

Análisis por elementos finitos para modelar muros de obra de fábrica sometidos a compresión excéntrica

Introducción

En el presente informe se describe el análisis por elementos finitos utilizado para la modelización de los muros de obra de fábrica sin refuerzo ensayados como referencia de comparación. Así mismo se presentan los resultados obtenidos como validación del modelo numérico que servirá como base para el desarrollo posterior del análisis de muros reforzados.

Objetivos

El principal objetivo es validar una metodología de análisis por elementos finitos para su aplicación en el modelado de muros de carga de obra de fábrica sin reforzar sometidos a compresión excéntrica. Para alcanzar dicho objetivo principal se plantean los siguientes objetivos parciales:

- Definir detalladamente el análisis propuesto para poder ser reproducido.
- Aplicar la metodología a los muros sin reforzar ensayados en el laboratorio para validar la precisión de la herramienta.
- Obtener conclusiones sobre los principales parámetros que influyen en el modelo y su aplicabilidad.

Definición del modelo

El análisis por elementos finitos propuesto se basa en simplificar el problema tridimensional real a un caso bidimensional de deformación plana. Esto implica suponer que las deformaciones a lo largo del ancho de la pared son muy pequeñas y el caso aplica directamente para muros de ancho considerable (la mayoría de muros de carga).

- Geometría

La geometría utilizada en todas las simulaciones representa la forma real de cada muro en su dirección fuera del plano. El contorno de la sección vertical del muro (ver Figura 1) se define a partir de las mediciones de cada pared.

El modelo implementado se trata de un micromodelo simplificado, es decir, que no se distingue entre el mortero y los ladrillos sino que se contempla el uso de un material, la obra de fábrica, que tiene las propiedades homogeneizadas del compuesto mortero + ladrillo. No obstante, para representar correctamente la influencia de las juntas de mortero en el comportamiento global de la estructura sí que se definen estas discontinuidades. Por lo tanto,

Attribution-Noncommercial 2.5

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/es/deed.ca>



las hiladas reales corresponden con cada una de las piezas rectangulares que se ven en la Figura 1.

Para la simulación de las rótulas se han modelado dos piezas triangulares cuyo objetivo es el de representar acuradamente las condiciones de contorno, fijando la excentricidad real en cada uno de los extremos del muro y la desalineación vertical entre estas rótulas correspondiente a las medidas reales. La presencia de un vértice opuesto al muro en cada extremo permite modelar la condición de articulación de manera directa al estar situado este mismo vértice en la posición del centro del eje de la rótula real (punto de rotación).

