

Comportamiento de un muro confinado ante acciones laterales

Los recientes cambios en la normativa de la construcción de la edificación han supuesto algunas novedades en la manera de proyectar una vivienda. Uno de esos cambios consiste en la obligación de justificar la estabilidad estructural del cerramiento a las acciones que se vea sometido, es decir, fundamentalmente el viento.

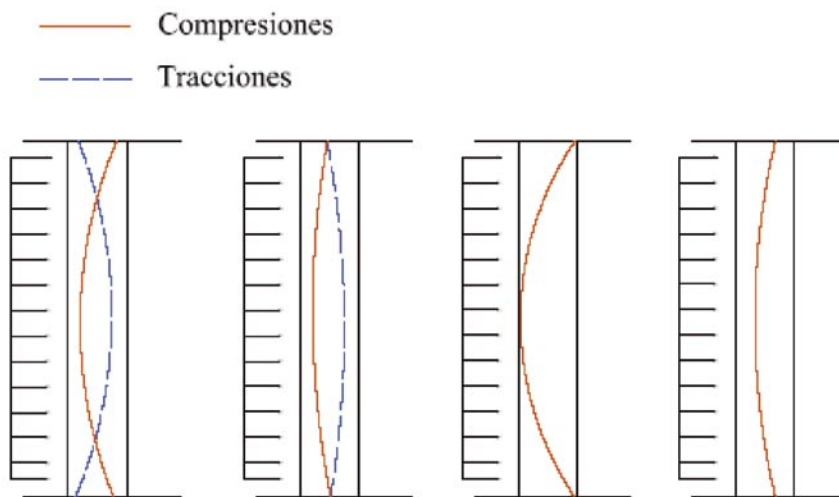
Tradicionalmente, el cerramiento es un elemento que, en la mayoría de las ocasiones, se diseña y ejecuta siguiendo las directrices de los criterios de buena construcción. Sin embargo, estos criterios no están apoyados sobre una base teórica, sino que se consideran acertados por estar validados por una larga experiencia de buenos resultados.

Por lo tanto, para cumplir con la exigencia de la justificación, resulta conveniente demostrar teóricamente lo que ya está comprobado por la ejecución.

Este documento se va a centrar en la tipología más conocida de cerramiento tradicional, el muro confinado entre dos forjados.

Cuando un muro se encuentra confinado entre dos plantas de forjado, es decir, que la base y la cabeza del muro encuentran resistencia al giro en dichas partes, la reacción del muro ante una sollicitación tipo carga repartida provoca la aparición de tensiones en el interior del mismo, cuya morfología cambia en función del valor de la carga.

Estas morfologías son alternativas de distribución tensional que tiene el muro para alcanzar el equilibrio con la sollicitación exterior, por lo que, en principio, podemos hallar varias distribuciones internas de tensiones que estarían en equilibrio con una sollicitación exterior concreta. Sin embargo, para cada carga exterior dada, el muro siempre reacciona con un equilibrio tensional determinado. Esto es debido a que las tensiones reales internas que se producen son las que producen el equilibrio con el menor gasto energético.



Como consecuencia, si no hubiera otras limitaciones, solamente habría una morfología de tensión interior como respuesta a la carga solicitante, independientemente del valor de esta. Sin embargo, al igual que cada distribución tensional requiere una energía interna diferente, también tienen un límite a la hora de resistir la sollicitación exterior, ya que la tensión máxima alcanzada puede superar el límite resistente del material, o ceder ante los efectos de segundo orden. La distribución tensional final que se producirá en el muro será aquella que, de entre las distribuciones que sean capaces de resistir la carga exterior, la que tenga una energía interna menor.

Para identificar la energía interna de cada distribución tensional, lo más sencillo es calcular la flecha que se produce. Es evidente que, entre dos alternativas, el muro desarrollará la flecha más pequeña que le ofrezca el equilibrio necesario.

Haciendo una simplificación, podemos explicar la evolución tensional interior del muro en cuatro dominios, con cierta semejanza a los clásicos dominios tensionales que se estudian en el hormigón. A su vez, podemos dividir estos dominios en dos grupos. Los dominios que son morfologías tensionales de flexión, y los que son morfologías de arco.

Todo la formulación está desarrollada para muros de ancho unitario.

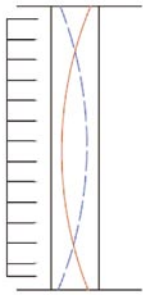
DOMINIO VIGA 1:

Como se podrá comprobar un poco más adelante cuando se compare la flecha producida por carga unitaria, el primer dominio que se produce es a flexión.

