

# Consideraciones respecto al cálculo según el CTE de muros de fábrica sometidos a cargas laterales\*

## Remarks about calculation of masonry walls subjected to lateral loads according CTE



**Javier Estévez Cimadevila**

Dr. Arquitecto .Catedrático de Universidad



**Emilio Martín Gutiérrez**

Dr. Arquitecto. Profesor titular de Universidad



**Dolores Otero Chans**

Arquitecta. Universidad de A Coruña

Departamento de Tecnología de la Construcción  
Universidad de A Coruña

### RESUMEN

En el artículo se aborda el planteamiento propuesto por el Código Técnico de la Edificación respecto al análisis de sollicitaciones en muros de fábrica sometidos a cargas laterales, incidiendo en problemas de nomenclatura y formulación que pueden repercutir en errores significativos de dimensionado.

### SUMMARY

*The approach suggested by CTE (Technical Code of Building) for the stress analysis of masonry walls subjected to lateral loads is discussed in this report. It stress nomenclature and formulation problems that could have an effect on significant measurement errors.*

### 1. INTRODUCCIÓN

El Código Técnico de la Edificación (CTE) aborda los aspectos relativos a las estructuras de fábrica en el Documento Básico DB SE-F *Seguridad Estructural: Fábrica* [1].

En términos generales puede afirmarse que dicho DB recoge los procedimientos de cálculo correspondientes al Euro-

código 6. En lo que compete a este artículo, el CTE trata las acciones laterales en su artículo 5.4 “*Muros con acciones laterales locales*” y en el anejo G “*Coefficientes de flexión*”. Tanto dicho artículo como el anejo se corresponden, respectivamente, con el artículo 4.6 “*Muros de fábrica con acciones laterales*” de la parte 1-1 del EC6 [3] y con la parte 1.3 del citado Eurocódigo, en el que se abordan de forma específica las “*Reglas detalladas para acciones laterales*” [4].

Ambas normativas plantean dos posibles métodos para el cálculo de muros sometidos a acciones laterales: asumiendo un comportamiento del muro como arco estribado en dos bordes o como placa trabajando a flexión.

En relación con ambos procedimientos, los autores recogieron en un amplio artículo [2] un análisis pormenorizado de la problemática del cálculo de muros sometidos a cargas laterales, en el que se proponía un método alternativo para la determinación de los momentos flectores solicitantes.

Con posterioridad al artículo señalado se ha publicado el CTE donde, en lo relativo a esta cuestión de determinación de los momentos flectores de cálculo, desliza, desafortunadamente, ciertas ambigüedades en la terminología y notación empleada, así como un error en la formulación de las sollicitaciones, todo lo cual puede dar lugar a una incorrecta valoración de la magnitud de los esfuerzos considerados en el dimensionado. Dichas cuestiones son las que se pretenden clarificar con este artículo.

\* De acuerdo con la norma habitual de la revista, el hecho de que el Comité de Redacción de Hormigón y Acero acepte un artículo para su difusión en esta sección de Opinión y Debate, no implica necesariamente conformidad con las opiniones expresadas en el mismo.

## 2. DETERMINACIÓN DE LAS SOLICITACIONES DE FLEXIÓN

Con relación al análisis de solicitaciones en flexión, el CTE admite (5.4.2, apartado 2) la aplicación del método de las líneas de rotura de K. W. Johansen [5]. En el mismo, se asume para el material la hipótesis de un comportamiento rígido-plástico perfecto, de forma que en el estado de agotamiento de la placa, las deformaciones elásticas pueden despreciarse frente a las plásticas. Así, en situación límite, la pieza queda fraccionada en trozos planos mediante líneas de rotura rectas, y el conjunto se convierte en un mecanismo donde cada porción rota en torno a un eje dependiente de las condiciones de apoyo, forma y carga. De acuerdo con el teorema del límite inferior, la configuración correcta, de entre todas las posibles, será la compatible y en equilibrio con la carga de rotura menor. En consecuencia, y para una placa rectangular, es posible formular el momento que agota simultáneamente todas las secciones en rotura mediante el producto de un coeficiente por el valor de cálculo de la acción distribuida y el cuadrado de una de las dimensiones:

