# MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE MURETES DE MAMPOSTERÍA SIMPLE DE BLOQUES HUECOS DE CONCRETO SUJETOS A CARGAS FUERA DEL PLANO

#### Luis E. Fernández Baqueiro\*, Joel A. Moreno Herrera, Jorge L. Varela Rivera y María E. Novelo Arjona

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, A.P. 150, Cordemex, Mérida, Yucatán, México. Fecha de recepción: 13 de agosto de 2020 - Fecha de aceptación: 11 de octubre de 2021

#### Resumen

El objetivo de esta investigación fue desarrollar modelos no lineales del Método del Elemento Finito de muretes de mampostería simple de bloques huecos de concreto, sujetos a cargas fuera del plano, para analizar su proceso de agrietamiento. Se consideró información experimental de ensayes de muretes de mampostería simple de bloques huecos de concreto para determinar la resistencia a tensión por flexión fuera del plano perpendicular y paralela a las juntas. Se desarrollaron modelos tridimensionales de los muretes. Se simuló la falla con un modelo de grieta discreta y elementos de interfaz plana. Se consideraron dos mecanismos de falla: (1) falla por adherencia bloque-mortero en murete sometido a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a las juntas, (2) falla combinada por adherencia bloque-mortero y tensión en bloques en murete sometido a tensión por flexión fuera del plano paralela a las juntas. Se calibró el módulo de elasticidad de los bloques con base en la rigidez inicial de los muretes que presentaron una falla combinada. Se determinó la resistencia a tensión de los elementos de interfaz que reproduce la carga máxima de los muretes. Se concluyó que la relación entre la resistencia a tensión del elemento de interfaz de mortero de la junta vertical y la resistencia a tensión del elemento de interfaz de mortero de la junta horizontal es 2.9. Adicionalmente, los modelos computacionales no lineales desarrollados en esta investigación reprodujeron de manera adecuada los dos mecanismos de falla observados en los ensayes experimentales.

**Palabras Clave:** Mampostería, Método del Elemento Finito, resistencia a tensión, cargas fuera del plano, bloques huecos de concreto.

<sup>\*</sup>luis.fernandez@correo.uady.mx

Nota: Este artículo de investigación es parte de Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 25, No. 3, 2021, ISSN: 2448-8364

## COMPUTATIONAL MODELING OF HOLLOW CONCRETE BLOCK UNREINFORCED MASONRY WALLS SUBJECTED TO OUT-OF-PLANE LOADS

## Abstract

The objective of this research was to develop nonlinear models of the Finite Element Method of hollow concrete block unreinforced masonry walls, subjected to out-of-plane loads, to analyze their cracking process. Experimental information from hollow concrete block unreinforced masonry wall tests to determine the out-of-plane flexural tensile strength normal and parallel to the bed joints was considered. Three-dimensional models of the walls were developed. Wall failure was simulated with a discrete crack model and plane interface elements. Two failure mechanisms were considered: (1) debonding of the mortar along the bed joint in wall subjected to out-of-plane flexural tension normal to the bed joints, (2) combined failure due to cracking through head joints and masonry blocks in wall subjected to out-of-plane flexural tension parallel to the bed joints. The modulus of elasticity of the blocks was calibrated with the initial stiffness of the walls that had a combined failure mechanism. The tensile strength of the interface elements that reproduce the maximum load of the walls was determined. It was concluded that the ratio between the tensile strength of the head joint interface element and the tensile strength of the bed joint interface element is 2.9. In addition, the nonlinear computational models developed in this research adequately reproduced the two failure mechanisms observed in experimental tests.

**Keywords:** Masonry, Finite Element Method, tensile strength, out-of-plane loads, hollow concrete blocks.

## 1. Introducción

Los muros de mampostería confinada son ampliamente utilizados en México y otros países en la construcción de viviendas y edificaciones de baja altura. En su diseño se deben considerar las distintas acciones a las que estarán sometidos durante su vida útil, tales como las cargas de viento y sismo. Sin embargo, los códigos de diseño en México (e.g. Gobierno de la Ciudad de México 2017; Municipio de Mérida 2018) no cuentan con ecuaciones de diseño para muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Esto es, no se establecen valores de resistencia a tensión por flexión fuera del plano de la mampostería para diseñar los muros con criterios basados en el primer agrietamiento, ni se establecen ecuaciones de diseño para determinar la resistencia fuera del plano del

