

# Cálculo de muros de fábrica sometidos a cargas laterales de viento

## *Calculation of masonry walls subjected to lateral wind loads*



**Javier Estévez Cimadevila**

Dr. Arquitecto

Catedrático de Universidad del Departamento de Tecnología de la Construcción Universidad de A Coruña



**Dolores Otero Chans**

Arquitecta

Profesora Asociada de Universidad del Departamento de Tecnología de la Construcción Universidad de A Coruña

### RESUMEN

A pesar de la importancia del problema, el cálculo de muros de fábrica sometidos a cargas laterales de viento no ha sido suficientemente abordado dentro del campo de la literatura técnica, lo que se ha traducido en una cuestión que las normativas hábilmente han soslayado hasta la aparición del Eurocódigo EC6, parte 1-3. El presente artículo clarifica los criterios del EC6, analizando desde un punto de vista comparativo los métodos de cálculo disponibles. Al mismo tiempo, se propone un análisis alternativo para la determinación de esfuerzos en la fábrica, criterio que aúna una significativa sencillez con una razonable precisión, acorde al nivel de conocimientos actualmente disponible sobre el comportamiento de las estructuras de fábrica.

### SUMMARY

*Even though the importance of the problem, the calculation of masonry walls subjected to lateral wind loads, has not been sufficiently discussed within the technical Literature. This subject has been avoided by all the codes until the appearance of Eurocode EC6, part 1-3. This report clarifies the criteria of available calculation methods. Furthermore, an alternative analysis for the determination of masonry stresses is discussed. This criterion combines both significant simplicity and reasonable precision, agreed at the level of knowledge available at the moment on the behavior of the masonry structures.*

### 1. INTRODUCCIÓN

El cálculo de muros de fábrica sometidos a acciones laterales de viento constituye un problema de notable complejidad. El escaso conocimiento existente respecto al comportamiento resistente de las obras de fábrica desaconseja el empleo de modelos sofisticados de cálculo que enmascaran, bajo una aparente precisión numérica, la debilidad de sus fundamentos. Las dificultades de cálculo inherentes al carácter ortotrópico de sus propiedades mecánicas y la heterogeneidad de resultados derivados de la notable incidencia que tiene todo el proceso constructivo, hacen deseable abordar la comprobación resistente bajo métodos aproximados que proporcionen una simplicidad en el procedimiento acorde con el nivel de conocimientos disponible.

Prescindiendo de la consideración del método de los elementos finitos, cuya principal dificultad se centra en el conocimiento fiable de las constantes elásticas de la fábrica necesarias para su aplicación, disponemos básicamente de dos modelos de cálculo para la determinación de esfuerzos en un muro sometido a cargas laterales:

- Funcionamiento del muro como arco rebajado.
- Funcionamiento del muro como placa.

En relación con el primero de los procedimientos, el conocimiento del mecanismo resistente como arco rebajado estriado entre sus apoyos es todavía insuficiente y, a pesar de la existencia de interesantes estudios [ref.4], su aplicación plan-

tea numerosas dudas. En este sentido, no disponemos de ningún criterio para, atendiendo al carácter ortotrópico del muro y a las luces entre apoyos, determinar si deben considerarse sólo arcos verticales, o sólo horizontales o ambos simultáneamente. Por otra parte, la recomendación del Eurocódigo EC6 de considerar en el modelo exclusivamente arcos horizontales puede conducir a valores muy alejados de la realidad cuando los muros traveseros que actúan como apoyos se encuentran suficientemente distantes entre sí. Pero además de las incertidumbres anteriores, la posible presencia de retracción en la fábrica puede generar modificaciones en la geometría que, a pesar de su pequeña magnitud, alteran significativamente los resultados del modelo.

A la vista de las dificultades expresadas y atendiendo al estado actual de conocimientos, el cálculo de muros bajo acciones laterales debe abordarse admitiendo un funcionamiento como placa sustentada en sus bordes. Obviamente, dicho modelo debe tener presente la diferencia de propiedades de la fábrica en las dos direcciones ortogonales. A pesar de que se trata de un método de análisis claramente más contrastado que el anterior, siguen presentes incertidumbres que frecuentemente el técnico tiene que solventar atendiendo a su buen criterio. Una de las más habituales se refiere a las condiciones de sustentación y continuidad de la placa en los apoyos. En este sentido, deben tenerse presentes algunas recomendaciones de carácter fundamentalmente cualitativo y de difícil concreción práctica:

- Solamente debemos considerar apoyos en aquellos bordes que sean capaces de proporcionar la reacción correspondiente necesaria por equilibrio. Ello puede llevarnos a prescindir de la consideración de apoyo en los bordes superiores de muro no retacados eficazmente contra los forjados. Asimismo, es posible que la presencia de barras antihumedad reste eficacia al apoyo del muro y, por tanto, puede ser aconsejable prescindir de su colaboración resistente.
- La continuidad estructural del muro sobre los apoyos debe establecerse atendiendo a las soluciones constructivas proyectadas. En general, los muros eficazmente trabados a muros traveseros pueden suponerse continuos a los efectos de flexión horizontal. Por el contrario, la continuidad desde el punto de vista de la flexión vertical depende claramente de la solución adoptada para el enlace del forjado con el muro. Las soluciones más habituales, con entregas del forjado del orden de los 2/3 del espesor del muro y recubrimientos aislantes en el frente del forjado, aconsejan prescindir en tales casos de la continuidad estructural, considerando entonces el muro como simplemente apoyado en el forjado.