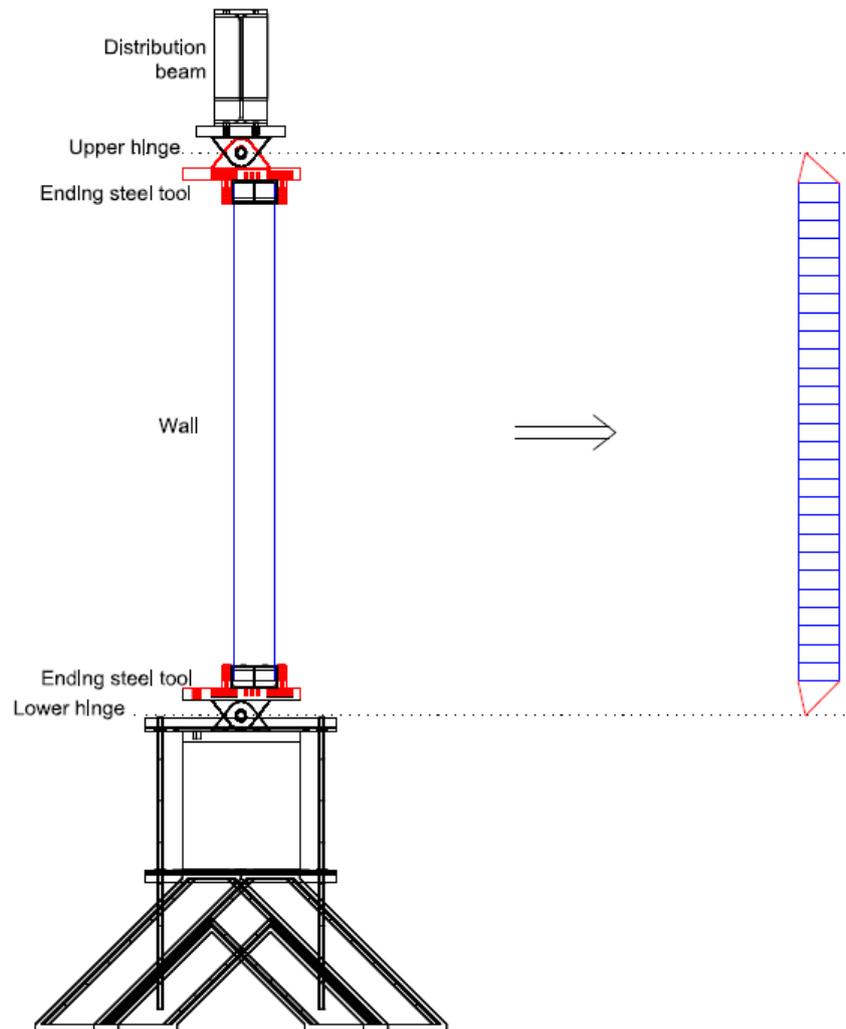


Figura 1. Simplificación y modelado geométrico de los muros

- Materiales y contactos

Para la modelación de los muros experimentalmente caracterizados en la presente investigación se ha utilizado un único material, la obra de fábrica, que de forma homogeneizada representa la combinación de piezas cerámicas y juntas de mortero a compresión. Para representar la posibilidad de rotura frágil por apertura de las juntas de

mortero a flexo-tracción, se han definido contactos representando las juntas de cada hilada con la correspondiente resistencia a flexotracción y energía de fractura. Las principales características de la obra de fábrica se recogen en la Tabla 1. Todas se han obtenido experimentalmente excepto la energía de fractura que se ha deducido a partir de la resistencia a tracción y el coeficiente de Poisson que se ha estimado a partir de referencia bibliográficas.

Muros	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de deformación lineal (MPa)	Coficiente de Poisson	Energía de fractura del primer modo (N/m)
W#1	18,2	0,23	780	0,35	8,4
W#2- W#5	12,9	0,36	780	0,35	13
W#6- W#9	13,7	0,36	780	0,35	13
W#10- W#20	10,8	0,36	780	0,35	13

Tabla 1. Características mecánicas de la obra de fábrica

A compresión se supone un comportamiento elástico-perfectamente plástico.

Los contactos para representar las juntas y posibilitar el fallo por su apertura se simulan siguiendo un modelo denominado *Cohesive Zone Model (CZM)* que define un comportamiento elástico lineal a tracción (caracterizado por el mismo módulo de deformación lineal que a compresión) hasta rotura (cuando se alcanza la resistencia a tracción) cuando se produce una pérdida de resistencia lineal con la deformación definida por la energía de fractura (Tabla 1). El comportamiento puede verse gráficamente en la Figura 2.

Finalmente, los objetos triangulares situados en cada extremo del muro se caracterizan con las propiedades del acero estructural por defecto. Su simulación no forma parte del estudio y el acero es un material conocido que aporta una rigidez muy superior a la de la fábrica permitiendo la simplificación de la rótula real a un triángulo.

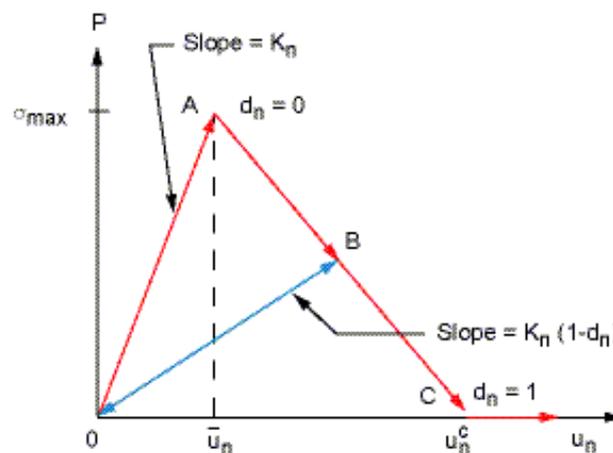


Figura 2. Relación fuerza-apertura de fisura para el CZM bilineal. Fuente: ANSYS

- Malla

Los elementos usados para discretizar el muro son cuadriláteros uniformes formando una malla regular y ordenada. El tamaño promedio del elemento finito 2D es de 20mm para los muros W#1-W#9 y de 5mm para los muros W#10-W#20. Estos elementos se denominan PLANE183 en el software de modelización utilizado (ANSYS® v.12.1) y se caracterizan por ser cuadriláteros con 8 nodos e integración cuadrática de los desplazamientos.

Además, para la modelación de los contactos que representan las juntas se utilizan los elementos denominados CONTA172 y TARGE169 que son, respectivamente, un elemento de contacto y el objetivo (segmento) contra el que contacta. Estos elementos son necesarios para la implementación del CZM en la simulación.

