

COMPORTAMIENTO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA CON ABERTURAS SUJETOS A CARGAS FUERA DEL PLANO

J. L. Varela-Rivera¹, S. Chan-Esquivel¹, L. E. Fernández-Baqueiro¹ y J. A. Moreno-Herrera¹

RESUMEN

En este trabajo se estudió el comportamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Se ensayaron en el laboratorio cuatro muros a escala natural, tres con aberturas y uno sólido. Las variables de estudio fueron el tipo de abertura y el tipo de castillo intermedio. Se determinó la resistencia analítica fuera del plano de cada muro utilizando los métodos del puntal de compresión, líneas de fluencia y puntal bidireccional. Se compararon las resistencias analíticas con sus correspondientes experimentales. Con base en los resultados experimentales se concluye que la resistencia fuera del plano incrementa conforme aumenta la relación de aspecto del panel del muro y la rigidez del castillo intermedio. Con base en la comparación de resultados analíticos y experimentales se concluye que el método más adecuado para determinar la resistencia fuera del plano es el del puntal bidireccional.

Palabras clave: mampostería confinada, resistencia fuera del plano, aberturas, método del puntal bidireccional.

ABSTRACT

In this work, the behavior of confined masonry walls subjected to uniform out-of-plane loads was studied. Four full-scale walls were tested in the laboratory: three with openings and one without openings. The variables studied were the type of opening and the type of interior vertical confining element. Analytical out-of-plane strengths were determined using the compressive strut, the yielding line, and the bidirectional strut methods. Analytical and experimental out-of-plane strengths were compared. Based on experimental results it was concluded that, the out-of-plane strength increases as the aspect ratio of the wall panel and the in-plane stiffness of the interior vertical confining element increase. Based on the comparisons between analytical and experimental results it was concluded that the bidirectional strut method predicts more accurately the out-of-plane strength of the confined walls studied.

Keywords: confined masonry, out-of-plane strength, openings, bidirectional strut method.

RESUMO:

Neste trabalho foi estudado o comportamento dos muros de alvenaria confinados sujeitos a cargas uniformes fora do plano. Foram testados em laboratório, quatro muros em escala natural, três com aberturas e um sólido. As variáveis estudadas foram o tipo de abertura e o tipo de coluna intermediária. A resistência analítica fora do plano de cada muro foi determinada utilizando os métodos de escoras de compressão, linhas de rendimento e escora bidireccional. As resistências analíticas foram comparadas com o seu correspondente experimental. Com base nos resultados experimentais, concluiu-se que a resistência fora do plano se incrementa conforme aumenta a relação de aspecto do painel do muro e a rigidez da coluna intermediária. Baseados na comparação dos resultados analíticos e experimentais concluiu-se que o mais adequado para determinar a resistência fora do plano é o método de escora bidireccional.

Palavras chave: alvenaria confinada, resistência fora do plano, aberturas, método da escora bidireccional.

1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento fuera del plano de muros de mampostería ha sido poco estudiado en comparación con el comportamiento en su plano. Existen algunos estudios sobre el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería no

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Av. Industrias No Contaminantes por Anillo Periférico Norte S/N, C.P. 97310, Mérida, Yucatán, Tel: (999) 9300569.

E-mail: vrivera@uady.mx

Artículo recibido el 20 de enero de 2015 y aprobado el 2 de junio del 2015.

reforzada (Drysdale y Essawy, 1988; Middleton y Drysdale, 1995; Griffith y Vakulic, 2007), reforzada (Abbout *et al.*, 1996; Zhang *et al.*, 2001), tipo diafragma (Dawe y Seah, 1989; Abrams *et al.*, 1996; Klingner *et al.*, 1996; Flanagan y Bennett, 1999; Henderson *et al.*, 2003; Tu *et al.*, 2010) y confinada (Varela-Rivera *et al.*, 2011, 2012a, 2012b; Moreno-Herrera *et al.*, 2014b, Singhal y Rai, 2014). Con base en estos estudios, se encontró que las principales variables que afectan el comportamiento fuera del plano son: las condiciones de apoyo, la relación de aspecto (altura entre longitud del muro), la relación de esbeltez (altura entre espesor del muro), la rigidez en el plano de los elementos de la periferia, la carga axial, el tipo de pieza y las aberturas.

Por otro lado, se encontró que el comportamiento fuera del plano de muros confinados es diferente al de muros no reforzados, reforzados y diafragma. Las diferencias están relacionadas con los detalles de refuerzo y el proceso constructivo de cada muro. Por ejemplo, entre muros confinados y diafragma se tienen las siguientes diferencias: los muros confinados consisten de un panel de mampostería no reforzada y elementos confinantes en su periferia. Los elementos confinantes forman un marco de concreto reforzado flexible. En este caso, primero se construye el panel de mampostería y posteriormente los elementos confinantes. Por su parte, los muros diafragma consisten de un panel de mampostería reforzada o no reforzada y un marco de concreto reforzado o de acero estructural. En general, el marco es más rígido que el de muros confinados. Para el caso de muros diafragma, primero se construye el marco y posteriormente el panel de mampostería. Debido a este proceso constructivo pueden existir holguras entre el marco y el panel de mampostería. La resistencia fuera del plano de muros confinados y diafragma está asociada a la formación de un mecanismo de arco (Dawe y Seah, 1989; Abrams *et al.*, 1996; Varela-Rivera *et al.*, 2011, 2012a, 2012b; Moreno-Herrera *et al.*, 2014b). Las holguras en los muros diafragma retardan la formación del mecanismo de arco (Dawe y Seah, 1989; Abrams *et al.*, 1996). Para el caso de muros confinados se han estudiado las siguientes variables: condiciones de apoyo, relación de aspecto, relación de esbeltez, rigidez de los elementos confinantes y carga axial. Los estudios anteriores se han realizado con muros confinados sólidos, por lo que existe la necesidad de estudiar muros con diferentes tipos de aberturas como son las puertas y las ventanas. Este estudio permitirá complementar el conocimiento sobre el comportamiento fuera del plano de muros confinados.

La resistencia fuera del plano de muros de mampostería se puede calcular utilizando diferentes métodos analíticos. Para el caso de muros no reforzados, los métodos más utilizados son el de líneas de fluencia (Drysdale y Essawy, 1988; Middleton y Drysdale, 1995; Drysdale *et al.*, 2004) y líneas de falla (Drysdale y Essawy, 1988). Para muros reforzados es el de líneas de fluencia (Zhang *et al.*, 2001). Para muros diafragma son el de líneas de fluencia modificada (Dawe y Seah, 1989) y puntal de compresión (Abrams *et al.*, 1996). Por su parte, para muros confinados los más utilizados son el del puntal de compresión (Varela-Rivera *et al.*, 2011; 2012a), líneas de fluencia (Varela-Rivera *et al.*, 2011, 2012a, 2012b) y puntal bidireccional (Moreno-Herrera *et al.*, 2014a, 2014b).