$$M_d = \alpha \cdot q_d \cdot L^2 \quad (\text{ec. 1})$$

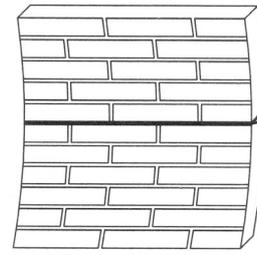
No obstante, en el caso de los paramentos de fábrica debe considerarse la diferente resistencia a flexión que ostentan en las direcciones horizontal y vertical, derivadas de la configuración de llagas y tendeles y de la posible concomitancia de compresiones debidas fundamentalmente a la acción gravitatoria. En consecuencia, y para contemplar este comportamiento ortotrópico, se puede recurrir al análisis de solicitaciones mediante el denominado método de la afinidad. Dicho procedimiento analiza una placa transformada, en la que se ha manipulado una de las dimensiones del alzado (por ejemplo la altura  $h$ ), pero que en concordancia con dicha alteración respondería a un carácter isotrópico. Esta modificación se considera mediante un coeficiente de rateo  $\mu$  dado por:

$$\mu = \frac{f_{xk1}}{f_{xk2}} \quad (\text{ec. 2})$$

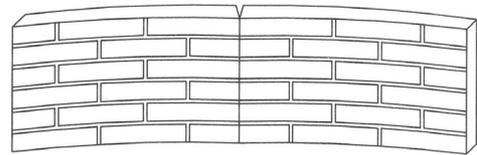
donde  $f_{xk1}$  representa la resistencia característica a flexión vertical (cuando el plano de rotura es paralelo a los tendeles) y  $f_{xk2}$  la relativa a flexión horizontal (fisuración sensiblemente vertical, ya sea afectando a llagas y bloques o bien según un trazado quebrado que atiende a llagas y parte de los tendeles).

El artículo 4.6.4 del CTE define correctamente ambos modos de flexión aportando, para evitar cualquier duda interpretativa, la figura explicativa 4.1 (ver Figura 1). Idéntico criterio y nomenclatura emplea el EC6 en su artículo 3.6.4 y en la Figura 3.1.

De acuerdo con el anterior planteamiento, los momentos flectores en las direcciones principales de la placa se expresan en base a una misma dimensión, pero el relativo a la orientación transformada debe verse afectado por el coeficiente de rateo  $\mu$  antes definido; y es precisamente en estas cuestiones donde el CTE presenta una notable confusión tanto en la notación empleada como en la formulación de las solicitaciones.



a) Plano de rotura paralelo a los tendeles



b) Plano de rotura perpendicular a los tendeles

Figura 1. Modos de flexión según CTE (artículo 4.6.4).

En efecto, la redacción del artículo 5.4.2 resulta contradictoria con respecto a la nomenclatura previa, al definir  $M_{Rd1}$  como la capacidad resistente en dirección paralela a los tendeles (lo cual supondría flexión en torno a un eje vertical), en contraposición a la forma de trabajo descrita a tenor de la resistencia característica  $f_{xk1}$ . Idénticas consideraciones pueden efectuarse con relación al valor en la dirección opuesta ( $M_{Rd2}$ ).

Evidentemente, el empleo de los subíndices 1 y 2 debería estar relacionado con los empleados en la definición de las resistencias características a flexión ( $f_{xk1}$  y  $f_{xk2}$ ), por lo que  $M_{Rd1}$  debería referirse a la capacidad resistente en dirección perpendicular a los tendeles, o flexión vertical que genera un plano de rotura horizontal paralelo a los tendeles. Lógicamente,  $M_{Rd2}$  representaría la capacidad resistente en dirección paralela a los tendeles, o flexión horizontal con plano de rotura vertical perpendicular a los tendeles. Dicho criterio sí se aplica correctamente, en cambio, en el punto 3 del artículo 5.4.3, cuando se refiere a  $M_{Rd1}$  como el momento resistente correspondiente a una viga vertical. Por tanto, la definición de los términos empleada en el CTE no es coherente en todo su articulado, lo que puede dar lugar a un error de interpretación con consecuencias en la cuantificación de la capacidad resistente de la fábrica.