Una malla tipo puede observarse en la Figura 3

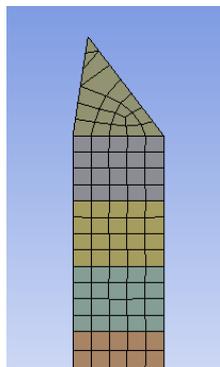


Figura 3. Malla tipo para los muros W#1-W#9 con elementos de 20mm de lado

- Condiciones de contorno y de carga

El vértice inferior del triángulo situado en el extremo inferior del modelo de cada muro se fija en el espacio permitiendo su rotación. Esta condición permite definir inequívocamente la posición del centro de giro de la rótula real respecto del muro. En el vértice superior del triángulo situado en la parte superior del modelo del muro se impide el movimiento horizontal (coincidente con el movimiento fuera del plano del muro) mientras que simultáneamente se impone un desplazamiento descendiente que supone una forma indirecta de aplicación de la carga.

La fuerza aplicada se obtiene como la reacción fruto de imponer el desplazamiento.

- Particularidades del análisis y obtención de resultados

El análisis permite las grandes deformaciones (para representar acuradamente la posibilidad de fallo por apertura de las juntas) y por lo tanto es no lineal en el cálculo. Además es no lineal por la geometría irregular y por la definición de los materiales y los contactos. El análisis incrementa paso a paso el descenso del vértice superior hasta alcanzar una carga máxima que

pasado el punto crítico disminuye abriendo las juntas del modelo. Finalmente, la resolución del modelo se vuelve inestable porque el problema deriva en un mecanismo de piezas independientes y la solución del sistema de ecuaciones asociado no converge (ver Figura 4)

La carga máxima alcanzada está calculada por 1m de ancho (por la hipótesis de deformación plana) y debe de multiplicarse por el ancho real de los muros ensayados (aproximadamente 900mm en todos los casos)

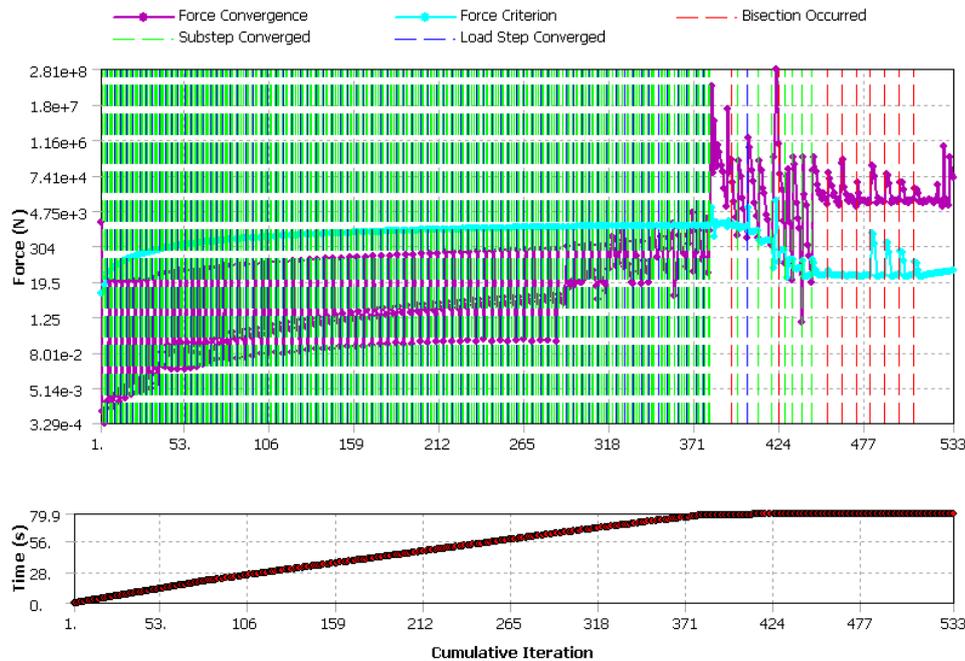


Figura 4. Análisis paso a paso y pérdida de convergencia después de alcanzar la carga máxima

Resultados obtenidos para los muros sin reforzar

Para el análisis de los resultados se definen variables adimensionales que permitirán la comparación entre series distintas:

$\phi = P_{\max} / P_u$ es la variable adimensional de la carga máxima soportada (P_{\max}) sobre la carga máxima que podría soportar en teoría el muro en el caso de compresión uniforme y concéntrica (P_u).

e/t es el ratio de la excentricidad de aplicación de la carga en dirección fuera del plano (e) respecto del grosor del muro (t).

$\lambda = H_{ef}/t$ es la esbeltez del muro, definida como la altura efectiva (distancia entre centros de rotación de las rótulas) entre el grosor del muro.