El método del puntal de compresión se basa en la formación de un mecanismo de arco en la dirección vertical. Se supone que posterior a la formación de un patrón de agrietamiento el muro se divide en segmentos. Debido a la rotación de los segmentos se generan puntales de compresión. Se supone que la fuerza en los puntales es constante a lo largo de la longitud del muro. La resistencia fuera del plano se obtiene mediante el equilibrio entre las fuerzas externas y las componentes fuera del plano de los puntales de compresión. Se supone que la falla de los muros está asociada al aplastamiento de la mampostería. Por su parte, el método de líneas de fluencia se basa en el equilibrio de los trabajos externos e internos. Se supone la formación de un patrón de agrietamiento que divide al muro en segmentos. Los trabajos externos se determinan en función de las cargas que actúan en los segmentos y sus correspondientes desplazamientos. Los trabajos internos se obtienen con los momentos resistentes y las rotaciones de los segmentos. Finalmente, el método del puntal bidireccional es un proceso iterativo basado en la formación de un mecanismo de arco. Se supone, como en el caso anterior, que el muro se divide en segmentos. Se supone la formación de puntales de compresión en dos direcciones ortogonales. La resistencia fuera del plano se determina mediante el equilibrio fuera del plano entre las fuerzas externas y las componentes fuera del plano de los puntales de compresión. Se consideran dos tipos de falla asociados al panel de mampostería: la inestabilidad estática de los segmentos y el aplastamiento de la mampostería.

En este trabajo se estudió el comportamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Se ensayaron en el laboratorio muros a escala natural, tres muros con aberturas y un muro sólido. Las variables de estudio fueron el tipo de abertura y el tipo de castillo intermedio. Se determinó la resistencia analítica fuera del plano de cada muro utilizando los métodos del puntal de compresión, líneas de fluencia y puntal bidireccional. Se compararon las resistencias analíticas con sus correspondientes experimentales.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se consideraron cuatro muros de mampostería confinada a escala natural (Muros M1 a M4). La longitud y la altura de los muros fue de 3.57 m y 2.71 m, respectivamente. Se consideró un muro sólido (M1) y tres con aberturas (M2 a M4). Se incluyeron dos tipos de aberturas: puerta y ventana. Las dimensiones de las puertas de los muros M2 y M4 fueron de 1.08 m × 2.30 m (longitud × altura), respectivamente. Las dimensiones de la ventana del muro M3 fueron de 1.08 m × 0.90 m (longitud × altura). Detalles de la geometría de los muros se presentan en la figura 1. Los muros se construyeron utilizando bloques huecos de concreto con dimensiones nominales de 0.15 m × 0.20 m × 0.40 m (espesor × altura × longitud). Cada bloque tenía tres celdas verticales con un espesor promedio de las paredes de las celdas de 25 mm. Los bloques se obtuvieron de un mismo lote de producción. Los muros se construyeron traslapando los bloques a la mitad. Se utilizó mortero en proporciones por volumen 1:2:7 (cemento Portland: cal: arena). El mortero se colocó tanto en las caras horizontales como en las verticales de los bloques. En las primeras se colocó en las paredes exteriores de las celdas, paralelas a la longitud de los bloques, y en las segundas sobre toda el área. El espesor promedio de las juntas de mortero fue de 10 mm. Para la elaboración del mortero y del concreto se utilizó cemento portland compuesto 30-R (CPC-30R). La construcción de los muros se realizó a plomo y nivel por un trabajador experimentado.

La dala superior y los castillos exteriores de cada muro se diseñaron para inducir la falla del panel de mampostería, como se discute posteriormente. Las dimensiones de la dala superior y los castillos exteriores fueron de 0.15 m × 0.17 m y 0.15 m × 0.15 m, respectivamente. Las dimensiones de la dala inferior fueron de 0.15 m × 0.24 m. Dichas dimensiones se seleccionaron para facilitar el ensaye de los muros. Se consideraron dos tipos de castillos intermedios: armados y ahogados. Los primeros tuvieron acero de refuerzo longitudinal y transversal y los segundos exclusivamente acero de refuerzo longitudinal. En el último caso, el acero se colocó al centro de la primera celda de los bloques. Para los

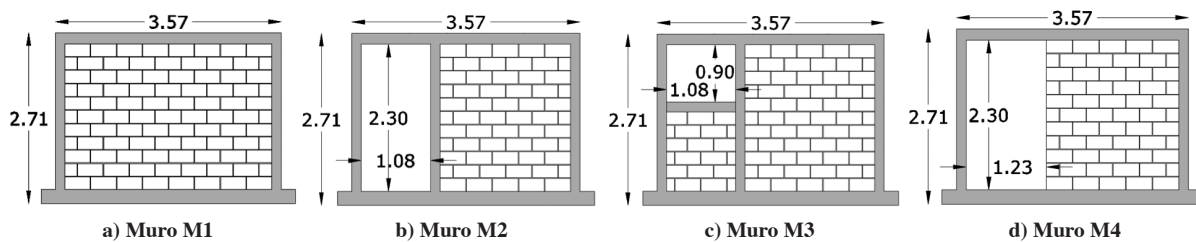


Fig. 1: Detalles de la geometría de los muros (unidades en metros).

Tabla 1: Dimensiones de la sección transversal y detalles del acero de refuerzo de las dalas y castillos.

Muro	Dala superior	Dala inferior	Castillos exteriores	Castillos intermedios
M1	0.15 m × 0.17 m RL 4#4 RT#2@0.12 m	0.15 m × 0.24 m RL 4#4 RT#2@0.12 m	0.15 m × 0.15 m RL 4#4 RT#2@0.12 m	----
M2	0.15 m × 0.17 m RL 4#4 RT#2@0.12 m	0.15 m × 0.24 m RL 4#4 RT#2@0.12 m	0.15 m × 0.15 m RL 4#4 RT#2@0.12 m	0.15 m × 0.15 m RL 6#4 RT#2@0.12 m
M3	0.15 m × 0.17 m RL 4#4 RT#2@0.12 m	0.15 m × 0.24 m RL 4#4 RT#2@0.12 m	0.15 m × 0.15 m RL 4#4 RT#2@0.12 m	0.15 m × 0.15 m RL 6#4 RT#2@0.12 m
M4	0.15 m × 0.17 m RL 4#4 RT#2@0.12 m	0.15 m × 0.24 m RL 4#4 RT#2@0.12 m	0.15 m × 0.15 m RL 4#4 RT#2@0.12 m	0.10 m × 0.10 m RL 1#3

muros M2 y M3, las dimensiones del castillo intermedio armado fueron de 0.15 m × 0.15 m. Para el muro M4, las dimensiones del castillo intermedio ahogado fueron de 0.10 m × 0.10 m. Los detalles del acero de refuerzo de las dalas y los castillos se presentan en la Tabla 1. El acero de refuerzo longitudinal (RL) consistió en barras corrugadas con una resistencia a la fluencia de 412 MPa. El acero de refuerzo transversal (RT) consistió en estribos lisos con una resistencia a la fluencia de 228 MPa.