panel de mampostería con criterios de resistencia última. Esto ha motivado el desarrollo de múltiples estudios experimentales (Varela-Rivera et al. 2011; Varela-Rivera et al. 2012a y 2012b; Varela-Rivera et al. 2015; Moreno-Herrera et al. 2016). En estos estudios experimentales se han ensayado muros a escala natural considerando diferentes variables, tales como: las condiciones de apoyo, el tipo de pieza, la relación de aspecto, la presencia de aberturas y la carga axial. Adicionalmente, se han estudiado diversos modelos analíticos para predecir la resistencia máxima de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano, destacándose el método del puntal bidireccional (Moreno-Herrera et al. 2014; Varela-Rivera et al. 2015; Moreno-Herrera et al. 2016). El método del puntal bidireccional no etapas iniciales considera las de comportamiento fuera del plano de los muros

de mampostería confinada, en donde se presentan los primeros agrietamientos. De la revisión de la literatura se observa que es necesario complementar los estudios realizados, ya que éstos abarcan únicamente los experimentales y ensayes los modelos analíticos para determinar la resistencia máxima de los muros, estando pendiente el desarrollo de modelos computacionales para simular el proceso de agrietamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano (Fernández et al. 2018). Estos computacionales modelos permitirán desarrollar recomendaciones para el diseño al primer agrietamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Sin embargo, previo a dichos modelos, es necesario desarrollar modelos computacionales del proceso de agrietamiento de muros de mampostería simple.

Se han desarrollado diversas normas por la American Society for Testing and Materials (ASTM) para ensayar muros de mampostería simple sujetos a cargas fuera del plano y determinar la resistencia a tensión por flexión por cargas fuera del plano, tales como la ASTM E518, ASTM E72 y ASTM C1072 (American Society for Testing and Materials 2015a, 2015b y 2019). Los muros ensayados con la norma ASTM E72 dan resultados similares a los obtenidos en el ensave de muros de mampostería simple a escala natural (Drysdale et al. 1999). Los muros de mampostería simple tienen una resistencia y mecanismo de falla diferente dependiendo de la dirección de los esfuerzos actuantes (Drysdale et al. 1999). Por lo tanto, se determina la resistencia a tensión por flexión fuera del plano perpendicular y paralela a las juntas. En el primer caso se puede presentar una falla por adherencia bloquemortero (Figura 1). En el segundo caso se puede presentar una falla por adherencia bloque-mortero en forma dentada (Figura 2) o una falla combinada por adherencia bloquemortero y tensión en bloques (Figura 3). La falla por adherencia bloque-mortero en forma dentada se presenta cuando la resistencia a tensión de los bloques es alta. En las Figuras 1a - 3a se presentan estos tipos de falla, los cuales fueron observados en los ensayes experimentales de Varela et al. (2009). En las Figuras 1b - 3b se señala con línea roja la posición de la grieta.



a) Ensaye experimental



b) Posición de la grieta en el plano





a) Ensaye experimental







a) Ensaye experimental



b) Posición de la grieta en el plano

Figura 3. Falla combinada por adherencia bloque-mortero y tensión en bloques en muretes sometidos a tensión por flexión fuera del plano paralela a la junta (Varela et al. 2009).

El objetivo de este trabajo de investigación fue desarrollar modelos no lineales del Método del Elemento Finito de muretes de mampostería simple de bloques huecos de concreto, sujetos a cargas fuera del plano, para analizar su proceso de agrietamiento. Se consideró información experimental de ensayes de muretes de mampostería simple de bloques huecos de concreto para determinar la resistencia a tensión por flexión fuera del plano perpendicular y paralela a la junta (Varela et al. 2009). Se elaboraron modelos tridimensionales de los muretes. Se utilizaron elementos finitos isoparamétricos hexaedros de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo para los bloques. Se utilizaron elementos finitos de interfaz plana de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo para el mortero y los planos de agrietamiento de los bloques. Se simuló la falla de los muretes con un modelo de grieta discreta. Se consideraron dos mecanismos de falla: (1) falla por adherencia bloque-mortero en murete sometido a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a las juntas, (2) falla combinada por adherencia bloque-mortero y tensión en bloques en murete sometido a tensión por flexión fuera del plano paralela a las juntas. Se calibró el módulo de elasticidad de los bloques con base en la rigidez inicial de los muretes que presentaron una falla combinada. Se determinó las resistencias a tensión de los elementos de interfaz que permiten reproducir las cargas máximas.