Dado que la viga se encuentra confinada, la respuesta del muro será la de un modelo de viga empotrada en los extremos. A partir de este razonamiento se puede desarrollar:



Los artículos técnicos son facilitados por Hispalyt (asociación española de fabricantes de ladrillos y tejas de arcilla cocida) y forman parte de los programas de investigación que desarrolla sobre los distintos materiales cerámicos y su aplicación.



$$M_{Rd} = f_{xd1} \cdot Z$$

$$M_{sd \text{ máx}} = q_d \cdot h^2 / 12$$

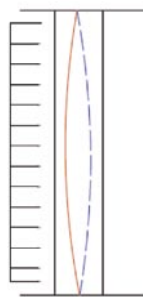
$$M_{Rd} > M_{sd \text{ máx}} \Rightarrow q_d < 12 \cdot f_{xd1} \cdot Z / h^2 \Rightarrow q_d < 2 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / h^2$$

$$\text{Flecha} = q_d \cdot h^4 / 384 \cdot E \cdot I = q_d \cdot h^4 / 32 \cdot E \cdot t^3$$

Este dominio será la respuesta tensional del muro cuando la q_d se sitúe entre:

$$0 < q_d < 2 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / h^2$$

Si embargo, si existiera alguna circunstancia por la cual no podamos considerar un empotramiento en todo el ancho del muro y no se pueda determinar con exactitud que clase de reacción se tiene en la cabeza y la base del muro, se puede optar por considerar que el muro trabaja sin ayuda alguna de empotramiento, como una viga biapoyada:



$$M_{Rd} = f_{xd1} \cdot Z$$

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

$$M_{Rd} > M_{sd \text{ máx}} \Rightarrow q_d < 8 \cdot f_{xd1} \cdot Z / h^2 \Rightarrow q_d < 4 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / 3 \cdot h^2$$

$$\text{Flecha} = 5 \cdot q_d \cdot h^4 / 384 \cdot E \cdot I = 5 \cdot q_d \cdot h^4 / 32 \cdot E \cdot t_d^3$$

En este caso, este dominio será la respuesta tensional del muro cuando la q_d se sitúe entre:

$$0 < q_d < 4 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / 3 \cdot h^2$$

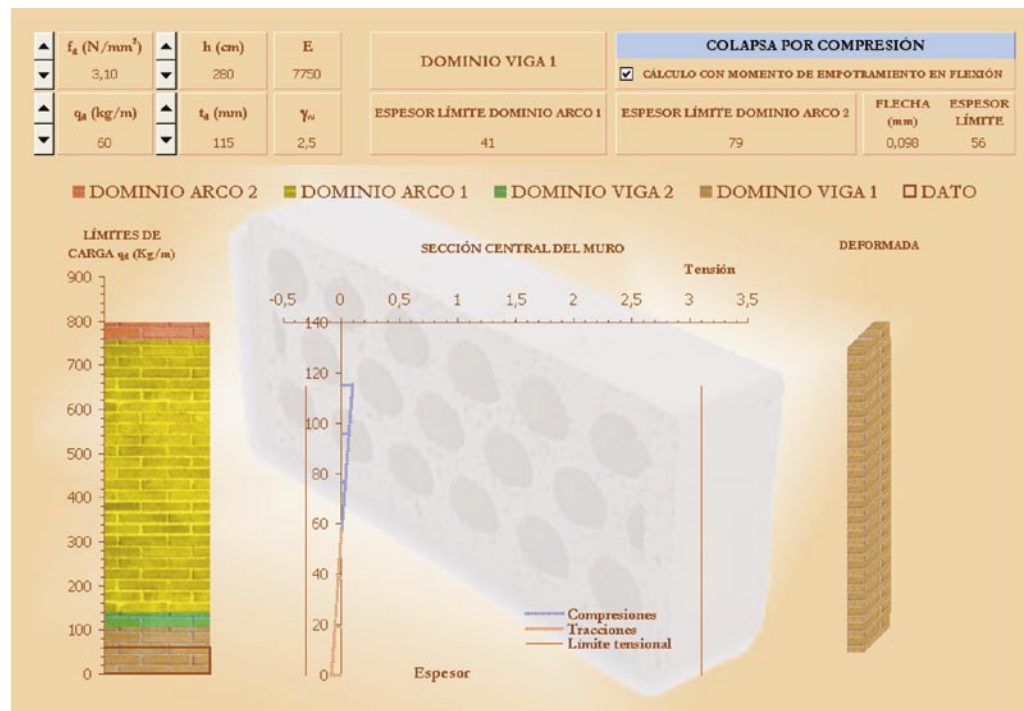
En los gráficos siguientes se incluyen un muro de 1/2 pie de espesor cuando se encuentran en las situaciones descritas.

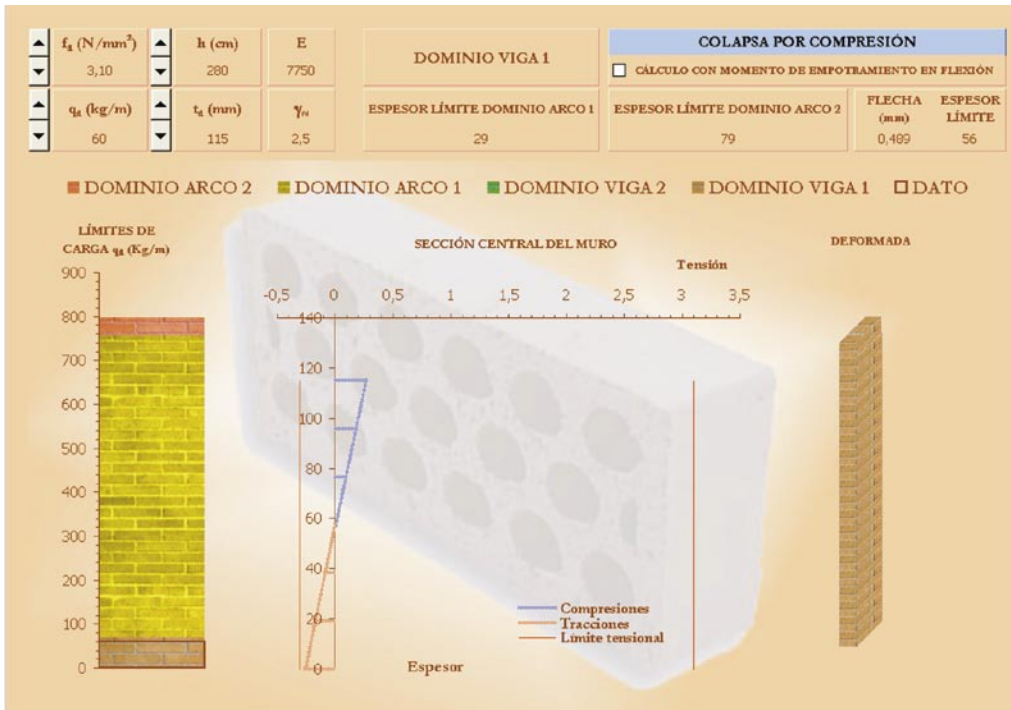
Estos esquemas hay tres partes principales. La primera detalla los límites de los dominios tensionales, reflejados en un muro con diferentes colores que representan cada uno de los dominios y calibrados con una regla donde se indica el nivel de q_d admisible.