El diseño de los elementos confinantes se realizó mediante un análisis estructural elástico lineal. Para dicho análisis se modelaron los elementos confinantes como un marco. Las condiciones de apoyo idealizadas y la distribución de fuerzas de cada marco se presentan en la figura 2. Los apoyos simples en la parte inferior de los muros representan la restricción vertical proporcionada por la losa de reacción del laboratorio. Los apoyos simples colocados en el castillo intermedio del muro M3 representan la restricción proporcionada por el panel de mampostería debajo de la ventana.

La fuerza en el plano (F_T) utilizada para cada marco se determinó usando el método del puntal bidireccional. Un resumen de dicho método se presenta en la sección de métodos analíticos. Las dimensiones y características del acero de refuerzo del castillo intermedio ahogado del muro M4 fueron seleccionadas con base en la práctica constructiva del sureste de México.

El ensaye de los muros se realizó aplicando incrementos de cargas uniformes fuera del plano hasta la falla. La carga fuera del plano se aplicó utilizando dos bolsas de aire de 3 m × 1.2 m (longitud × altura). Las bolsas de aire se colocaron entre el muro espécimen y un muro de reacción. Se conectaron ambos muros mediante barras roscadas de 19 mm. Se colocaron tubulares de acero estructural (PTR 102 mm × 102 mm × 3.2 mm) a lo largo de la longitud de los elementos confinantes exteriores de los muros. A cada tubular se le colocó a lo largo de su longitud una barra redonda de acero de 19 mm de diámetro con el propósito de restringir los desplazamientos fuera del plano en el perímetro del muro y permitir la rotación. Para cubrir las aberturas se utilizó un bastidor formado con tubulares (PTR 25 mm × 25 mm × 3.2 mm) y una hoja de madera. Los tubulares se conectaron en sus extremos a elementos de madera atornillados a los elementos confinantes. La hoja de madera se colocó entre las bolsas de aire y el bastidor. Los muros se sujetaron a la losa de reacción del laboratorio en la parte inferior de los castillos exteriores. El sistema de carga se presenta en la figura 3.

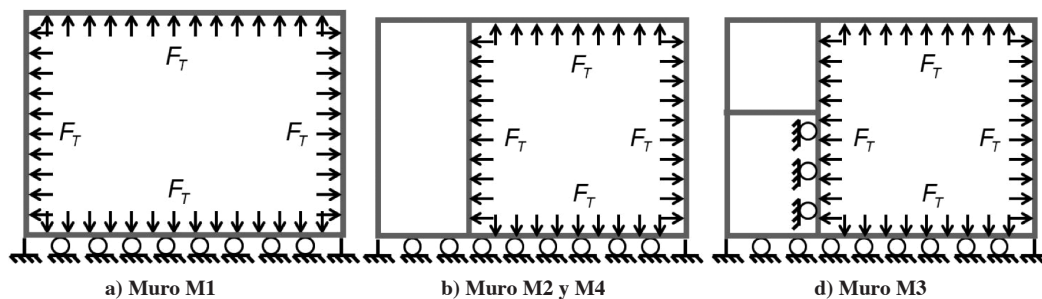


Fig. 2: Condiciones de apoyo idealizadas y distribución de fuerzas de los marcos.



Fig. 3: Sistema de carga.

La presión en las bolsas de aire se midió utilizando transductores de presión con capacidades de 34.5 kPa y 103.5 kPa. Los desplazamientos fuera del plano del muro y del castillo intermedio se midieron utilizando potenciómetros lineales

de 50 mm y 100 mm de longitud. Los desplazamientos horizontales y verticales en el plano de los muros se midieron utilizando potenciómetros lineales de 50 mm de longitud. Se colocaron galgas extensométricas en las barras de acero de refuerzo longitudinal de los castillos intermedios. Para los muros M2 y M3, las galgas se colocaron a 0.10 m de la parte inferior del castillo. Para el muro M4, las galgas se colocaron a 0.10 m de la parte inferior, en la altura media y a 0.10 m de la parte superior del castillo. La distribución de los potenciómetros y de las galgas extensométricas en los muros (Fig. 4).

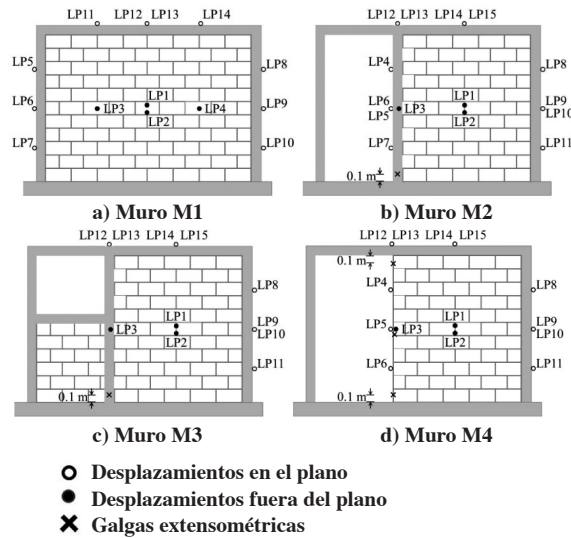


Fig. 4: Distribución de potenciómetros lineales y galgas extensométricas en muros.

Se determinó la resistencia a compresión axial del concreto, mortero, bloques y mampostería de acuerdo a las normas NMX-C-083-ONNCCE-2002 (ONNCCE, 2003), NMX-C-061-ONNCCE-2001 (ONNCCE, 2001), NMX-C-036-ONNCCE-2004 (ONNCCE, 2004) y NMX-C-464-ONNCCE-2010 (ONNCCE, 2010), respectivamente. Se determinó la resistencia a tensión por flexión, perpendicular y paralela a las juntas horizontales, de la mampostería. Dichas resistencias se determinaron mediante el ensaye de muretes de acuerdo con la norma ASTM-E-72-2005 (ASTM, 2005). Se consideraron seis especímenes para cada caso.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La resistencia a compresión axial promedio del concreto (f_c), mortero (f_j), bloques (f_b) y mampostería (f_m) fueron de 23.73 MPa, 2.89 MPa, 6.92 MPa y 3.11 MPa, respectivamente. Los coeficientes de variación correspondientes fueron de 0.08, 0.05, 0.05 y 0.05. La resistencia a tensión por flexión promedio perpendicular (f_{tpe}) y paralela (f_{tpa}) fueron de 0.14 MPa y 0.44 MPa, respectivamente. Los coeficientes de variación correspondientes fueron de 0.14 y 0.20. Todas las resistencias se calcularon utilizando el área total correspondiente.

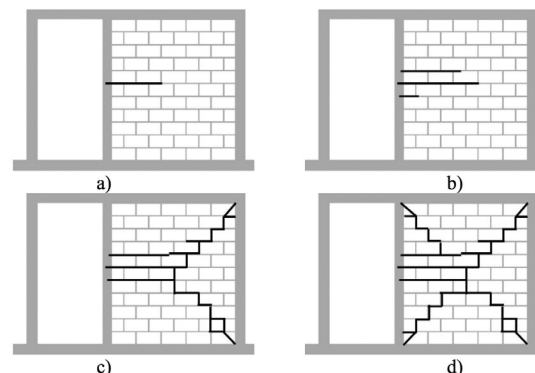


Fig. 5: Evolución del agrietamiento en la cara frontal de los muros con aberturas.