## 2. Metodología

### 2.1 Información experimental

La información experimental utilizada para calibrar los modelos computacionales corresponde a muretes ensayados por Varela et al. (2009). Flores Chan (2008) presenta información detallada de dichos ensaves. Los muretes eran de mampostería simple de bloques huecos de concreto. El objetivo de dichos ensayes fue determinar la resistencia a tensión por flexión fuera del plano perpendicular y paralela a las juntas. Los ensayes seleccionados fueron realizados de acuerdo con la norma ASTM E72. Se consideraron los resultados obtenidos de los muretes hechos con bloques provenientes de la planta de fabricación número 5. Los bloques huecos de concreto tenían tres celdas verticales, dimensiones nominales de 150 mm x 200 mm x 400 mm (espesor x altura x longitud) y una resistencia a compresión sobre área neta de 9.5 MPa. La junta de mortero tenía un espesor de 10 mm. El mortero tenía una resistencia a compresión de 3.43 MPa. El mortero fue colocado en todo el espesor de la junta vertical y sobre las paredes exteriores en la junta horizontal (Figura 4). Las dimensiones de los muretes utilizados para determinar la resistencia a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a las juntas fueron 1000 mm de largo y 1200 mm de altura. En la Figura 5 se presentan las condiciones de carga y apoyo de estos muretes. La falla observada fue por adherencia bloque-mortero. Por otra parte, las dimensiones de los muretes utilizados para determinar la resistencia a tensión por flexión fuera del plano paralela a las juntas fueron 1600 mm de largo y 1200 mm de altura. En la Figura 6 se presentan las condiciones de carga y apoyo de estos muretes. La falla observada fue combinada por adherencia bloque-mortero y tensión en bloques. Estos dos tipos de falla fueron seleccionados va que han sido observados en los ensayes de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano (Varela-Rivera et al. 2011; Varela-Rivera et al. 2012a; Varela-Rivera et al. 2015).



Figura 4. Colocación del mortero en bloques huecos de concreto de 3 celdas verticales.



Figura 5. Condiciones de carga y apoyo de muretes sometidos a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a las juntas (unidades en mm).



Figura 6. Condiciones de carga y apoyo de muretes sometidos a tensión por flexión fuera del plano paralela a las juntas (unidades en mm).

#### 2.2 Modelos computacionales

#### 2.2.1 Descripción general

En este trabajo de investigación se desarrollaron modelos lineales y modelos no lineales del Método del Elemento Finito para simular el comportamiento de muretes de mampostería simple de bloques huecos de concreto, sujetos a cargas fuera del plano. Inicialmente, se desarrolló un modelo lineal con el propósito de determinar el módulo de elasticidad de los bloques huecos de concreto que permite aproximar la rigidez inicial de los muretes. Se asumió un módulo de elasticidad para el mortero de 1000 MPa. La rigidez elástica del murete está asociada principalmente a las propiedades del bloque, dado que aproximadamente el 94% del volumen del murete es bloque y solamente el 6% del volumen del murete es mortero. Por lo tanto, el resultado no es sensible al valor seleccionado del módulo de elasticidad del mortero. El modelo lineal corresponde al del murete sometido a tensión por flexión fuera del

plano paralela a las juntas. Se aproximó la rigidez al valor promedio del primer ciclo histerético que fue 12619 N/mm (Flores Chan 2008). La rigidez del murete se calcula como la carga entre el desplazamiento fuera del plano medido al centro del murete. Posteriormente, se desarrollaron modelos lineales de los muretes con tensión por flexión fuera del plano paralela y perpendicular a la junta, con el propósito de determinar la distribución de esfuerzos en el murete e identificar dónde inicia el proceso de agrietamiento.

Se desarrollaron modelos computacionales no lineales del Método del Elemento Finito con el propósito de determinar la resistencia a tensión de los elementos de interfaz que permite reproducir la carga máxima de los muretes. Los resultados experimentales de los muretes con por flexión fuera tensión del plano perpendicular a la junta permitieron calibrar la resistencia a tensión de los elementos de interfaz de la junta de mortero horizontal (falla adherencia bloque-mortero). por Los resultados experimentales de los muretes con tensión por flexión fuera del plano paralela a la junta permitieron calibrar las resistencias a tensión de los elementos de interfaz de la junta de mortero vertical y de los elementos de interfaz del bloque (falla combinada por adherencia bloque-mortero y tensión en bloques). Este análisis es complejo ya que se requiere calibrar dos valores de resistencia simultáneamente en un solo análisis. Para resolver este problema se asumió que la relación entre la resistencia a tensión del elemento de interfaz de mortero y del elemento de interfaz del bloque de concreto era 0.70. Esta consideración está basada en las siguientes observaciones:

 Los mecanismos de falla reportados por Varela et al. (2009) permiten concluir que la resistencia por adherencia bloque-mortero debe ser menor que la resistencia a tensión del bloque.  La relación entre la resistencia a tensión por flexión paralela a las juntas cuando la falla es por adherencia es aproximadamente el 70% de la correspondiente cuando la falla es combinada.