La segunda muestra las tensiones producidas en la sección central del muro y la deformada del mismo, en función de los datos geométricos del muro (espesor y altura) y de sus características físicas (resistencia a compresión y módulo de elasticidad).

La tercera son los datos de entrada y otros resultados tales como los espesores límite de los dominios arco 1 y 2 (espesores mínimos a partir de los cuales aparecen), la flecha a media altura del muro, y el espesor límite, que es el espesor mínimo que, para la carga dada, es necesario para que el muro no ceda por los efectos de segundo orden.

Estos esquemas están realizados con una hoja de cálculo Excel, con los mismos criterios reflejados en este documento.





DOMINIO VIGA 2:

En el caso de que se pueda considerar el empotramiento en los extremos en el dominio viga 1, el dominio viga 2 comienza con la formación de rótulas plásticas en cabeza y base, y sigue teniendo un comportamiento como viga a flexión hasta la formación de rótula plástica en el centro de vano. Si no se considerase el efecto del momento, este dominio no aparecería, puesto que el dominio viga 1 terminaría al formarse la rotula plástica a media altura del muro y se formaría entonces una respuesta tensional en arco.

Las ecuaciones que describen este dominio son:

$$M_{Rd} = f_{xd1} \cdot Z$$

$$M_{sd\ máx} = q_d \cdot h^2 / 16$$

$$M_{Rd} > M_{sd\ máx} \Rightarrow q_d < 16 \cdot f_{xd1} \cdot Z / h^2 \Rightarrow q_d < 8 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / 3 \cdot h^2$$

$$\text{Flecha} = 2 \cdot q_d \cdot h^4 / 384 \cdot E \cdot I = 2 \cdot q_d \cdot h^4 / 32 \cdot E \cdot t_d^3$$

Rotula plástica

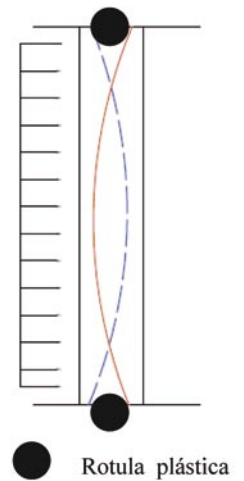
El equilibrio de fuerzas puede lograrse con infinitas alturas del arco, por lo que se necesita otra condición para definir el arco que se forma.

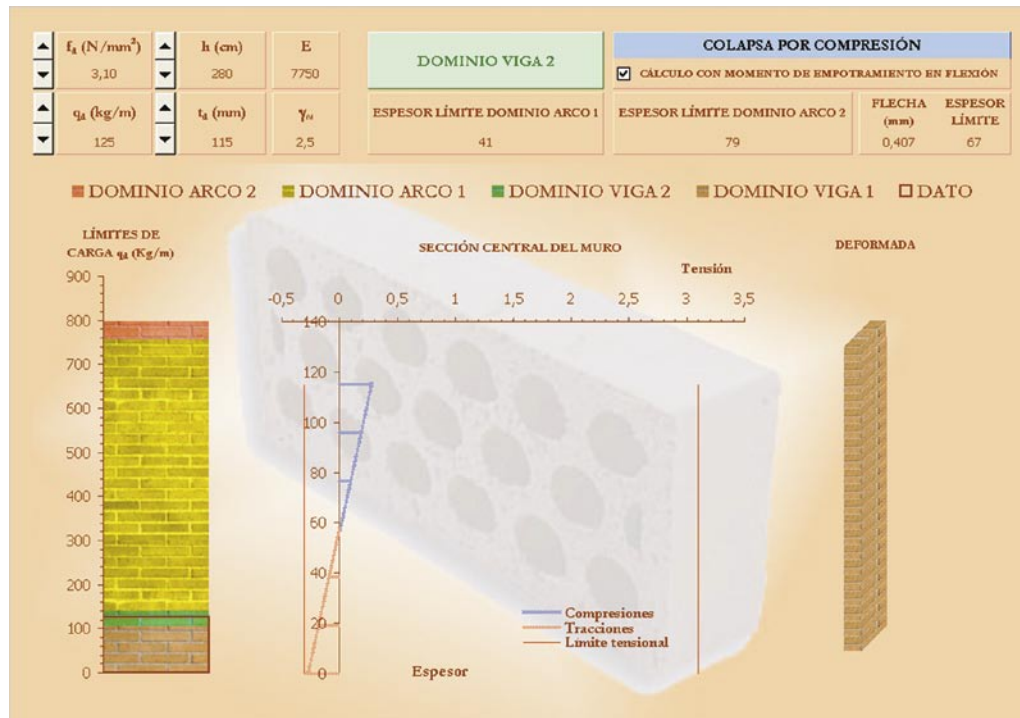
El equilibrio de fuerzas puede lograrse con infinitas alturas del arco, por lo que se necesita otra condición para definir el arco que se forma.