Dicha confusión se traslada también a la determinación de los valores de los momentos máximos en un paño rectangular sometido a carga uniforme. El CTE aporta las siguientes fórmulas:

$$M_{Sdx1} = \alpha \cdot q_d \cdot h^2 \quad (\text{ec. 3})$$

$$M_{Sdx2} = \mu \cdot \alpha \cdot q_d \cdot L^2 \quad (\text{ec. 4})$$

donde  $\alpha$  representa el coeficiente de flexión que puede obtenerse en las tablas del Anejo G del CTE (Figura 2).

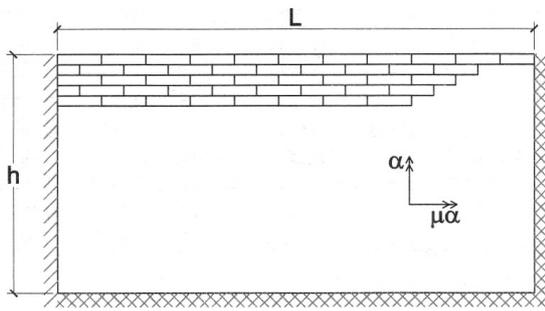


Figura 2. Parámetros en la determinación de coeficientes de flexión.

De nuevo nos encontramos con una duda interpretativa respecto al verdadero significado de los subíndices. Es obvio que, para mantener la coherencia de notación precisa,  $M_{Sdx1}$  debería referirse al momento de flexión vertical con plano de rotura horizontal paralelo a los tendeles y, análogamente,  $M_{Sdx2}$  representaría el momento de flexión horizontal con plano de rotura vertical. Rectificando en consecuencia la asignación de subíndices:

$$M_{Sdx1} = \mu \cdot \alpha \cdot q_d \cdot L^2 \tag{ec. 5}$$

$$M_{Sdx2} = \alpha \cdot q_d \cdot h^2 \tag{ec. 6}$$

Pero en todo caso, además de lo anterior, las expresiones son claramente incorrectas y ello porque la luz empleada para el cálculo de los momentos tendría que ser, en ambos casos, la misma (L). Ello es así puesto que si se aplica el método de las líneas de rotura de Johansen, el momento flector tiene que ser constante a lo largo de las líneas de rotura en las que se alcanza la plastificación, en el supuesto de que la capacidad resistente sea igual en ambas direcciones (isotropía). Si la placa es ortótropa, tal y como se ha definido anteriormente, los momentos en ambas direcciones tienen que guardar la relación  $\mu$  ya definida (método de la afinidad para placas ortótropas).

En conclusión y a los efectos de clarificar el articulado, los momentos máximos solicitantes en el caso de paños rectangulares sometidos a carga uniforme deberían determinarse aplicando las ecuaciones 7 (Figura 3) y 8 (Figura 4):

$$M_{Sdx1} = \mu \cdot \alpha \cdot q_d \cdot L^2 \tag{ec.7}$$

$$M_{Sdx2} = \alpha \cdot q_d \cdot L^2 \tag{ec.8}$$

La aplicación entonces de las expresiones del CTE, tal y como allí se recogen, conducen a un significativo error que, en los casos habituales con relaciones de lados h/L inferiores a la unidad, puede llevar a un dimensionado inseguro con una sustancial infravaloración de los momentos actuantes. A efectos de evidenciar tales discrepancias, cabe representar la inci-