### 2.2.2 Características de los modelos

Los análisis computacionales del Método del Elemento Finito fueron elaborados con el programa DIANA (TNO 2019). Los modelos fueron tridimensionales. La geometría de los muretes se realizó acorde con la información experimental, considerando un espesor constante de 25 mm para las paredes de los bloques huecos de concreto. Los bloques se modelaron con elementos isoparamétricos hexaedros de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo (HX24L). La dimensión de las aristas de los elementos fue de 12.5 mm. Las juntas fueron modeladas con elementos de interfaz plana de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo (Q24IF). El módulo de elasticidad de los bloques fue obtenido de los modelos lineales como se indicó anteriormente y la relación de Poisson fue 0.2. La rigidez normal de los elementos de interfaz para la junta de mortero fue 100 N/mm<sup>2</sup> y la rigidez tangente fue 41.6 N/mm<sup>2</sup>; estos valores se determinaron considerando un módulo de elasticidad del mortero de 1000 MPa y un espesor de junta de 10 mm. Las rigideces de los elementos de interfaz para la junta de bloque de los modelos de muretes sometidos a tensión por flexión paralela a las juntas, fue determinada considerando un espesor de 10 mm y el módulo de elasticidad obtenido de la calibración del modelo lineal. Los apoyos se colocaron conforme a la prueba experimental, restringiendo en uno de los apoyos en la dirección x y y, y en el otro apoyo en la dirección y; adicionalmente, se restringió en la dirección z en los puntos de inicio de las líneas de apoyo. Se aplicaron tres grupos de carga. La primera carga fue al peso propio del murete

correspondiente a un peso volumétrico de 19.6  $kN/m^3$ . La segunda carga fue el peso del equipo de aplicación de carga de 926 N. La tercera carga fue la carga aplicada por los actuadores hidráulicos en el ensaye. Esta carga fue de 4791 N para los muretes sometidos a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a las juntas y de 6570.5 N para los muretes sometidos a tensión por flexión fuera del plano paralela a las juntas. Estos valores de carga corresponden a los promedios de las cargas de falla observados experimentalmente para la planta seleccionada. En la Figura 7a se presenta la malla de elementos finitos, las condiciones de apoyo y las cargas aplicadas al murete sometido a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a las juntas. En la Figura 7b se presentan los elementos de interfaz para este mismo murete; con color azul se indican los elementos de interfaz de las juntas de mortero

verticales y con color rojo los elementos de interfaz de las juntas de mortero horizontales. En la Figura 8a se presenta la malla de elementos finitos, las condiciones de apoyo y las cargas aplicadas al murete sometido a tensión por flexión fuera del plano paralela a las juntas. En la Figura 8b se presentan los elementos de interfaz para este mismo murete; con color azul se indican los elementos de interfaz de las juntas de mortero verticales, con color rojo los elementos de interfaz de las juntas de mortero horizontales y con color verde los elementos de interfaz para modelar el agrietamiento en los bloques huecos de concreto. Se verificó que los resultados de los modelos con este tamaño de elementos finitos comparándolos son adecuados. al con resultados de modelos elásticos hechos con mallas autocontenidas.



(a) Malla de elementos finitos, condiciones de apoyo y cargas



(b) Elementos de interfaz

Figura 7. Modelo de elementos finitos de murete sometido a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a las juntas.



(a) Malla de elementos finitos, condiciones de apoyo y cargas



(a) Elementos de interfaz



#### 2.2.3 Modelo de grieta discreta

En los modelos computacionales no lineales se consideró un modelo de grieta discreta para simular el proceso de fractura de los muretes. Este modelo reproduce un Modo I (Abertura) de agrietamiento. La falla del elemento se obtiene al alcanzar un esfuerzo normal en la interfaz igual a la resistencia a tensión del material. Los análisis no lineales permitieron determinar la resistencia a tensión de los elementos de interfaz que permite reproducir la carga máxima. En los elementos de interfaz se consideró el criterio de ablandamiento de Hordijk et al. (1991). Se asumió una energía de fractura para el mortero de 0.08 N/mm y para los bloques de 0.1 N/mm (van Mier 1997). Las características descritas para los modelos lineales se mantienen en los modelos no lineales. Para resolver el sistema de ecuaciones no lineales se utilizó el método de Newton -Raphson Regular. Se utilizó un criterio de convergencia de desplazamiento dado que se aplicaron incrementos de carga.