Este dominio será la respuesta tensional del muro cuando la q_d se sitúe entre:

$$2 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / h^2 < q_d < 8 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / 3 \cdot h^2$$

El esquema se presenta en la página siguiente:





DOMINIO ARCO 1:

Una vez que el muro agota la fase de respuesta a flexión, comienza la respuesta en arco. Esta respuesta es debida al agotamiento de la resistencia a tracción del material, por lo que en este estado la morfología tensional varía completamente, cambiando de la disposición asimétrica triangular a una rectangular con un ancho igual a la diferencia del espesor por la altura del arco.

Dentro del comportamiento en arco hacemos unas suposiciones iniciales:

- La tensión en el arco es constante. Esto, en sentido estricto no es cierto, pero la simplificación es válida, sobre todo en los muros con grandes esbelteces.
- El bloque tensional es constante. Esto es, la fuerza de compresión a lo largo del arco es constante.

La primera incógnita a resolver es averiguar cual es la altura del arco que va surgir, ya que a diferencia de la flexión, dentro de la distribución tensional en arco, existen infinitos arcos que mantienen el equilibrio de fuerzas.

Para hallar qué arco se formará, volvemos a la teoría de mínima energía interna, es decir, la altura del arco z será la correspondiente a la del arco que necesite la menor energía para formarse:

$$\text{Energía} = \frac{1}{2} \cdot U \cdot \Delta l$$

Donde U es la reacción que desarrolla el arco, l es la longitud de arco y z es la altura del mismo.
 $U = M_{sd} / z \Rightarrow q_d \cdot h^2 / 8 \cdot z$

$$\Delta l = U \cdot l / E \cdot b = U \cdot l / E \cdot (t_d - z)$$

Sustituyendo:

$$\text{Energía} = \frac{1}{2} \cdot (q_d \cdot h^2 / 8 \cdot z)^2 \cdot l / E \cdot (t_d - z)$$

Para hallar z , hacemos mínima la energía, **$d\text{Energía} / dz = 0$** .

Teniendo en cuenta que para las esbelteces de los muros, la longitud del arco formado tiene una variación despreciable en comparación con el término $1 / z^2 \cdot (t_d - z)$, y que el resto de términos son constantes, entonces:

$$d(1 / z^2 \cdot (t_d - z)) / dz = 3 \cdot z - 2 \cdot t_d / z^3 \cdot (t_d - z)^2 = 0 \Rightarrow \mathbf{z = 2 \cdot t_d / 3}$$

Una vez que queda demostrado que el arco se va a formar en el dominio arco 1 es el correspondiente a $z = 2 \cdot t_d / 3$, comprobamos entre qué límites de resistencia de carga exterior se encuentra. En el estudio de los efectos de primer orden, este dominio estará agotado cuando la tensión alcanzada sea igual a la resistencia a compresión:

$$M_{sd} = U \cdot z$$

En el límite de la capacidad resistente del material $U = f_d \cdot (t_d - z)$, donde f_d es la resistencia a compresión de cálculo de la fábrica.

(1) Estas fórmulas han sido demostradas en el proyecto de investigación "Análisis del Comportamiento Mecánico de los cerramientos", incluido dentro del PROFIT concedido a HISPALYT "Proyecto cooperativo del análisis de la problemática y las soluciones más adecuadas para la construcción de muros no portantes de fábricas de ladrillo cerámico", en la convocatoria publicada en el B.O.E de 13 de abril 2005.

$$q_d \cdot h^2 / 8 = f_d \cdot (t_d - z) \cdot z \Rightarrow z = 2 \cdot t_d / 3 \Rightarrow q_d = 16 \cdot f_d \cdot t_d^2 / 9 \cdot h^2$$

Este sería el límite de carga exterior que podría aguantar, si no fuera por que, a diferencia de la flexión, la flecha d que se produce en el arco reduce el espesor de cálculo t_d , por lo que q_d queda:

$$q_d = 16 \cdot f_d \cdot (t_d - d)^2 / 9 \cdot h^2 \Rightarrow (t_d - d)^2 = 9 \cdot q_d \cdot h^2 / 16 \cdot f_d$$

El valor de la flecha d lo obtenemos de la fórmula:

$$d = q_d \cdot h^4 / 32 \cdot (1 - \nu) \cdot (t_d - d)^3 \cdot E \quad (1)$$

donde es la relación z/t_d , en el caso del dominio arco 1, $z = 2/3$, sustituyendo tenemos la flecha en el dominio arco 1:

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

Sustituyendo $(t_d - d)^2$:

$$(t_d - d) \cdot d = 27 \cdot q_d \cdot h^2 \cdot 16 \cdot f_d / 128 \cdot 9 \cdot q_d \cdot E = 3 \cdot h^2 \cdot f_d / 8 \cdot E$$

$$d^2 - t_d \cdot d + 3 \cdot h^2 \cdot f_d / 8 \cdot E = 0 \Rightarrow \text{Flecha} = d_{\text{máx}} = t_d - (t_d^2 - 3 \cdot h^2 \cdot f_d / 2 \cdot E)^{1/2} / 2$$

Con lo cual, la carga máxima resistente que puede agotar la resistencia a compresión es:

$$q_d = 16 \cdot f_d \cdot (t_d / 2 + (t_d^2 - 3 \cdot h^2 \cdot f_d / 2 \cdot E)^{1/2} / 2)^2 / 9 \cdot h^2$$

Visto lo anterior, hay que tener en cuenta que aunque se puede alcanzar la tensión máxima, los efectos de segundo orden pueden limitar la capacidad del muro antes que de agotar la resistencia a compresión. La esbeltez máxima que puede tener un muro por efectos del pandeo vale:

$$h / t_d \leq (0,5 \cdot E / q_d)^{1/4} \quad (1)$$

Con una flecha máxima de $d = t_d / 4$ (1).

De esta fórmula podemos averiguar la q_d máxima que soportaría el muro antes de pandear:

$$q_d = 1/2 \cdot E \cdot (t_d / h)^4$$

Por lo que para que el muro ofreciera la respuesta tensional de este dominio arco 1, la q_d debe estar comprendida entre:

Valor en función de si se consideran los empotramientos:

$$\frac{8 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / 3 \cdot h^2}{4 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / 3 \cdot h^2}$$

El valor mínimo de:

$$q_d < \frac{16 \cdot f_d \cdot (t_d / 2 + (t_d^2 - 3 \cdot h^2 \cdot f_d / 2 \cdot E)^{1/2} / 2)^2 / 9 \cdot h^2}{1/2 \cdot E \cdot (t_d / h)^4}$$

Por otra parte, si comparamos la flecha producida en el caso más desfavorable de la flexión, con la producida en el dominio arco 1, observamos que siempre es más alta la del dominio arco 1, por lo que el muro siempre reacciona antes con flexión que con el arco tensional:

$$5 \cdot q_d \cdot h^4 / 32 \cdot E \cdot t_d^3 < 27 \cdot q_d \cdot h^4 / 128 \cdot (t_d - d)^3 \cdot E \Rightarrow 5 \cdot t_d^3 < 27 / 4 \cdot (t_d - d)^3$$

Además dado que el efecto del pandeo puede limitar el dominio arco 1, puede hacerlo hasta que la resistencia que se alcanzase fuese igual a la de los dominios vigas. Si igualamos $q_{d\text{máx}}$ podemos obtener la esbeltez con la cual el muro no podría desarrollar la morfología tensional de arco:

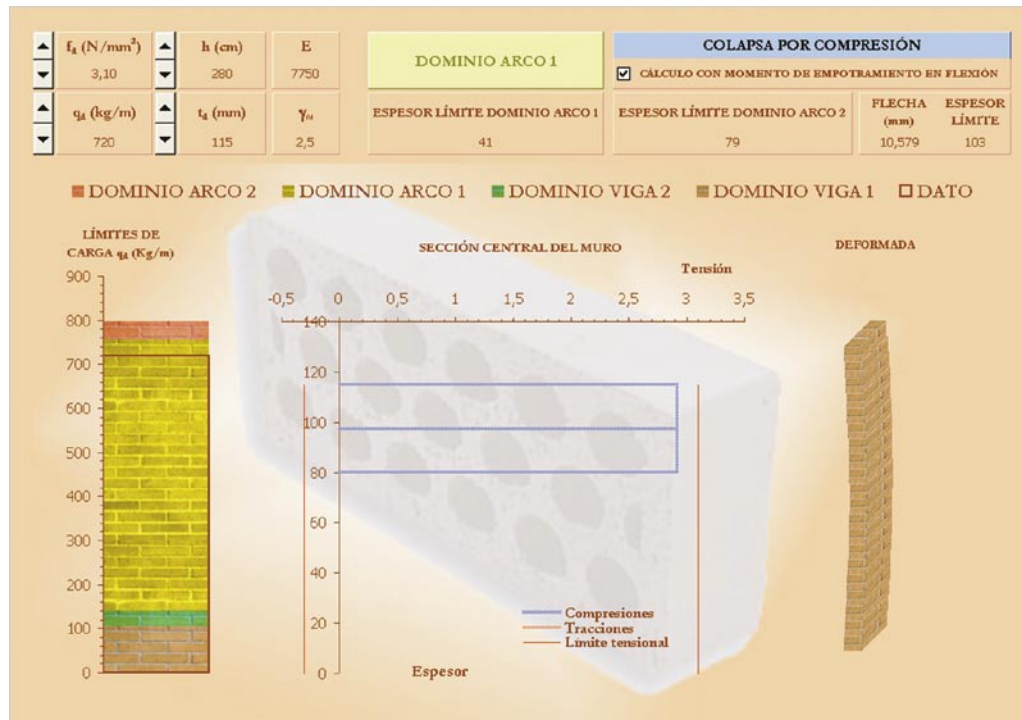
Si considero empotramiento:

$$8 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / 3 \cdot h^2 = 1/2 \cdot E \cdot (t_d / h)^4 \Rightarrow h / t_d = (3 \cdot E / 16 \cdot f_{xd1})^{1/2}$$