## 2. DETERMINACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES RESISTENTES

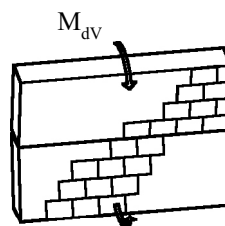
El tratamiento de las acciones laterales sobre muros de fábrica lo aborda el EC6 en su art. 4.6 de la parte 1-1 "Reglas generales para edificios. Reglas para fábrica y fábrica armada" [UNE-ENV 1996-1-1] [ref.1] y, de forma más detallada,

en la parte 1-3 "Reglas generales para edificios. Reglas detalladas para acciones laterales" [UNE-ENV 1996-1-3] [ref.2].

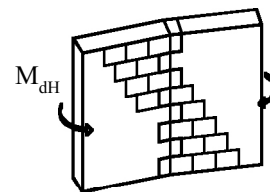
La condición de dimensionado en estado límite último se establece como:

$$M_d \leq M_{Rd} \quad (\text{ec. 1})$$

Dado el carácter ortotrópico de las fábricas, la diferencia existente tanto a nivel de esfuerzos como de capacidades resistentes respecto a los dos planos de flexión nos llevan a escribir la condición de dimensionado como:



$$M_{dv} \leq M_{RdV} \quad (\text{ec. 2})$$



$$M_{dH} \leq M_{RdH} \quad (\text{ec. 3})$$

A los efectos de determinar el momento flector resistente de cálculo  $M_{Rd}$  tenemos que distinguir entre fábricas sin armar y fábricas con armadura dispuesta en los tendeles.

En el primero de los casos, fábricas sin armar, el momento flector  $M_{Rd}$  se obtiene con:

$$M_{Rd} = \frac{f_{xk} Z}{\gamma_M} \quad (\text{ec. 4})$$

Lógicamente, la resistencia característica a flexión depende del plano de flexión considerado. El EC6 establece que su magnitud se determine experimentalmente. Sin embargo, ante la habitual ausencia de dichos resultados experimentales pueden adoptarse los valores siguientes, de acuerdo con lo establecido en la Propuesta del Documento Nacional de Aplicación del EC6 (DNA ENV 1996-1-1:1995):

$$f_{xk1,aparente} = f_{xk1} + \gamma_M \sigma_{dp} \approx f_{vk0} + \gamma_M \sigma_{dp} \quad (\text{ec. 5})$$

$$f_{xk2} = 0,1 f_k \quad (\text{ec. 6})$$

En las estructuras de fábrica es usual la presencia de una significativa desigualdad en las resistencias a flexión respecto a los dos planos de flexión, desigualdad especialmente acusada en las fábricas pétreas y en las armadas. La presencia de carga vertical incrementa de forma sensible la resistencia característica a flexión  $f_{xk1}$ , cuando el plano de rotura es paralelo a los tendeles. Es por ello importante la consideración de dicha carga vertical en la determinación de la resistencia a flexión, adoptando el valor de  $f_{xk1,aparente}$  en lugar de  $f_{xk1}$ , pues de esta manera se modifica el ratio de ortotropía de la placa y, por tanto, la distribución de momentos flectores en la misma.

En consecuencia, podemos expresar el momento flector resistente de cálculo en cada dirección de flexión como:

$$M_{RdV} = \frac{(f_{vk0} + \gamma_M \sigma_{dp}) Z}{\gamma_M} \quad (\text{ec. 7})$$

$$M_{RdH} = \frac{0,1 f_k Z}{\gamma_M} \quad (\text{ec. 8})$$

En el caso de fábricas con tendeles armados, el momento flector resistente de cálculo  $M_{RdV}$  obviamente no varía. Por el contrario, la presencia de armadura modifica el momento  $M_{RdH}$  que se obtiene con:

$$M_{RdH} = \frac{A_s f_{yk} z}{\gamma_S} \quad (\text{ec. 9})$$

$$z = d \left[ 1 - 0,5 \cdot \frac{A_s f_{yk} \gamma_M}{b d f_k \gamma_S} \right] \leq 0,95d \quad (\text{ec. 10})$$

### 3. DETERMINACIÓN DE LOS MOMENTOS FLECTORES APLICADOS

Las expresiones anteriores nos permiten determinar el momento flector resistente de cálculo correspondiente a los dos planos de flexión, tanto para fábricas sin armar como armadas. Ahora bien, la principal dificultad en la comprobación de la condición de dimensionado en estado límite último se nos presenta en la estimación de los momentos  $M_{dV}$  y  $M_{dH}$ . Cuando se trata de muros apoyados en dos bordes antagónicos, bien sean éstos los forjados o los muros traveseros, el problema no reviste complejidad, y los esfuerzos se determinan a partir del cálculo por asimilación a viga. En el caso de tratarse de un tramo aislado, los momentos serán:

$$M_{dV} = \gamma_F \frac{W_k H^2}{8} \quad (\text{ec. 11})$$

$$M_{dH} = \gamma_F \frac{W_k L^2}{8} \quad (\text{ec. 12})$$

Evidentemente, las expresiones anteriores son únicamente válidas para tramos de muros sin continuidad en los apoyos. En el caso de muros en los que sea factible la consideración de continuidad, podrán obtenerse los esfuerzos mediante cálculo elástico de la viga de asimilación correspondiente. Es importante señalar que en el Documento Nacional de Aplicación (DNA) del EC6 se establece que para muros apoyados únicamente en forjados debería calcularse el muro como arco entre apoyos, en lugar de cómo viga. En nuestra opinión, y dadas las actuales incertidumbres existentes respecto a dicho método, consideramos más adecuado el criterio de asimilación a viga.