La primera grieta observada en la cara frontal (que no está en contacto con las bolsas de aire) del muro M1 fue una grieta horizontal entre la sexta y séptima hilada de bloques. Al incrementarse la carga, se observó la aparición de una nueva grieta horizontal entre la quinta y la sexta hilada de bloques. Posteriormente, se formaron grietas diagonales que se propagaron desde los extremos de las grietas horizontales hacia las esquinas de los elementos confinantes. También se observó agrietamiento en la cara posterior del muro en contacto con las bolsas de aire. Se observaron grietas horizontales entre la dala inferior y la primera hilada de bloques, y entre la décima y décimo primera hilada de bloques. También se observaron grietas verticales cercanas los castillos. Por su parte, el patrón de agrietamiento de los muros M2 a M4 fue, en general, similar. La primera grieta observada en la cara frontal del muro fue una grieta horizontal entre la sexta y séptima hilada de bloques (Fig. 5a). Al incrementarse la carga, se observó la formación de nuevas grietas horizontales en las hiladas centrales (Fig. 5b). Posteriormente, se formaron grietas diagonales que se propagaron desde el extremo derecho de las grietas horizontales hacia las dos esquinas derechas de los muros (Fig. 5c). Se observó la formación de grietas verticales en las hiladas centrales del muro (Fig. 5c). Posteriormente, se formaron grietas diagonales desde los extremos de las grietas verticales hacia las dos esquinas izquierdas del muro (Fig. 5d). Por otro lado, en la cara posterior del muro se observaron grietas horizontales localizadas entre la primera y la segunda hilada de bloques, y entre la décima y onceava hilada de bloques. Se observaron también grietas verticales cercanas a los castillos. El patrón de agrietamiento final de la cara frontal de los muros M1, M2, M3 y M4 (Figs. 6a, 6b, 6c y 6d). La falla del muro M1 estuvo relacionada con la inestabilidad estática de los segmentos del muro. La falla de los muros M2 a M4 estuvo asociada con el aplastamiento de la mampostería. El aplastamiento de la mampostería se observó entre la primera y segunda hilada de bloques, y entre la décima y onceava hilada de bloques. También se observó aplastamiento en los bloques en contacto con los castillos. En general, el aplastamiento de la mampostería fue mayor en las esquinas de los muros.

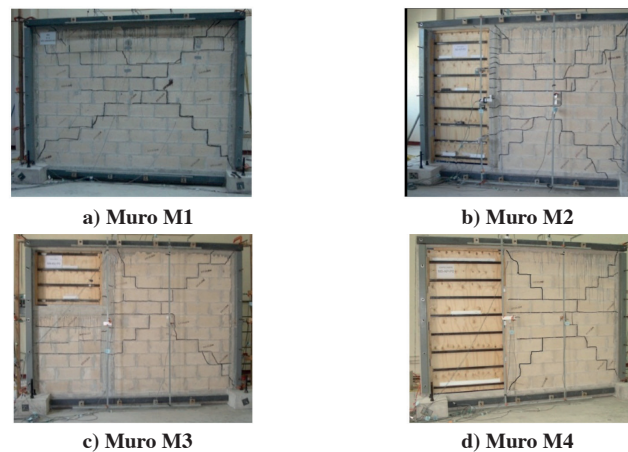


Fig. 6: Patrón de agrietamiento final de los muros.

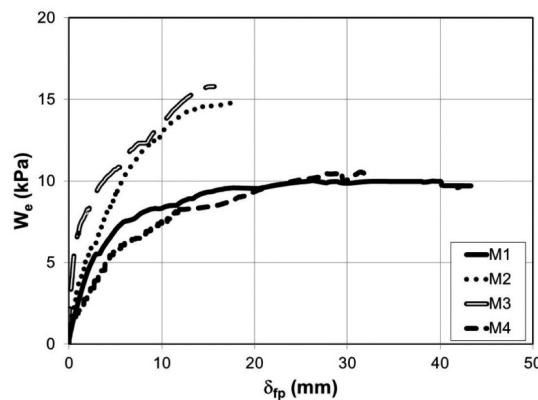


Fig. 7: Curvas carga fuera del plano – desplazamiento fuera del plano de los muros.

En la figura 7 se presentan las curvas carga fuera del plano – desplazamiento fuera del plano (W_e - δ_{fp}) de los muros. Las cargas fuera del plano medidas en el laboratorio (W_n) están asociadas al área de contacto entre las bolsas de aire y el muro (A_b). Dicha área fue menor que el área total del muro (A_t). Las cargas fuera del plano, reportadas en la Fig. 7, son cargas uniformes equivalentes sobre el área total del panel del muro (W_e). Dichas cargas se calcularon considerando la relación de áreas (A_b/A_t) y la posición de las bolsas con respecto al centro del muro (Ec. 1). En dicha ecuación, h_b y L_b son la altura y longitud de una bolsa de aire, respectivamente y h_s y L_s son la altura media y la longitud del panel del muro, respectivamente. Por otro lado, para el muro M1, el desplazamiento fuera del plano reportado en la figura 7, corresponde al medido al centro del muro (LP1 y LP2) (Fig. 4). Para los muros M2 a M4, el desplazamiento reportado es un desplazamiento relativo calculado como la diferencia entre el desplazamiento fuera del plano medido al centro del muro (LP1 y LP2) y la mitad del medido a la altura media del castillo intermedio (LP3). Se consideró dicho desplazamiento relativo debido a que los desplazamientos fuera del plano del castillo intermedio no estuvieron restringidos.

$$W_e = W_n \frac{A_b}{A_t} \left(2 - \frac{h_b}{h_s} \right) \left(2 - \frac{L_b}{L_s} \right) \quad (1)$$

4. MÉTODOS ANALÍTICOS

Se determinó la resistencia analítica fuera del plano de cada muro utilizando los métodos del puntal de compresión, líneas de fluencia y puntal bidireccional. Dichos métodos se describen de forma resumida en este trabajo. Detalles de los métodos se presentan en Abrams *et al.*, (1996), Drysdale *et al.*, (2004) y Moreno-Herrera *et al.*, (2014), respectivamente.

