

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

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.

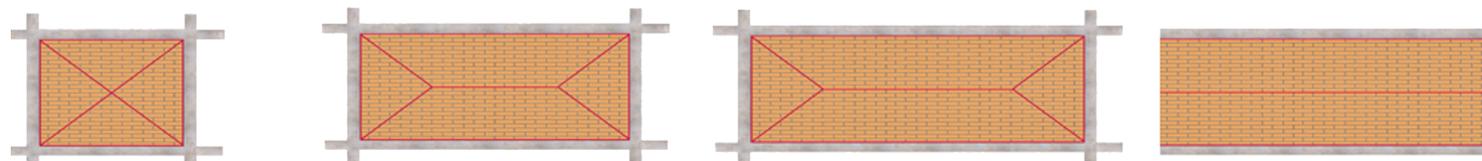
La forma convencional de construir la hoja exterior de un cerramiento de fábrica de ladrillo cerámico consiste en sustentarlo en la estructura portante del edificio, generalmente constituida por pórticos de hormigón o acero y forjados de hormigón. Las acciones fundamentales a las que debe hacer frente el cerramiento son de dos tipos: gravitatorias, originadas al menos por su propio peso; y horizontales, debidas a la acción de viento o sismo¹. 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 sollicitación predominante es de flexión, combinada en mayor o menor medida con sollicitación axial 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 mecánico².

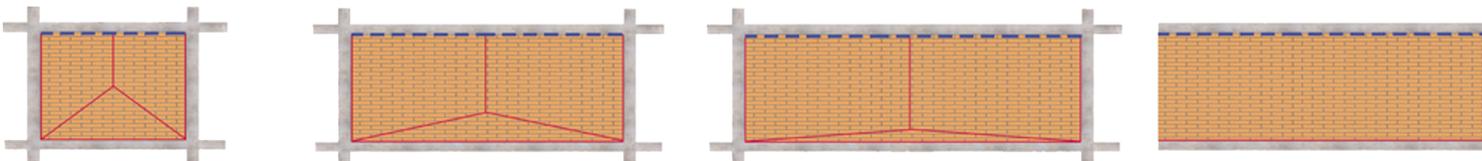
Los esfuerzos fundamentales que se generan en los cerramientos sustentados en una estructura porticada

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.

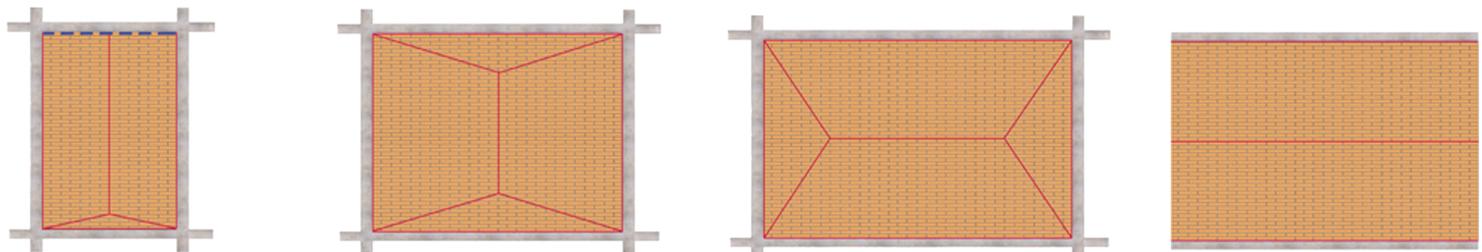
En general, la distancia entre forjados en edificios convencionales suele estar comprendida en una horquilla de valores relativamente estrecha, mientras que la distancia entre soportes



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.

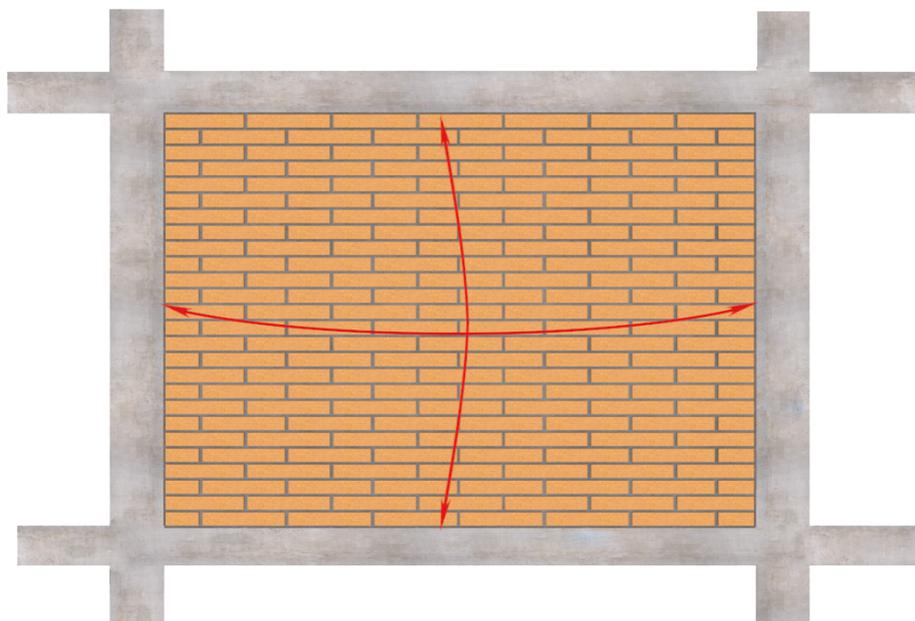


oscila entre valores muy dispersos; pudiendo, incluso, no existir soportes en el plano de fachada.

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 mecánico³.

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 correspondiente⁴.



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 sollicitación de compresión con la flexión asociada que implica el pandeo, se puede convertir en sollicitación 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 for-

jados, 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 despreciar⁹.

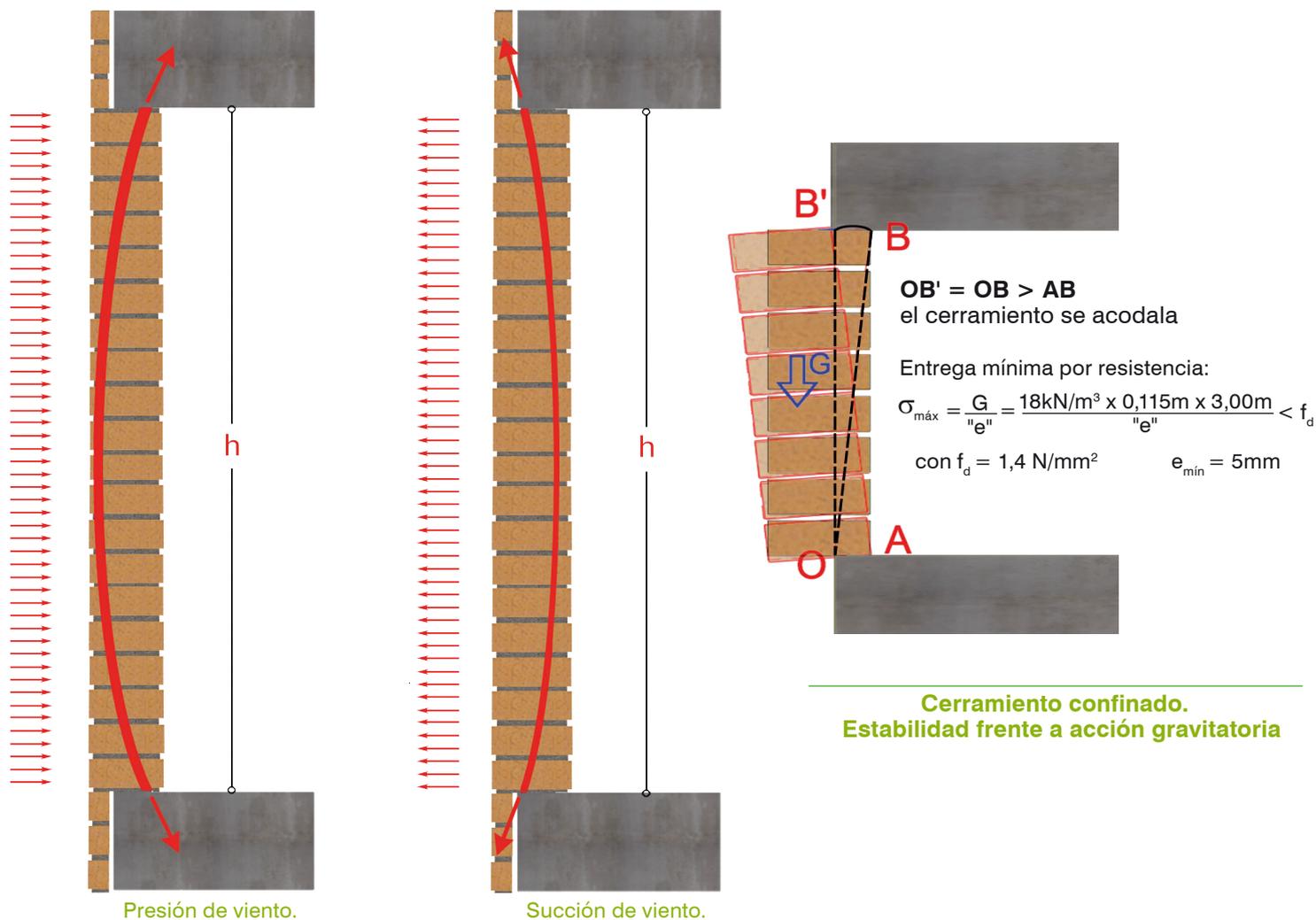
Verificar el requisito de estabilidad supone comprobar que no existe posibilidad de vuelco. Para evitar el vuelco ante la acción gravitatoria no se precisa ninguna condición especial en el apoyo, puesto que el propio movimiento de vuelco genera un efecto de acodalado que lo imposibilita. Si la dimensión del apoyo en la base fuera extremadamente reducida, el acodamiento 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 sollicitación 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 sollicitación 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.



Cerramiento confinado. Estabilidad frente a acción horizontal

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:

$$\frac{d\delta}{d\alpha} = 0 \rightarrow \frac{1}{\alpha^2} \cdot \frac{1}{(1-\alpha)^2} - \frac{1}{(1-\alpha)} \cdot \frac{2}{\alpha^3} = 0$$

$$\frac{1}{(1-\alpha)} - \frac{2}{\alpha} = 0 \rightarrow \alpha = \frac{2}{3}$$

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 cerramiento⁶.

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 sollicitación 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 sollicitación 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) = $q_e \cdot \gamma_Q$
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 sollicitación 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:

$$M_{Sd} / M_{Rd} = \sigma_{d, \text{máx}} / f_d$$

Por tanto, el valor de cálculo de la máxima tensión normal producida por la acción horizontal es:

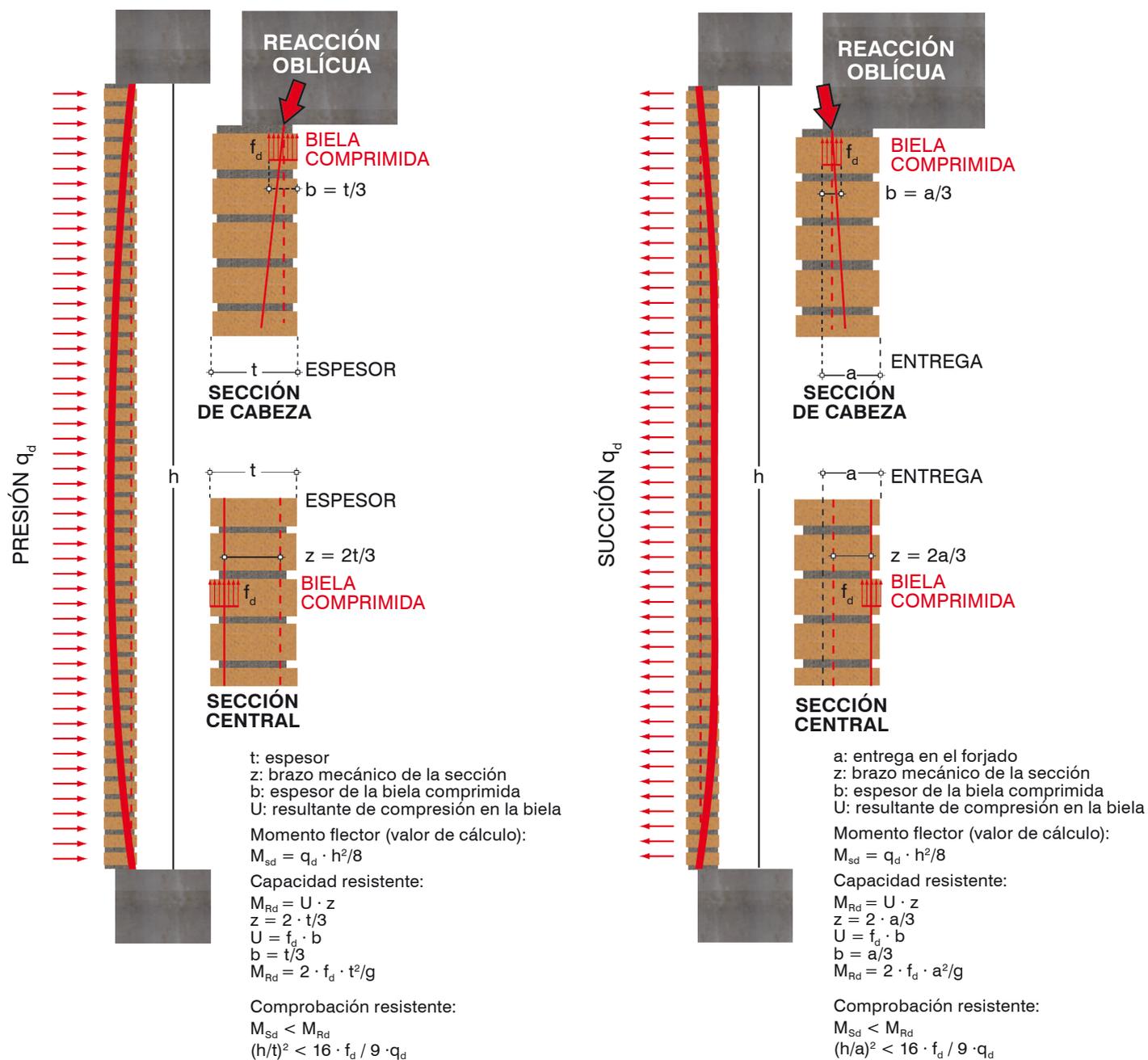
$$\sigma_{d, \text{máx}} = f_d \cdot M_{Sd} / M_{Rd}$$

siendo:

- $\sigma_{d, \text{máx}}$ → 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.





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: $\rightarrow h = 2,70 \text{ m}$
- Espesor del muro
($\frac{1}{2}$ pie formato castellano): $\rightarrow t = 115 \text{ mm}$
- Ancho de la entrega en forjados $\rightarrow a = 80 \text{ mm}$

Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de las piezas: $f_b = 10 \text{ N/mm}^2$
- Resistencia a compresión del mortero (M 5): $f_m = 5 \text{ N/mm}^2$
- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4 \text{ N/mm}^2$ (7)
- Valor característico de la acción de viento: (8)
 - Presión: $q_{e, \text{presión}} = 0,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 2,0 \cdot 0,8 = 0,8 \text{ kN/m}^2$ (9)
 - Succión: $q_{e, \text{succión}} = 0,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 2,0 \cdot 0,5 = 0,5 \text{ kN/m}^2$ (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)”.

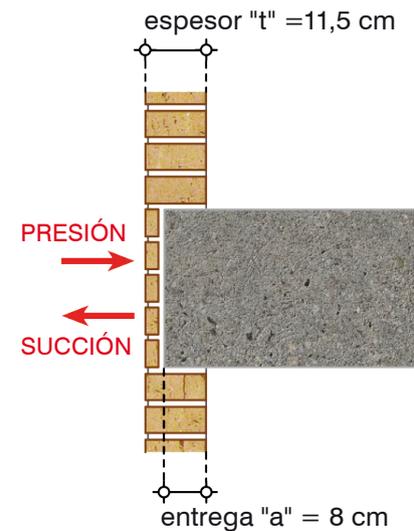
8 Según DB SE-AE, artículo 3.2.2 “Acción de viento”, para edificios urbanos de hasta ocho plantas.

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.



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.

Análisis:

Comprobación a presión:

- Valor de cálculo del momento flector máximo:
- Espesor de cálculo:
- Ancho de la biela comprimida:
- Capacidad resistente de la biela comprimida:
- Brazo eficaz de la sección resistente (altura del arco):
- Capacidad resistente a momento flector:
- Comprobación de resistencia:

$$\begin{aligned} M_{Sd, presión} &= q_{e, presión} \cdot \gamma_Q \cdot h^2 / 8 &&= 1,09 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{m} \\ t_{d, presión} &= t \quad (\text{ver esquema}) &&= 115 \text{ mm} \\ b_{presión} &= (1 / 3) \cdot t_{d, presión} &&= 38,3 \text{ mm} \\ U_{cd} &= f_d \cdot b_{presión} = (f_k / \gamma_M) \cdot b_{presión} &&= 61,3 \text{ kN} / \text{m} \\ Z_{presión} &= (2 / 3) \cdot t_{d, presión} &&= 0,077 \text{ m} \\ M_{Rd, presión} &= U_{cd} \cdot Z_{presión} &&= 4,70 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{m} \\ M_{Sd, presión} &\leq M_{Rd, presión} \end{aligned}$$

$$M_{Sd, presión} = 0,8 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,50 \cdot (2,70 \text{ m})^2 / 8 = 1,09 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{m} < M_{Rd, presión} = 61,3 \text{ kN/m} \cdot 0,077 \text{ m} = 4,70 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{m}. \text{ VALE}$$

Comprobación a succión:

- Valor de cálculo del momento flector máximo:
- Espesor de cálculo:
- Ancho de la biela comprimida:
- Capacidad resistente de la biela comprimida:
- Brazo eficaz de la sección resistente (altura del arco):
- Capacidad resistente a momento flector:
- Comprobación de resistencia:

$$\begin{aligned} M_{Sd, succión} &= q_{e, succión} \cdot \gamma_Q \cdot h^2 / 8 &&= 0,68 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{m} \\ t_{d, succión} &= a \quad (\text{ver esquema}) &&= 80 \text{ mm} \\ b_{succión} &= (1 / 3) \cdot t_{d, succión} &&= 26,7 \text{ mm} \\ U_{cd} &= f_d \cdot b_{succión} = (f_k / \gamma_M) \cdot b_{succión} &&= 42,7 \text{ kN} / \text{m} \\ Z_{succión} &= (2 / 3) \cdot t_{d, succión} &&= 0,053 \text{ m} \\ M_{Rd, succión} &= U_{cd} \cdot Z_{succión} &&= 2,28 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{m} \\ M_{Sd, succión} &\leq M_{Rd, succión} \end{aligned}$$

$$M_{Sd, succión} = 0,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,50 \cdot (2,70 \text{ m})^2 / 8 = 0,68 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{m} < M_{Rd, succión} = 42,7 \text{ kN/m} \cdot 0,053 \text{ m} = 2,28 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{m}. \text{ VALE}$$

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

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 uso¹⁴.

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 constructiva¹⁵.