Las dificultades para la determinación de esfuerzos surgen cuando se plantea el caso de muros sustentados en 3 ó 4 bordes. En este caso, y para tener en cuenta la incidencia que tiene en la distribución de esfuerzos de la placa el carácter ortotrópico de la fábrica, se define un coeficiente  $\mu$ , que representa el rateo ortogonal de las resistencias características a flexión de la fábrica respecto a las dos direcciones definidas anteriormente.

$$\mu = \frac{f_{xk1,aparente}}{f_{xk2}} = \frac{f_{vk0} + \gamma_M \sigma_{dp}}{0,1 f_k} \quad (\text{ec. 13})$$

Conocido el coeficiente de rateo  $\mu$ , los momentos flectores de cálculo en cada dirección pueden obtenerse con:

$$M_{dV} = \mu M_{dH} \quad (\text{ec. 14})$$

$$M_{dH} = \alpha \gamma_F W_k L^2 \quad (\text{ec. 15})$$

El coeficiente de flexión  $\alpha$  depende del rateo ortogonal  $\mu$ , de la relación entre la altura y la longitud del muro  $\lambda$  y de las condiciones de sustentación en sus bordes. El EC6 en su parte 1-1 no define explícitamente el procedimiento para su obtención, señalando que se obtendrá mediante adecuada teoría. Se presentan entonces dos alternativas para su cuantificación:

- Aplicar los coeficientes recogidos en el DNA, obteniendo directamente los momentos con las expresiones siguientes:

$$M_{dV} = \frac{1}{8} \frac{\mu L}{\mu L + H} \gamma_F W_k H^2 \quad (\text{ec. 16})$$

$$M_{dH} = \frac{1}{8} \frac{H}{\mu L + H} \gamma_F W_k L^2 \quad (\text{ec. 17})$$

Es importante señalar que tanto en el DNA como en el borrador de Código Técnico SE-F, las expresiones recogidas son erróneas pues aparecen permutados los coeficientes indicando para  $M_{dV}$  el coeficiente correspondiente a  $M_{dH}$  y viceversa.

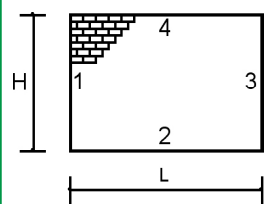
Las anteriores expresiones podemos escribirlas de forma que sean más fácilmente comparables con las proporcionadas con el criterio de placas, que se detalla en el siguiente punto:

$$\lambda = \frac{H}{L} \quad (\text{ec. 18})$$

$$M_{dV} = \frac{1}{8} \frac{\lambda^2 \mu}{\lambda + \mu} \gamma_F W_k L^2 \quad (\text{ec. 19})$$

$$M_{dH} = \frac{1}{8} \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \gamma_F W_k L^2 \quad (\text{ec. 20})$$

Tabla 1

Muro sustentado en los cuatro bordes:	$M_{dH} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1^2 + \mu + \lambda_1 \sqrt{\mu})} \gamma_f W_k L^2$		
Muro con el borde superior libre:	$M_{dH} = \frac{\lambda^2}{6\lambda_3^2 + 8\lambda_3 \sqrt{\mu} + 2k_2(\lambda_3^2 + \mu)} \gamma_f W_k L^2$	para $\lambda \leq \frac{2\sqrt{\mu}}{\sqrt{1+k_1} + \sqrt{1+k_3}}$	
	$M_{dH} = \frac{\lambda_4^2}{2(4\lambda_5^2 + \mu + 2\lambda_5 \sqrt{\mu})} \gamma_f W_k L^2$	para $\lambda > \frac{2\sqrt{\mu}}{\sqrt{1+k_1} + \sqrt{1+k_3}}$	
Muro con un borde lateral libre <sup>(*)</sup> :	$M_{dH} = \frac{\lambda_6^2}{2(\lambda_7^2 + 4 \cdot \mu + 2\lambda_7 \sqrt{\mu})} \gamma_f W_k L^2$	para $\lambda \leq \frac{\sqrt{\mu}}{2} (\sqrt{1+k_2} + \sqrt{1+k_4})$	
	$M_{dH} = \frac{\lambda_6^2}{6\mu + 8\lambda_6 \sqrt{\mu} + 2k_1(\mu + \lambda_6^2)} \gamma_f W_k L^2$	para $\lambda > \frac{\sqrt{\mu}}{2} (\sqrt{1+k_2} + \sqrt{1+k_4})$	
	$\lambda_1 = \lambda \frac{\sqrt{1+k_1} + \sqrt{1+k_3}}{\sqrt{1+k_2} + \sqrt{1+k_4}}$	$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{(\sqrt{1+k_1} + \sqrt{1+k_3})^2}$	$\lambda_3 = \frac{\lambda}{2} (\sqrt{1+k_1} + \sqrt{1+k_3})$
	$\lambda_4 = \frac{\lambda}{\sqrt{1+k_2}}$	$\lambda_5 = \frac{\lambda_3}{\sqrt{1+k_2}}$	$\lambda_6 = \frac{2\lambda}{(\sqrt{1+k_2} + \sqrt{1+k_4})}$
$k_1, k_2, k_3, k_4$ coeficientes de empotramiento de los correspondientes bordes del muro. $k_i = 0$ bordes apoyados. $k_i = 1$ bordes con empotramiento perfecto $0 < k_i < 1$ bordes semiempotrados En todos los casos $M_{dV} = \mu M_{dH}$			