El método del puntal de compresión se basa en la formación de un mecanismo de arco en la dirección vertical del muro. Se supone que el muro se divide en dos segmentos. Debido a la rotación de dichos segmentos se forman puntales de compresión. Las fuerzas en los puntales se suponen constantes a lo largo del muro. Se considera que el marco de elementos confinantes es infinitamente rígido; por tanto, se restringen los desplazamientos verticales en el plano. Las fuerzas en los puntales de compresión (C) se obtienen suponiendo una distribución lineal de esfuerzos (f_c) hasta alcanzar el aplastamiento de la mampostería (Fig. 8a, Ec. 2). α es el ángulo entre el eje longitudinal de un segmento y el eje vertical, γ es el ángulo entre un puntal de compresión y el eje vertical, y b es el ancho de contacto entre dos segmentos consecutivos de muro (Fig. 8b). El ancho de contacto b se obtiene suponiendo una relación lineal entre los acortamientos axiales de los segmentos (Δ_a) y el desplazamiento fuera del plano (Δ_{fp}) (Fig. 8b). Se supone que los acortamientos axiales varían linealmente a lo largo de los segmentos. La resistencia fuera del plano de los muros (W_{pc}) se obtiene mediante el equilibrio entre las fuerzas externas y las componentes fuera del plano de los puntales de compresión (Fig. 8c, Ec. 3). La resistencia obtenida con el procedimiento anterior se modifica aplicando un factor de reducción de la resistencia fuera del plano (R_w) (Ec. 4). Dicho factor está asociado con la rigidez de los elementos confinantes. En la Ecuación 4, E_c es el módulo de elasticidad del concreto e I es el momento de inercia de la sección transversal de la dala superior.

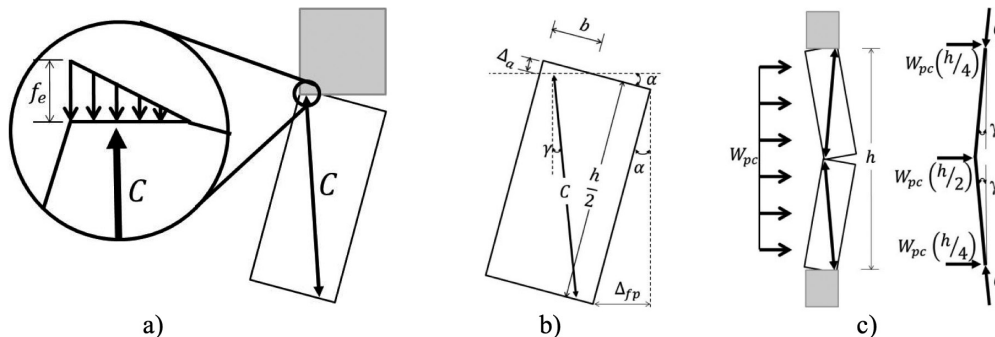


Fig. 8: Puntal de compresión. (a) Distribución lineal de esfuerzos, (b) ancho de contacto b y ángulos α y γ de un segmento de muro, y (c) equilibrio entre fuerzas externas y puntales de compresión.

$$C = \frac{1}{3} b f_m \frac{\cos \gamma}{\cos \alpha} \quad (2)$$

$$W_{pc} \left(\frac{h}{2} \right) = C \sin \gamma \quad (3)$$

$$R_w = \begin{cases} 1 & \text{si } E_c I > 26.12 \times 10^9 \\ 0.357 + 2.46 \times 10^{-11} & \text{si } 5.80 \times 10^9 < E_c I \leq 26.12 \times 10^9 \\ 0.35 & \text{si } E_c I \leq 5.80 \times 10^9 \end{cases} \quad (4)$$

El método de líneas de fluencia se basa en el equilibrio de los trabajos externos e internos. Dado un patrón de agrietamiento el muro se divide en segmentos (Fig. 9). Dichos segmentos rotan alrededor de las líneas de agrietamiento. Los trabajos externos (W^{ext}) e internos (W^{int}) se determinan con las Ecuaciones 5 y 6, respectivamente, donde W_{lf} es la resistencia fuera del plano del muro, A_{seg} es el área de un segmento de muro, δ_c es el desplazamiento del centroide del segmento, M_{cr} es el momento resistente de agrietamiento por unidad de longitud, l es la longitud de las líneas de agrietamiento y θ es la rotación del segmento. Los momentos resistentes de agrietamiento alrededor del eje horizontal y vertical (M_{cr}^h y M_{cr}^v) se determinan con las Ecuaciones 7 y 8, donde P es la carga axial debida a la fuerza externa aplicada y al peso propio de la dala superior y de las hiladas de bloques sobre la línea de agrietamiento, S es el módulo de sección del muro por unidad de longitud y A es el área de la sección transversal del muro por unidad de longitud.

$$W^{ext} = \sum W_{lf} (A_{seg} \delta_c) \quad (5)$$

$$W^{int} = \sum (M_{cr} l \theta) \quad (6)$$

$$M_{cr}^h = \left(f_{tpe} + \frac{P}{A} \right) S \quad (7)$$

$$M_{cr}^v = f_{tpa} S \quad (8)$$

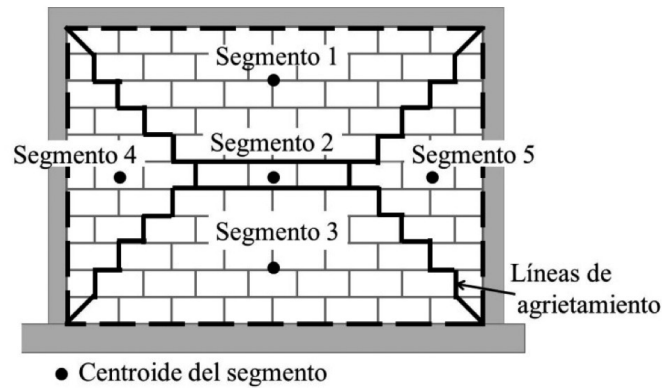


Fig. 9: Patrón de agrietamiento, segmentos del muro y centroide de los segmentos.

El método del puntal bidireccional se basa en la formación de un mecanismo de arco en dos direcciones ortogonales. Dado un patrón de agrietamiento (Fig. 10), el muro se divide en segmentos. El muro se subdivide en franjas verticales y horizontales (Fig. 10). Debido a la rotación de los segmentos del muro, se generan puntales de compresión en cada una de las franjas. Las componentes en el plano de los puntales de compresión (fuerzas en el plano) se transfieren excéntricamente al marco de elementos confinantes. El marco se divide en n elementos tipo marco. Se consideran 6 grados de libertad por nodo en los elementos tipo marco: tres desplazamientos y tres rotaciones. Se restringen los desplazamientos fuera del plano del marco y se supone que la dala inferior está empotrada. El procedimiento iterativo se describe a continuación.

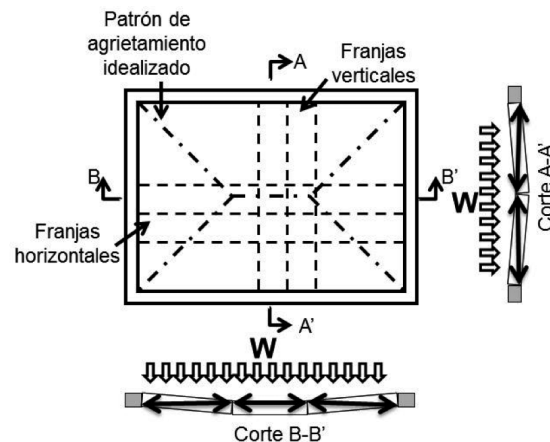


Fig. 10: Patrón de agrietamiento idealizado y franjas horizontales y verticales.