En primer lugar se analiza la bondad del modelo comparando sus resultados numéricos con los obtenidos experimentalmente por otros investigadores:

- Comparación con los experimentos de Watstein et al. (Watstein & Allen, 1970)

Para la modelización de estos casos se ha utilizado la información recogida en (Watstein & Allen, 1970) para la caracterización de la geometría de los muros y los materiales que los formaban.

En la Figura 5 se pueden ver los resultados obtenidos con el modelo numérico comparados con los resultados obtenidos al aplicar las normativas más comunes (Eurocódigo-6 i ACI-530) y los resultados experimentales. Cabe destacar que el modelo propuesto prevé adecuadamente la carga máxima cometiendo un error relativo absoluto promedio del 10,5% (inferior a la dispersión de los propios resultados experimentales). Se observa como el método de análisis descrito obtiene resultados más próximos a los experimentales para los casos con mayor excentricidad y/o esbeltez para los cuales el proceso de colapso por apertura de las juntas de mortero es más probable indicando que la modelización del comportamiento a flexo-tracción de la fábrica es incluso más certero usando el presente modelo numérico que el comportamiento a compresión. Las normativas son más conservadoras proponiendo resultados siempre del lado de la seguridad excepto el caso de la ACI-530 (sin factores de seguridad) para los muros menos esbeltos y con la carga más centrada.

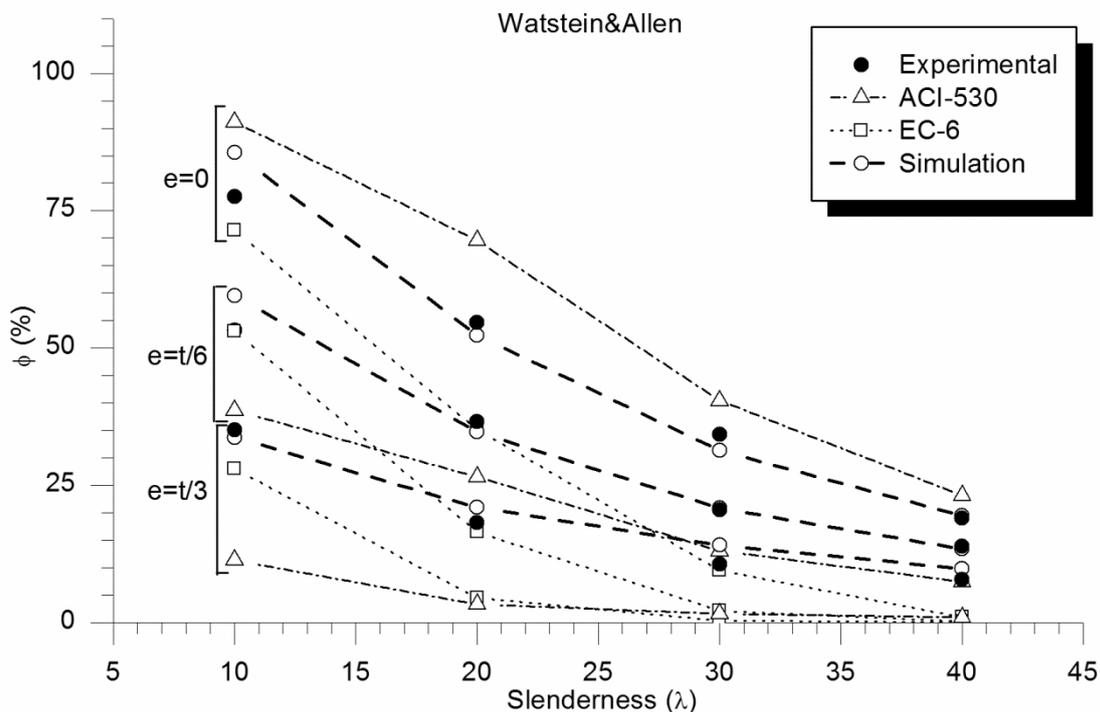


Figura 5. Resultados del modelo numérico simulando muros ensayados por Watstein et al.

- Comparación con los experimentos de Kirtschig et al. (Kirtschig & Asntötz, 1991)

En la Figura 6 se observan los resultados experimentales de la campaña de (Kirtschig & Asntötz, 1991) junto con los resultados analíticos del Eurocódigo-6, la ACI-530 y el modelo numérico propuesto. Para el modelado de los muros se ha utilizado la información proporcionada en (Kirtschig & Asntötz, 1991).

Cabe destacar que el presente modelo numérico es el método de cálculo que obtiene resultados con un menor error relativo absoluto promedio (28,4%). Este error es comparable a la dispersión de los resultados experimentales. Es destacable por contraposición con el caso anterior, que los resultados del modelo son particularmente buenos para los casos con menor excentricidad y/o esbeltez demostrando que el rango de aplicabilidad de la herramienta de cálculo aquí presentada no está limitado a los muros más críticos.