• Aplicar la tabla 4.1 del EC6 parte 1-3 que nos aporta los coeficientes de flexión  $\alpha$  correspondientes a placas con distintas condiciones de sustentación. En este segundo caso, la tabla nos proporciona el coeficiente  $\alpha$  para valores de H/L que se mueven entre 0,30 y 2,00 y valores de  $\mu$  variables entre 0,30 y 1,00. El cálculo real nos pone de manifiesto que las tablas de valores proporcionados son en muchos casos insuficientes, pues con frecuencia, especialmente en fábricas armadas, el coeficiente  $\mu$  de rateo se encuentra por debajo de 0,30.

El desafortunado criterio de EC6 de proporcionar la tabla de valores de  $\alpha$  sin explicitar ni las expresiones analíticas empleadas para su obtención, ni tan siquiera el método de cálculo empleado, comienza a ser desgraciadamente habitual en el ámbito normativo. Ello resulta si cabe más inexplicable en el caso presente, si tenemos en cuenta la simplicidad de las mismas, pues es fácil deducir, aunque no se cite expresamente, que la determinación de los coeficientes se ha obtenido aplicando el cálculo plástico del método de las líneas de rotura de Johansen [ref.3] en combinación con el método de la afinidad para placas ortótropas. Al objeto de facilitar la aplicación del criterio del EC6 y de darle mayor generalidad, se han obtenido las expresiones que nos permiten calcular los valores de los momentos flectores  $M_{dV}$  y  $M_{dH}$  para muros sustentados en tres y cuatro bordes, cualquiera que sea el grado de empotramiento en los mismos, el coeficiente de rateo  $\mu$  y la relación de lados  $\lambda$  (Tabla 1).

No obstante lo anterior, el empleo de un criterio de cálculo plástico en la determinación de las sollicitaciones es, cuando menos, discutible. La validez de dicho método ha sido ampliamente demostrada, desde un punto de vista experimental, en el campo del hormigón armado, sin que exista experiencia sobre su fiabilidad en estructuras de fábrica. Hay que tener presente que dicho método se sustenta en la hipótesis de redistribución de esfuerzos que se produce respecto a los proporcionados por la teoría elástica, conforme progresa la fisuración y se alteran las inercias. En un material de ductilidad prácticamente nula como la fábrica, especialmente cuando no se arma, aceptar un grado de fisuración tal que lleguen a formarse secciones plastificadas situadas sobre las líneas de rotura constituye, a nuestro entender, un criterio de difícil sustentación sin una validación experimental.

Además del discutible criterio de aplicación de un método plástico para evaluar los momentos flectores actuantes en el muro en la hipótesis de placa sustentada en sus bordes, resulta sorprendente la diferencia de criterio y resultados que se obtienen aplicando los dos métodos recogidos en EC6 y DNA. Al objeto de visualizar las diferencias, se han representado gráficamente los resultados correspondientes al caso de muro apoyado en todo el contorno. La elección de este caso se debe a que el criterio del DNA solamente es aplicable a dicha situación, lo que reduce de forma casi total su utilidad práctica.

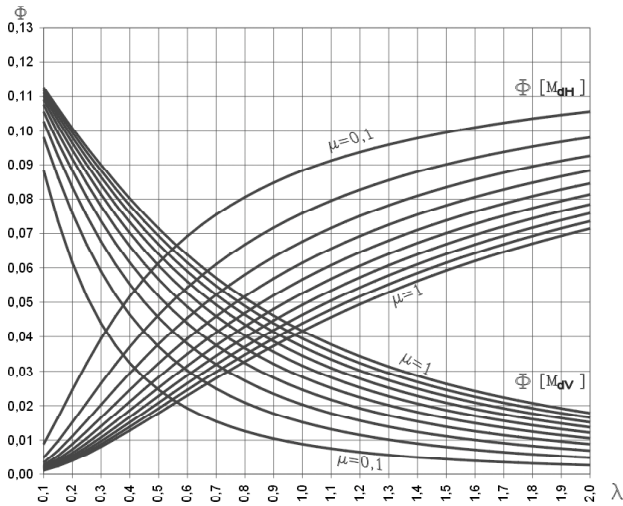


Figura 1. Valores de  $\Phi$  según EC6 para momentos expresados en función de H y L.