- 1) Se supone inicialmente un desplazamiento fuera del plano al centro del muro (δ_c) (Fig. 11). Se calculan los desplazamientos fuera del plano al centro de cada franja (δ_i^s) y el correspondiente desplazamiento en el plano (u_i^s). Para calcular dichos desplazamientos se supone la rotación como cuerpo rígido de los segmentos del muro.
- 2) Se calculan las fuerzas en el plano (F_T) mediante un análisis elástico lineal del marco de elementos confinantes. Dicho análisis se realiza utilizando los desplazamientos en el plano obtenidos en el paso anterior.
- 3) Se corrigen los desplazamientos en el plano (u_i^s) considerando las deformaciones axiales de los segmentos del muro y los desplazamientos en el plano asociados a la torsión de los elementos confinantes. Los acortamientos axiales se calculan suponiendo una distribución triangular de esfuerzos y una relación lineal esfuerzo-deformación hasta el aplastamiento de la mampostería. Se recalculan las fuerzas en el plano (F_T) con los desplazamientos en el plano corregidos.
- 4) Se obtienen las magnitudes de los puntales de compresión para cada franja mediante el equilibrio en el plano entre dichos puntales y las fuerzas en el plano (F_T).
- 5) Las cargas fuera del plano (W_{pb}) se calculan mediante el equilibrio fuera del plano entre las fuerzas externas y las componentes fuera del plano de los puntales de compresión (Fig. 10).

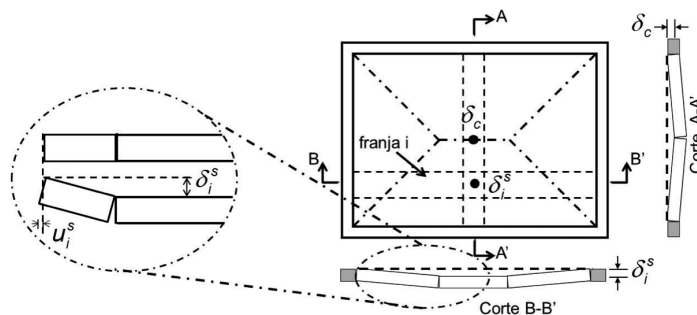


Fig. 11: Desplazamientos en el plano y fuera del plano.

Se supone un nuevo desplazamiento fuera del plano y se repite el proceso descrito anteriormente hasta obtener el máximo valor de W_{pb} o hasta que el esfuerzo de compresión axial actuante de una franja dada sea igual a la resistencia a compresión axial de la mampostería. El esfuerzo de compresión axial actuante se calcula suponiendo una relación lineal esfuerzo-deformación hasta el aplastamiento de la mampostería. En el primer caso, la falla estará asociada a la inestabilidad estática de los segmentos del muro; en el segundo, al aplastamiento de la mampostería. Ambos tipos de falla están asociados a la falla del panel de mampostería.

En la Tabla 2 se presentan las resistencias experimentales fuera del plano (W_e) y las correspondientes analíticas calculadas con los métodos del puntal de compresión (W_{pc}), líneas de fluencia (W_{lf}) y puntal bidireccional (W_{pb}), para cada muro estudiado. En dicha tabla se presentan los tipos de falla obtenidos con el método del puntal bidireccional para cada muro: inestabilidad estática de los segmentos (IS) y aplastamiento de la mampostería (AM). Los patrones de agrietamiento utilizados en los métodos de líneas de fluencia y puntal bidireccional se presentan en la Fig. 12. La deformación unitaria máxima de la mampostería utilizada en los métodos del puntal de compresión y puntal bidireccional fue de 0.003 (Drysdale, 2004).

Tabla 2: Resistencias experimentales y analíticas fuera del plano y tipo de falla de los muros.

Muro	W_{pc}	W_{lf}	W_{pb}	W_e	W_{pc} / W_e	W_{lf} / W_e	W_{pb} / W_e	Tipo falla
	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)				
M1	9.46	8.80	11.48	10.03	0.94	0.88	1.14	IS
M2	9.46	14.38	16.44	14.78	0.64	0.97	1.11	AM
M3	9.46	14.38	17.48	15.79	0.60	0.91	1.11	AM
M4	9.46	14.38	13.11	10.60	0.89	1.36	1.24	AM
Promedio					0.77	1.03	1.15	
CV					0.22	0.22	0.05	

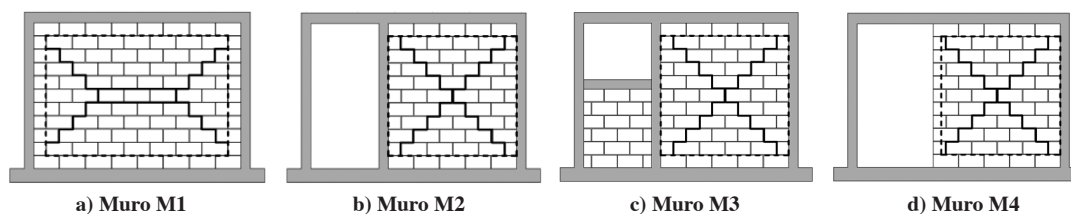


Fig. 12: Patrón de agrietamiento principal de los muros.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El patrón de agrietamiento del muro sólido (M1) fue similar al observado en losas con apoyos en cuatro bordes. Para los muros con aberturas (M2 a M4) se observó que, inicialmente, el patrón de agrietamiento fue similar al observado en losas con apoyos en tres bordes (Fig. 5c). Sin embargo, al final fue similar al observado en losas con apoyos en cuatro bordes (Fig. 5d). El cambio en el patrón se debió a que el castillo intermedio actuó como un cuarto apoyo. Dicho castillo tuvo la suficiente resistencia y rigidez fuera del plano para inducir el cambio en dicho patrón. En este trabajo se definen dos tipos de patrones de agrietamiento para los muros, el final y el principal. El primero está asociado a la evolución del agrietamiento durante el ensayo (Fig. 6) y el segundo con las grietas que definen los segmentos del muro al formarse un mecanismo de arco (Fig. 12). En esta figura, las líneas de agrietamiento asociadas con los momentos positivos y negativos se representan con líneas sólidas y punteadas, respectivamente. Los patrones de agrietamientos final y principal de los muros estudiados dependen de la relación de aspecto del panel de mampostería.

La falla por inestabilidad estática de los segmentos observada en el muro M1 se debió a que la rigidez de la dala superior fue relativamente pequeña. La rigidez de la dala superior del muro M1 fue menor que la de los muros con aberturas (M2 a M4). La falla por inestabilidad estática de los segmentos del muro se caracteriza por la excesiva rotación y posterior colapso de dichos segmentos. Para el caso de los muros con aberturas (M2 a M4) se observó la

falla por aplastamiento de los segmentos del muro. La rotación de los segmentos generó esfuerzos de compresión que incrementaron hasta que alcanzaron la resistencia a compresión axial de la mampostería. La falla por aplastamiento se caracteriza por ser una falla frágil.