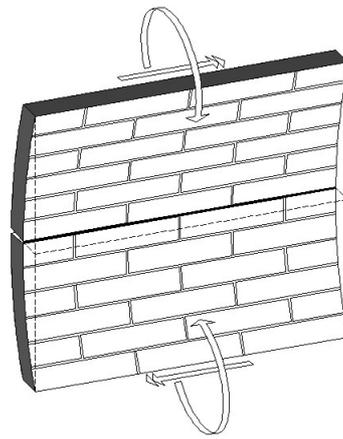


Figura 3. Momento en dirección de los tendeles (plano de rotura perpendicular a los tendeles)

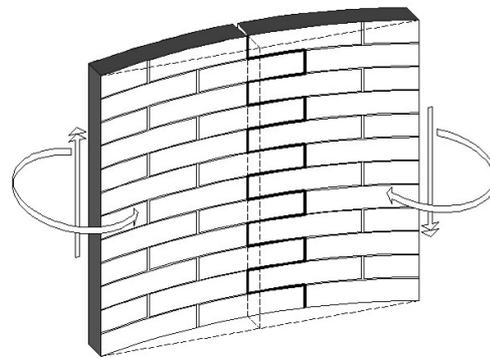


Figura 4. Momento en dirección perpendicular a los tendeles (plano de rotura paralelo a los tendeles).

dencia que en las expresiones 6 y 8 tiene la esbeltez del paño de fábrica ( $\lambda$ ), entendida ésta como el cociente entre sus dimensiones h y L. Para ello se determina un nuevo factor  $\Phi$  que, multiplicado por la acción distribuida ( $q_d$ ) y el cuadrado de la dimensión horizontal de la fábrica (L), conduciría al momento originado en dirección perpendicular a los tendeles.

Desarrollando la expresión 6:

$$M_{Sdx2} = \alpha \cdot q_d \cdot \frac{h^2}{L^2} \cdot L^2 = \alpha \cdot q_d \cdot \lambda^2 \cdot L^2 = (\alpha \cdot \lambda^2) \cdot (q_d \cdot L^2)$$

$$\Phi_{CTE} = \alpha \cdot \lambda^2 \rightarrow M_{Sdx2} = \Phi_{CTE} \cdot q_d \cdot L^2$$

Operando igualmente sobre la número 8:

$$M_{Sdx2} = \alpha \cdot q_d \cdot L^2 = \alpha \cdot (q_d \cdot L^2)$$

$$\Phi_{PLAST} = \alpha \rightarrow M_{Sdx2} = \Phi_{PLAST} \cdot q_d \cdot L^2$$

Los resultados se muestran en la Figura 5, para coeficientes  $\mu$  comprendidos entre 0,1 y 1,0. Asimismo, la Figura 6 demuestra que para valores de esbeltez inferiores a la unidad (situación muy habitual en la práctica edificatoria), el

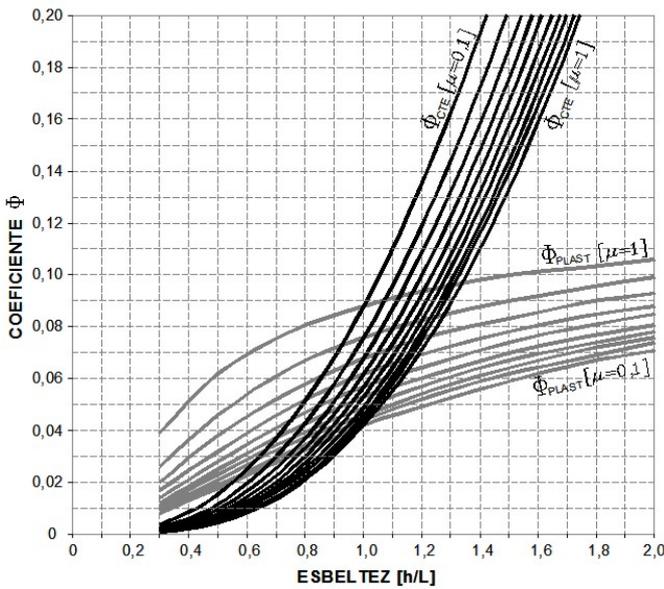


Figura 5. Curvas correspondientes a los coeficientes para el cálculo del momento horizontal (plano de rotura perpendicular a los tendeles). En negro las correspondientes al CTE y en gris las correspondientes a la correcta aplicación del método plástico.