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 crítica¹⁶; 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

$$\sigma_d < f_k / \gamma_M$$

siendo:

- σ_d → la tensión normal de cálculo en la biela comprimida
- f_k → la resistencia de cálculo a compresión de la fábrica
- γ_M → 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 sustenta-

ción del bloque comprimido con el valor de la resistencia de cálculo de la fábrica, y verificando el cumplimiento de la inecuación siguiente:

ción, 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

Características geométricas:

- Cerramiento de ladrillo confinado entre forjados sin soportes en fachada
- Altura libre de planta: $h = 2,70 \text{ m}$
- Espesor del muro ($1/2$ pie formato castellano): $t = 115 \text{ mm}$
- Ancho de la entrega en forjados: $a = 60 \text{ mm}$

Características mecánicas:

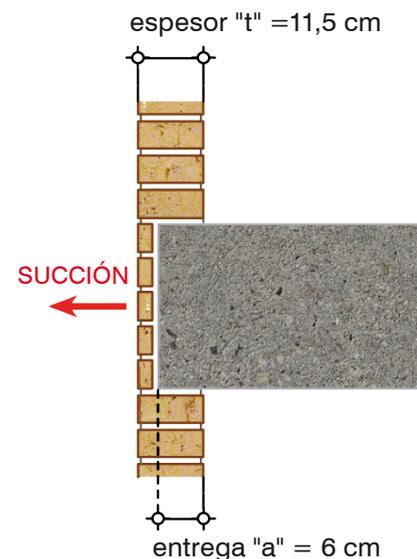
- Resistencia a compresión de las piezas: $f_b = 10 \text{ N/mm}^2$
- Resistencia a compresión del mortero (M5): $f_m = 5 \text{ N/mm}^2$
- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4 \text{ N/mm}^2$
- Valor característico de la acción de viento:
 - Succión: $q_{e, \text{succión}} = 0,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 2,0 \cdot 0,5 = 0,5 \text{ kN/m}^2$
- 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: $M_{\text{Sd, succión}} = q_{e, \text{succión}} \cdot \gamma_Q \cdot h^2 / 8 = 0,68 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{metro}$
- Ancho inicial de la biela comprimida: $b_0 = (1 / 3) \cdot t_d = (1 / 3) \cdot a = 20 \text{ mm}$
- Brazo eficaz inicial de la sección resistente: $z_0 = (2 / 3) \cdot t_d = (2 / 3) \cdot a = 0,040 \text{ m}$
- Resultante de la fuerza de compresión: $U_0 = M_{\text{Sd}} / z_0 = 17,09 \text{ kN} / \text{metro}$
- Valor de la tensión inicial: $\sigma_{d,0} = U_0 / b_0 = 0,854 \text{ N/mm}^2$

19 Las características anteriores son las mismas que las definidas en el ejemplo 2.



• 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/mm ²
• 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/mm ²
• 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/mm ²
---	--------------------------------------	--------------------------

$$\sigma_d = 1,63 \text{ N/mm}^2 > f_d = 1,60 \text{ N/mm}^2. \text{ NO VALE}$$

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 forjados²⁰. 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 inviable²¹.

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.

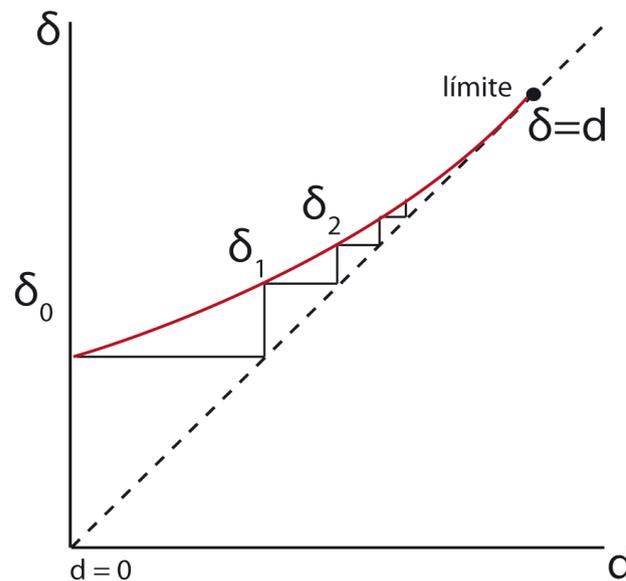
Esta regla simplifica mucho el análisis, porque elude todo el proceso iterativo, aunque conviene indicar la siguiente matización. El valor de deformación máxima establecido ($t_d/4$) es el que corresponde a la *esbeltez límite por estabilidad*²², por consiguiente resulta conservador en todos los casos 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

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 $\delta - d$ se obtiene introduciendo en la expresión anterior el valor de α obtenido anteriormente (= 2/3):

$$\delta = 27 \cdot q_d \cdot h^4 / [128 \cdot (t_d - d)^3 \cdot E] = d \quad (1)$$

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:

$$\delta' = 3 \cdot 27 \cdot q_d \cdot h^4 / [128 \cdot (t_d - d)^4 \cdot E] = 1 \quad (2)$$

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

$$3 \cdot 27 \cdot q_d \cdot h^4 = 128 \cdot (3/4)^4 \cdot t_d^4 \cdot E$$

$$(h/t_d)^4 = 128 \cdot (3/4)^4 \cdot E / (3 \cdot 27 \cdot q_d)$$

$$(h/t_d)^4 = 0,5 \cdot E / q_d$$

$$\lambda_{\text{límite}}^4 = 0,5 \cdot E / q_d$$

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

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 $d = t_d / 4$:

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 orden²³.

En la hoja gráfica que se adjunta, se ilustra el esquema resistente en segundo orden, así como las fórmulas para

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.

la obtención de los parámetros que intervienen.

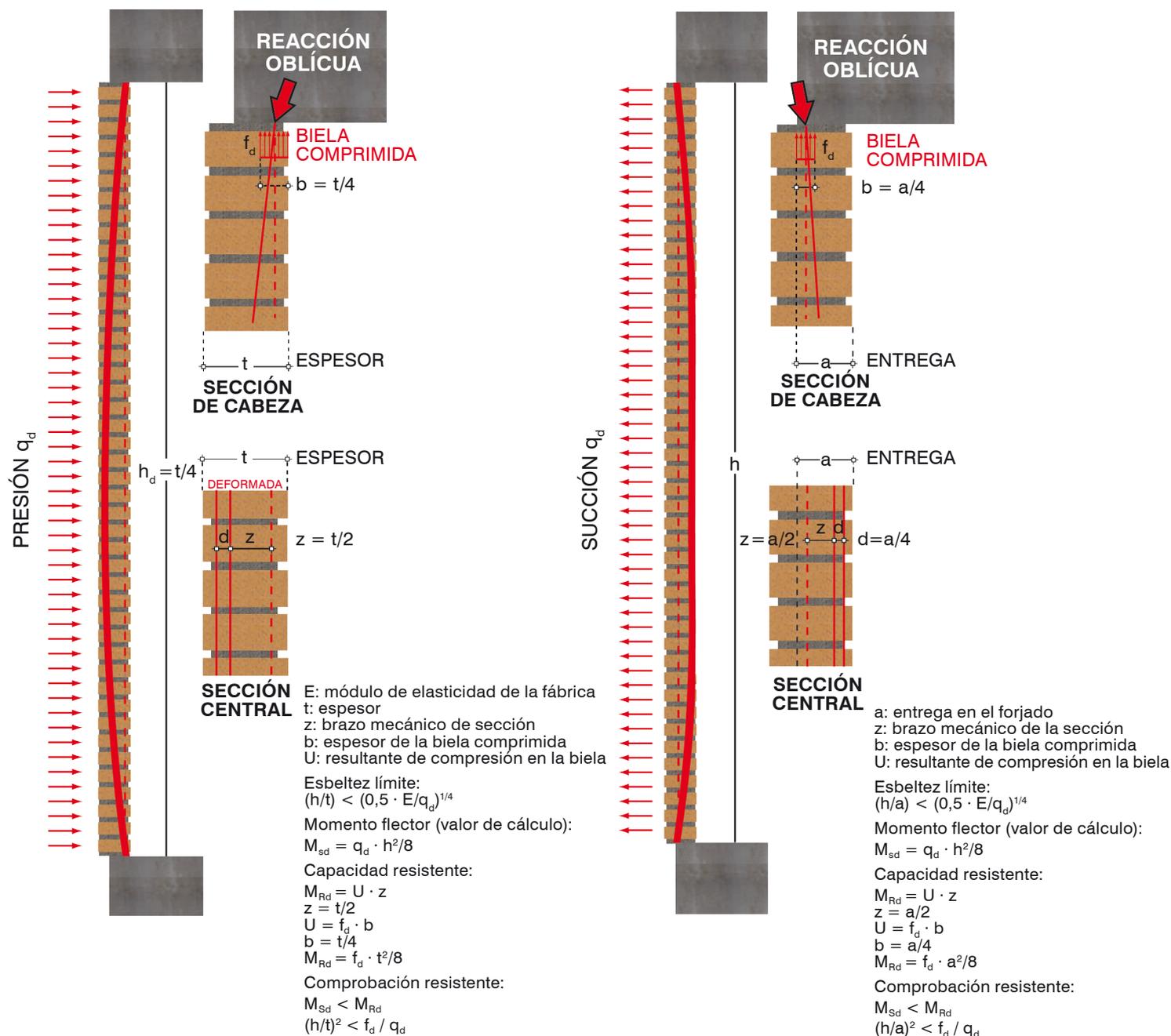
Según lo anterior, el proceso para verificar la validez de un cerramiento confinado entre forjados, con esbeltez superior a 25, que requiere la consideración de los efectos de segundo orden, comprende los siguientes pasos:

- 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



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: $M_{sd} \leq M_{Rd}$

$$M_{sd} = q_d \cdot h^2 / 8$$

$$M_{Rd} = U_c \cdot z = [f_d \cdot (1/3) \cdot (3/4) \cdot t_d] \cdot [(2/3) \cdot (3/4) \cdot t_d] = f_d \cdot t_d^2 / 8$$

$$q_d \cdot h^2 / 8 \leq f_d \cdot t_d^2 / 8 \rightarrow q_d \cdot h^2 \leq f_d \cdot t_d^2 \rightarrow \lambda = h / t_d \leq (f_d / q_d)^{1/2}$$

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

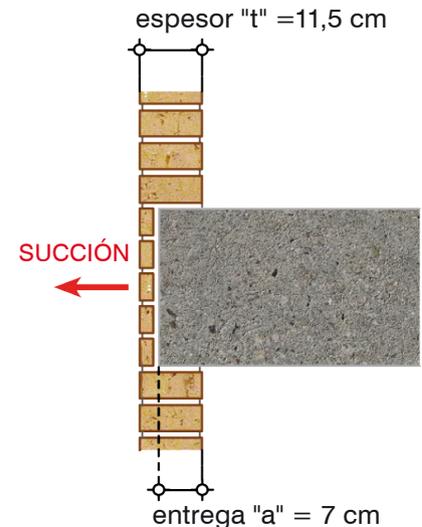
Cerramiento confinado entre forjados. Análisis en segundo orden. Entrega 7 cm

Características geométricas:

- Cerramiento de ladrillo confinado entre forjados sin soportes en fachada
- Altura libre de planta: $h = 2,70 \text{ m}$
- Espesor del muro ($1/2$ pie formato castellano): $t = 115 \text{ mm}$
- Ancho de la entrega en forjados: $a = 70 \text{ mm}$

Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de las piezas: $f_b = 10 \text{ N/mm}^2$
- Resistencia a compresión del mortero (M5): $f_m = 5 \text{ N/mm}^2$
- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4 \text{ N/mm}^2$
- Valor característico de la acción de viento:
 - Succión: $q_{e, \text{succión}} = 0,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 2,0 \cdot 0,5 = 0,5 \text{ kN/m}^2$
- 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: $E = 1.000 \cdot f_k = 4.000 \text{ N/mm}^2$ (24)



Análisis:

24 Las características anteriores son las mismas que las definidas en los ejemplos 2 y 3.

Comprobación de la estabilidad a succión:

- Esbeltez del cerramiento a succión: $\lambda = h / a = 2,70 \text{ m} / 0,070 \text{ m} = 38,57$
- Valor de cálculo de la succión de viento: $q_d = q_{e, \text{succión}} \cdot \gamma_Q = 0,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,50 = 0,75 \text{ kN/m}^2$
- Esbeltez límite a succión: $\lambda_{\text{lim}} = (0,5 \cdot E / q_d)^{1/4} = 40,41$
- Comprobación en términos de esbeltez: $\lambda \leq \lambda_{\text{lim}}$

$$\lambda = 38,57 < \lambda_{\text{lim}} = 40,41. \text{ VALE}$$

Comprobación de la resistencia a succión:

- Valor de cálculo del momento flector máximo: $M_{\text{Sd, succión}} = q_{e, \text{succión}} \cdot \gamma_Q \cdot h^2 / 8 = 0,68 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{metro}$
- Entrega (reducida por efectos de segundo orden): $a_{\text{red}} = (3 / 4) \cdot a = (3 / 4) \cdot 70 \text{ mm} = 52,5 \text{ mm}$
- Ancho de la biela comprimida: $b_{\text{succión}} = (1 / 3) \cdot a_{\text{red}} = 17,5 \text{ mm}$
- Capacidad resistente de la biela comprimida: $U_{\text{cd}} = f_d \cdot b_{\text{succión}} = f_k \cdot b_{\text{succión}} / \gamma_M = 28,0 \text{ kN} / \text{metro}$
- Brazo eficaz de la sección resistente: $z_{\text{succión}} = (2 / 3) \cdot a_{\text{red}} = 0,035 \text{ m}$
- Capacidad resistente a momento flector: $M_{\text{Rd, succión}} = U_{\text{cd}} \cdot z_{\text{succión}} = 0,98 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{metro}$
- Comprobación de resistencia: $M_{\text{Sd, succión}} \leq M_{\text{Rd, succión}}$

$$M_{\text{Sd, succión}} = 0,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,50 \cdot (2,70 \text{ m})^2 / 8 = 0,68 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{m} < M_{\text{Rd, succión}} = 28,0 \text{ kN} / \text{m} \cdot 0,035 \text{ m} = 0,98 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{m}. \text{ VALE}$$

- Valor de cálculo de la tensión normal máxima: $\sigma_{d, \text{succión}} = M_{\text{Sd, succión}} / (z_{\text{succión}} \cdot b_{\text{succión}}) = 1,11 \text{ N/mm}^2$

(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 $1,6 \text{ N/mm}^2$, un módulo de elasticidad de 4.000 N/mm^2 y un valor de cálculo de la acción de viento de $1,20 \text{ kN/m}^2$ a presión y $0,75 \text{ kN/m}^2$ 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 $\frac{1}{2}$ 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 prever 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

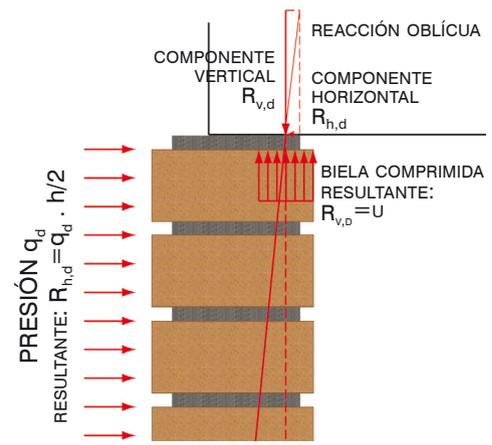
El modelo de funcionamiento en arco precisa determinados requisitos para un correcto comportamiento. El requisito fundamental es la condición de entrega, deducida mediante el análisis, que se debe prescribir en proyecto en términos de mínimos, y que debe ser objeto de comprobación en obra.

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 equilibrio²⁵.

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.

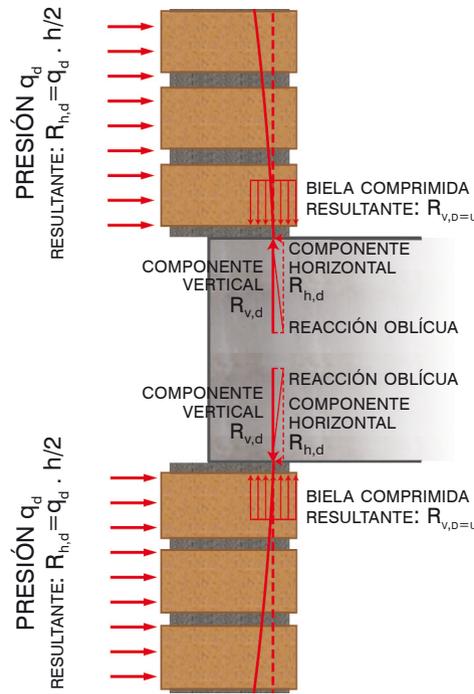
La *oblicuidad* de la reacción en los extremos está determinada por la directriz del arco. El vector reacción tiene su punto de aplicación exactamente en el centro de la biela comprimida, y tiene la dirección de la tangente del arco en el extremo. Se trata, por tanto, de una reacción conocida en la jerga 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”.

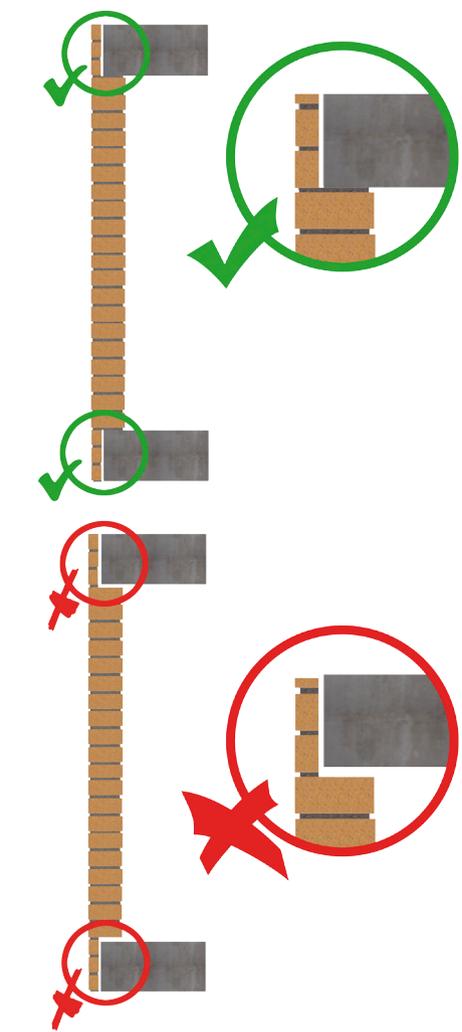
Para los valores de acción de viento, altura de planta y espesor utilizados en el último ejemplo, la componente vertical de la reacción o empuje máximo se obtiene como sigue:

- Acción de viento (valor de cálculo):
 - Presión: $q_{d, presión} = 1,20 \text{ kN/m}^2$
 - Succión: $q_{d, succión} = 0,75 \text{ kN/m}^2$
- Altura libre de planta $h = 2,70 \text{ m}$
- Espesor de cálculo:
 - Presión: $t_d = t = 115 \text{ mm}$ (espesor total)
 - Succión: $t_d = a = 70 \text{ mm}$ (entrega)
- Reacción vertical o empuje máximo:
 - Presión: $R_{Vd (presión)} = 0,25 \cdot 1,20 \text{ kN/m}^2 \cdot (2,70 \text{ m})^2 / 0,115 \text{ m} = \mathbf{19,02 \text{ kN / metro}}$
 - Succión: $R_{Vd (succión)} = 0,25 \cdot 0,75 \text{ kN/m}^2 \cdot (2,70 \text{ m})^2 / 0,070 \text{ m} = \mathbf{19,53 \text{ kN / metro}}$

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 contrario²⁷. 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 permanente²⁸.