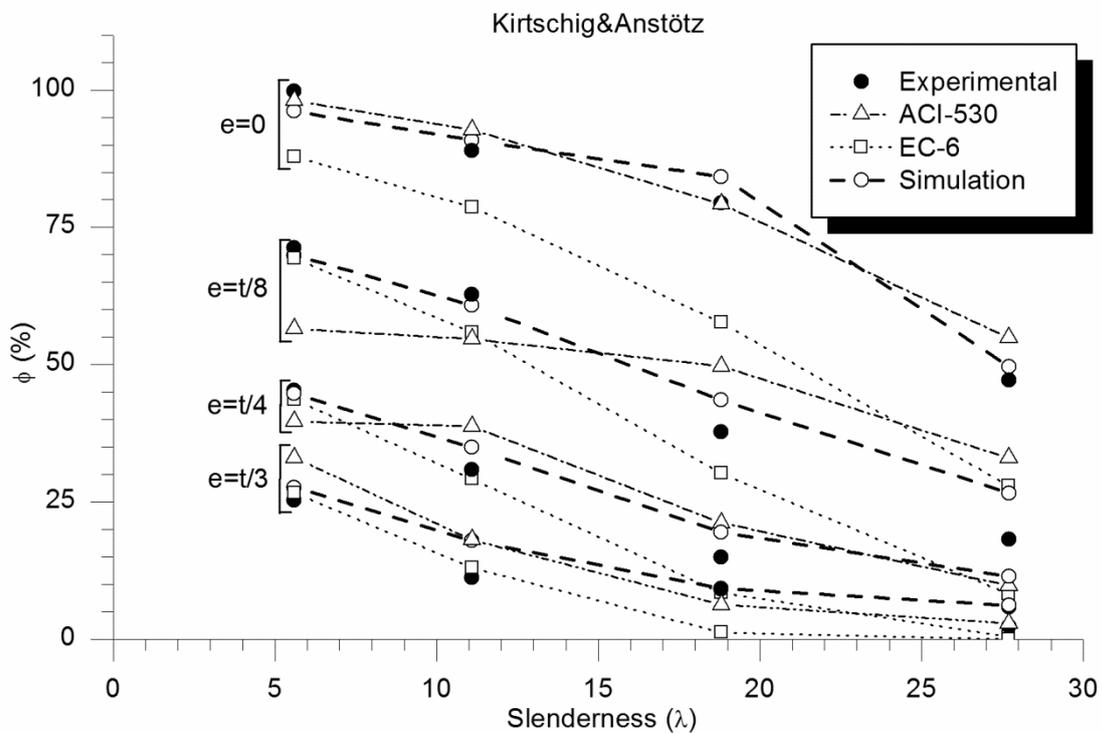


Figura 6. Resultados del modelo numérico simulando muros ensayados por Kirtschig et al.

A continuación se comparan los resultados del modelo numérico con los resultados experimentales de la campaña de ensayos del presente proyecto de investigación.

Para empezar debe destacarse que de entre los muros ensayados en esta campaña se descartan tres del análisis:

- Muro W#4 porque la condición de contorno inferior (empotramiento) no se corresponde con el resto de casos y su comparación no aporta elementos de juicio al presente estudio de análisis numérico.
- Muro W#5 porque su comportamiento experimental es distinto del resto de casos de geometría comparable (W#1-W#9) y por lo tanto no resulta útil su comparación con un modelo de cálculo orientado a la máxima representatividad.
- Muro W#17 porque su geometría es única (doble hoja) e incluye efectos no considerados en el modelo inicialmente desarrollado para muros de una sola hoja.

En los gráficos de las Figuras 7 a 9 puede observarse que junto al valor experimental de la carga máxima (presentado de forma adimensional) se ha graficado un rango de posibles soluciones del modelo numérico correspondientes al rango razonable de las variables de entrada. Este análisis es necesario dada la gran dispersión observada en parámetros tan determinantes como las resistencias a tracción y compresión de la obra de fábrica y el módulo de deformación elástica.

Se puede observar como el modelo simula correctamente los casos de mayor esbeltez (Figura 4) para los cuales el error relativo promedio es de 38,4% comparable con la dispersión de los valores de la propiedades mecánicas de la obra de fábrica.

