Madrid).

Manual de minimización y cestión de los residuos en las obras de construcción y demolición. 2000. Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña ITeC (Barcelona).

Diccionario de arquitectura y construcción. S. Vega Amando. 2001. Munilla-Leira (Madrid).

Manual práctico de seguridad en la construcción. 2001. Cambra Oficial de Contractistes d'Obra de Catalunya CCOC.

Aladrillo y sus muros maravillosos. 2003. Hispalyt (Madrid).

La acústica en el Código Técnico de la Edificación. F. Lidón Juan. Servicio de Acústica de CAAT Valencia. Mayo de 2003.

Pequeña guía de la cal en la construcción. Monika Brüemmer. EcoHabitar. 2004.

Métodos de análisis para verificar la estabilidad y resistencia de los cerramientos de ladrillo. C. del Río. Conarquitectura nº 10. Marzo 2004.

Morteros para fábricas. O. Rodríguez Mora. Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero AFAM. Octubre de 2004 (Madrid).

Guía sobre el Marcado CE en los productos de arcilla cocida. Laboratorio Oficial para Ensayos de Materiales de Construcción. Noviembre 2004. Hispalyt (Madrid).

Patología de las piezas cerámicas y nuevas tendencias en la edificación. AITEMIN & Universidad de Castilla-La Mancha. 2004. AITEMIN – Centro Tecnológico (Toledo).

Fichas técnicas sobre medios de protección colectiva en edificación. Sistemas provisionales de protección de borde. Fundación Laboral de la Construcción. 2004.

Los equipos de protección individual en la construcción. Fundación Laboral de la Construcción. 2004.

Prácticas de sostenibilidad en la edificación. 2005. Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña ITeC (Barcelona). 2005.

Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2004 – 2012. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE. Julio de 2005.

Aislamiento aéreo de sonidos con mampostería cerámica. Cámara Industrial de Cerámica Roja. Septiembre de 2005.

Control de ejecución de tabiquerías y cerramientos. Pablo Collado Trabanco. Editorial Lex Nova. 2005.

Manual de aislamiento en la edificación. ISOVER.

Cerramientos. GeoHidrol, S.A. 2006 (Madrid).

Los materiales cerámicos ante el reto del Código Técnico de la Edificación. A. Maiztegi y J. Astudillo. Centro de Investigación Tecnológica CIDEMCO. Conarquitectura, nº 18. Abril de 2006.

Cálculo de muros de fábrica sometidos a cargas laterales de viento. J. Estévez Cimadevila; D. Otero Chans. Hormigón y Acero, nº 240. 2º Trimestre de 2006.

Comportamiento de un muro confinado ante acciones laterales. V. Sastre. Conarquitectura, nº 20. Octubre de 2006.

DAV – Aplicación a edificios de uso residencial vivienda. Seguridad Estructural Fábricas. Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España. 2007 (Madrid).

Aislamiento térmico. C. Castro. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Fundación Escuela de la Edificación. 2008.

La integración de la acústica en los procesos constructivos. F. Labastida Azemar. Revista Online de Arquitectura, Ingeniería y Construcción. Abril de 2008.

Primeros ruidos. Análisis del documento de protección frente al ruido, el último del CTE. F. Daumal i Domenech. Revista Online de Arquitectura, Ingeniería y Construcción. 2008.

Sistema "Structura" para fachadas de ladrillo cara vista. C. del Río. Conarquitectura nº 25. Enero 2008.

Proyecto cooperativo del análisis de la problemática y las soluciones más adecuadas para la construcción de muros no portantes de fábricas de ladrillo cerámico. PROFIT liderado por Hispalyt, convocatoria de 13 de abril de 2005. 2005 - 2008.

Catálogo de soluciones cerámicas para el cumplimiento del Código Técnico de la Edificación. Hispalyt. 2008 (Madrid).