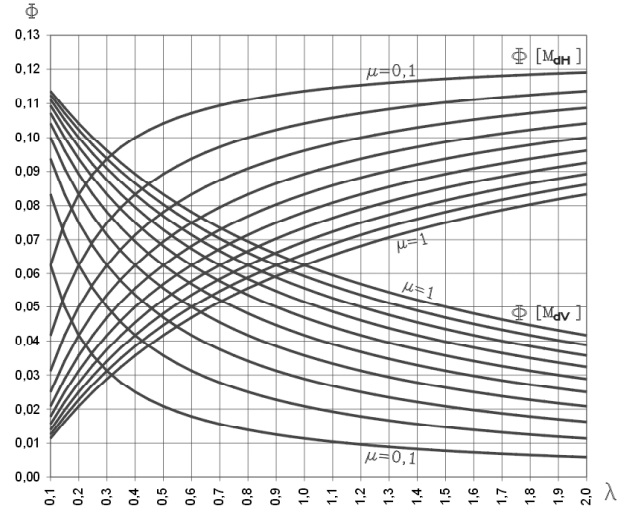


Figura 2. Valores de  $\Phi$  según DNA para momentos expresados en función de H y L.

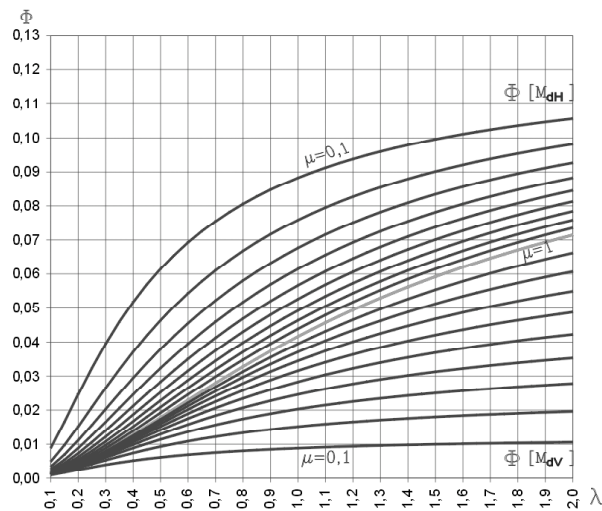


Figura 3. Valores de  $\Phi$  según EC6 para momentos expresados únicamente en función de L.

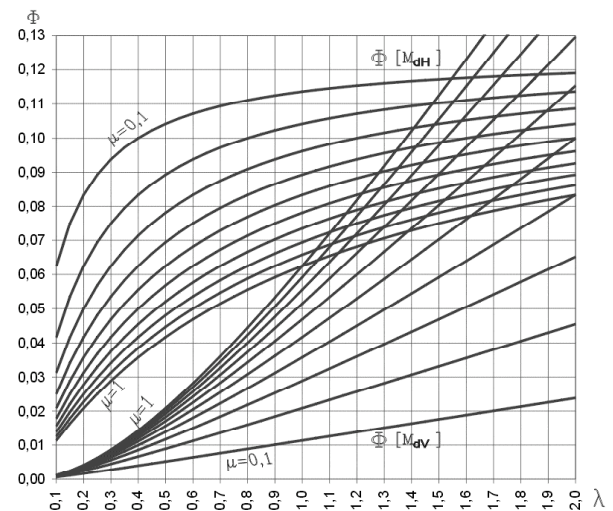


Figura 4. Valores de  $\Phi$  según DNA para momentos expresados únicamente en función de L.

Las expresiones utilizadas en la representación de las gráficas de las figuras 1 a 4 son las siguientes (Tabla 2):

Tabla 2

EC6	Figura 1	$M_{dv} = \frac{1}{8} \frac{\mu}{\lambda^2 + \mu + \lambda\sqrt{\mu}} \gamma_F W_k H^2 = \phi \gamma_F W_k H^2$	$M_{dH} = \frac{1}{8} \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + \mu + \lambda\sqrt{\mu}} \gamma_F W_k L^2 = \phi \gamma_F W_k L^2$
	Figura 3	$M_{dv} = \frac{1}{8} \frac{\lambda^2 \mu}{\lambda^2 + \mu + \lambda\sqrt{\mu}} \gamma_F W_k L^2 = \phi \gamma_F W_k L^2$	
DNA	Figura 2	$M_{dv} = \frac{1}{8} \frac{\mu}{\lambda + \mu} \gamma_F W_k H^2 = \phi \gamma_F W_k H^2$	$M_{dH} = \frac{1}{8} \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \gamma_F W_k L^2 = \phi \gamma_F W_k L^2$
	Figura 4	$M_{dv} = \frac{1}{8} \frac{\lambda^2 \mu}{\lambda + \mu} \gamma_F W_k L^2 = \phi \gamma_F W_k L^2$	

$\phi \rightarrow$  coeficiente cuyo valor se determina, según los casos, a partir de las gráficas de las figuras 1 a 4.