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: $q_{d, \text{presión}} = 1,20 \text{ kN/m}^2$
 - Succión: $q_{d, \text{succión}} = 0,75 \text{ kN/m}^2$
- Altura libre de planta: $h = 2,70 \text{ m}$
- Reacción horizontal:
 - Presión: $R_{Hd (\text{presión})} = 1,20 \text{ kN/m}^2 \cdot 2,70 \text{ m} / 2 = \mathbf{1,62 \text{ kN / metro}}$
 - Succión: $R_{Hd (\text{succión})} = 0,75 \text{ kN/m}^2 \cdot 2,70 \text{ m} / 2 = \mathbf{1,01 \text{ kN / metro}}$

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:

$$R_{Hd} = q_d \cdot h / 2 \leq f_{vd} \cdot t_d$$

$$h / t_d = \lambda \leq 2 \cdot f_{vd} / q_d$$

siendo:

$$\lambda = h / t_d \rightarrow \text{la esbeltez del paño}$$

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

Características geométricas:

- Cerramiento de ladrillo confinado entre forjados sin soportes en fachada
- Altura libre de planta: $h = 2,70 \text{ m}$
- Espesor del muro ($1/2$ pie formato castellano): $t = 115 \text{ mm}$
- Ancho de la entrega en forjados: $a = 80 \text{ mm}$

Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de las piezas: $f_b = 10 \text{ N/mm}^2$
- Resistencia a compresión del mortero (M5): $f_m = 5 \text{ N/mm}^2$
- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4 \text{ N/mm}^2$
- Valor característico de la acción de viento:
 - Succión: $q_{e, \text{succión}} = 0,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 2,0 \cdot 0,5 = 0,5 \text{ kN/m}^2$
- 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: $E = 1.000 \cdot f_k = 4.000 \text{ N/mm}^2^{(18)}$

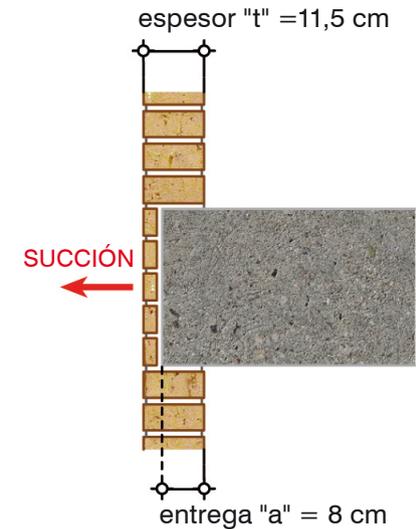
Análisis:

Comprobación a succión:

- Valor de cálculo del momento flector máximo: $M_{Sd, \text{succión}} = q_{e, \text{succión}} \cdot \gamma_Q \cdot h^2 / 8 = 0,68 \text{ m-kN / metro}$
- Ancho inicial de biela comprimida: $b_0 = (1 / 3) \cdot t_d = (1 / 3) \cdot a = 26,7 \text{ mm}$
- Brazo eficaz inicial de la sección resistente: $z_0 = (2 / 3) \cdot t_d = (2 / 3) \cdot a = 0,053 \text{ m}$
- Resultante de la fuerza de compresión en la biela: $U_0 = M_{Sd} / z_0 = 12,81 \text{ kN / metro}$
- Valor de la tensión inicial: $\sigma_{d,0} = U_0 / b_0 = 0,481 \text{ N/mm}^2$

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.



• 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/mm ²
• 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:	$\delta_1 - \delta_0 = 4,81 \text{ mm} - 4,11 \text{ mm}$	= 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/mm ²
• Comprobación de la máxima tensión de cálculo:	$\sigma_d \leq f_d = f_k / \gamma_M$	= 1,60 N/mm ²

$$\sigma_d = 0,546 \text{ N/mm}^2 < f_d = 1,60 \text{ N/mm}^2. \text{ VALE}$$

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: $q_{d, \text{presión}} = 1,20 \text{ kN/m}^2$

- Succión: $q_{d, \text{succión}} = 0,75 \text{ kN/m}^2$

- Altura libre de planta $h = 2,70 \text{ m}$

- Espesor de cálculo $t_d = 70 \text{ mm}$

- Resistencia al corte²⁹ $f_{vd} = f_{vko} / \gamma_M = 0,2 \text{ N/mm}^2 / 2,5 = 80 \text{ kN/m}^2$

- Esbeltez: $\lambda = h / t_d = 2,70 \text{ m} / 0,070 \text{ m} = 38,57$

- Comprobación: $2 \cdot f_{vd} / q_{d, \text{presión}} = 2 \cdot 80 \text{ kN/m}^2 / 1,20 \text{ kN/m}^2 = 133$

$\lambda = 23,48 < 133$. 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 contruidos 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 ce-

rramiento 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 resistencia³⁰.

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

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.

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

de juntas horizontales de movimiento por esta u otras causas³¹.

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 so-

$$\Delta\sigma = \rho \cdot \varepsilon \cdot E$$

siendo:

- $\rho = 5 / 6 \rightarrow$ la proporción de material cerámico (descontando el espesor de tendeles)
- $\varepsilon = 0,5 \text{ ‰} \rightarrow$ 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 fábrica³³. 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 des-

lución 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 hume-

dad; 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:

cribe 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 utilizar 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 su-

ficiente 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

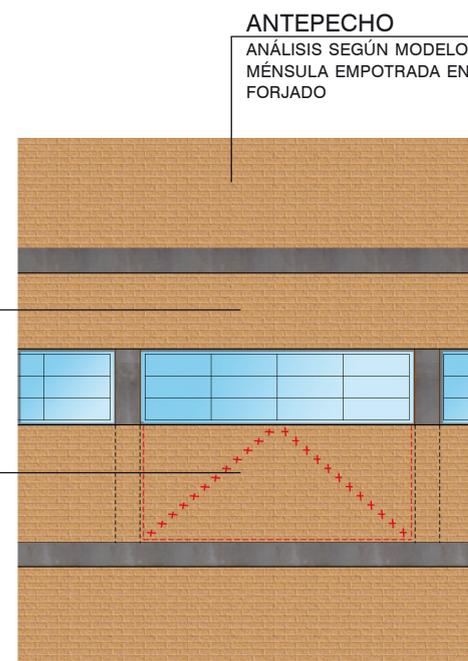
31 En los muros de carga no se limita el número de plantas y, lógicamente, no es viable disponer juntas horizontales de movimiento.

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.

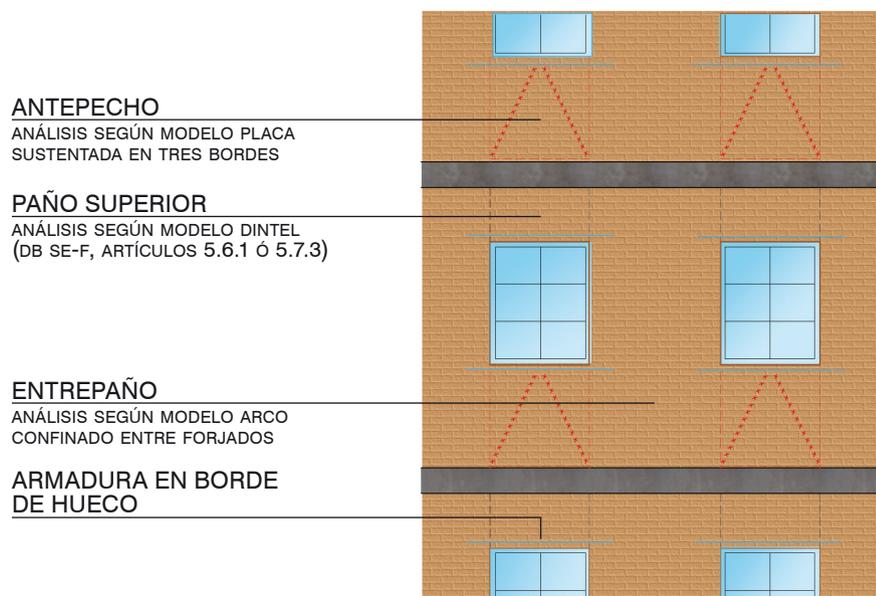
- **Tipo 3. Huecos cuadrados o rectangulares**

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 paño³⁴.

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 $\frac{1}{2}$ pie, con suficiente rigidez 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.

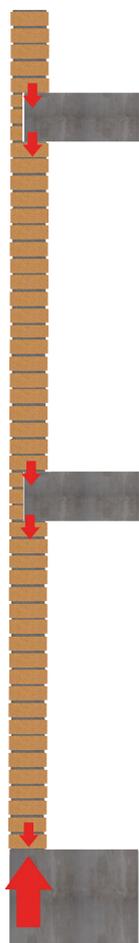
- *Proceso de acumulación de carga*

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 sótano³⁵. 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 conectadas³⁶.

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



Proceso de acumulación de carga

como carga a aquellos elementos que inequívocamente vayan a soportarlos... En caso de continuidad con plantas inferiores, debe considerarse, del lado de la seguridad del elemento, que la totalidad de su peso gravita sobre sí mismo.”

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 fachada³⁷.

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 beneficioso³⁸.

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 causas³⁹. Además, deja de ser crítica la restricción que supone las condiciones de entrega en los forjados para aplicar el funcionamiento en arco.

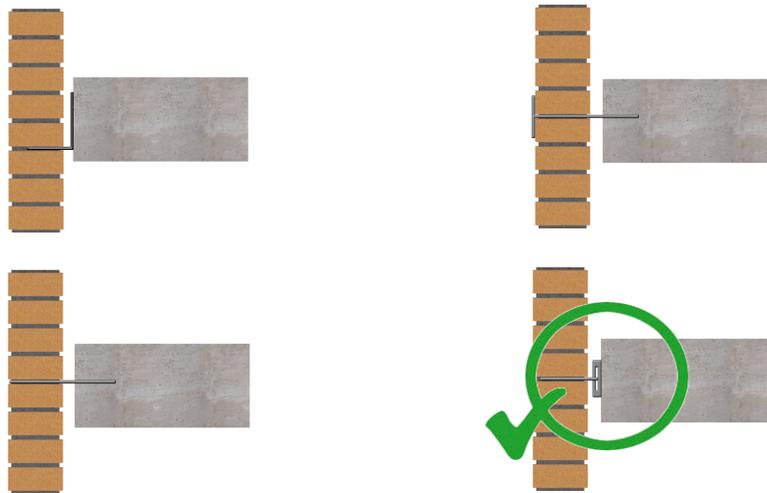
Lógicamente, existe una limitación impuesta por la capacidad resistente a

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, consiste 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 1/2 pie, que pese a razón de 15 kN/m³, supone $\sigma_d = 15 \text{ kN/m}^3 \times 1,35 \times 2,70 \text{ m} = 55 \text{ kN/m}^2 = 0,055 \text{ N/mm}^2$, 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.



Sistema de conexión a forjado recomendada

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 $\frac{1}{2}$ 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.

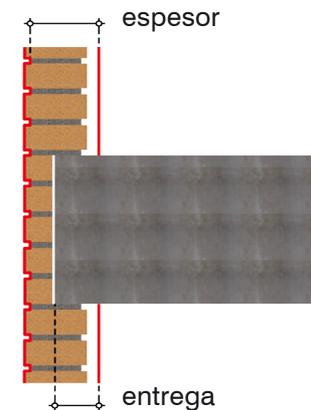
El espesor del cerramiento se puede y se debe especificar en la fase de proyecto, y no hay ninguna razón para que las exigencias mínimas se vean alteradas por imprevistos en obra. Sólo hay que controlar en obra que las piezas tengan el espesor definido en proyecto, y que las resistencias, tanto de las piezas como del mortero, no sean inferiores a las especificadas⁴⁰.

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 cerramiento⁴¹, 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 casos, 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 genéricas⁴² 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.

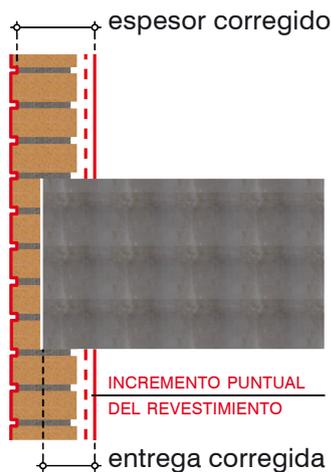
Aunque es un problema habitual que los frentes de forjados de plantas sucesivas no mantengan el plomo, o que,

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 sistemáticas⁴³. En este sentido, la solución indicada permite correcciones puntuales sin apenas incrementar el coste.

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 auxiliares⁴⁴.

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 paquetas de revestimiento.



Aumento del 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 supuesta⁴⁵. 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 controlada⁴⁶.

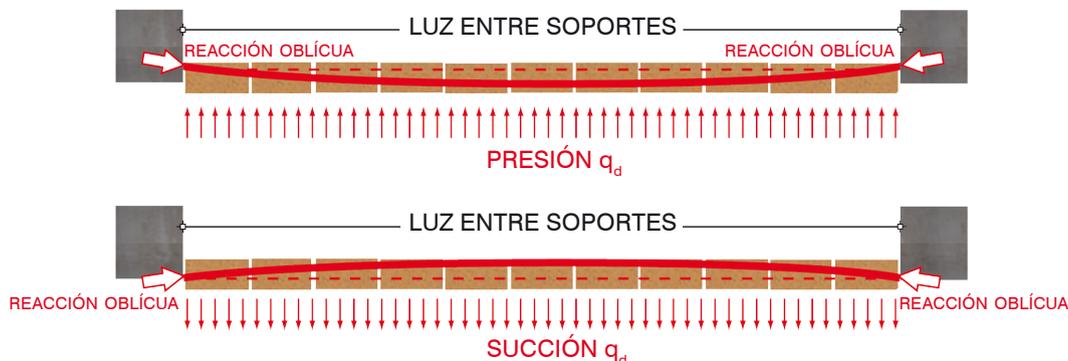
Otra reserva al modelo de *arco horizontal* viene impuesta por la posibilidad de contrarrestar los empujes generados contra el soporte del extremo. Mientras que el confinamiento contra los forjados permite contar con la carga gravitatoria de la última planta, si el confinamiento se produce contra

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 extremo⁴⁷. 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 soportes⁴⁸.

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 1/2 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

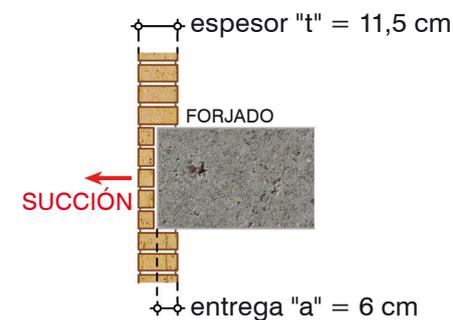
Características geométricas:

- Cerramiento de ladrillo confinado entre forjados con soportes en fachada
- Altura libre de planta: $h = 2,70$ m
- Espesor del muro (1/2 pie formato castellano): $t = 115$ mm
- Ancho de la entrega en forjados: $a_{forjado} = 60$ mm

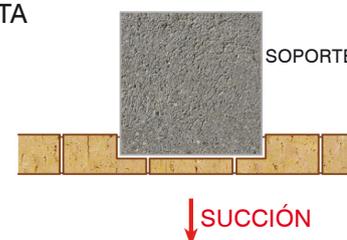
Características mecánicas:

- 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:

$$\lambda_{\text{lím}} = (0,5 \cdot E / q_d)^{1/4} = 40,41$$

- Esbeltez real del cerramiento a succión (en vertical):

$$\lambda_{\text{real, vertical}} = h / a_{\text{forjado}} = 2,70 \text{ m} / 0,060 \text{ m} = 45,00 > \lambda_{\text{lím, vertical}}$$

- Carga límite con la esbeltez real:

$$q_{d, \text{lím}} = 0,5 \cdot E / \lambda_{\text{real}}^4 = 0,488 \text{ kN/m}^2$$

Comprobación de la resistencia a SUCCIÓN por arco vertical, para la carga límite:

- Valor de cálculo del momento flector máximo:

$$M_{\text{Sd}} = q_{d, \text{lím}} \cdot h^2 / 8 = 0,44 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{metro}$$

- Entrega (reducida por efectos de segundo orden):

$$a_{\text{red}} = (3 / 4) \cdot a_{\text{forjado}} = (3 / 4) \cdot 60 \text{ mm} = 45 \text{ mm}$$

- Ancho de biela comprimida:

$$b = (1 / 3) \cdot a_{\text{red}} = (1 / 3) \cdot 45 \text{ mm} = 15 \text{ mm}$$

- Capacidad resistente de la biela comprimida:

$$U_{\text{cd}} = f_d \cdot b = f_k \cdot b / \gamma_M = 24,0 \text{ kN} / \text{metro}$$

- Brazo eficaz de la sección resistente:

$$z = (2 / 3) \cdot a_{\text{red}} = 0,030 \text{ m}$$

- Capacidad resistente a momento flector:

$$M_{\text{Rd}} = U_{\text{cd}} \cdot z = 0,72 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{metro}$$

- Comprobación de resistencia:

$$M_{\text{Sd}} \leq M_{\text{Rd}}$$

$$M_{\text{Sd}} = q_{d, \text{lím}} \cdot h^2 / 8 = 0,44 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{m} < M_{\text{Rd}} = 0,72 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{m. VALE}$$

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:

$$\Delta q_d = q_d - q_{d, \text{lim}} = 0,75 \text{ kN/m}^2 - 0,488 \text{ kN/m}^2 = 0,262 \text{ kN/m}^2$$

- Esbeltez límite a succión (en horizontal):

$$\lambda_{\text{lim, horizontal}} = (0,5 \cdot E / \Delta q_d)^{1/4} = 52,56$$

- Luz máxima entre soportes:

$$L_{\text{máx}} = \lambda_{\text{lim, horizontal}} \cdot a_{\text{soporte}} \text{ (siendo "a}_{\text{soporte}}\text{" la entrega en soportes)}$$

- Con entrega total

$$(a_{\text{soporte}} = 115 \text{ mm}): L_{\text{máx}} = 52,56 \cdot 0,115 \text{ m} = 6,04 \text{ m}$$

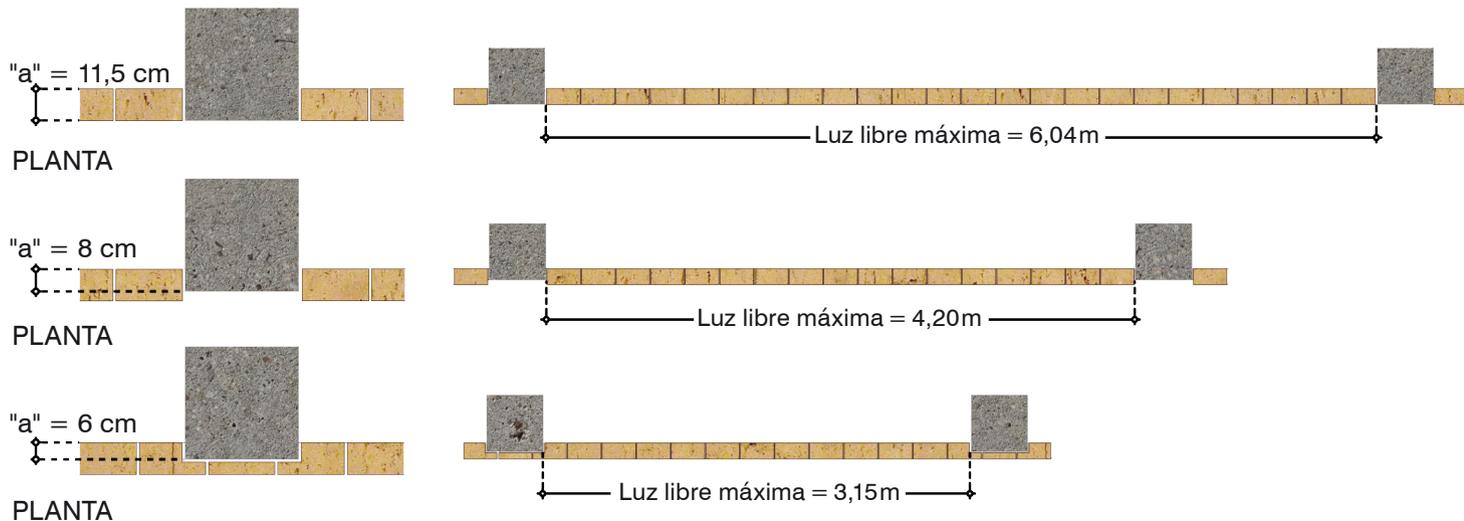
- Con entrega parcial

$$(a_{\text{soporte}} = 80 \text{ mm}): L_{\text{máx}} = 52,56 \cdot 0,080 \text{ m} = 4,20 \text{ m}$$

- Con entrega parcial

$$(a_{\text{soporte}} = 60 \text{ mm}): L_{\text{máx}} = 52,56 \cdot 0,060 \text{ m} = 3,15 \text{ m}$$

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.

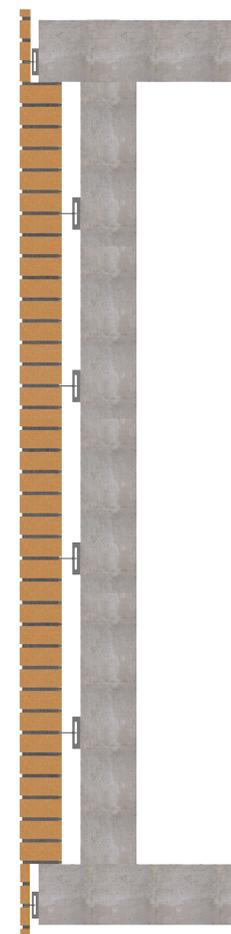
Como se ha visto en los ejemplos anteriores, la reacción oblicua generada por un funcionamiento en arco, tanto horizontal como vertical, produce esfuerzos de compresión de valor considerable, que no se generan en un funcionamiento en placa. Contra los soportes, el esfuerzo de compresión es horizontal, 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.