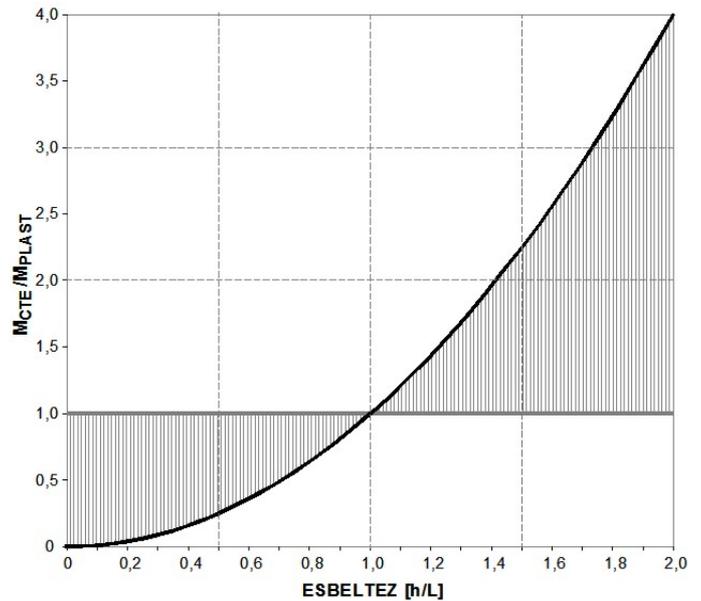


Figura 6. Relación entre el momento correspondiente a la formulación propuesta por el CTE y el obtenido de acuerdo con el cálculo plástico por el método de las líneas de rotura.

momento obtenido conforme a la formulación del CTE se situaría claramente del lado de la inseguridad.

Con independencia de lo anterior, cabe recordar que se permite la utilización de cualquier otro procedimiento de análisis elástico de esfuerzos, como alternativa al método plástico perfilado. En este sentido, puede ser de utilidad el empleo de las expresiones simplificadas propuestas por los autores [2].

### 3. COMPROBACIÓN DE LA CAPACIDAD RESISTENTE

El artículo 5.4.3 del CTE establece los procedimientos para la comprobación de la capacidad resistente aplicando el método de los estados límites. De acuerdo con ello, se tiene que verificar que el momento de cálculo aplicado  $M_{sd}$  es menor o igual que el momento resistente  $M_{Rd}$ .

$$M_{sd} \leq M_{Rd} \tag{ec.9}$$

En relación con la determinación de los momentos de cálculo, el apartado anterior ha puesto de manifiesto las incoherencias de notación y los errores en las expresiones. Centrándonos ahora en lo que compete al momento resistente, el articulado del CTE establece dos procedimientos para su obtención: como pieza en flexión, en la que distingue la existencia o no de compresiones, y con el modelo de respuesta como arco estribado entre dos bordes.

Utilizando en primer lugar el criterio de flexión, en el caso de que no existan compresiones en la fábrica, el CTE recoge la conocida expresión:

$$M_{Rd} = f_{xd} \cdot Z \tag{ec.10}$$

siendo  $f_{xd}$  el valor de cálculo de la resistencia a flexión de la fábrica, obtenida según Tabla 1 (designada como 4.6 en el DB), y Z el módulo resistente elástico a flexión de la sección bruta.