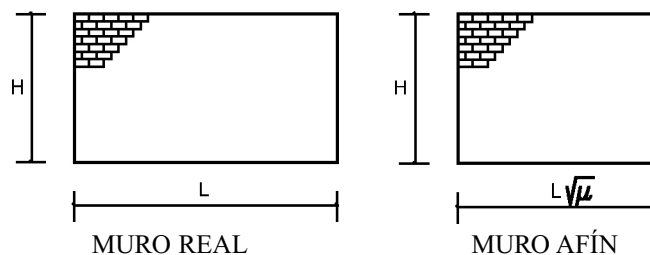
Las gráficas 1 y 3 correspondientes al EC6 no plantean ninguna duda, salvo la ya discutida validez del criterio plástico en su aplicación a la determinación de flectores en un muro de fábrica. Por el contrario, las gráficas 2 y 4 correspondientes al DNA nos ponen de manifiesto que dicho criterio de cálculo es claramente incorrecto. La Figura 2, en la que se representa los coeficientes  $\Phi$  que determina los momentos en función de la luz de flexión correspondiente (H y L), nos muestran unas curvas de trazado análogo a las del EC6, pero con valores superiores a igualdad de esbeltez. Ello puede llevarnos a pensar en un criterio más conservador, pero coherente con el recogido en el EC6. Sin embargo, la Figura 4 donde se representa la variación de  $\Phi$  tomando como referencia siempre la misma luz de cálculo L, nos evidencia su incorrección. Puede observarse claramente como en muros isótropos ( $\mu=1$ ) y con esbelteces superiores a la unidad, el coeficiente correspondiente a  $M_{dv}$  supera a  $M_{dh}$ , lo que contraviene las teorías de cálculo. Para esbelteces inferiores a la unidad el efecto es el contrario e igualmente incorrecto. Por otra parte, puede observarse asimismo en las figuras 1 y 2 como el punto de corte de las gráficas en la que se igualan los momentos  $M_{dv}$  y  $M_{dh}$  se produce cuando  $\lambda=\mu$  en lugar de  $\lambda=\sqrt{\mu}$  tal y como ponen de manifiesto tanto el cálculo elástico como plástico.

En consecuencia, el método recogido en el DNA no sólo es aplicable a un único caso, el de muros apoyados en todo el contorno, lo que le resta utilidad, sino que además conduce a resultados erróneos y totalmente contrarios a los proporcionados por el método recogido en el EC6.

#### 4. PROPUESTA DE MÉTODO SIMPLIFICADO

Tal y como se ha expuesto en el apartado anterior, la casi nula ductilidad de las fábricas y el deseable criterio de evitar la aparición de fisuración, nos llevan a considerar como más adecuados los métodos basados en el cálculo elástico. En este sentido y al objeto de tener en cuenta el carácter ortótropo de

los muros de fábrica, es de gran utilidad la consideración del método de la afinidad que nos permite obtener los esfuerzos en un muro isótropo afin al muro real ortótropo.



La obtención de esfuerzos en el muro afin puede realizarse utilizando los métodos clásicos de cálculo elástico o alguna de las numerosas tablas disponibles para placas isótropas. Los momentos flectores  $M_{dv}$  obtenidos en el muro afin son directamente válidos. Por el contrario, los momentos flectores  $M_{dh}$  deben dividirse por el coeficiente de ortotropía  $\mu$ .

En el estado actual, caracterizado por el insuficiente nivel de conocimientos respecto a la capacidad resistente a flexión de una fábrica, el inicio de su fisuración y el valor real del coeficiente de ortotropía, consideramos que la utilización de un método simplificado, como el método de Marcus, para la obtención de los esfuerzos en el muro, aúna satisfactoriamente simplicidad y una eficiencia acorde al nivel de precisión de las hipótesis de cálculo.

En este sentido, podemos fácilmente formular de forma genérica las expresiones de los momentos flectores  $M_{dv}$  y  $M_{dh}$  para muros sustentados en cuatro bordes, cualquiera que sea el grado de empotramiento en los mismos, el coeficiente de rateo  $\mu$  y la relación de lados  $\lambda$  (Tabla 3).

Al objeto de comparar los resultados proporcionados por las expresiones anteriores se ha representado gráficamente en

Tabla 3

Momentos en apoyos		Momento en punto medio		
$M_{dh1}^- = -\frac{1}{8}\phi_1 \frac{\phi\lambda^4}{\phi\lambda^4 + \mu^2} \gamma_f W_k L^2 = \phi \gamma_f W_k L^2$	$M_{dh3}^- = -\frac{1}{8}\phi_3 \frac{\phi\lambda^4}{\phi\lambda^4 + \mu^2} \gamma_f W_k L^2 = \phi \gamma_f W_k L^2$	$M_{dh}^+ = \frac{1}{8}\phi_5 \frac{\phi\lambda^4}{\phi\lambda^4 + \mu^2} \gamma_f W_k L^2 = \phi \gamma_f W_k L^2$		
$M_{dv2}^- = -\frac{1}{8}\phi_2 \frac{\lambda^2\mu^2}{\phi\lambda^4 + \mu^2} \gamma_f W_k L^2 = \phi \gamma_f W_k L^2$	$M_{dv4}^- = -\frac{1}{8}\phi_4 \frac{\lambda^2\mu^2}{\phi\lambda^4 + \mu^2} \gamma_f W_k L^2 = \phi \gamma_f W_k L^2$	$M_{dv}^+ = \frac{1}{8}\phi_6 \frac{\lambda^2\mu^2}{\phi\lambda^4 + \mu^2} \gamma_f W_k L^2 = \phi \gamma_f W_k L^2$		
	Donde:			
	$\phi_1 = \frac{2k_1}{1+k_1+k_3}$	$\phi_2 = \frac{2k_2}{1+k_2+k_4}$	$\phi_3 = \frac{2k_3}{1+k_1+k_3}$	$\phi_4 = \frac{2k_4}{1+k_2+k_4}$
	$\phi_5 = \frac{1}{1+k_1+k_3}$	$\phi_6 = \frac{1}{1+k_2+k_4}$	$\phi = \frac{1-0,6(\phi_2 + \phi_4)}{1-0,6(\phi_1 + \phi_3)}$	
$k_1, k_2, k_3, k_4$ coeficientes de empotramiento de los correspondientes bordes del muro.				
$k_1 = 0$ bordes apoyados		$k_1 = 1$ bordes con empotramiento perfecto		
$0 < k_1 < 1$ bordes semiempotrados				