El comportamiento de los muros se puede dividir en dos etapas (Fig. 7): una lineal hasta la formación de los primeros agrietamientos en el muro y otra no-lineal asociada con la evolución del agrietamiento. En la segunda etapa, la resistencia fuera del plano se asocia con la formación de un mecanismo de arco en dos direcciones ortogonales. Durante los ensayos se observó el aplastamiento de la mampostería tanto en la dirección vertical como en la horizontal. Dicho aplastamiento fue mayor en las esquinas de los muros, ya que en estas zonas los desplazamientos en el plano tuvieron mayor restricción.

En la figura 7 se observa que la resistencia fuera del plano del muro sólido (M1) fue menor que la de los muros con aberturas (M2 a M4). Lo anterior se debe a que la rigidez de los elementos confinantes del muro M1 fue menor que la de los muros M2 a M4. A mayor rigidez se generan mayores fuerzas de compresión axial en los puntales y por tanto mayor resistencia fuera del plano. Para el caso del muro M4, la resistencia fuera del plano fue solo 6 % mayor que la del muro M1. Lo anterior se debe a que en el muro M4 se observó la fluencia del acero de refuerzo longitudinal del castillo intermedio, lo cual limitó la resistencia fuera del plano. Por otro lado, la resistencia fuera del plano del muro con abertura tipo puerta (M2) fue similar a la del muro con abertura tipo ventana (M3). En ambos casos se tuvo una rigidez de los elementos confinantes similar, por tanto la resistencia fuera del plano de los muros fue similar. La resistencia fuera del plano del muro con abertura tipo puerta y castillo intermedio armado (M2) fue 40 % mayor que la del muro con abertura tipo puerta y castillo intermedio ahogado (M4). Lo anterior se debe a la fluencia del acero de refuerzo longitudinal del castillo intermedio reportada anteriormente. Para los muros estudiados se observó que, en general, la resistencia fuera del plano depende de la relación de aspecto del panel de mampostería; dicha resistencia aumenta conforme la relación de aspecto del panel de mampostería aumenta. Por otro lado, la resistencia fuera del plano también depende de la rigidez y resistencia del castillo intermedio. La resistencia fuera del plano puede estar limitada por la falla local de alguno de los elementos confinantes, como fue el caso del castillo intermedio del muro M4.

En la Tabla 2 se observa que la resistencia fuera del plano analítica, obtenida con el método del puntal de compresión, fue igual para todos los muros. Esto se debe a los siguientes factores: 1) en este método se supone que el muro está dividido en toda su longitud en dos segmentos de igual altura, independientemente de su relación de aspecto y 2) los factores de corrección por rigidez no consideran la longitud de los elementos confinantes, por tanto, no se considera correctamente la rigidez de los elementos confinantes. Con el método de puntal de compresión se subestima hasta en un 40 % la resistencia fuera del plano de los muros. Por su parte, la resistencia fuera del plano analítica, obtenida con el método de líneas de fluencia, fue igual para los muros con aberturas (M2 a M4). Esto se debe a que el patrón de agrietamiento utilizado para dichos muros fue el mismo. Aunque con este método se obtienen predicciones razonables de la resistencia fuera del plano para los muros M1 a M3, en este método se supone que los momentos resistentes de agrietamiento se mantienen constantes a lo largo de todo el patrón de agrietamiento hasta la falla del muro; lo anterior es incorrecto para materiales con comportamiento frágil como es el caso de la mampostería. Finalmente, con el método del puntal de compresión se obtiene una resistencia fuera del plano diferente para cada muro estudiado. La resistencia depende de la relación de aspecto del panel del muro y de la rigidez de los elementos confinantes. Este método predice adecuadamente la resistencia de los muros M1 a M3. Para el caso del muro M4, se predice una mayor resistencia, ya que en el método se supone la falla del panel de mampostería y no la fluencia del acero de refuerzo longitudinal del castillo intermedio como se discutió anteriormente. Por otro lado, con este método se predicen también los tipos de falla observados en los muros M1 a M4. Con base en lo anterior se concluye que el método más adecuado para determinar la resistencia fuera del plano es el del puntal bidireccional.

6. CONCLUSIONES

Se estudió el comportamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Se ensayaron en el laboratorio cuatro muros a escala natural, tres con aberturas y uno sólido. Se determinó la resistencia analítica fuera del plano de cada muro utilizando los métodos del puntal de compresión, líneas de fluencia y puntal bidireccional. Se compararon las resistencias analíticas con sus correspondientes experimentales. Con base en los resultados obtenidos en este trabajo, se presentan las siguientes conclusiones:

- Para los muros con aberturas, inicialmente el patrón de agrietamiento fue similar al observado en losas con apoyos en tres bordes; sin embargo, al final fue similar al de losas con apoyos en cuatro bordes.
- Se definen dos tipos de patrones de agrietamiento para los muros: final y principal. Dichos patrones dependen de la relación de aspecto del panel de mampostería.

- El muro sólido presentó una falla por inestabilidad estática de los segmentos, mientras que los muros con abertura presentaron una falla por aplastamiento de la mampostería.
- El comportamiento de los muros se puede dividir en dos etapas: una lineal, hasta la formación de los primeros agrietamientos en el muro y otra no-lineal, asociada con la evolución del agrietamiento. En la etapa no-lineal, la resistencia fuera del plano se asocia con la formación de un mecanismo de arco en dos direcciones ortogonales.
- La resistencia fuera del plano del muro sólido fue menor que la de los muros con aberturas. La rigidez de los elementos confinantes del muro sólido fue menor que la de los muros con aberturas. A mayor rigidez se obtienen mayores fuerzas de compresión axial en los puntales y por tanto mayor resistencia fuera del plano.
- La resistencia fuera del plano del muro con abertura tipo puerta y castillo intermedio armado (M2) fue 40 % mayor que la del muro con abertura tipo puerta y castillo intermedio ahogado (M4). La fluencia del acero de refuerzo longitudinal del castillo intermedio interior limitó la resistencia fuera del plano.
- La resistencia fuera del plano incrementa conforme aumenta la relación de aspecto del panel del muro y la rigidez del castillo intermedio.
- La resistencia fuera del plano, obtenida con el método del puntal bidireccional considera la relación de aspecto del panel del muro y la rigidez de los elementos confinantes. Con este método se determinó adecuadamente la resistencia de los muros M1 a M3. Para el muro M4 se determinó una mayor resistencia, ya que en el método se modela la falla del panel de mampostería y no se considera la fluencia del acero de refuerzo longitudinal del castillo ahogado. Adicionalmente, con este método se predicen adecuadamente los tipos de falla observados en los muros M1 a M4.