El problema se plantea con la determinación del valor de  $f_{xd}$  a partir de los valores característicos contenidos en la Tabla 1 (designada como 4.6 en el DB). Dicha tabla es una novedad respecto a los contenidos del Eurocódigo, pues esta normativa en su artículo 3.6.4 no aporta ningún valor resistente, y únicamente señala que la resistencia característica a flexión de una fábrica se determinará mediante ensayos. Es de agradecer que el CTE haya hecho el esfuerzo de cuantificar la resistencia a flexión, en lugar de remitir su determinación a la realización de ensayos; sin embargo, los valores recogidos en la citada tabla son de tan reducida magnitud que conducen a su total inutilidad como procedimiento de comprobación. Su aplicación a un ejemplo simple es suficientemente clarificadora.

En el caso habitual de morteros ordinarios con una resistencia superior a 5 N/mm<sup>2</sup> como situación más favorable, se observa que, independientemente del tipo de pieza empleado, los valores característicos a flexión que aporta la Tabla 1 son:

$$f_{xk1} = 0,10 \text{ N/mm}^2 \text{ y } f_{xk2} = 0,40 \text{ N/mm}^2$$

Los valores de cálculo se obtienen dividiendo los valores característicos anteriores por el coeficiente parcial de seguridad recogido en la Tabla 2 (designada como 4.8 en el DB).

Considerando el caso más favorable posible, piezas de categoría I en el control de fabricación y categorías de ejecución A o B, se obtienen unos coeficientes parciales de seguridad, respectivamente, de valor 1,70 y 2,20 (pueden consultarse los criterios de clasificación por categorías de fabricación y ejecución en el capítulo 8 del DB).

**Tabla 1. Resistencia a flexión de la fábrica (N/mm<sup>2</sup>)**

Tipo de pieza	Morteros ordinarios			
	$f_m < 5 \text{ N/mm}^2$		$f_m \geq 5 \text{ N/mm}^2$	
	$f_{xk1}$	$f_{xk2}$	$f_{xk1}$	$f_{xk2}$
Cerámica	0,10	0,20	0,10	0,40
Silíceo-calcáreos	0,05	0,20	0,10	0,40
Hormigón ordinario	0,05	0,20	0,10	0,40
Hormigón celular de autoclave	0,05	0,40	0,10	0,40
Piedra artificial	0,05	0,40	0,10	0,40
Piedra natural	0,05	0,40	0,10	0,40

**Tabla 2. Coeficientes parciales de seguridad ( $\gamma_M$ )**

Situaciones persistentes y transitorias		Categoría de la ejecución		
		A	B	C
Resistencia de la fábrica	Categoría del control I	1,7	2,2	2,7
	Categoría del control II	2,0	2,5	3,0

Se ha procedido al análisis de un paño rectangular de fábrica simplemente apoyado en todo su perímetro y sometido exclusivamente a la acción del viento. Dicha acción se ha determinado mediante la aplicación del artículo 3.3.2 del DB SE-AE *Seguridad Estructural. Acciones en la edificación*. De acuerdo con ello se ha considerado una presión estática de valor 0,80 kN/m<sup>2</sup>, válida para edificios urbanos de hasta 8 plantas situados en cualquier punto del territorio español.

En la Figura 7 se ha representado la variación del coeficiente parcial de seguridad para las acciones en el caso de un cerramiento de 12 cm de espesor y una altura libre estándar de 2,70 m. Dicho coeficiente de seguridad se ha obtenido como el cociente entre  $M_{Rd}$  y  $M_{Sd}$  calculados para diferentes relaciones de lados h/L.