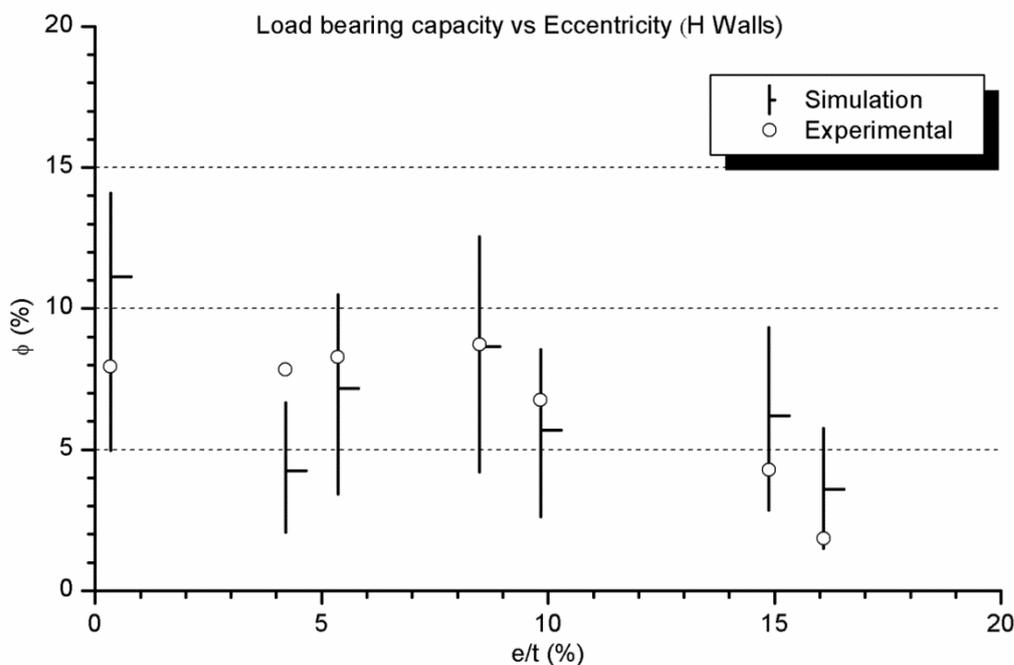


Figura 7. Resultados del modelo numérico simulando los muros de mayor esbeltez de la presente campaña experimental

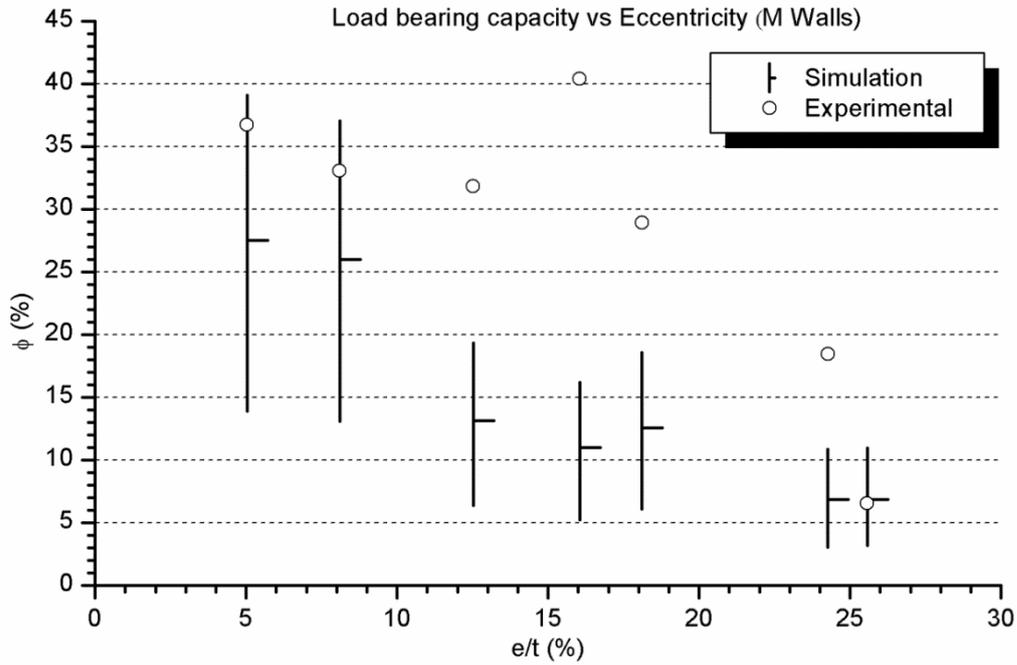


Figura 8. Resultados del modelo numérico simulando los muros de esbeltez media de la presente campaña experimental