Si no considero empotramiento:

$$4 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / 3 \cdot h^2 = 1/2 \cdot E \cdot (t_d / h)^4 \Rightarrow h / t_d = (3 \cdot E / 8 \cdot f_{xd1})^{1/2}$$

El esquema tensional se incluye a continuación:



DOMINIO ARCO 2:

Una vez que el bloque tensional del dominio arco 1 ha llegado a la resistencia límite de compresión del material, y no lo ha hecho por pandeo, sigue habiendo margen para que el muro absorba más carga. Eso se debe a que, aunque la forma de reaccionar ante la carga con una altura de arco de 2/3 del espesor es la más rentable desde el punto de vista energético, no lo es desde el punto de vista resistente. A partir de este punto la altura del arco baja paulatinamente, es decir el valor de d deja de ser constante y disminuye hasta llegar al d crítico, donde el muro alcanza su máxima resistencia. Llegado este punto el muro colapsa definitivamente.

Para hallar el valor resistente a una q_d , en función de la relación d del arco formado:

$$M_{sd} = U \cdot z$$

$$z = \frac{1}{2} \cdot (t_d - d)$$

$$U = f_d \cdot (t_d - d - z) \Rightarrow \text{siendo } d \text{ no constante} \Rightarrow U = f_d \cdot (t_d - d) \cdot (1 - \frac{d}{t_d})$$

$$q_d \cdot h^2 / 8 = f_d \cdot (t_d - d - z) \cdot z \Rightarrow q_d = 8 \cdot f_d \cdot (t_d - d)^2 \cdot \frac{d \cdot (1 - \frac{d}{t_d})}{h^2}$$

Ahora, lo que nos interesa, es hallar cual es el valor máximo a resistir de q_d y su d crítica. En un análisis en primer orden, se desarrolla $dq_d / d = 0$, con la notación $d' = d(d) / d$:

$$dq_d / d = -2 \cdot d' \cdot (t_d - d) \cdot \frac{d \cdot (1 - \frac{d}{t_d})}{h^2} + (t_d - d)^2 \cdot (1 - 2 \cdot \frac{d}{t_d}) = 0$$

El único valor desconocido es d' . Para hallar d' , se deriva la fórmula original respecto de d :

$$d = qd \cdot h^4 / 32 \cdot E \cdot (1 - \frac{d}{t_d}) \cdot (t_d - d)^3$$

$$d' = (qd \cdot h^4 / 32 \cdot E) \cdot ((1/t_d - d)^3 \cdot (-3 \cdot -2 / t_d^3 \cdot (1 - \frac{d}{t_d})^2) + 3 \cdot d' / (1 - \frac{d}{t_d}) \cdot (t_d - d)^4)$$

Sustituyendo d en la fórmula anterior:

$$d' - 3 \cdot d' \cdot d / (t_d - d) = d \cdot (3 \cdot -2) / (1 - \frac{d}{t_d})$$

$$d' = (t_d - d) \cdot d \cdot (3 \cdot -2) / (1 - \frac{d}{t_d}) \cdot (t_d - 4 \cdot d)$$

Sustituyendo d' en dq_d / d :

$$-2 \cdot (t_d - d)^2 \cdot d \cdot (3 \cdot -2) / (t_d - 4 \cdot d) + (t_d - d)^2 \cdot (1 - 2 \cdot \frac{d}{t_d}) = 0$$

$$-2 \cdot d \cdot (3 \cdot -2) + (t_d - 4 \cdot d) \cdot (1 - 2 \cdot \frac{d}{t_d}) = 0$$

$$2 \cdot (d - t_d) + t = 0 \Rightarrow d_{\text{critico}} = t_d / 2 \cdot (t_d - d)$$

Con este valor, la carga máxima en primer orden que podría aguantar el muro en el dominio arco 2 es:

$$q_d = 8 \cdot f_d \cdot (t_d - d)^2 \cdot t_d / 2 \cdot (t_d - d) \cdot (1 - t_d / 2 \cdot (t_d - d)) / h^2 \Rightarrow q_d = 2 \cdot f_d \cdot t_d \cdot (t_d - 2 \cdot d) / h^2$$

y la flecha que se produciría es:

$$d = q_d \cdot h^4 / 32 \cdot (t_d / 2 - (t_d - d))^2 \cdot (1 - t_d / 2 - (t_d - d)) \cdot E \cdot (t_d - d)^3 \Rightarrow d = q_d \cdot h^4 / 4 \cdot t_d^2 \cdot E \cdot (t_d - 2 \cdot d)$$

Sustituyendo $q_{d\text{máx}}$:

$$\text{Flecha} = d_{\text{máx}} = f_d \cdot h^2 / 2 \cdot t_d \cdot E$$

por lo que:

$$q_{d\text{máx}} = 2 \cdot f_d \cdot t_d \cdot (t_d - f_d \cdot h^2 / t_d \cdot E) / h^2$$