las figuras 5 a 7 la variación de los coeficientes  $\Phi$ . Asimismo, se ha procedido al cálculo, aplicando el método de los elementos finitos, de un total de 140 placas sustentadas en sus cuatro bordes con diferentes valores de esbeltez, cuyos resultados se plasman en las figuras 6 y 8.

La comparación entre el procedimiento simplificado y el MEF nos pone de manifiesto una clara concordancia, aceptando que se trata de un método claramente conservador; ello no debe suponer una puesta en cuestión del método, por cuanto el deficiente conocimiento actual del comportamiento de las fábricas flectadas, desaconsejan aventurarse en métodos aparentemente más rigurosos que se sustentan, sin embargo, en hipótesis sin avalar. En consecuencia, se propone la formulación recogida en la Tabla 3 anterior como alternativa de cálculo frente al EC6 y al DNA, pues nos aporta un análisis elástico en combinación con unas expresiones de

notable sencillez que permiten, sin embargo, abordar una amplísima casuística.

### 5. CONCLUSIONES

El criterio de cálculo plástico del EC6 para la determinación de las sollicitaciones en muros sustentados en tres o cuatro bordes no parece suficientemente avalado para su aplicación en fábricas sin ductilidad.

El método alternativo propuesto por el DNA es claramente incorrecto y debe ser revisado.

La aplicación del método de Marcus en muros isótropos afines al muro real nos permite determinar los esfuerzos de flexión en una amplia casuística, lo que constituye un procedimiento fiable y sencillo, cuyo nivel de precisión es acorde con el actual conocimiento del comportamiento de las fábricas.

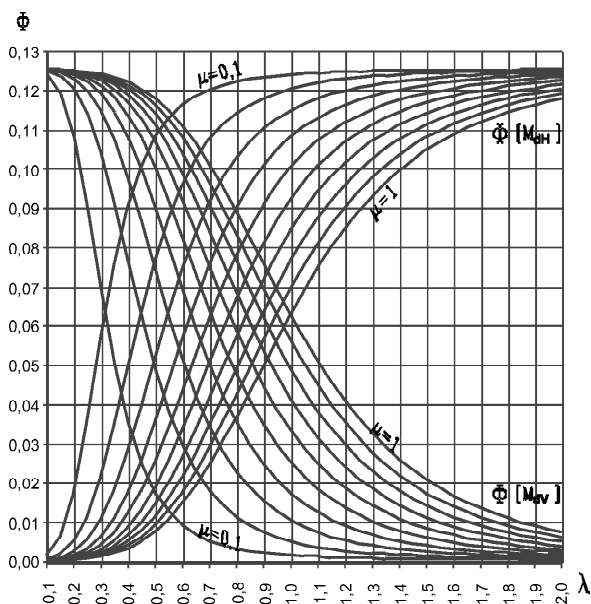


Figura 5. Valores de  $\Phi$  según método propuesto para momentos expresados en función de H y L.

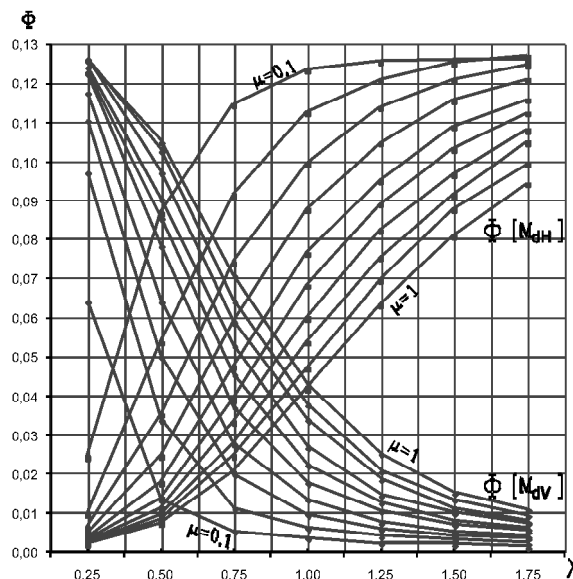


Figura 6. Valores de  $\Phi$  según MEF para momentos expresados en función de H y L.