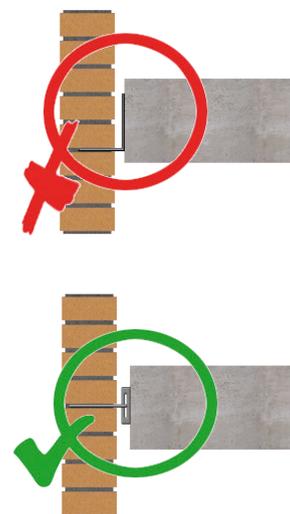
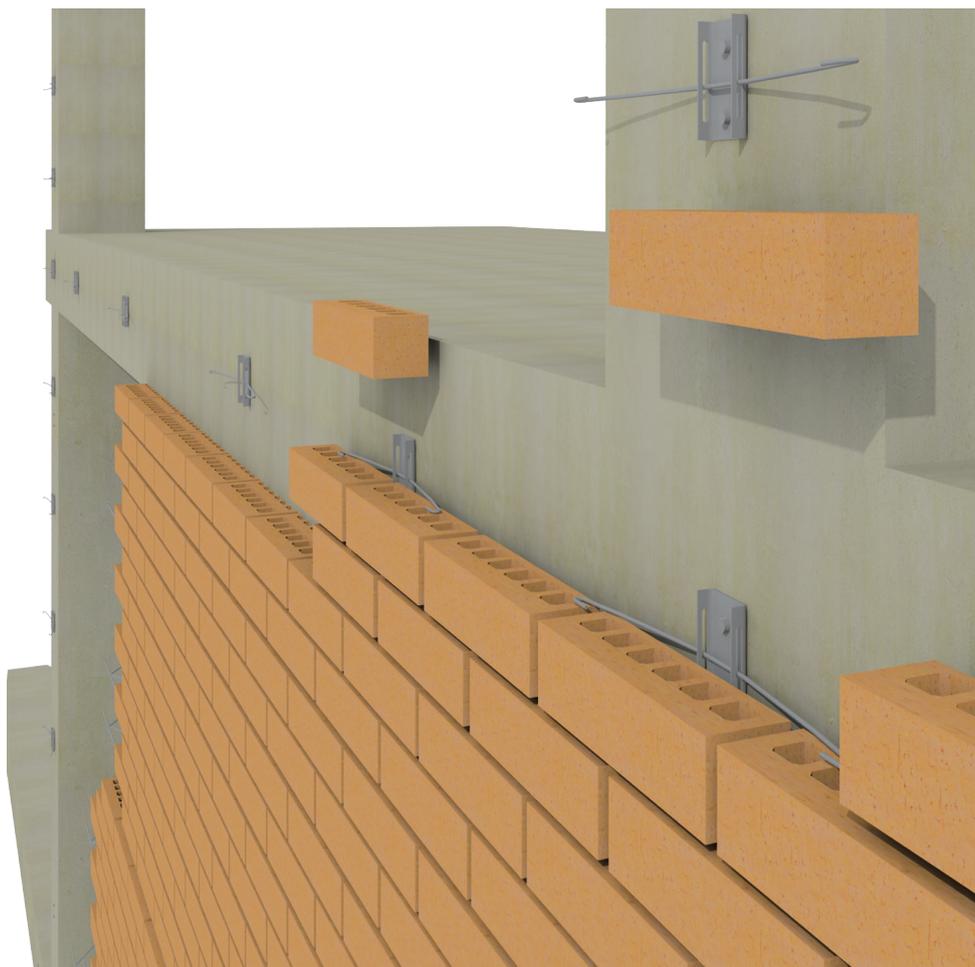
Anclajes para restituir la entrega

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 produ-

cida 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.



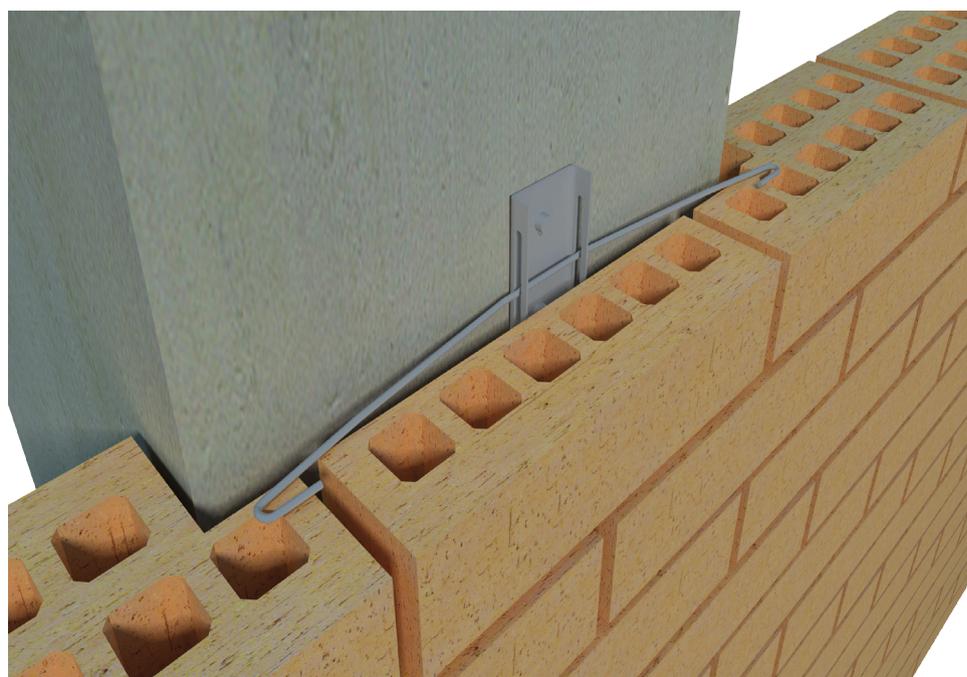
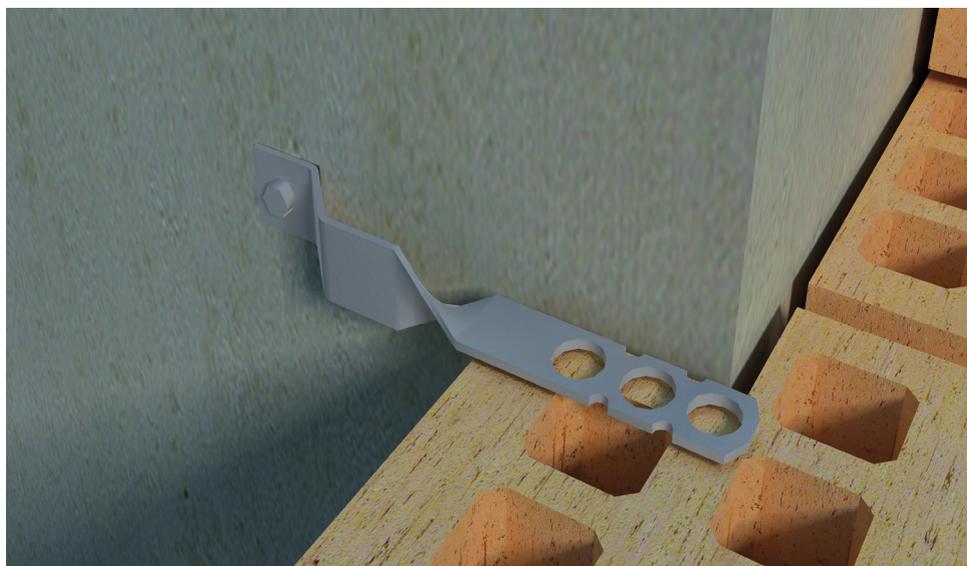
5.1.3 Cerramiento anclado

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 insostenibles 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 pre-

venir 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 transmitir las 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



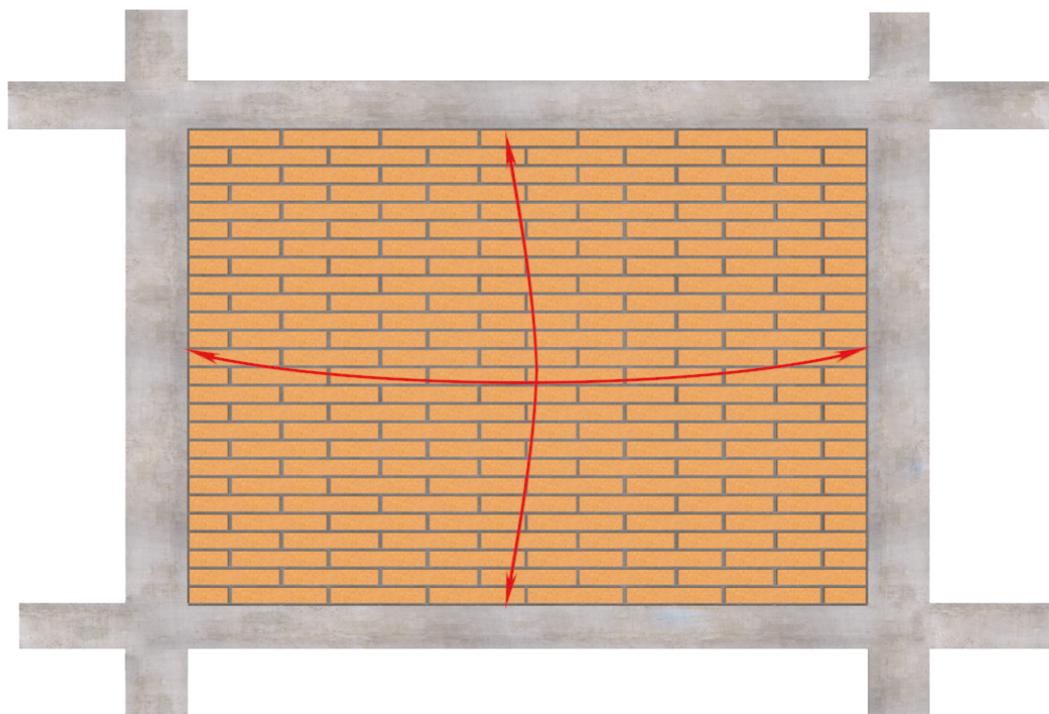
en la fábrica, puesto que sólo el propio peso del cerramiento de cada paño no es suficiente para contrarrestarlas.

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 pequeños⁵¹. 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 ortótropos⁵³.

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_{Rd2} → capacidades resistentes a flexión vertical y horizontal, respectivamente

El Anejo G “*Coefficientes 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 respec-

tivas 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 “*Coefficientes 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:

- α → el coeficiente de flexión (DB SE-F, Anejo G)
- μ → la razón de resistencias a flexión = f_{xk1} / f_{xk2}
- L → la longitud del muro entre sustentaciones verticales
- q_e → el valor característico de la acción horizontal
- γ_Q → el coeficiente de seguridad de la acción horizontal
- Z → el módulo resistente de la sección de muro por unidad de longitud o altura = $t^2 / 6$
- t → el espesor del muro
- f_{xk1} → el valor característico de la resistencia de la fábrica a flexión vertical
- f_{xk2} → el valor característico de la resistencia de la fábrica a flexión horizontal
- γ_M → 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:

$$M_{Rd1} = (f_{xd1} + \sigma_d) \cdot Z = (f_{xk1} / \gamma_M + \sigma_d) \cdot Z$$

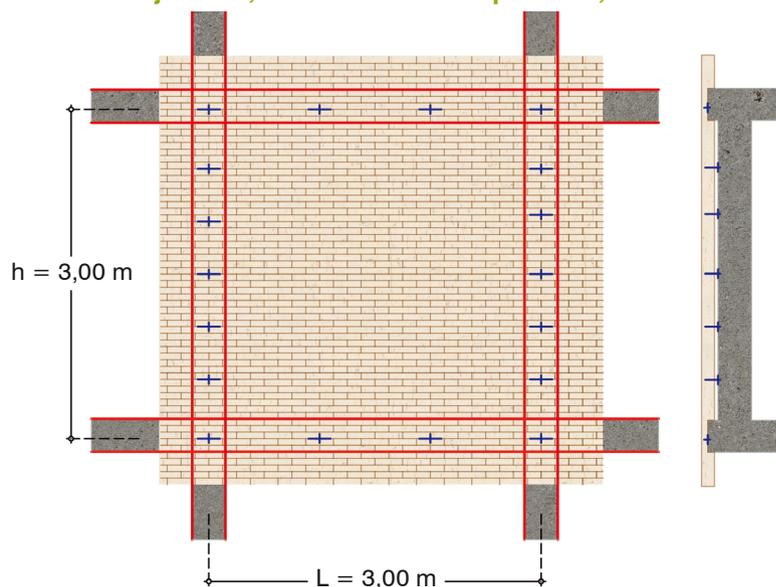
donde:

σ_d → 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



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*.

Características geométricas:

- Paño sustentado en cuatro bordes con laterales en continuidad (DB SE-F tabla G.3)
- Altura entre forjados: $h = 3,00 \text{ m}$
- Luz entre soportes: $L = 3,00 \text{ m}$
- Espesor del muro ($1/2$ pie formato castellano): $t = 115 \text{ mm}$

Características mecánicas:

- Resistencia a compresión de la fábrica: $f_k = 4 \text{ N/mm}^2$ ⁽⁵⁴⁾
- Resistencia a flexión paralela a los tendeles: $f_{xk1} = 0,10 \text{ N/mm}^2$
- Resistencia a flexión perpendicular a los tendeles: $f_{xk2} = 0,40 \text{ N/mm}^2$ ⁽⁵⁵⁾
- Módulo resistente por unidad de longitud / altura: $Z_1 = Z_2 = t^2 / 6 = 2204 \text{ mm}^2 \cdot \text{m} / \text{metro}$
- Valor característico de la acción de viento: $q_e = 0,8 \text{ kN/m}^2$
- 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) ⁽⁵⁶⁾
- Peso específico de la fábrica: $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$

Análisis:

- Tensión normal debida a peso propio (a media altura): $\sigma_d = \rho \cdot \gamma_G \cdot h / 2 = 0,0194 \text{ N/mm}^2$
- Capacidad resistente a flexión vertical: $M_{Rd1} = Z \cdot (f_{xk1} / \gamma_M + \sigma_d) = 0,131 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{metro}$
- Capacidad resistente a flexión horizontal: $M_{Rd2} = Z \cdot f_{xk2} / \gamma_M = 0,353 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{metro}$
- 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:

$$M_{Sd1} = \mu \cdot \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 = 0,371 \cdot 0,0316 \cdot 0,8 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,50 \cdot (3,00 \text{ m})^2 = 0,126 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{metro de longitud}$$

- Valor de cálculo del momento flector horizontal:

$$M_{Sd2} = \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 = 0,0316 \cdot 0,8 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,50 \cdot (3,00 \text{ m})^2 = 0,341 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{metro de altura}$$

- Comprobación de resistencia: $M_{Sd} \leq M_{Rd}$

$$M_{Sd1} = 0,126 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{metro} < M_{Rd1} = 0,131 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{metro. VALE}$$

$$M_{Sd2} = 0,341 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{metro} < M_{Rd2} = 0,353 \text{ m}\cdot\text{kN} / \text{metro. VALE}$$

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 $\frac{1}{2}$ 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 fachada⁵⁷.

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.

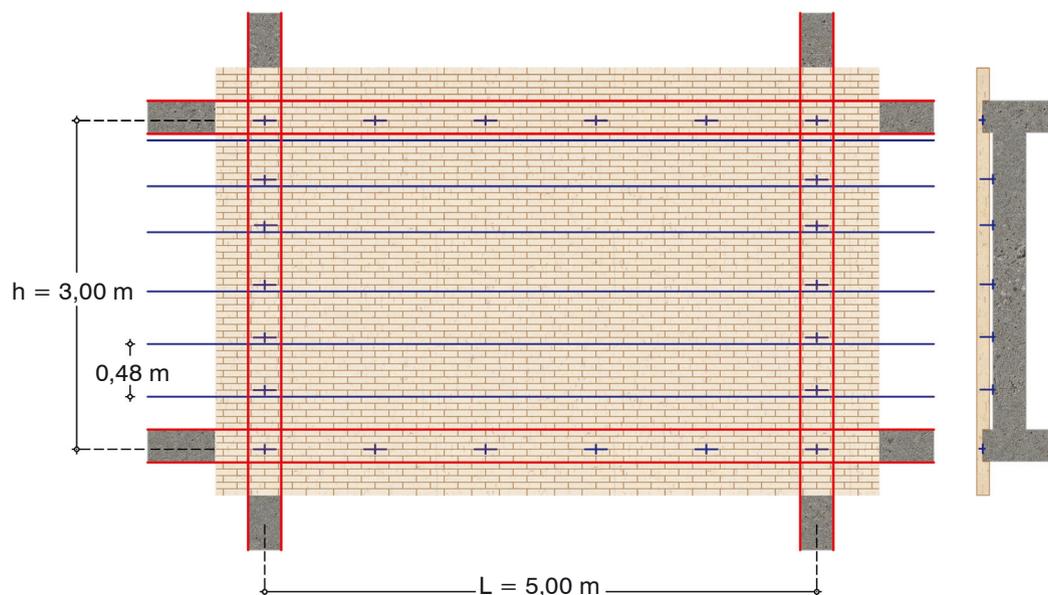
Con objeto de ilustrar el método y dar una idea del orden de magnitud de los resultados, se analiza el mismo ejemplo anterior, con armadura de tendel dispuesta con cuantía media (cada 8 hiladas), y con luces entre soportes de 5,00 m; que representa una situación habitual en edificios de estructuras porticadas.

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



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.

192

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 ($1/2$ pie formato castellano): $t = 115$ mm
- Armadura de tendel (FISUFOR® 4080/G): $\Phi 4$ 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



- Área de la armadura de tendel (Φ 4 mm cada 0,48 m): $A_s = 26,18 \text{ mm}^2 / \text{metro de altura}$
- Brazo mecánico de la armadura: $Z_s = 0,080 \text{ m}$
- Módulo resistente por unidad de longitud: $Z_1 = t^2 / 6 = 2204 \text{ mm}^2 \cdot \text{m} / \text{metro}$
- Valor característico de la acción de viento: $q_e = 0,8 \text{ kN/m}^2$
- 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: $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$

Análisis:

- Tensión normal debida a peso propio (a media altura): $\sigma_d = \rho \cdot \gamma_G \cdot h / 2 = 0,0216 \text{ N/mm}^2$
- Capacidad resistente a flexión vertical: $M_{Rd1} = Z \cdot (f_{yk1} / \gamma_M + \sigma_d) = 0,136 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{metro}$
- Capacidad resistente a flexión horizontal: $M_{Rd2} = A_s \cdot f_{yk} \cdot z_s / \gamma_s = 0,911 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{metro}$
- 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): $\alpha = 0,0303$

- Valor de cálculo del momento flector vertical:

$$M_{Sd1} = \mu \cdot \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 = 0,149 \cdot 0,0303 \cdot 0,8 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,50 \cdot (5,00 \text{ m})^2 = 0,135 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{metro de longitud}$$

- Valor de cálculo del momento flector horizontal:

$$M_{Sd2} = \alpha \cdot q_e \cdot \gamma_Q \cdot L^2 = 0,0303 \cdot 0,8 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,50 \cdot (5,00 \text{ m})^2 = 0,909 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{metro de altura}$$

- Comprobación de resistencia: $M_{Sd} \leq M_{Rd}$

$$M_{Sd1} = 0,135 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{metro} < M_{Rd1} = 0,136 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{metro. VALE}$$

$$M_{Sd2} = 0,909 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{metro} < M_{Rd2} = 0,911 \text{ m} \cdot \text{kN} / \text{metro. VALE}$$

En general, para situaciones habituales de altura de planta en torno a los 3,00 m; con un cerramiento de $\frac{1}{2}$ 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 sollicitaciones.

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.