7. NOTACIÓN

α	Ángulo entre el eje longitudinal de un segmento y el eje vertical.
β	Ángulo entre el puntal de compresión y el eje longitudinal de un segmento.
γ	Ángulo entre el puntal de compresión y el eje vertical.
Δ_c	Deformación axial de un segmento asociada con el aplastamiento de la mampostería.
Δ_a	Acortamiento axial de los segmentos de muro.
δ_c	Desplazamiento del centroide de un segmento del muro.
δ_{fp}	Desplazamiento fuera del plano al centro del muro.
Δ_h	Desplazamiento horizontal del muro.
Δ_v	Desplazamiento vertical del muro.
ϵ_m	Deformación máxima de la mampostería.
θ	Ángulo de rotación de un segmento de muro.
A	Área de la sección transversal del muro.
A_b	Área de contacto entre las bolsas de aire y el muro.
A_T	Área de total del muro.
A_{seg}	Área de un segmento del muro.
b	Ancho de contacto entre dos segmentos de muro consecutivos.
C	Fuerzas de compresión en los puntales.
E_c	Módulo de elasticidad del concreto.
F_T	Fuerzas en el plano (componente en el plano de los puntales de compresión).
f_c	Resistencia a compresión axial del concreto.
f_e	Esfuerzo axial de un segmento del muro.
f_j	Resistencia a compresión axial del mortero.
f_m	Resistencia a compresión axial de la mampostería.
f_p	Resistencia a compresión axial de los bloques.
f_{tpa}	Resistencia a tensión por flexión paralela a las juntas horizontales de la mampostería.
f_{tpe}	Resistencia a tensión por flexión perpendicular a las juntas horizontales de la mampostería.
h	Altura del muro.
h_b	Altura de una bolsa de aire.
h_p	Altura media del panel del muro.
I	Momento de inercia de la sección transversal de la dala superior.
l	Longitud de las líneas de agrietamiento.

L_b	Longitud de una bolsa de aire.
L_S	Longitud del panel del muro.
M_{cr}	Momento resistente de agrietamiento por unidad de longitud.
M_{cr}^h	Momento resistente de agrietamiento horizontal por unidad de longitud.
M_{cr}^v	Momento resistente de agrietamiento vertical por unidad de longitud.
P	Carga axial debida al peso propio.
RL	Acero de refuerzo longitudinal.
RT	Acero de refuerzo transversal.
S	Módulo de sección por unidad de longitud de la sección transversal del muro.
t	Espesor del muro.
T	Espesor de las paredes de las celdas de los bloques.
W_e	Resistencia fuera del plano experimental de los muros, sobre área total del muro.
W^{ext}	Trabajo externo.
W^{int}	Trabajo interno.
W_{lf}	Resistencia fuera del plano obtenida con el método de líneas de fluencia.
W_n	Resistencia fuera del plano experimental de los muros, sobre área de contacto de las bolsas.
W_{pb}	Resistencia fuera del plano obtenida con el método del puntal bidireccional.
W_{pc}	Resistencia fuera del plano obtenida con el método del puntal de compresión.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento recibido por el Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) para la realización de este trabajo de investigación. El segundo y cuarto autor agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para el desarrollo de sus estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- About, B. E.; Ahmad, A. H. y Harris, H. G. (1996), "Flexural behavior of reinforced concrete masonry walls under out-of-plane monotonic loads", *Structural Journal, ACI*, 93(3), pp. 327-335.
- Abrams, D.P.; Angel, R. y Uzarski, J. (1996), "Out-of-plane strength of unreinforced masonry infill panels", *Earthquake Spectra*, 12(4), pp. 825-844.
- ASTM (2005), *American Standard Test Methods - Standard test methods of conducting strength tests of panels for building construction*, ASTM-E-72-2005, West Conshohocken, PA, EUA.
- Dawe, J.L. y Seah, C.K. (1989), "Out-of-plane resistance of concrete masonry infilled panels", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 16(6), pp. 854-864.
- Drysdale, R. G. y Essawy, A.S. (1988), "Out-of-plane bending of concrete block walls", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 114(1), pp.121-133.
- Drysdale, R. G.; Hamid, A. A. y Baker, L. R. (2004), *Masonry structures: behavior and design*, Tercera edición, Masonry Society.
- Flanagan, R. D. y Bennett, R. M. (1999), "Bidirectional behavior of structural clay tile infilled frames", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 125(3), pp. 236-244.
- Griffith, M. C. y Vaculik, J. (2007), "Out-of-plane flexural strength of unreinforced clay brick masonry walls", *TMS Journal*, 25(1), pp. 53-68.
- Henderson, R. C.; Fricke, K. E.; Jones, W. D.; Beavers, J. E. y Bennet, R. M. (2003), "Summary of a large- and small-scale unreinforced masonry infill test program", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 129(12), pp. 1667-1675.

- Klingner, R. E.; Rubiano, N. R.; Bashandy, T. R. y Sweeney, S. C. (1996), "Evaluation and analytical verification of shaking table data from infilled frames part II: Out-of-plane behavior", *Proceedings of the Seventh North American Masonry Conference, The Masonry Society*, Champaign, Illinois, USA, pp. 521-532.
- Middleton, A. C. y Drysdale, R. G. (1995), "Flexural capacities of concrete block walls with openings", *Seventh Canadian Masonry Symposium*, Hamilton, Ontario.
- Moreno-Herrera, J.; Varela-Rivera, J. y Fernandez-Baqueiro, L. (2014a), "Bidirectional strut method: out-of-plane strength of confined masonry walls", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(12), pp. 1029-1035.
- Moreno-Herrera, J.; Varela-Rivera, J. y Fernandez-Baqueiro, L. (2014b), "Out-of-plane design procedure for confined masonry walls", *Journal of Structural Engineering*, ASCE (enviado para su posible publicación).
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (ONNCCE) (2001), *NMX-C-061-ONNCCE-2001, Industria de la construcción – Cemento – Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos*, Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (ONNCCE) (2003), *NMX-C-083-ONNCCE-2002, Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto – Método de prueba*, Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (ONNCCE) (2004), *NMX-C-036-ONNCCE-2004, Industria de la construcción - Bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines- Resistencia a la compresión - Método de prueba*, Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (ONNCCE) (2010), *NMX-C-464-ONNCCE-2010, Industria de la construcción – Mampostería – Determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería*, Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
- Singhal, V., y Rai, D.C. (2014), "Seismic behavior of confined masonry walls when subjected to in-plane and out-of-plane loading", *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering Frontiers of Earthquake Engineering*, Anchorage, Alaska.
- Tu, Y. H.; Chuang, T. H.; Liu, P. M. y Yang, Y. S. (2010), "Out-of-plane shaking table tests on unreinforced masonry panels in RC frames", *Engineering Structures*, 32(12), pp. 3925-3935.
- Varela-Rivera, J.; Navarrete-Macias, D; Fernandez-Baqueiro, L. y Moreno, E. (2011), "Out-of-plane behaviour of confined masonry walls", *Engineering Structures*, 33(5), pp. 1734-1741.
- Varela-Rivera, J.; Moreno-Herrera, J.; López-Gutierrez, I. y Fernández-Baqueiro, L. (2012a), "Out-of-plane strength of confined masonry walls", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 138(11), pp. 1331-1341.
- Varela-Rivera, J.; Polanco-May, M.; Fernández-Baqueiro, L. y Moreno, E. (2012b), "Confined masonry walls subjected to combined axial loads and out-of-plane uniform pressures", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(4), pp. 439-447.
- Zhang, X.; Singh, S.; Bull, D. K.; y Cooke, N. (2001), "Out-of-plane performance of reinforced masonry walls with openings", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 127(1), pp. 51-57.