Este es el límite impuesto por el límite de resistencia a compresión. Estudiemos ahora el límite de resistencia que imponen los efectos de segundo orden. En el límite de resistencia por pandeo, $d(d) / d(d) = 1$:

$$d = q_d \cdot h^4 / 4 \cdot t_d^2 \cdot E \cdot (t_d - 2 \cdot d)$$

$$d(d) / d(d) = q_d \cdot h^4 / 2 \cdot t_d^2 \cdot E \cdot (t_d - 2 \cdot d)^2 = 1$$

$$2 \cdot d / (t_d - 2 \cdot d) = 1 \Rightarrow 2 \cdot d = t_d - 2 \cdot d \Rightarrow \mathbf{d = t_d / 4}$$

Valor que es el mismo que el que se produce para el pandeo en el dominio arco 1. En efecto, si sustituimos en el valor crítico de :

$$q_{\text{crítico}} = t_d / 2 \cdot (t_d - d) \Rightarrow q_{\text{crítico}} = t_d / 2 \cdot (t_d - t_d / 4) \Rightarrow \mathbf{q_{\text{crítico pandeo}} = 2 \cdot t_d / 3}$$

Es decir, que cuando se produce el pandeo en el dominio arco 2, se produce justo en la frontera de cambio de dominio arco 1 a dominio arco 2.

La esbeltez límite en este caso es:

$$q_d \cdot h^4 / 2 \cdot t_d^2 \cdot E \cdot (t_d - 2 \cdot d)^2 = 1 \Rightarrow q_d \cdot h^4 = 2 \cdot t_d^2 \cdot E \cdot (t_d - 2 \cdot d)^2 \text{ con } d = t_d / 4;$$

$$q_d \cdot h^4 = t_d^4 \cdot E / 2 \Rightarrow (h / t_d)^4 = E / 2 \cdot q_d$$

que por coherencia coincide con el valor del dominio arco 1.

Supongamos ahora que tenemos un muro con una esbeltez tal que colapse por pandeo en el dominio arco 1. Si aumentamos el espesor del muro la esbeltez disminuirá y llegará un momento que el efecto por pandeo no sea limitativo en este dominio, aunque si podrá serlo en el dominio arco 2. Si igualamos el valor de carga máxima que soporta el dominio arco 2 por resistencia a compresión con el valor de carga máximo soportado por pandeo, podemos obtener el valor de la esbeltez máxima para que no actúe el pandeo en este dominio. Concretando para el valor de q_d cuando $d = t_d / 4$ y sustituyendo:

$$q_d = f_d \cdot t_d^2 / h^2 \Rightarrow \mathbf{(h / t_d)^2 = E / 2 \cdot f_d}$$

Este valor de la esbeltez que nos marca la aparición del dominio arco 2, es decir que con una esbeltez menor a esta relación el agotamiento del dominio arco 1 se produce siempre por el alcance de la tensión de la resistencia a compresión del material y nunca por efectos de segundo orden. En un muro con esta esbeltez los valores de q_d máximas que puede resistir el muro para los dominios arco 1, arco 2 y por pandeo coinciden.

Por lo tanto, hay que recalcar que en el dominio arco 2 los efectos de segundo orden, siempre anulan de raíz el dominio, pudiendo el muro desarrollar solamente el modelo tensional del dominio arco 1, y agotándose este dominio, como ya se ha dicho, por los efectos de segundo orden.

Por otra parte, si la esbeltez del muro es menor, entonces el muro se agota en el dominio arco 2 por resistencia tal como se indicó anteriormente, cuando se llega a un crítico. Si comparamos la carga máxima que se puede resistir por el límite de resistencia a compresión y por pandeo en el dominio arco 2 cuando ambas son de igual valor:

$$\text{Límite de resistencia a compresión: } \Rightarrow q_d = f_d \cdot (t_d / h)^2$$

$$\text{Límite por pandeo: } \Rightarrow q_d = 1/2 \cdot E \cdot (t_d / h)^4$$

se puede advertir que el valor de la segunda ecuación crece más rápido al disminuir la esbeltez:

$$\text{Límite de resistencia a compresión: } \Rightarrow d q_d / d(t_d / h) = 2 \cdot f_d \cdot (t_d / h)$$

$$\text{Límite por pandeo: } \Rightarrow d q_d / d(t_d / h) = 2 \cdot E \cdot (t_d / h)^3$$