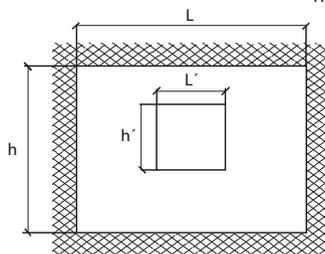


• Paños con continuidad en cabeza y base (plantas intermedias):

Capacidad resistente:

A flexión vertical: $M_{Rd1}' = M_{Rd1} \cdot (4 \cdot L - 2 \cdot L') / 4 \cdot L$

A flexión horizontal: $M_{Rd2}' = M_{Rd2} \cdot (4 \cdot h - 2 \cdot h') / 4 \cdot h$



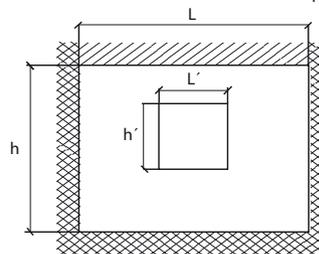
Paño con los cuatro bordes en continuidad (Tramo interior)

• 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: $M_{Rd2}' = M_{Rd2} \cdot (4 \cdot h - 2 \cdot h') / 4 \cdot h$

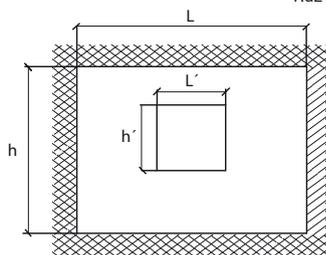


Paño con bordes laterales en continuidad (Tramo interior de última planta)

Capacidad resistente:

A flexión vertical: $M_{Rd1}' = M_{Rd1} \cdot (4 \cdot L - 2 \cdot L') / 4 \cdot L$

A flexión horizontal: $M_{Rd2}' = M_{Rd2} \cdot (3 \cdot h - 2 \cdot h') / 3 \cdot h$

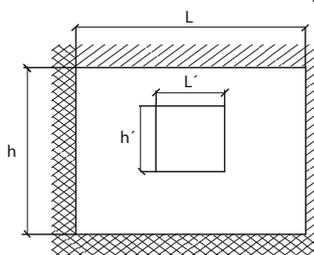


Paño con un borde lateral sin continuidad (Tramo extremo)

Capacidad resistente:

A flexión vertical: $M_{Rd1}' = M_{Rd1} \cdot (3 \cdot L - 2 \cdot L') / 3 \cdot L$

A flexión horizontal: $M_{Rd2}' = M_{Rd2} \cdot (3 \cdot h - 2 \cdot h') / 3 \cdot h$

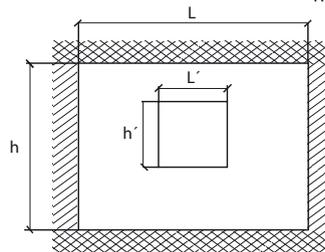


Paño con un borde lateral sin continuidad (Tramo extremo de última planta)

Capacidad resistente:

A flexión vertical: $M_{Rd1}' = M_{Rd1} \cdot (4 \cdot L - 2 \cdot L') / 4 \cdot L$

A flexión horizontal: $M_{Rd2}' = M_{Rd2} \cdot (h - h') / h$

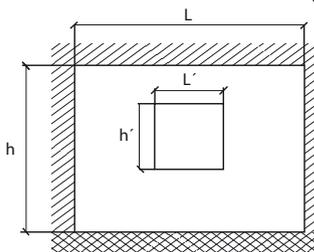


Paño con bordes laterales sin continuidad (Tramo aislado)

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 sollicitación 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 → el valor característico de la acción de viento (presión o succión)
- γ_Q → el coeficiente de seguridad de la acción horizontal = 1,50
- h, L → la altura y la longitud del paño, respectivamente

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 sollicitaciones 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



Anclajes a elementos estructurales

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 sollicitaciones (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: $q_{d1} = q_e \cdot \gamma_Q \cdot 16 \cdot M_{sd1} / [h^2 \cdot (16 \cdot M_{sd2} / L^2 + 16 \cdot M_{sd1} / h^2)] = 0,40 \text{ kN/m}^2$
- Luz del tramo (altura de planta): $h = 2,70 \text{ m}$
- Reacción en el borde (procedente de dos paños consecutivos):

$$R_{d, \text{forjados}} = q_{d1} \cdot h = 0,40 \text{ kN/m}^2 \cdot 2,70 \text{ m} = 1,08 \text{ kN / metro de longitud}$$

Reacción en soportes:

- Tipo de sustentación del paño: empotrado – empotrado
- Carga equivalente a flexión horizontal: $q_{d2} = q_e \cdot \gamma_Q \cdot 16 \cdot M_{sd2} / [L^2 \cdot (16 \cdot M_{sd2} / L^2 + 16 \cdot M_{sd1} / h^2)] = 0,80 \text{ kN/m}^2$
- Luz del tramo (longitud entre soportes): $L = 5,00 \text{ m}$
- Reacción en el borde (procedente de dos paños consecutivos):

$$R_{d, \text{soportes}} = q_{d2} \cdot L = 0,80 \text{ kN/m}^2 \cdot 5,00 \text{ m} = 4,00 \text{ kN / metro de altura}$$

Comprobación de equilibrio:

- Reacción total en bordes: $R_{d, \text{total}} = R_{d, \text{forjados}} \cdot L + R_{d, \text{soportes}} \cdot h = 1,08 \text{ kN/m} \cdot 5,00 \text{ m} + 4,00 \text{ kN/m} \cdot 2,70 \text{ m} = 16,20 \text{ kN}$
- Acción de viento total en el paño: $Q_{d, \text{total}} = q_d \cdot L \cdot h = 0,80 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,50 \cdot 5,00 \text{ m} \cdot 2,70 \text{ m} = 16,20 \text{ kN}$

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):

$$N_{Rd, \text{compresión}} \geq R_d \cdot s$$

- A tracción (para la succión de viento):

$$N_{Rd, \text{tracción}} \geq R_d \cdot s \cdot q_{e, \text{succión}} / q_{e, \text{presión}}$$

(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: $s = 1,00 \text{ m}$
- Reacción en borde: $R_{d, \text{forjados}} = 1,08 \text{ kN / metro}$
- Capacidad resistente a compresión: $N_{Rd, \text{compresión}} = 1,08 \text{ kN/m} \cdot 1,00 \text{ m} = 1,08 \text{ kN / anclaje}$
- Capacidad resistente a tracción: $N_{Rd, \text{tracción}} = 1,08 \text{ kN/m} \cdot 0,5 \text{ kN/m}^2 / 0,8 \text{ kN/m}^2 = 0,68 \text{ kN / anclaje}$

Anclajes a soportes:

- Separación recomendada: $s = 0,48 \text{ m}$ (cada 8 hiladas, el mismo intervalo que la armadura)
- Reacción en borde: $R_{d, \text{soportes}} = 4,00 \text{ kN / metro}$
- Capacidad resistente a compresión: $N_{Rd, \text{compresión}} = 4,00 \text{ kN/m} \cdot 0,48 \text{ m} = 1,92 \text{ kN / anclaje}$
- Capacidad resistente a tracción: $N_{Rd, \text{tracción}} = 1,92 \text{ kN} \cdot 0,5 \text{ kN/m}^2 / 0,8 \text{ kN/m}^2 = 1,20 \text{ kN / anclaje}$

Dimensionado de los perfiles verticales auxiliares

198

Los perfiles auxiliares intercalados entre los soportes deben transmitir la reacción a los forjados, asimilada a una carga lateral con distribución uniforme.

La sollicitación 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):

$$M_{Sd} = R_{d, \text{soportes}} \cdot h^2 / 8$$

- Perfil en continuidad (con una sola placa al frente del forjado):

$$M_{Sd} = R_{d, \text{soportes}} \cdot h^2 / 16$$

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 prolongados⁶⁰.

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 disconti-

nuos 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 térmica⁶².

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 fachada⁶³.

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 mortero⁶⁴.

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 hidratada proporciona una mayor estanquidad al agua de lluvia sin mermar la permeabilidad al vapor de agua⁶⁵.

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 esorrentía 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 menor⁶⁶. 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 provo-

ca 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 aire⁶⁷.

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*⁶⁶, 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 ambiental⁷⁰.

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 succión⁷¹.

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 filtración⁷² 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 filtración⁷³.

En situaciones intermedias, por ejemplo en fachadas sin revestimiento exterior y grado de impermeabilidad

cuatro, la barrera puede ser de resistencia *alta* a la filtración⁷⁴; 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/m². 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.

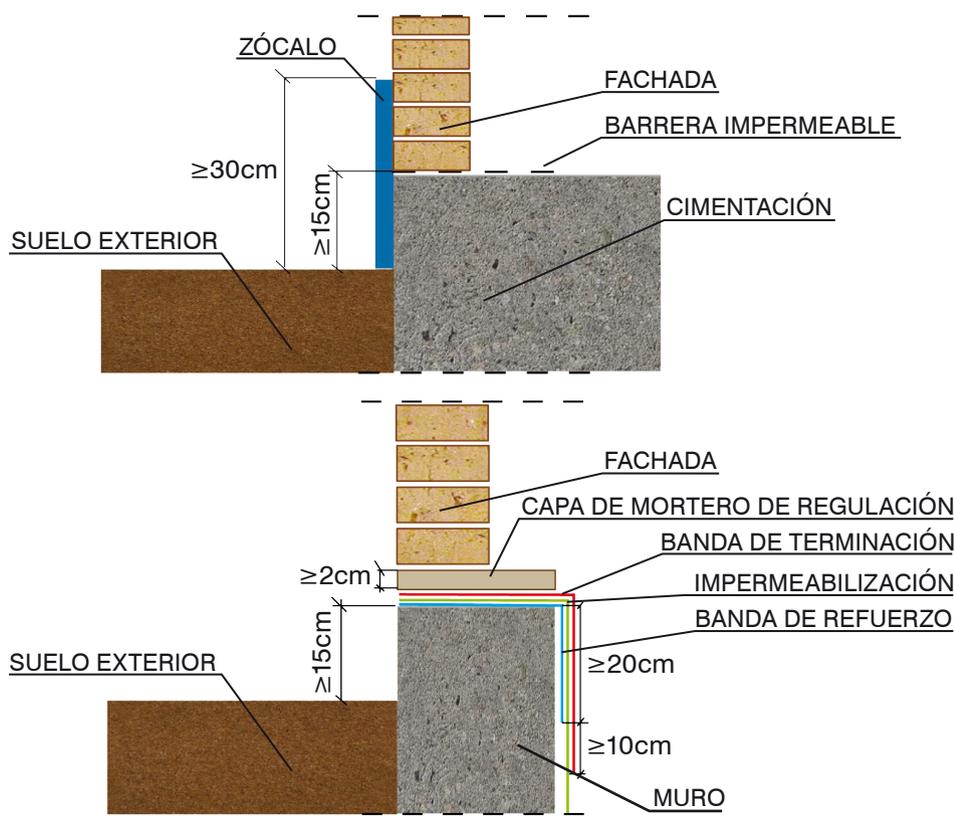
• Solución de arranque sobre cimentación

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



Detalles de arranque de fachada

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**

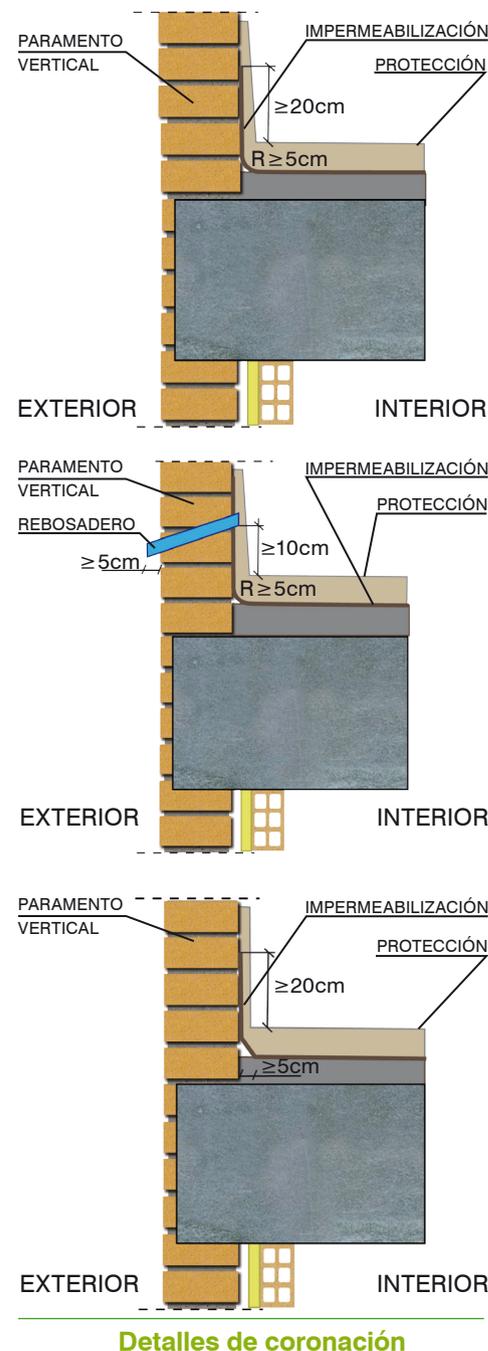
El encuentro del peto con la cubierta requiere un estudio particular en cada caso concreto, puesto que las soluciones son diferentes si se trata de una cubierta plana o inclinada, transitable o no, etc. Las recomendaciones que aquí se indican son generales para todos los casos.

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 30° 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 mem-

brana impermeable en el encuentro, es importante cuidar que estos salientes estén provistos de goterón y tengan suficiente pendiente hacia el exterior.

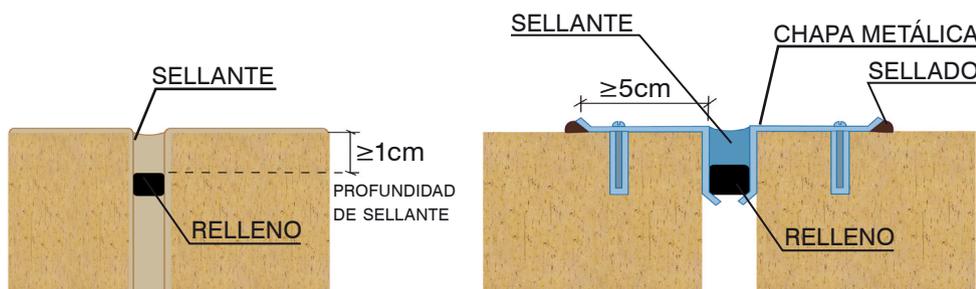
Prevención de humedades en las juntas de movimiento

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.



Detalles de remate de juntas verticales de movimiento

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 aquellas 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.

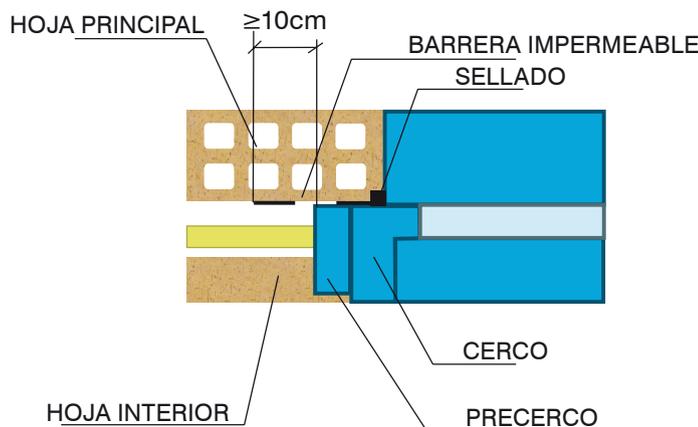
Además, si la mocheta⁷⁵ es interna, se puede colocar la carpintería desde el interior. En muros de dos hojas, con la carpintería a haces interiores es fácil obtener la mocheta sin necesidad de cortar las piezas, retranqueando ligeramente la hoja interna.

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 $\frac{1}{2}$ 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.

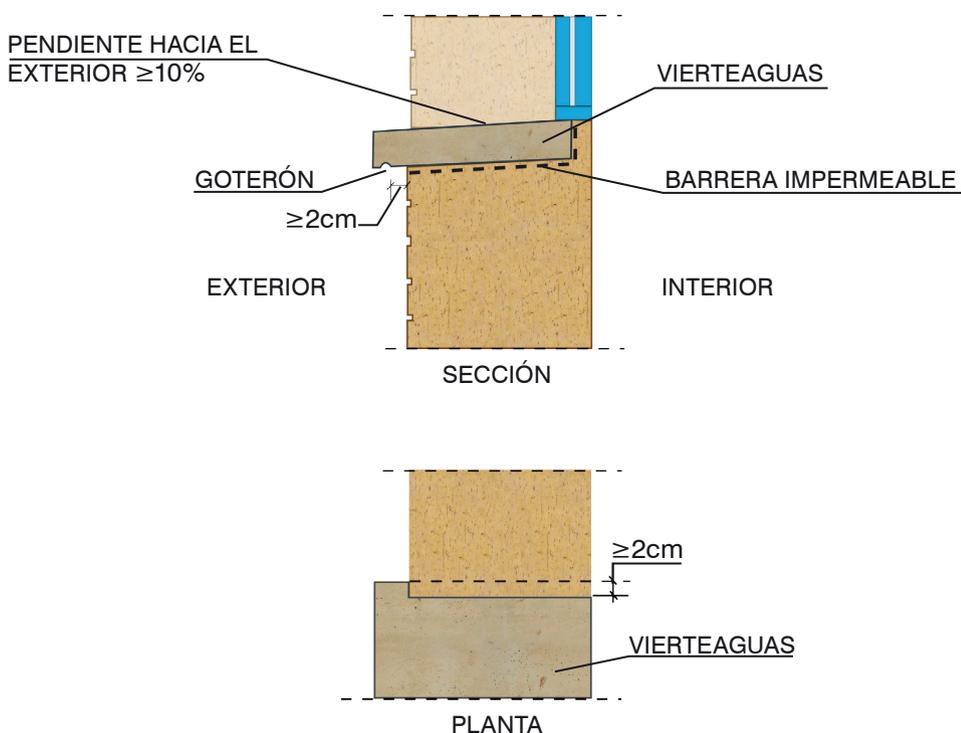
El precerco se aloja en la mocheta y se fija a la hoja interior recibiendo las

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 sollicitaciones 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 10° 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 10° 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

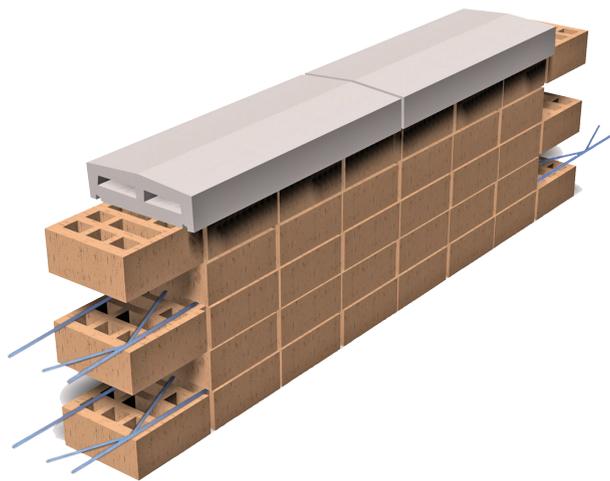
Los petos y, en general, todos los muros en su coronación, deben contar con los elementos de protección necesarios para evitar el aporte excesivo de agua sobre la fachada.

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 10° 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 10° 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.).