Hay que tener presente que, de acuerdo con el artículo 1.2, el documento básico *“establece condiciones tanto para elementos de fábrica sustentante, la que forma parte de la estructura general del edificio, como para elementos de fábrica sustentada, destinada sólo a soportar las acciones directamente aplicadas sobre ella, y que debe transmitir a la estructura general.”*

Los resultados obtenidos son elocuentes. El coeficiente de seguridad debería ser en todos los casos superior a 1,50, que es el establecido por la tabla 4.1 del DB SE *Seguridad Estructural. Bases de cálculo*. Sin embargo, dicho coeficiente no se alcanza en un importantísimo rango de esbelteces, que se corresponden, además, con los casos habituales en la práctica. Es decir, paños de cerramiento de 2,70 m de altura construidos con fábrica de ladrillo perforado o piezas de piedra de 12 cm de espesor incumplen la comprobación resistente, salvo que haya tabiques transversales de arriostramiento del paño a

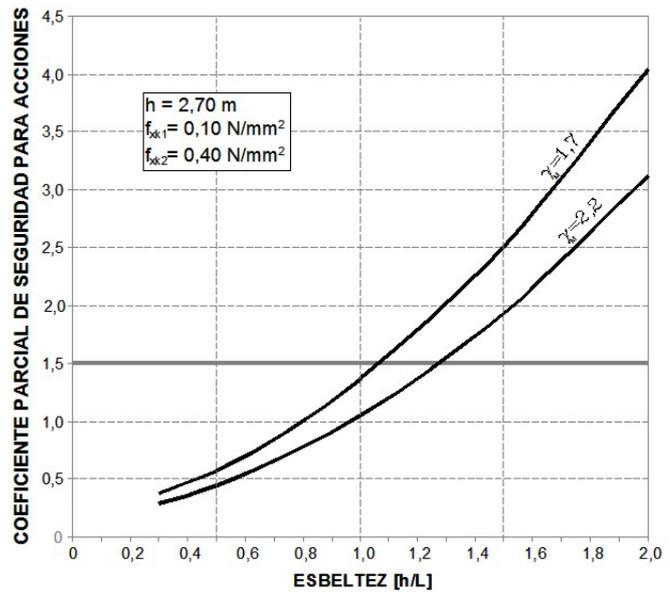


Figura 7. Valoración de la seguridad en el supuesto práctico.

una distancia inferior a ¡2,10 m!. Es decir, prácticamente todos los cerramientos de edificios urbanos construidos o que se están construyendo, no cumplen la condición de estado límite último bajo acciones laterales, cuando utilizamos como criterio resistente el mecanismo de flexión, lo que es tanto como decir que dicho procedimiento, en los términos actuales, no resulta operativo.

A la vista de lo expuesto está claro que la inconsistencia del método deriva de unas resistencias a flexotracción de muy baja magnitud. Tal y como se ha señalado, el Eurocódigo no cuantifica dicha resistencia, recomendando la realización de ensayos para su obtención. Por su parte, la anterior normativa NBE FL-90 *Muros resistentes de fábrica de ladrillo*, si bien no abordaba en profundidad el problema de la flexión, si admitía un valor resistente de  $0,1 \cdot f_d$ , significativamente superior al contemplado en el CTE.

El camino adecuado para soslayar toda la problemática que puede generar en los proyectos y obras la aplicación del criterio de cálculo en flexión, es recurrir a la respuesta del muro como arco estribado entre dos bordes. En tal caso, la capacidad resistente admitida por el CTE en su artículo 5.4.3, coincidente con la contemplada en el artículo 4.2.2 del Eurocódigo, es muy superior a la contemplada para el mecanismo de flexión, y claramente suficiente para satisfacer la condición de dimensionado en estado límite último de los casos habituales. A los efectos de tener un orden de magnitud respecto a la importantísima diferencia que el CTE establece entre ambos mecanismos resistentes, se ha aplicado la consideración de respuesta como arco al cerramiento del ejemplo, considerando una  $f_d = 6,0 \text{ N/mm}^2$  (según tabla 4.4 del DB). Pues bien, considerando arcos verticales estribados a los forjados el momento resistente  $M_{Rd1}$  es 24,3 veces superior al que obtendríamos con la consideración de la resistencia como pieza a flexión. Por su parte, si consideramos arcos horizontales estribados en muros transversales de arriostramiento, el momento resistente  $M_{Rd2}$  es 4,39 veces superior al obtenido en el cálculo a flexión.