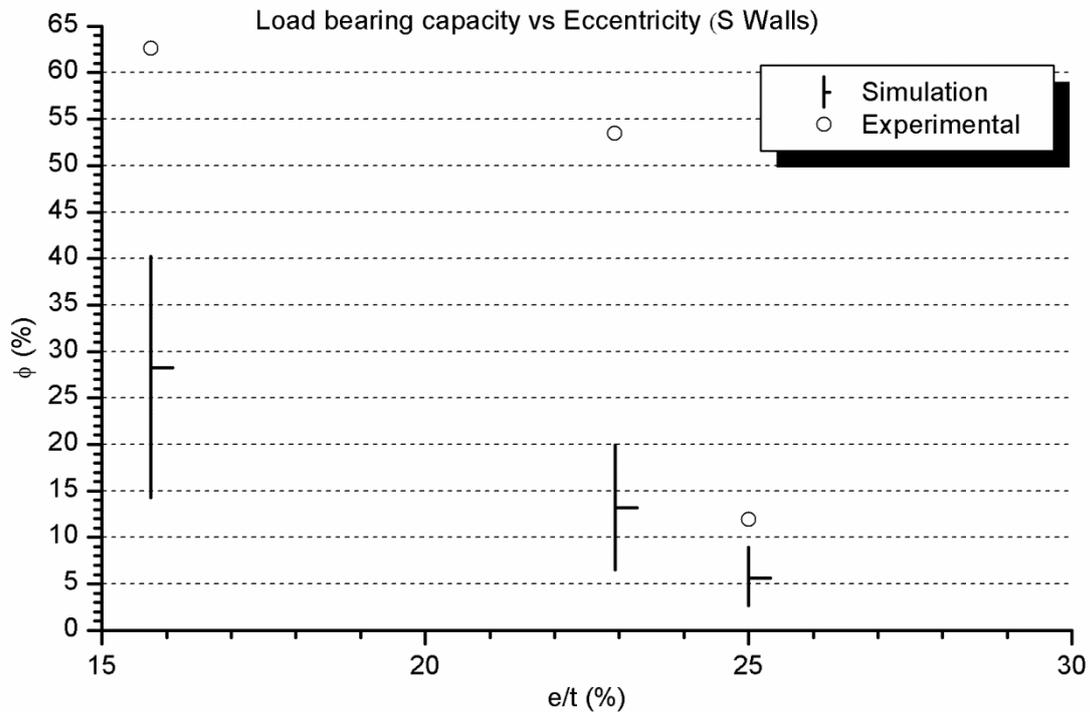


Figura 9. Resultados del modelo numérico simulando los muros de menor esbeltez de la presente campaña experimental

En la Figura 8 se puede ver una tendencia a subestimar la capacidad de carga de los muros ensayados, en particular, para los casos de mayor excentricidad. Finalmente, en la Figura 9 se confirma la tendencia y el modelo subestima los muros menos esbeltos (W#18-W#20) que rompen con un modo de fallo vinculado al agotamiento a compresión de la sección del muro.

Los resultados del modelo numérico para los casos de la presente campaña experimental pueden consultarse en la Tabla 2.

Muro	Carga máxima experimental (kN)	Límite inferior de la carga calculada con el modelo (kN)	Carga representativa calculada con el modelo (kN)	Límite superior de la carga calculada con el modelo (kN)
W#1	169,3	91,8	144,1	44,9
W#2	65,7	95,0	143,1	43,6
W#3	133,8	132,7	192,1	64,4
W#6	30,0	58,6	93,6	24,4
W#7	134,7	116,5	170,6	55,7
W#8	129,4	181,0	229,2	80,9
W#9	109,8	92,7	139,1	42,6
W#10	423,9	333,2	475,2	167,8
W#11	371,2	161,4	238,3	78,0
W#12	471,1	352,8	501,3	178,1
W#13	83,8	88,0	140,6	40,8
W#14	518,5	140,8	207,5	67,0
W#15	236,7	87,7	139,0	39,0
W#16	408,2	168,7	248,2	81,7
W#18	803,4	362,4	515,8	183,7
W#19	686,1	169,0	256,0	83,4
W#20	152,6	72,0	114,4	34,5

Tabla 2. Resultados del modelo numérico para los muros de la presenta campaña experimental.

Finalmente, se deben destacar los resultados generales y cualitativos de la observación del comportamiento estructural previsto por el modelo para los casos analizados. Los siguientes puntos son de consideración:

- La distribución de tensiones en la obra de fábrica indica que en general el fallo por aplastamiento del material está lejos de producirse. De hecho las tensiones de compresión se mantienen en valores realmente bajos comparados con la resistencia a compresión estimada para la obra de fábrica en la mayor parte de los casos (ver la Figura 10). Únicamente en los casos de menor esbeltez y carga prácticamente concéntrica se alcanzan valores de tensión de compresión que sugerirían un fallo por aplastamiento del material (ver Figura 11).