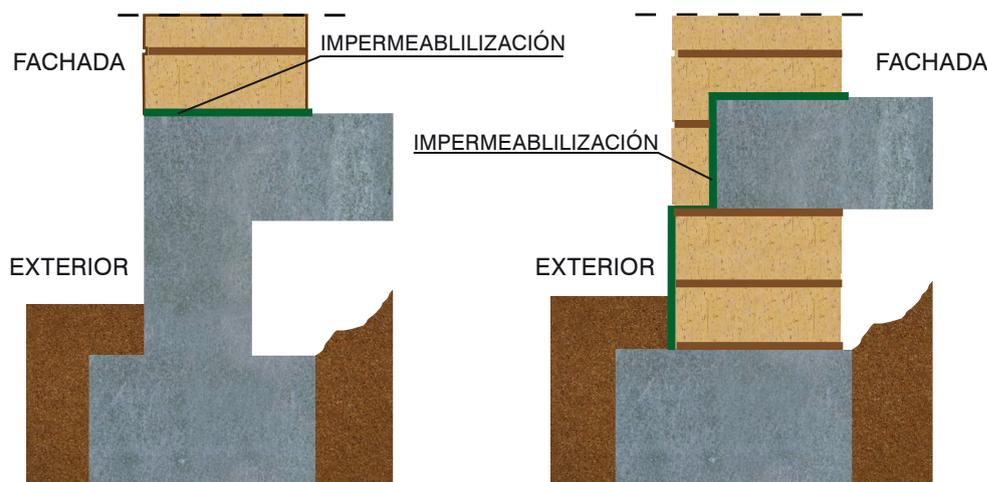
En las situaciones de alto riesgo, por estar muy alta la capa freática, se puede recurrir a la utilización de un mortero *macroporoso* que sea transpirable y tenga propiedades de retención al paso del agua.

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 en vueltas 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
Revestimiento intermedio	N	Resistencia a la filtración del revestimiento intermedio en la cara interior de la hoja principal
	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.
	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.
		Designación del mortero
		CS III W1 ó CS IV W1 Resistencia a compresión: CS III (3,5 - 7,5 N/mm ²) CS IV (≥ 6 N/mm ²) Absorción de agua por capilaridad: W1 ($c \leq 0,40$ kg / (m ² ·min ^{0,5}))
		CS III W2 ó CS IV W2 Resistencia a compresión: CS III (3,5 - 7,5 N/mm ²) CS IV (≥ 6 N/mm ²) Absorción de agua por capilaridad: W2 ($c \leq 0,20$ kg / (m ² ·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: <ul style="list-style-type: none"> • 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.
	C2	Se debe utilizar una hoja principal de espesor alto. Se considera como tal una fábrica cogida con mortero de: <ul style="list-style-type: none"> • 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/mm ²)
		M 5 ó M 7,5 M: resistencia a compresión (N/mm ²)

J Resistencia a la filtración de las juntas entre las piezas que componen la hoja principal		Designación del mortero
Juntas de fábrica vista	<p>J1</p> <p>Las juntas deben ser al menos de resistencia media a la filtración.</p> <p>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.</p>	<p>M 5 ó M 7,5</p> <p>$c \leq 0,40 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$</p> <p>M: resistencia a compresión (N/mm²)</p> <p>Absorción de agua por capilaridad (UNE-EN 998-1):</p> <p>W1 ($c \leq 0,40 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$)</p>
	<p>J2</p> <p>Las juntas deben ser de resistencia alta a la filtración.</p> <p>Se consideran como tales las juntas de mortero con adición de un producto hidrófugo, de las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> sin interrupción excepto, en el caso de las juntas de los bloques de hormigón, que se interrumpen 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. 	<p>M 5 ó M 7,5</p> <p>$c \leq 0,20 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$</p> <p>M: resistencia a compresión (N/mm²)</p> <p>Absorción de agua por capilaridad (UNE-EN 998-1):</p> <p>W2 ($c \leq 0,20 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$)</p>

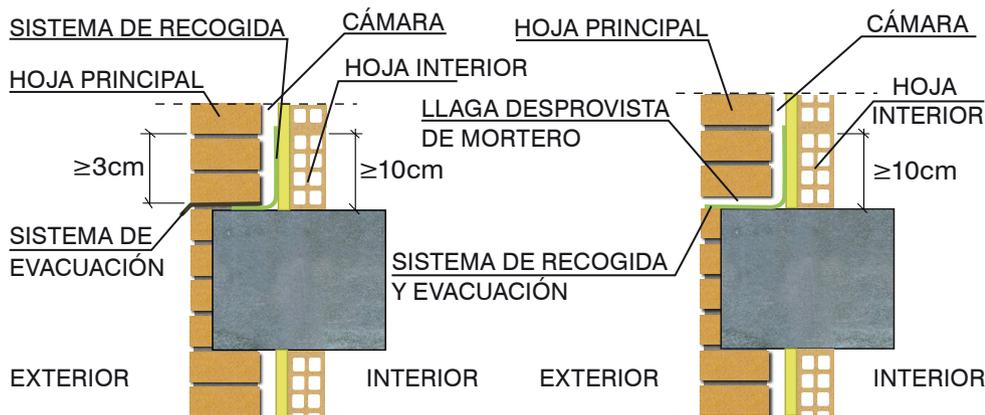
*Fuente: "Boletín de Fachadas". Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero

216

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.



Detalle de ventilación y drenaje de fachada

Para la evacuación se puede disponer 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.



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 instrumen-

tos 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 CO₂. 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 unifamiliar⁷⁶.

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 otoño⁷⁷.

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 $1 \text{ W} / (\text{m}^2\text{-K})$ garantiza un ahorro en calefacción de alrededor de 7,6 euros por m^2 de superficie vidriada al año.

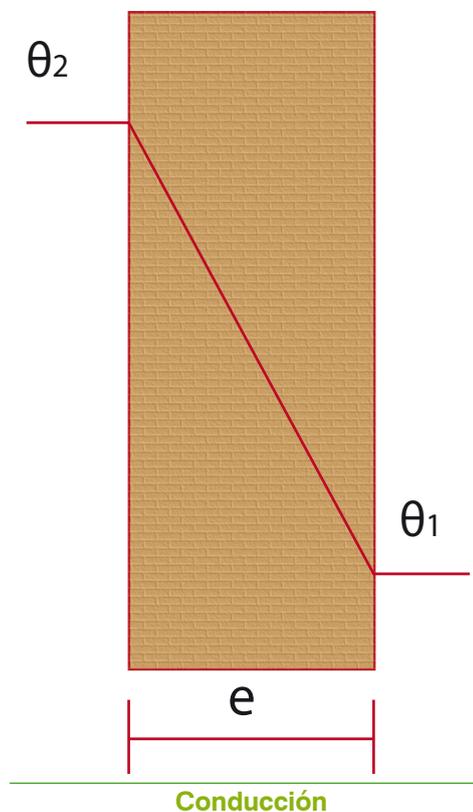


Invernadero adosado

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 se 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/m^2]
- λ : → coeficiente de conductividad del material [$W / (m \cdot K)$]
- 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:

$$R = e / \lambda \quad [m^2 \cdot K / W]$$

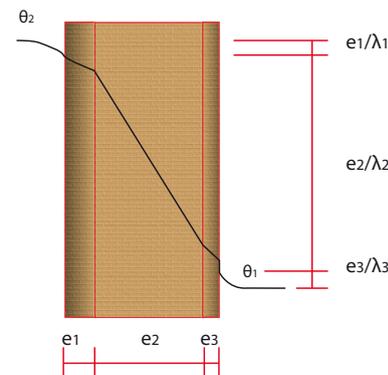
Si el elemento es heterogéneo, con capas de espesores e_1, e_2, \dots, e_n y coeficientes de conductividad $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, respectivamente, la resistencia térmica se expresa de la siguiente manera:

$$R = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n}$$

El flujo de calor, en este caso es:

$$q = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \frac{1}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n}}$$

$$q = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \frac{1}{R}$$



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/m^2]
- h_r : → coeficiente de transmisión superficial por radiación [$W / (m^2 \cdot K)$]
- $(\theta_r - \theta_1)$: → 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 ceramamiento, 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.

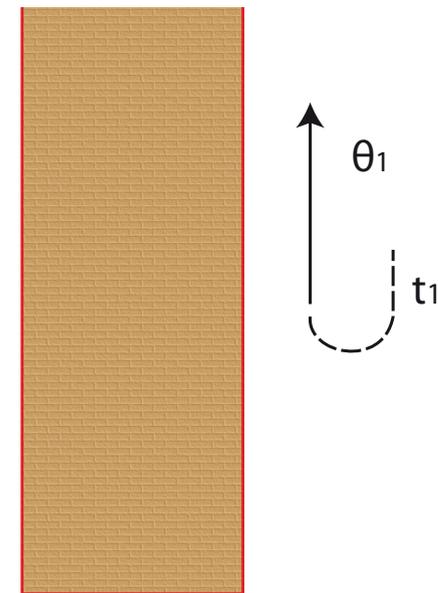
La transferencia de calor por convección se expresa por la *Ley de Enfriamiento de Newton*:

$$q = (\theta_1 - t_1) \cdot h_c$$

siendo:

- q : → flujo de calor por convección, por unidad de tiempo y de superficie [W/m^2]
- h_c : → coeficiente de transmisión superficial por convección o *coeficiente de película* [$W / (m^2 \cdot K)$]
- $(\theta_1 - t_1)$: → 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).

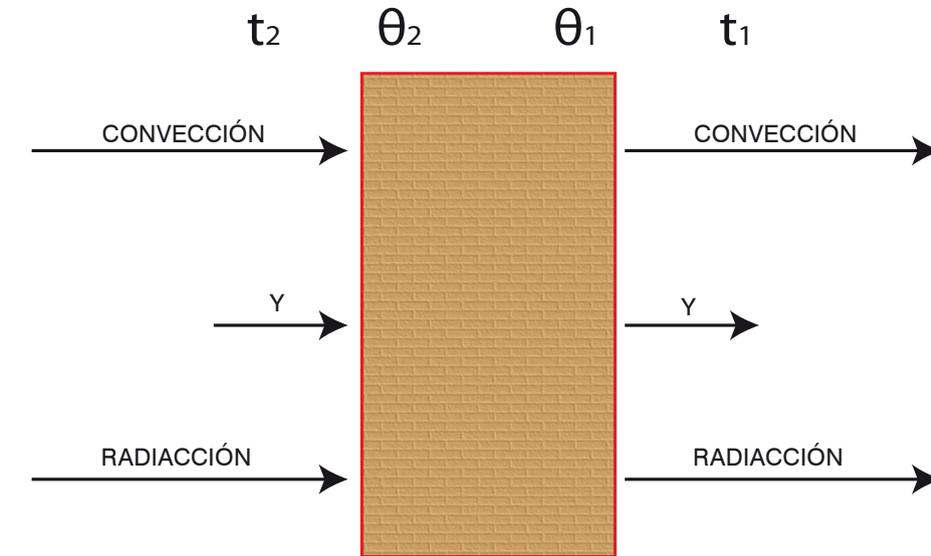
Ante la dificultad de involucrar a las temperaturas intermedias en la expresión de transmisión total del calor, el flujo total se expresa sólo en función de las temperaturas de los ambientes (t_1 y t_2). Los coeficientes de radiación y convección (h_r y h_c) actúan simultáneamente en el aire en contacto 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 exte-

rior, “ 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



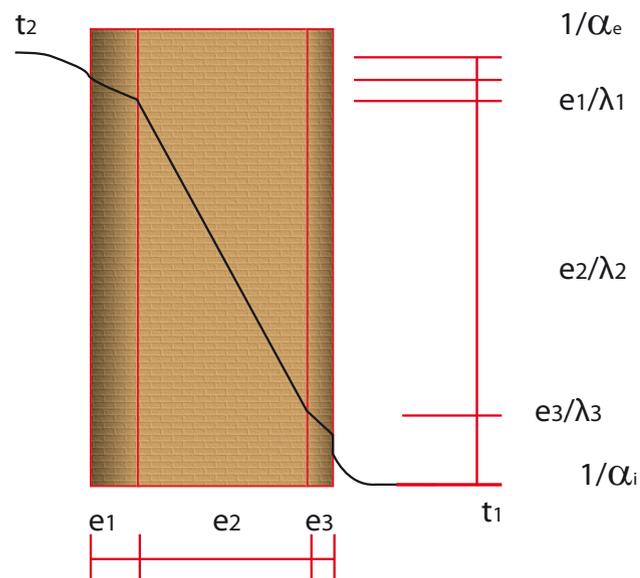
donde:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e}} = \frac{1}{R}$$

siendo:

- Q : → flujo de calor por unidad de superficie y tiempo [W/m^2]
- $(t_2 - t_1)$: → diferencia de temperatura de los ambientes [K]
- e_i : → espesor de cada capa [m]
- λ_i : → conductividad térmica del material componente de cada capa [$W / (m \cdot K)$]
- h_i, h_e : → coeficientes de transmisión superficial interior y exterior, respectivamente [$W / (m^2 \cdot K)$]
- R : → resistencia térmica total de la pared [$m^2 \cdot K / W$]
- U : → *transmitancia térmica* de la pared [$W / (m^2 \cdot K)$] = $1 / R$

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 material 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 $[MN \cdot s / g]$.

• **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, $\mu = r_{v,\text{material}} / r_{v,\text{aire}}$. Es un factor adimensional. Para efectuar la conversión se puede tomar como valor de resistividad del aire en reposo $r_{v,\text{aire}} = 5,4 MN \cdot s / (g \cdot m)$.

• **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]
- μ_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 li-

mitar 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 barrera 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 textiles⁸⁰. 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 750°C.

Las espumas orgánicas de poliestireno se fabrican básicamente a partir del etileno y diversos compuestos aromá-

ticos, 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

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 Reaumur (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.

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.

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/m³. El valor puede aumentar (empeora el poder aislante) si la densidad cambia; tanto si se trata de densidades bajas (por debajo de 25 kg/m³) como si se trata de densidades altas (por encima de 50 kg/m³).



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 fuego⁸².

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 ma-

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.

teriales en los más idóneos para su utilización en calorifugado y aislamiento industrial, sobre todo la lana de roca⁸³. 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.

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



Montaje de los paneles rígidos de aislamiento

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 nula⁹⁴.

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.



Fachada terminada con paneles rígidos de aislamiento

84 Ni siquiera con métodos dilatométricos muy sofisticados se consigue una medición diferente de cero.



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 acondicionado⁸⁵.

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 CO₂ 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 actuaciones⁸⁶.

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 las 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

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 CO₂ 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 CO₂ a la atmósfera de 32,5 millones de toneladas.

87 En adelante DB HE 1.

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 higrótérmicos 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.

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 energética⁸⁸ del edificio mediante la limitación de los parámetros característicos de los cerramientos y particiones interiores que componen su envolvente térmica⁸⁹. 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 referencia⁹⁰ 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 m², 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 Decreto⁹¹.
- 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

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.

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*.

• 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 1⁹².

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).

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 nacional⁹³.

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*

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”..

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 $f_{Rsi,min}$, 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 $f_{Rsi,min}$. 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 Límite 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 período⁹⁴. 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

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.

edificios con el ambiente exterior, medida con una sobrepresión de 100 Pa, debe tener unos valores inferiores a $50 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$, para las zonas climáticas A y B; y $27 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$, 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 E⁹⁵.

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:

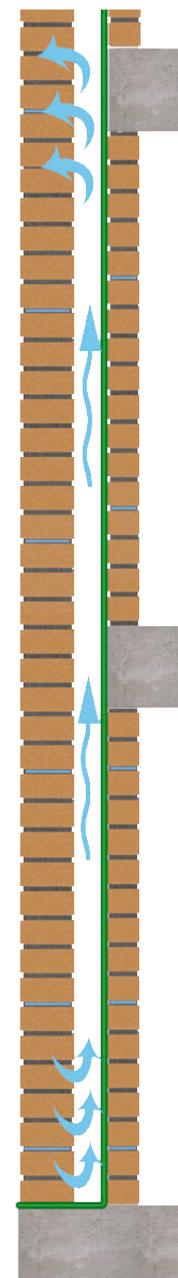
- R_T → la resistencia térmica total del cerramiento ($m^2 \cdot K / W$)

con:

$$R_T = R_{se} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{si}$$

siendo:

- $R_1, R_2 \dots R_n$ → las resistencias térmicas de cada capa [$m^2 \cdot K / W$]
- R_{se} y R_{si} → 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 → el espesor de la capa [m]
- λ → la conductividad térmica del material que compone la capa [$W / (m \cdot K)$]

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:

$$U_M = 1 / R_T = 0,56 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

96 Según la tabla D.1 “Zonas climáticas” del apéndice D del DB HE 1.

Tabla 5.5 Caracterización de los materiales del ejemplo 8

Capa	Conductividad térmica λ ($W / (m \cdot K)$)	Espesor e (m)	Resistencia térmica R ($m^2 \cdot K / W$)	Resistividad al vapor μ (adimensional)	Espesor equivalente $S_e = \mu \cdot e$ (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: $U_{M\text{lim}} = 0,57 \text{ W / (m}^2\cdot\text{K)}$ (Zona E)⁽⁹⁷⁾

$$U_M = 0,56 \text{ W / (m}^2\cdot\text{K)} < U_{M\text{lim}} = 0,57 \text{ W / (m}^2\cdot\text{K)}. \text{ VALE}$$

- Transmitancia térmica máxima de cerramientos: $U_{M\text{máx}} = 0,74 \text{ W / (m}^2\cdot\text{K)}$ (Zona E)⁽⁹⁸⁾

$$U_M = 0,56 \text{ W / (m}^2\cdot\text{K)} < U_{M\text{máx}} = 0,74 \text{ W / (m}^2\cdot\text{K)}. \text{ VALE}$$

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: $f_{Rsi,\text{min}} = 0,64$ (Zona E; clase de higrometría 3) ⁽¹⁰⁰⁾

Verificación de la conformidad con DB HE 1:

- Utilizando el valor de U_M calculado anteriormente: $f_{Rsi} = 1 - U_M \cdot 0,25 = 0,86$

$$f_{Rsi} = 0,86 > f_{Rsi,\text{min}} = 0,64 \text{ VALE (no hay riesgo de condensaciones superficiales)}$$

242

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 límite de transmitancia establecido.

Sólo en espacios de higrometría muy elevada (clase 5), como pueden ser piscinas o lavanderías, es preciso restrin-

gir 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 cumpli-

miento 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:

- θ_e → la temperatura exterior media de la localidad en el mes de enero
- θ_i → la temperatura del ambiente interior (20°C)
- θ_n → la temperatura de la capa n
- R_n → la resistencia térmica de la capa n
- R_T → la resistencia térmica total del cerramiento

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 → la presión de vapor del aire exterior [Pa]
- P_i → la presión de vapor del aire interior [Pa]
- P_n → la presión de vapor en la capa n [Pa]
- S_{dn} → la resistencia térmica de la capa n, expresada como el espesor de aire equivalente [m]

donde: → $S_{dn} = e_n \cdot \mu_n$

siendo:

- e_n → el espesor de la capa n [m]
- μ_n → 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:

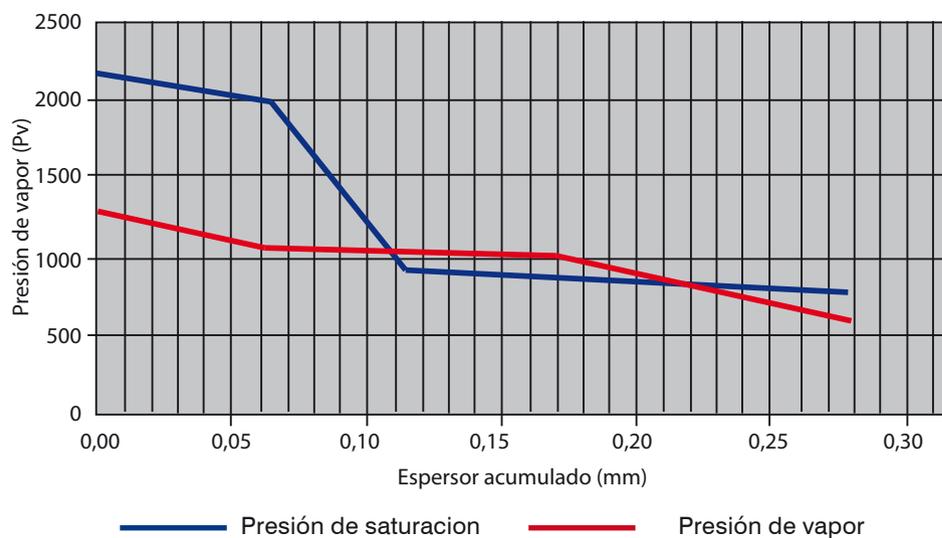
- Φ_i → la humedad relativa del ambiente interior (en tanto por 1) (0,55 para clase de higrometría 3)
- Φ_e → la humedad relativa del ambiente exterior (en tanto por 1)



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 resistencias 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

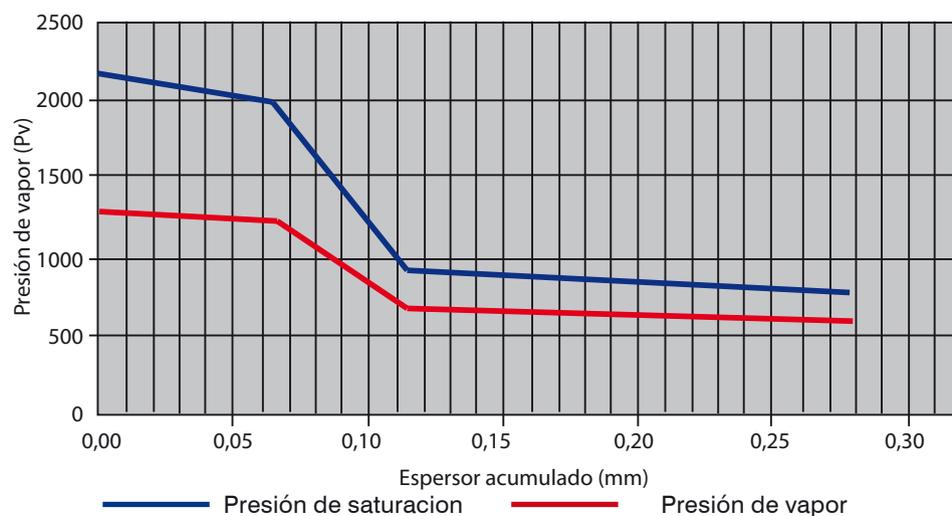
Capa	e (m)	R (m ² ·K / W)	μ (-)	S _d = μ·e (m)	T (°C)	P _{sat} (Pa)	P _v (Pa)	CONDENSA
Ambiente interior					20	2337	1285	NO
Superficie interior	-	0,13	-	-	18,82	2172	1285	NO
Enlucido de yeso	0,015	0,026	6	0,09	18,58	2140	1278	NO
Ladrillo cerámico hueco	0,050	0,112	10	0,50	17,57	2007	1238	NO
Poliestireno 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



Gradiente térmico y cálculo de condensaciones

con una capacidad aislante algo mayor y, sobre todo, con una resistividad a la difusión de vapor mucho mayor¹⁰³, los resultados del análisis son los indicados en la tabla 5.7.