A la vista de lo anterior está claro que el único procedimiento al que cabe recurrir es el basado en el comportamiento como arco, desechando como inútil el criterio de flexión del CTE. Ahora bien, esto plantea también otra serie de cuestiones. El propio Eurocódigo recoge en una nota al punto (2) del artículo 4.1.5 que “*con el conocimiento actual, los muros con acciones laterales básicamente se calcularán sólo con arco horizontal,...*”. Este criterio no lo recoge el CTE, que permite considerar tanto arcos horizontales como verticales. Sin embargo, sí contempla, en cambio, otra cautela también incluida en el Eurocódigo; se trata de poner de manifiesto que la comprobación como arco no es fiable para fábricas que tengan retracción en su dirección. En resumen, con los sistemas constructivos usuales nos encontraremos, con bastante frecuencia, en situaciones en las que no es aplicable el comportamiento como arco, tales como la presencia de huecos que desconectan el muro del forjado superior, barreras antihumedad, muros sin continuidad en uno de sus extremos, etc. En tales circunstancias, la alternativa para la comprobación resistente es la aplicación del criterio de pieza a flexión que, con las resistencias proporcionadas por el CTE, irremediablemente conduce al incumplimiento de la condición de estado límite último.

#### 4. CONCLUSIONES

Debe procederse a una revisión inmediata de los artículos 4.6.4 y 5.4.2 que subsanen las deficiencias de notación, los

errores en la formulación de las solicitudes de flexión y una reconsideración de los valores de capacidad resistente a flexión de las fábricas. En caso contrario, la aplicación de la normativa en sus actuales términos constituirá una frecuente fuente de conflictos entre los proyectistas y las OCT, respecto a la validez o no de las soluciones ejecutadas con fábrica.

#### 5. REFERENCIAS

[1] *Código Técnico de la Edificación. DB SE-F Seguridad Estructural: Fábrica*

[2] Estévez, Javier – Otero, Dolores. *Cálculo de muros de fábrica sometidos a cargas laterales de viento*. Hormigón y acero nº 240. Segundo trimestre de 2006.

[3] *Eurocódigo 6. Proyecto de estructuras de fábrica. Parte 1-1: Reglas generales para edificios. Reglas detalladas para acciones laterales*. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid, 2000.

[4] *Eurocódigo 6. Proyecto de estructuras de fábrica. Parte 1-3: Reglas generales para edificios. Reglas detalladas para acciones laterales*. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid, 2000.

[5] Johansen, K.W. *Yield-line formulae for slabs*. Cement and Concrete Association. London, 1972.

# HAC 2008

## 1<sup>er</sup> Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante

El “1<sup>er</sup> Congreso Español Sobre Hormigón Autocompactante- HAC 2008”, organizado por las Universidades Politécnicas de Cataluña, Madrid y Valencia, tendrá lugar los días 18 y 19 de febrero de 2008 en Valencia, España.

HAC 2008 tiene el objetivo de abordar los recientes avances tecnológicos y científicos en el área del hormigón autocompactante, de cara a extender el conocimiento y promocionar el buen uso del material

Los trabajos a presentar pueden centrarse en los siguientes campos temáticos:

- Materiales y productos componentes
- Durabilidad
- Diseño de mezclas
- Realizaciones
- Propiedades y caracterización en estado fresco
- Normativa
- Propiedades mecánicas y caracterización
- Aspectos medioambientales
- Producción, control de calidad y puesta en obra
- Hormigón autocompactante arquitectónico
- Prestaciones estructurales
- Hormigones autocompactantes especiales
- Propiedades ingenieriles

Los autores deberán enviar el resumen del trabajo en español, inglés o portugués, antes del 15 de abril de 2007, rellenando el formulario disponible en la página web del congreso: [www.hac2008.es](http://www.hac2008.es), donde podrán encontrar toda la información y seguir los aspectos organizativos del Congreso.