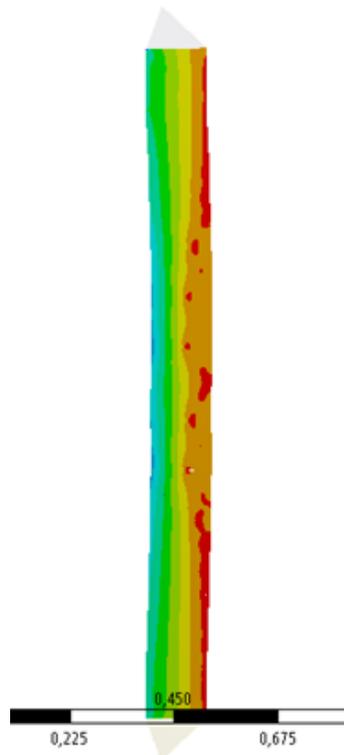


Figura 10. Distribución de tensiones para la carga máxima (muro 13). La compresión máxima es de 3,5MPa.

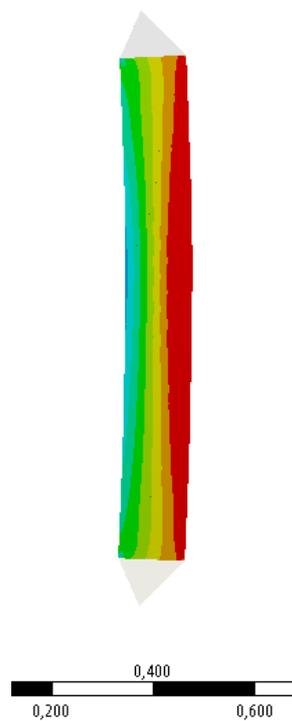


Figura 11. Distribución de tensiones verticales para el muro 18. Únicamente la parte roja está sometida a tracción y la compresión máxima supera los 10MPa.

- La distribución de tensiones en las juntas y su progresión indica que el modelo propuesto funciona en la modelización del contacto que se abre a partir de una tensión umbral (ver Figura 12). Además puede observarse el progreso de apertura de las juntas.

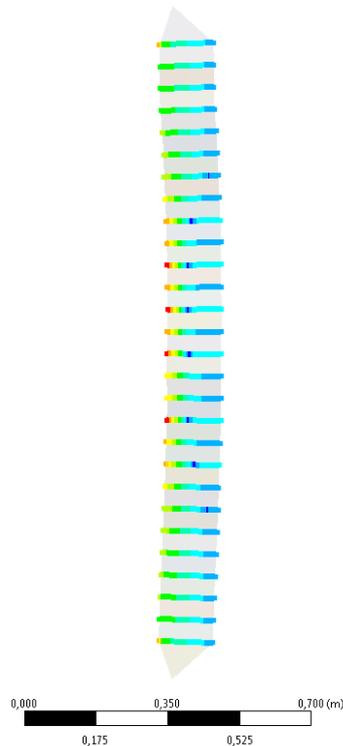


Figura 12. Distribución de la presión de contacto. Avance de la apertura de fisura.

- El fallo más común según las simulaciones llevadas a cabo sobre los casos elegidos es por formación de un mecanismo al generarse una rótula aproximadamente a media altura. Esta rótula está asociada a la apertura de una junta entre hiladas del muro modelado.

Conclusiones

Una vez validado el modelo numérico y analizados los resultados obtenidos con su aplicación se pueden detallar las siguientes conclusiones de aplicabilidad práctica:

- Es imprescindible definir detalladamente la geometría del muro a calcular y, en particular, las irregularidades fuera del plano principal ya que se ha comprobado que la geometría tiene una gran influencia en los resultados.
- Se requiere conocer de forma precisa el valor el módulo elástico de la obra de fábrica ya que este parámetro influye en gran medida en cómo se deformará la pared y por lo tanto en cómo se generará la rótula necesaria para el mecanismo de colapso. En consecuencia, la carga máxima calculada depende en buena medida de este parámetro.
- La resistencia a tracción y compresión también influyen en la capacidad de carga calculada aunque su influencia es menor que la de los parámetros anteriores.

- El comportamiento no lineal de las juntas, el modo de aplicación indirecta de la carga en la simulación, las condiciones de contorno y el método de análisis paso a paso han demostrado ser piezas claves para la obtención de resultados comparables a la experimentación.

Además, en general se puede decir que el modelo funciona adecuadamente en un amplio rango de casos que incluyen el fallo por compresión (muros menos esbeltos y con la carga centrada) hasta el fallo por formación de mecanismo (muros esbeltos y/o cargas muy excéntricas).

Se concluye que la metodología desarrollada es válida para la simulación de muros de obra de fábrica sin reforzar.