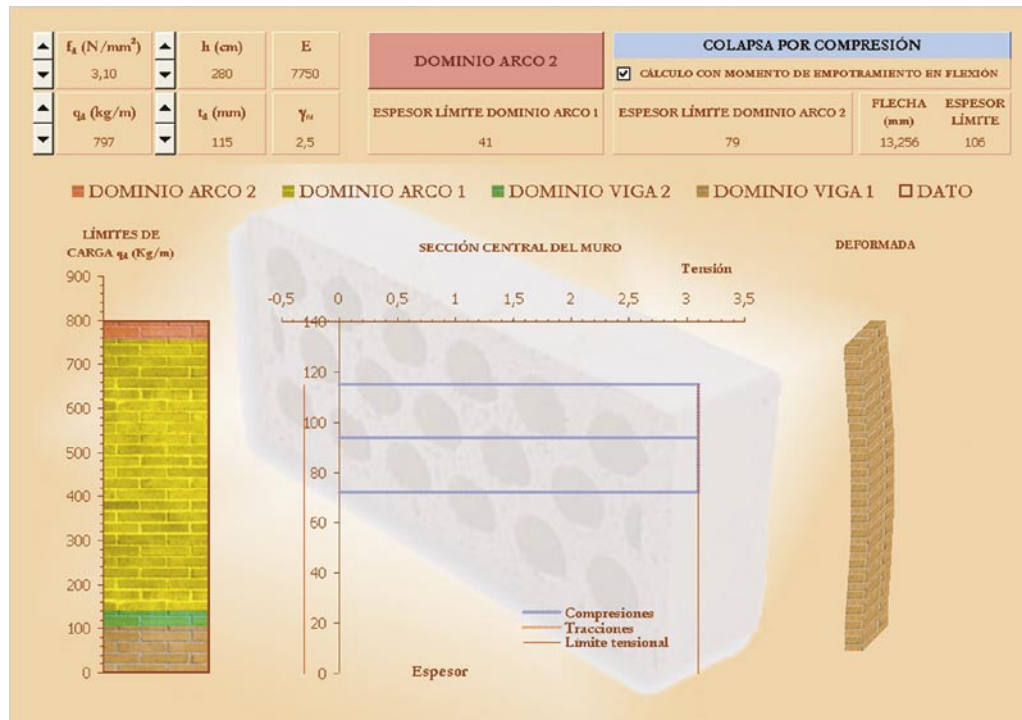
$$2 \cdot E \cdot (t_d / h)^3 > 2 \cdot f_d \cdot (t_d / h) \Rightarrow (t_d / h)^2 > f_d / E \Rightarrow 2 \cdot f_d / E > f_d / E$$

por lo que queda demostrado que si la esbeltez es menor de $(E / 2 \cdot f_d)^{1/2}$ la q_d máxima exterior que puede soportar un muro es $2 \cdot f_d \cdot t_d \cdot (t_d - f_d \cdot h^2 / t_d \cdot E) / h^2$.

Si $(h / t_d)^2 < E / 2 \cdot f_d$, los límites de q_d del dominio arco 2 son:

$$\mathbf{16 \cdot f_d \cdot (t_d / 2 + (t_d^2 - 3 \cdot h^2 \cdot f_d / 2 \cdot E)^{1/2} / 2)^2 / 9 \cdot h^2} < q_d < \mathbf{2 \cdot f_d \cdot t_d \cdot (t_d - f_d \cdot h^2 / t_d \cdot E) / h^2}$$

En la página siguiente se incluye el esquema habitual: Resumiendo:



DOMINIO	LÍMITES DE CARGA (q_d)			FLECHA (d)
DOMINIO VIGA 1 (con colaboración empotramiento)	0	$< q_d <$	$2 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / h^2$	$q_d \cdot h^4 / 32 \cdot E \cdot t_d^3$
DOMINIO VIGA 1 (sin colaboración empotramiento)	0	$< q_d <$	$4 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / 3 \cdot h^2$	$5 \cdot q_d \cdot h^4 / 32 \cdot E \cdot t_d^3$
DOMINIO VIGA 2	$2 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / h^2$	$< q_d <$	$8 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / 3 \cdot h^2$	$2 \cdot q_d \cdot h^4 / 32 \cdot E \cdot t_d^3$
DOMINIO ARCO 1 (con colaboración empotramiento)	$8 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / 3 \cdot h^2$	$< q_d <$	El valor mínimo de: $16 \cdot f_d \cdot (t_d / 2 + (t_d^2 - 3 \cdot h^2 \cdot f_d / 2 \cdot E)^{1/2} / 2)^2 / 9 \cdot h^2$ $\frac{1}{2} \cdot E \cdot (t_d / h)^4$	$27 \cdot q_d \cdot h^4 / 128 \cdot (t_d - d)^3 \cdot E$
DOMINIO ARCO 1 (sin colaboración empotramiento)	$4 \cdot f_{xd1} \cdot t_d^2 / 3 \cdot h^2$	$< q_d <$	El valor mínimo de: $16 \cdot f_d \cdot (t_d / 2 + (t_d^2 - 3 \cdot h^2 \cdot f_d / 2 \cdot E)^{1/2} / 2)^2 / 9 \cdot h^2$ $\frac{1}{2} \cdot E \cdot (t_d / h)^4$	$27 \cdot q_d \cdot h^4 / 128 \cdot (t_d - d)^3 \cdot E$
DOMINIO ARCO 2 Si $(h / t_d)^2 < E / 2 \cdot f_d$	$16 \cdot f_d \cdot (t_d / 2 + (t_d^2 - 3 \cdot h^2 \cdot f_d / 2 \cdot E)^{1/2} / 2)^2 / 9 \cdot h^2$	$< q_d <$	$2 \cdot f_d \cdot t_d \cdot (t_d - f_d \cdot h^2 / t_d \cdot E) / h^2$	$q_d \cdot h^4 / 4 \cdot t_d^2 \cdot E \cdot (t_d - 2 \cdot d)$

NOMENCLATURA

- M_{Rd} Momento flector resistente de cálculo del muro
- M_{Sd} Momento flector solicitante de cálculo del muro
- q_{Rd} Resistencia lateral de cálculo por unidad de longitud de muro
- q_d Carga solicitante de cálculo por unidad de longitud de muro
- f_d Resistencia a cálculo a compresión de la fábrica
- t_d Espesor resistente a acción lateral del muro (lo que corresponda, espesor de muro en flexión o canto de arco).
- h Altura del muro
- E Módulo de elasticidad
- f_{xd1} Resistencia de cálculo a flexión
- d flecha de muro a mitad de la altura.