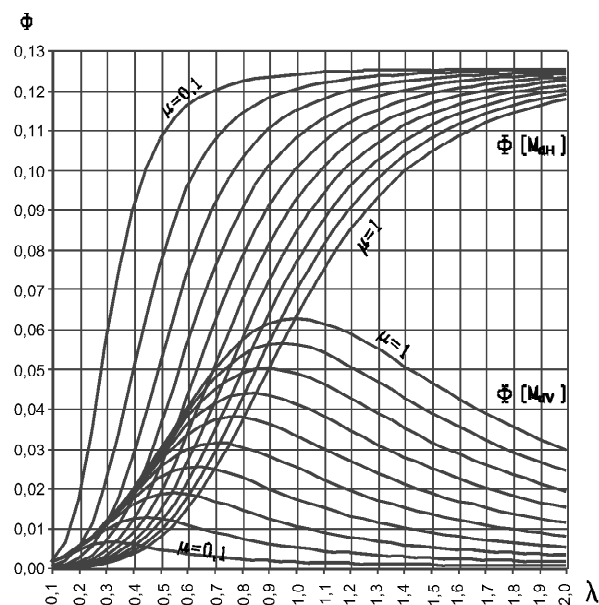


Figura 7. Valores de  $\Phi$  según método propuesto para momentos expresados únicamente en función de L.

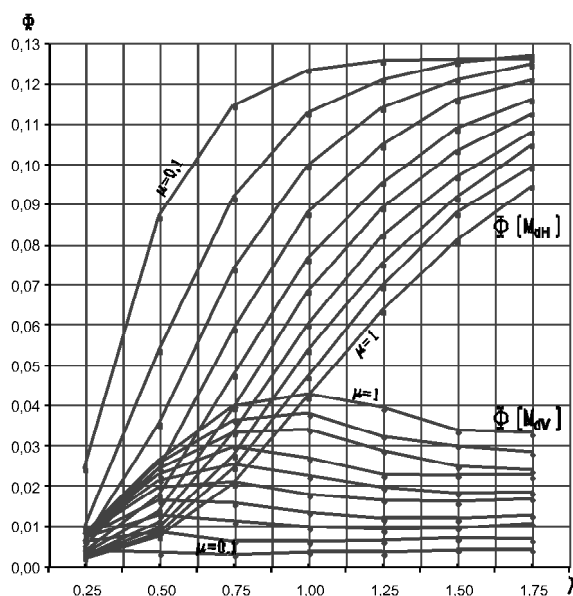


Figura 8. Valores de  $\Phi$  según MEF para momentos expresados únicamente en función de L.

## 6. NOMENCLATURA Y SIMBOLOGÍA

b	Ancho de la sección flectada. Generalmente los cálculos se realizan para 1 m de ancho.	$M_{Rd}$	Momento flector resistente de cálculo del muro.
d	Canto útil de la sección.	$M_{RdH}$	Momento resistente de cálculo a flexión (plano de rotura perpendicular a los tendeles).
$f_k$	Resistencia característica a compresión de la fábrica.	$M_{RdV}$	Momento resistente de cálculo a flexión (plano de rotura paralelo a los tendeles)
$f_{vk0}$	Resistencia a corte puro con tensión de compresión nula. Se determina en tabla 3.5 de EC6.	$W_k$	Carga característica de viento por unidad de área.
$f_{xk}$	Resistencia característica a flexión de la fábrica correspondiente al plano de flexión.	Z	Módulo resistente de la sección del muro.
$f_{xk1}$	Resistencia característica a flexión de la fábrica con plano de rotura paralelo a los tendeles.	A	Coefficiente de flexión.
$f_{xk1,aparente}$	Resistencia característica a flexión de la fábrica con plano de rotura paralelo a los tendeles teniendo en cuenta el incremento que se produce por efecto de la carga vertical.	$\alpha$	Coefficiente de flexión de placas (Tabla 4.1. EC6. parte 1-3).
$f_{xk2}$	Resistencia característica a flexión de la fábrica con plano de rotura perpendicular a los tendeles.	$\gamma_F$	Coefficiente parcial de seguridad para acciones.
$f_{yk}$	Resistencia característica del acero.	$\gamma_M$	Coefficiente parcial de seguridad de la fábrica.
$k_i$	Coefficiente de empotramiento del correspondiente borde del muro.	$\gamma_S$	Coefficiente parcial de seguridad del acero.
z	Brazo de palanca (art. 4.7.1.6 de EC6).	$\lambda$	Esbeltez geométrica del muro.
$A_s$	Área de la armadura de tracción de tendeles para un ancho b de la sección flectada.	$\mu$	Ratio de las resistencias características a flexión de la fábrica.
H	Altura libre del muro entre forjados.	$\sigma_{dp}$	Tensión debida a la carga vertical permanente de cálculo en el muro a la altura considerada.
L	Longitud libre del muro entre muros traveseros.		
$M_d$	Momento flector de cálculo aplicado al muro.		
$M_{dH}$	Momento flector de cálculo aplicado al muro (plano de rotura perpendicular a los tendeles).		
$M_{dV}$	Momento flector de cálculo aplicado al muro (plano de rotura paralelo a los tendeles).		

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Eurocódigo 6. Proyecto de estructuras de fábrica. Parte 1-1: Reglas generales para edificios. Reglas para fábrica y fábrica armada.* Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid, 2000.
- [2] *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.
- [3] Johansen, K.W. *Yield-line formulae for slabs.* Cement and Concrete Association. London, 1972.
- [4] Río Vega, María Concepción del. *Métodos de análisis para verificar la estabilidad y resistencia de los cerramientos de ladrillo.* Conarquitectura. Madrid, 2003.