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 *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 higrótérmico 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 higrótérmico, sobre todo en el encuentro con los elementos

103 El poliestireno tiene una conductividad térmica $\lambda = 0,038 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 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.

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 forjado¹⁰⁴.



Aislamiento de panel rígido machi-hembrado con separadores

Sin embargo, esta solución, cuando la hoja exterior es de $\frac{1}{2}$ 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 plaquetas¹⁰⁵. 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 ventilada¹⁰⁶. 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 barras 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 cerramiento¹⁰⁷. 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 adicional¹⁰⁸. Pueden quedar emparedados en el interior de las dos hojas del cerra-

miento, 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 fachada¹⁰⁹.



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 comunitarios¹⁰.

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*¹¹ 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.

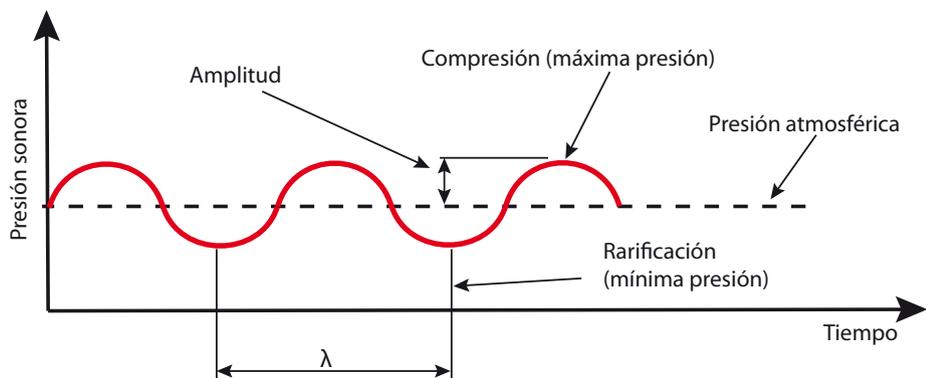
5.4.1 Conceptos básicos sobre la transmisión del sonido

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 fin¹¹².

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] ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10 \text{ } \mu\text{bar} = 10^{-5} \text{ kg/cm}^2$).



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:

- ρ → la masa volumétrica del medio (densidad)
- c → la velocidad de propagación del sonido

También por analogía con la corriente eléctrica, la impedancia acústica se mide en Ohmios Acústicos [$g / (s \cdot cm^2)$], aunque es más frecuente utilizar como unidad de medida el Rayl [$Pa \cdot s / m$]. La equivalencia es: 1 Ohmio Acústico = 10 Rayls. En los gases, la impedancia acústica está comprendida entre 427 Rayls [$Pa \cdot s / m$] para el aire a 0°C y 235 Rayls [$Pa \cdot s / m$] 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 Hz¹¹³. 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 rarefacción. Este proceso se repite con el 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 $2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar}$ ($2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$). Esto es lo que se denomina *umbral de audición*. Cuando la presión acústica supera los $103 \mu\text{bar}$ (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 $[\text{W}/\text{m}^2]$. En la escala de intensidades, el *umbral de audición* corresponde a $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ y el *umbral doloroso* comienza cuando la intensidad supera aproximadamente $10 \text{ W}/\text{m}^2$.

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:

$$L = 20 \cdot \log (P / P_0) \text{ [dB]}$$

siendo:

- P_0 → presión acústica del umbral de audición ($= 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$)
- L → 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 → intensidad acústica del umbral de audición ($= 10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$)
- L → 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 decibelios¹⁴.

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 anchos¹¹⁵.

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* repre-

sentan 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

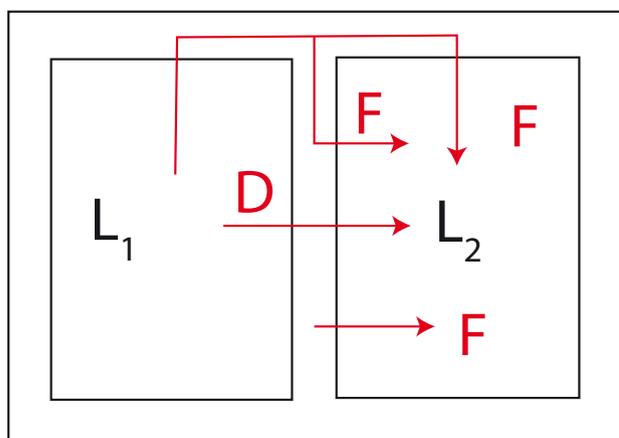
un buen aislamiento acústico es diferente si se trata de aislar el sonido transmitido por el aire u otro medio gaseoso (con baja impedancia) o si se trata de aislar el sonido transmitido por los sólidos (con alta impedancia).

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:

- 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.
- 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-



L_1 : recinto emisor D : transmisión directa
 L_2 : recinto receptor F : transmisiones por flancos

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:

$$D = L_1 - L_2 \text{ [dB]}$$

siendo:

- L_1 ; L_2 → 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_{nr} :**

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 reverberación¹¹⁶. Se define mediante la expresión siguiente:

$$D_{nr} = L_1 - L_2 + 10 \cdot \log (T / T_0) \text{ [dB]}$$

siendo:

- L_1 ; L_2 → los niveles medios de presión sonora en los recintos emisor y receptor, respectivamente [dB]
- T → tiempo de reverberación del recinto receptor [s]
- T_0 → 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 browniano es el ruido en el que la intensidad es proporcional al inverso del cuadrado de la frecuencia (1/f²). 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 → la potencia sonora que impacta sobre el elemento en estudio
- W_2 → 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 inciden-

te 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:

- ω → la frecuencia angular o pulsación ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$) [Hz]
- Z → la impedancia acústica del aire [$\text{Rayls} = \text{Pa} \cdot \text{s} / \text{m}$] (para el aire a 20°C, $Z = 414 \text{ Rayls}$)

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.

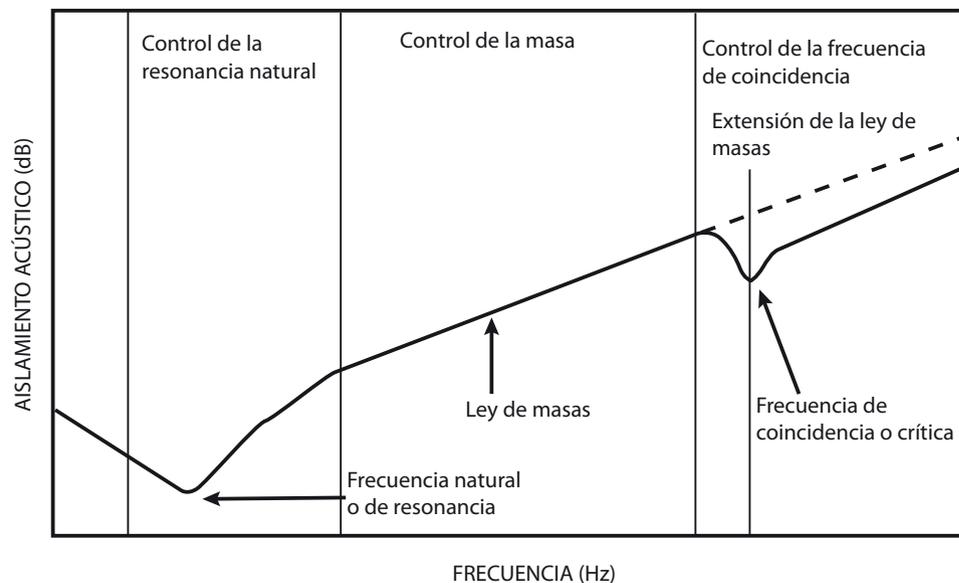
Si la pared es excitada por una onda sonora de una determinada frecuencia, en general, la propia pared opone resistencia al movimiento y la vibración se detiene. Pero si la frecuencia de la onda sonora es f_0 , la pared responde por simpatía con la misma frecuencia generando el sonido al otro lado. Entonces 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 flexa 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:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi \cdot d} \sqrt{\frac{12 \cdot \rho}{E} \cdot (1 - \sigma^2)}$$

siendo:

- $c \rightarrow$ la velocidad del sonido en el aire [m/s] (para el aire a 20°C, $c = 340$ m/s)
- $d \rightarrow$ el espesor de la pared [m]
- $\rho \rightarrow$ la densidad del material de la pared [kg/m³]
- $\sigma \rightarrow$ el coeficiente de Poisson
- $E \rightarrow$ el módulo de Young [N/m²]

Particularizando la expresión anterior para la velocidad del sonido en el aire a 20°C ($c = 340$ m/s), se obtiene la expresión de la frecuencia crítica que indica el DB HR, Anejo A "Terminología", fórmula A.10)

$$f_c = \frac{64.000}{d} \sqrt{\frac{\rho \cdot (1 - \sigma^2)}{E}}$$

La frecuencia crítica de una pared de ladrillo cerámico perforado de 1/2 pie de espesor, con una densidad $\rho = 1600$ kg/m³, un módulo de Young $E = 4 \cdot 10^9$ N/m², y un coeficiente de Poisson $\sigma = 0,25$ es aproximadamente de 340 Hz¹¹⁹.

Según lo anterior, la frecuencia natural y la frecuencia crítica de la

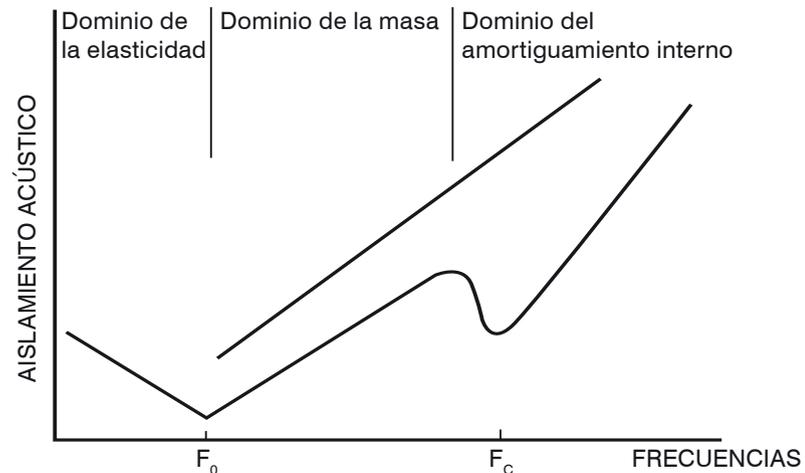
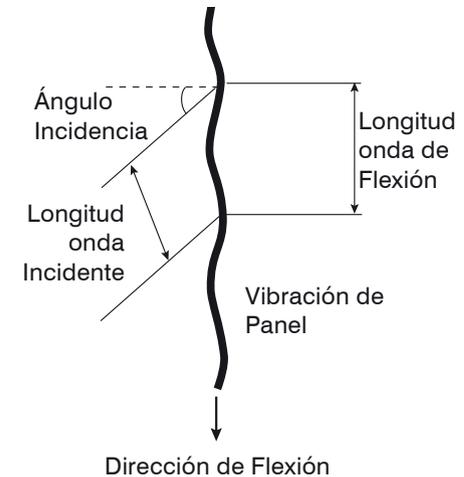
pared delimitan tres zonas en las que el aislamiento acústico se rige por diferentes leyes, tal como se representa esquemáticamente en la figura.

- 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 20°C ($Z = 414$ Rayls), se obtiene:

$$R = 20 \cdot \log(m \cdot f) - 42 \text{ [dB]}$$

(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 una 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 porosidad¹²⁰. 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.

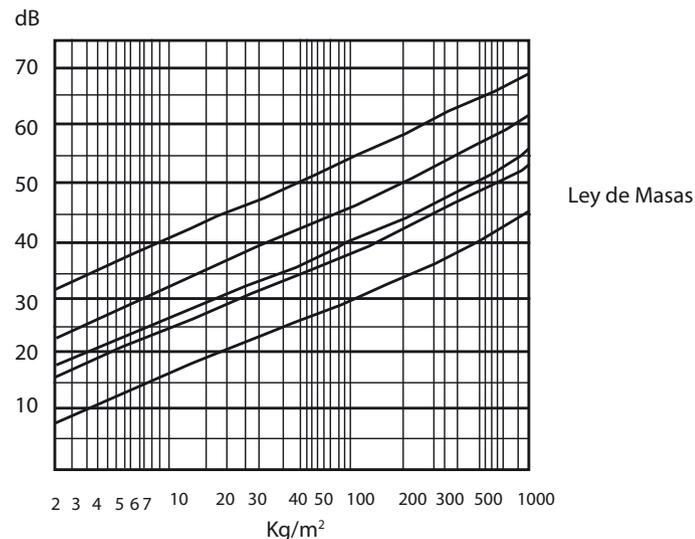
La pendiente de la ley de masa obtenida a partir de resultados experimentales es menor si se trata de elementos con masas inferiores a unos 150 kg/m². Para paredes ligeras (de masa superficial inferior 150 kg/m²) el aislamiento acústico real aumenta unos 5 dB al duplicar la masa; en paredes pesadas el 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;

$$\text{Para } m \leq 150 \text{ kg/m}^2 \quad R_A = 16,6 \cdot \log(m) + 5 \quad [\text{dBA}]$$

$$\text{Para } m \geq 150 \text{ kg/m}^2 \quad R_A = 36,5 \cdot \log(m) - 38,5 \quad [\text{dBA}]$$



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 ocurriría 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:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2}} \quad [\text{Hz}]$$

siendo:

- $K \rightarrow$ la rigidez dinámica del medio separador [MN/m^3]
- $m_1 ; m_2 \rightarrow$ 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:

$$f_0 < 75 \text{ Hz} \quad \text{supone} \quad d > 67 \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \text{ [cm]}$$

$$f_0 < 60 \text{ Hz} \quad \text{supone} \quad d > 105 \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \text{ [cm]}$$

• 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.

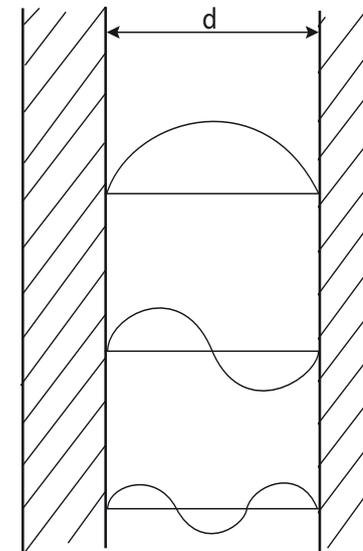
• Frecuencias de cavidad (f_{cavidad})

Las frecuencias de cavidad son las que corresponden a una separación entre hojas, d , exactamente igual a un múltiplo de la semilongitud de onda.

$$d = n \cdot (\lambda / 2) = n \cdot (c / 2 \cdot f_{\text{cavidad}}); \rightarrow f_{\text{cavidad}} = n \cdot c / (2 \cdot d)$$

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]



Frecuencias de cavidad

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” ($f_0 < f < f_{\text{cavidad}}$) 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:

- $m_1; m_2 \rightarrow$ las masas superficiales de los elementos $[\text{kg}/\text{m}^2]$

- $d \rightarrow$ el espesor de la capa de aire $[\text{m}]$
- $\omega \rightarrow$ la frecuencia angular o pulsación ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$) $[\text{Hz}]$
- $\rho \rightarrow$ la densidad del aire $[\text{kg}/\text{m}^3]$ (para el aire a 20°C , $\rho = 1,22 \text{ kg}/\text{m}^3$)
- $c \rightarrow$ la velocidad del sonido en el aire $[\text{m}/\text{s}]$ (para el aire a 20°C , $c = 340 \text{ m}/\text{s}$)
- 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 impor-

tante 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 exterior¹²¹. 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 (*punto 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 acústico¹²². 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,

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 m² 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.

vidrios dobles con cámara de aire¹²³ 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.

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 las 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 pro-*

ducir 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 m³ (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 recintos¹²⁴, 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

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.

recinto protegido del ambiente exterior, como es el caso general de las fachadas¹²⁵; 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_{d1} . 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

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 a 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 m² de absorción) que disponga de una puerta exterior que aisle 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 efectúan 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 HR¹²⁷.

- **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 $\frac{1}{2}$ 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 $\frac{1}{2}$ 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/m^2), cuando se utilizan sistemas resilientes o de entramado autoportante como elementos separadores. Esta exigencia se cumple sobradamente cuando se utiliza al exterior ladrillo cara vista de $\frac{1}{2}$ pie de espesor que, según la base de datos del programa LIDER, se puede considerar con una masa superficial de 205 kg/m^2 .

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

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 dominante 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.

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. Parte 1: 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

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 compor-

tamiento 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.

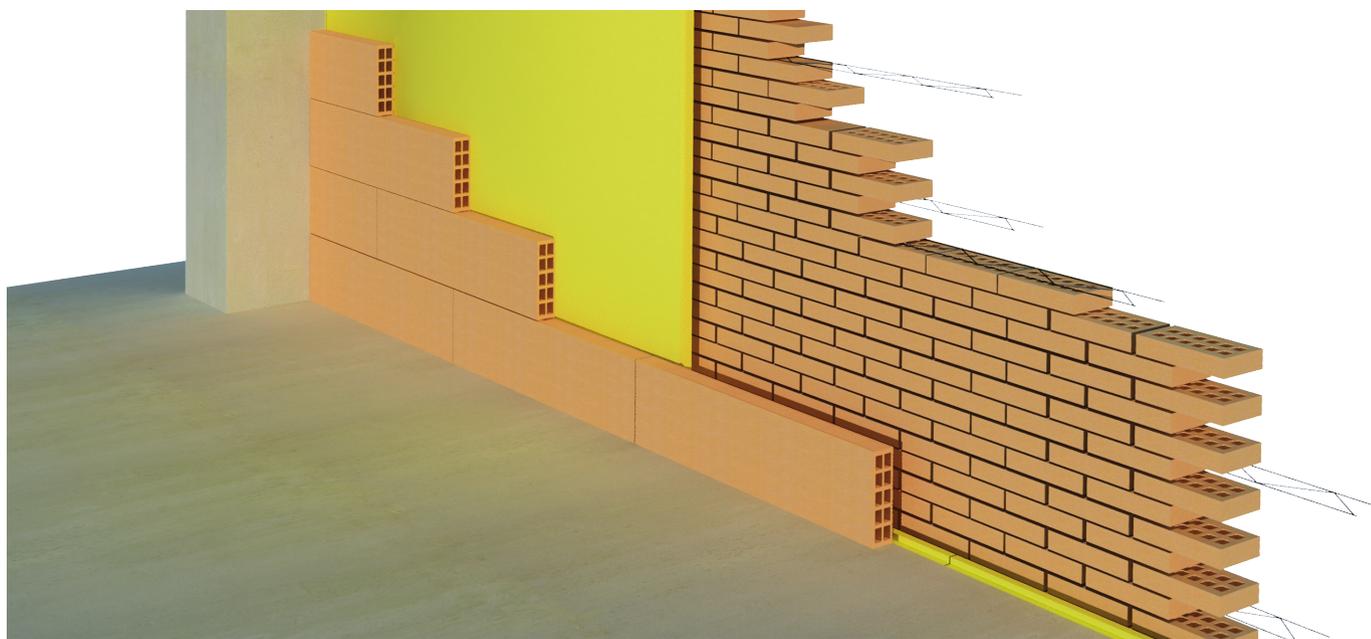
El reto que supone mejorar unas determinadas prestaciones es conseguirlo sin menoscabo del resto de los requisitos exigibles al edificio. Por esta razón el departamento técnico de Geohidrol ha realizado mediciones in situ para determinar el aislamiento acústico entre recintos de unidades de uso distintas 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 fuese 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:

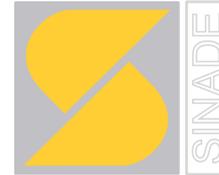
- Selección de los puntos de medida
- Medición “in-Situ”
- Análisis de los resultados

3.- LABORATORIO ACÚSTICO EMPLEADO

Para la realización de las mediciones, se trasladó el laboratorio que a continuación se detalla con todos los equipos perfectamente calibrados y certificados:

- Ordenador portatil TOSHIBA Tecra 740CDT
- Symphonie n°s. #00720 (01db)
- Software dBTRIG32, dTRAIT32 y dBATI
- Preamplificador tipo 26AK n° s. 15259 (G.R.A.S.)
- Micrófono 1/2", tipo 40AF n° s 12385 (G.R.A.S.)
- Preamplificador tipo 26AK n° s. 15258 (G.R.A.S.)
- Micrófono 1/2", tipo 40AF n° s. 21949 (G.R.A.S.)
- Verificador calibración, tipo 4230, n° s. 123511
- Fuente dodecaédrica DO 12 con trípode n° 2136
- Preamplificador de potencia UT - TMI
- Amplificador de potencia M-700
- Ecuilizador gráfico de 31 + 31 bandas EQ-9231 n° 990300973
- Emisor UHF ACT707T. n° 269022657
- Receptor UHF ACT707S, n° 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.

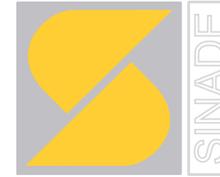
Para el cálculo del Tiempo de reverberación el rango de la caída ha sido superior a 20 dB y el extremo del rango ha sido superior en 10 dB al nivel de fondo. Se ha realizado con dos posiciones de la fuente, y cuatro posiciones de micrófono con dos lecturas en cada caso.

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

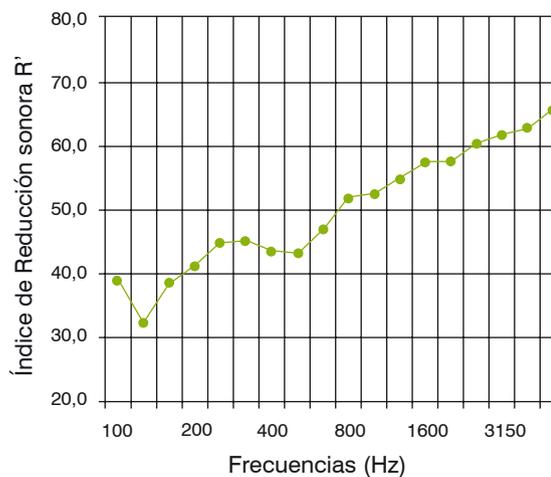
Muestra: Tarima flotante - Mortero de cemento - Lámina anti-impacto - Forjado de hormigón de nervios "in-situ", con bovedilla cerámica 25+5 - Yeso.

Situación: AÉREO FORJADO DE DORMITORIO 2ºB Y DORMITORIO 1ºB, PORTAL 1

Volumen sala receptora: 19 m³
Área de la muestra: 7 m²

Temperatura: 28°C
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.

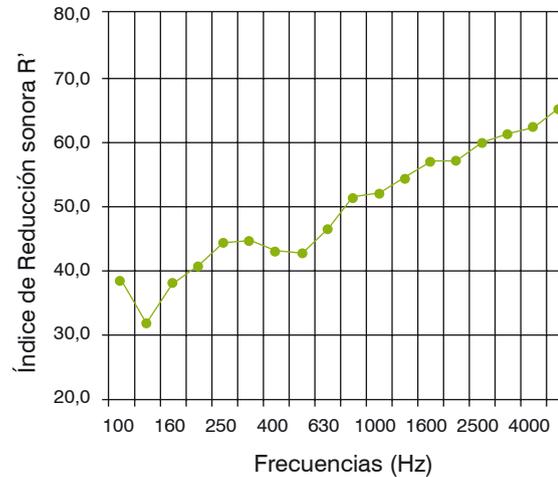
Situación: AÉREO FORJADO DE DORMITORIO 2ºB Y DORMITORIO 1ºB, PORTAL 1

Volumen sala receptora: 19 m³
Área de la muestra: 7 m²

Temperatura: 28°C
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 N° 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
M ^a José de Rozas	Susana Escudero

La titularidad técnica de la acreditación ENAC N°4/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 N°4/LE456 pertenecen al Área de Acústica del Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación del Gobierno Vasco.

EL PRESENTE INFORME CONSTA DE:

N° 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.

Informe de ensayo N° B0158 - IN - CT - F - 3

Pág. 1 de 13 (+1 Anexo)

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF



ETXEBIZITZA ETA GIZARTE GAITAKO 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
E N S A Y O S
N° 4 / L E 4 5 6



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.....	10
5.3.- Equipos.....	11
6.- PROCESO DE MEDIDA Y EVALUACIÓN.....	11
7.- RESULTADOS.....	12

ANEXO Resultados de ensayo



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 LBEIN (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 LBEIN 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.



AKUSTIKA ARLOA/ÁREA DE ACÚSTICA
Eraikuntzaren Klaitate Kontrolerako Laborategia
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación

labein
tecnalia



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 m²). 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/m²).

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/m²).

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.



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).

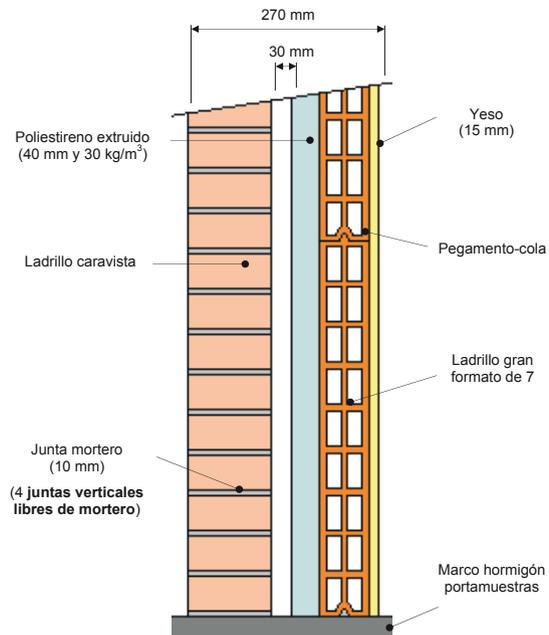


Figura 1: Esquema de muestra ensayada (B0158-09-M363)

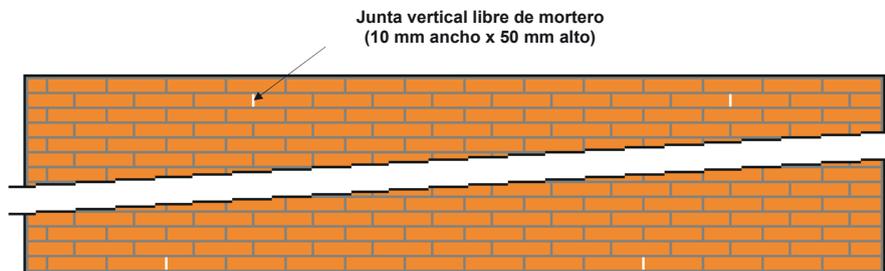


Figura 2: Ubicación de juntas libres de mortero



EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO

AKUSTIKA ARLOA/ÁREA DE ACÚSTICA
Eraikuntzaren Klaitate Kontrolerako Laborategia
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación

labein
tecnalia



EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO

AKUSTIKA ARLOA/ÁREA DE ACÚSTICA
Eraikuntzaren Klaitate Kontrolerako Laborategia
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación

labein
tecnalia

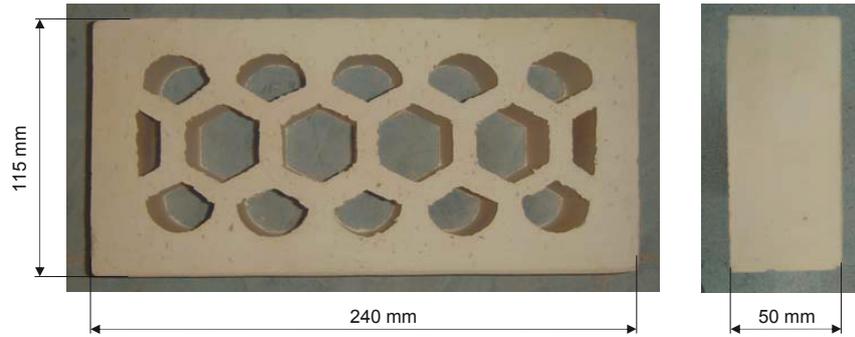


Figura 3: Dimensiones medidas de ladrillo caravista

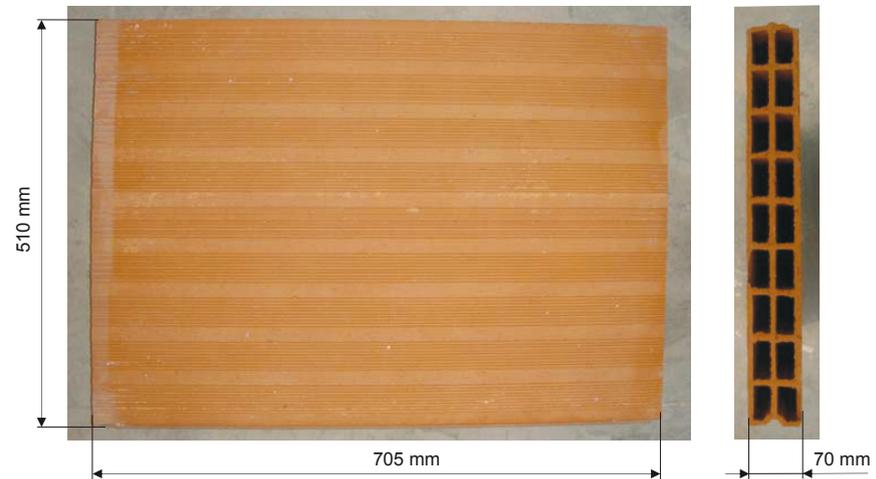


Figura 4: Dimensiones medidas de ladrillo gran formato



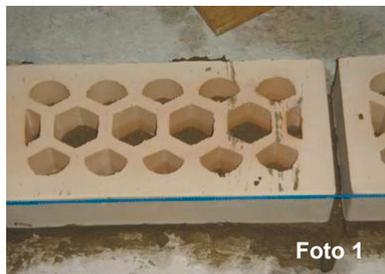


Foto 1



Foto 2



Foto 3

Fotos 1 - 3: Montaje de fábrica de ladrillo caravista con juntas verticales de ventilación



Foto 4

Penúltima hilera



Foto 5

Primera hilera

Fotos 4 y 5: Detalle de juntas verticales de ventilación libres de mortero



AKUSTIKA ARLOA/ÁREA DE ACÚSTICA
Eraikuntzaren Klaitate Kontrolerako Laborategia
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación

labein
tecnalia



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

Fotos 6 - 8: Montaje de poliestireno extruido

Informe de ensayo N° B0158 - IN - CT - F - 3

Pág. 8 de 13 (+1 Anexo)

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

Fachadas de ladrillo caravista





Foto 9



Foto 10

Fotos 9 y 10: Montaje de fábrica de ladrillo gran formato



Foto 11



Foto 12

Fotos 11 y 12: Vista de muestra en cámaras de ensayo



AKUSTIKA ARLOA/ÁREA DE ACÚSTICA
Eraikuntzaren Klaitate Kontrolerako Laborategia
Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación

labein
tecnalia



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.

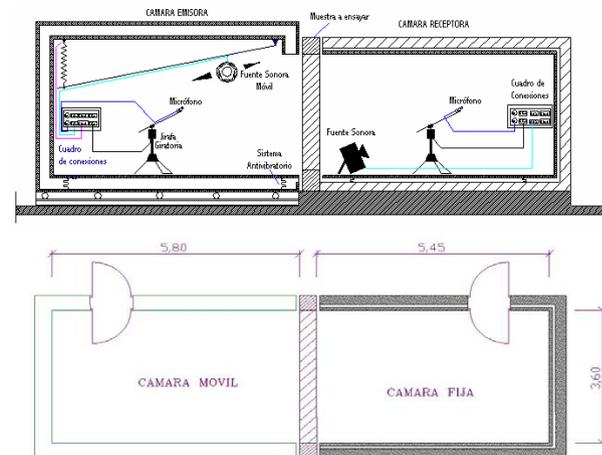


Figura 5: Cámaras de transmisión horizontal



5.3.- Equipos

	Sala Horizontal Emisora	Sala Horizontal Receptora
Micrófonos	Brüel & Kjær 4190; N° serie 2058386	Brüel & Kjær 4190; N° serie 2058385
Preamplificadores	Brüel & Kjær 2669; N° serie 2025847	Brüel & Kjær 2669; N° serie 2025851
Fuentes sonoras	Brüel & Kjær 4296; N° serie 2071420	CERWIN VEGA; N° 012446
Jirafas giratorias	Brüel & Kjær 3923; N° serie 2036586	Brüel & Kjær 3923; N° serie 2036591

	Sala de Control
Analizador	Brüel & Kjær 2144; N° serie 1893979
Amplificador	LAB Gruppen; LAB 300; N° serie 970-967
Ecualizador	Sony, SRP-E100; N° serie 400238
Calibrador	Brüel & Kjær 4231; N° serie 2061477
Medidor de condiciones atmosféricas	Testo 0560 4540; N° 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:

$$R=L_1-L_2+10*\text{Log } S/A \quad \text{donde,}$$

- L₁: Nivel de presión sonora promedio en la sala emisora.
 L₂: 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 L₁ y L₂, 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.



AKUSTIKA ARLOA/ÁREA DE ACÚSTICA
 Eraikuntzaren Klaitate Kontrolerako Laborategia
 Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación

labein
 tecnalia



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:

$$A=0.16 \cdot V/T \quad \text{donde,}$$

- 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 60° 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, 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**.

- El **índice ponderado de reducción sonora**, 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 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



**EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO**

**ETXEBIZITZA ETA GIZARTE
GAJETAKO 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/m²) 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/m²) revestida con 15 mm de yeso por su cara exterior, según se detalla en informe.

Volumen sala receptora: 55 m³

Volumen sala emisora: 65 m³

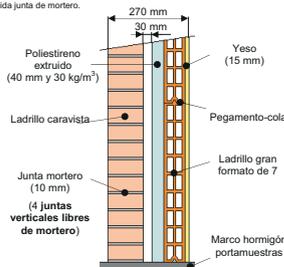
(*) Incluida junta de mortero.

Masa superficial estimada: 211 kg/m² (*)

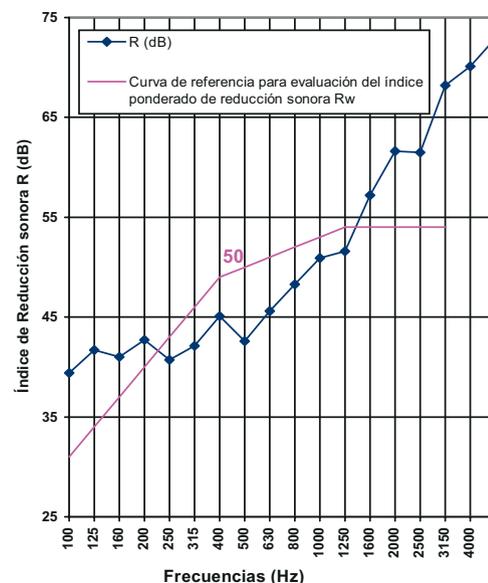
Área de la muestra: 10,08 m² (2,8x3,6 m)

Temperatura: 13,2 °C

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



Nº de resultado: B0158 – 09 – M363

Firma:

Area de Acústica
Gestionada por

Fecha informe: 26 de febrero de 2.008



Anexo al informe N° B0158 - IN - CT - F - 3

Pág. 1 de 1

Este documento es una copia de un informe original en formato PDF

Fachadas de ladrillo caravista



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 básico¹²⁹.

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 cons-

trucción 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 3×10^6 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 evacuación¹³⁰.
- **Caída de partículas inflamadas:** puede ser en forma de gotas o de material desprendido¹³¹.
- **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 elementos¹³³; 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

Esta 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.

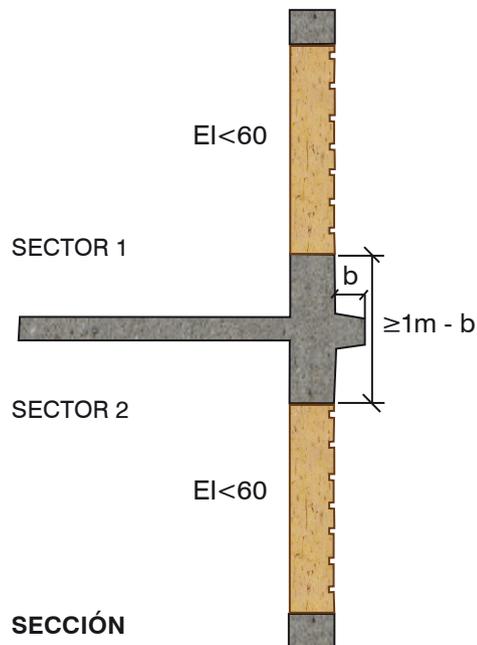
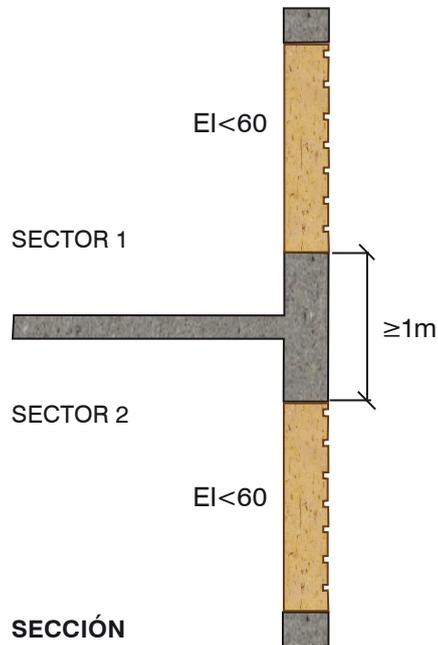
133 En este aspecto la utilización de material cerámico no suele requerir medidas adicionales por las excelentes propiedades de aislamiento que proporciona.

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 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 $\frac{1}{2}$ 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.