## 3. Resultados

#### 3.1 Modelos lineales

# 3.1.1 Determinación del módulo de elasticidad de los bloques

En la Figura 9 se presentan los desplazamientos fuera del plano (dirección y) del murete sometido a tensión por flexión fuera del plano paralela a las juntas. Los desplazamientos son los producidos por la aplicación de los tres grupos de carga. Al centro del claro se tiene un desplazamiento de 0.7766 mm, de los cuales 0.1826 mm, 0.0733 mm y 0.5207 mm, desplazamientos corresponden los а producidos por el peso propio, el peso del equipo de aplicación de carga y la carga del actuador hidráulico, respectivamente. Se determinó que un módulo de elasticidad de 4365 MPa para el bloque permite reproducir la rigidez observada en los ensayes experimentales (12619 N/mm)



Figura 9. Desplazamientos fuera del plano (dirección y) del murete sometido a tensión por flexión fuera del plano paralela a las juntas.

<sup>\*</sup>luis.fernandez@correo.uady.mx

Nota: Este artículo de investigación es parte de Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 25, No. 3, 2021, ISSN: 2448-8364

# **3.1.2 Distribuciones de esfuerzos en los muretes**

Se analizaron los esfuerzos normales en los bloques y en las interfaces de mortero. En el caso de los muretes sometidos a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a las juntas, se graficaron los esfuerzos normales en la dirección z ( $\sigma_{zz}$ ) en la superficie inferior del murete (Figura 10). Se observa que hay una concentración de esfuerzos cerca de los apoyos, pero éstos no son constantes en el espesor de la pared de los bloques y son un efecto local de la geometría de los bloques huecos de concreto. Los mayores esfuerzos están al centro del murete, como indica la Mecánica de Materiales y se puede observar en la Figura 11 donde se grafican los esfuerzos normales de los elementos de interfaz de mortero. En los elementos de interfaz localizados al centro del murete es donde se presentan los mayores esfuerzos normales de tensión y se forma la grieta.

En el caso de los muretes sometidos a tensión por flexión fuera del plano paralela a las juntas, se graficaron los esfuerzos normales en la dirección x ( $\sigma_{xx}$ ) en la superficie inferior del murete (Figura 12). Se observa que hay una concentración de esfuerzos cerca de los apoyos, pero éstos no son constantes en el espesor de la pared de los bloques y es un efecto local de la geometría de los bloques huecos de concreto, de manera similar al caso anterior. Los mayores esfuerzos están al centro del murete, como indica la Mecánica de Materiales y se puede observar en la Figura 13 donde se grafican los esfuerzos normales de los elementos de interfaz. El modelo tiene elementos de interfaz de mortero, así como unos elementos de interfaz de bloques localizados al centro del murete y alineados con los elementos de interfaz de mortero para modelar la grieta. En los elementos de interfaz localizados al centro del murete es donde se presentan los mayores esfuerzos normales de tensión y se forma la grieta.



Figura 10. Esfuerzos normales en la dirección z ( $\sigma_{zz}$ ) en la superficie inferior del murete sometido a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a las juntas (MPa).

<sup>\*</sup>luis.fernandez@correo.uady.mx

Nota: Este artículo de investigación es parte de Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 25, No. 3, 2021, ISSN: 2448-8364



Figura 11. Esfuerzos normales  $\sigma_{nn}$  en los elementos de interfaz del murete sometido a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a las juntas (MPa).



Figura 12. Esfuerzos normales en la dirección x ( $\sigma_{xx}$ ) en la superficie inferior del murete sometido a tensión por flexión fuera del plano paralela a las juntas (MPa).



Figura 13. Esfuerzos normales  $\sigma_{nn}$  en los elementos de interfaz del murete sometido a tensión por flexión fuera del plano paralela a las juntas (MPa).

### 3.2 Modelos no lineales

En la Figura 14 se presentan los esfuerzos normales en la dirección z ( $\sigma_{zz}$ ) del murete sometido a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a las juntas. En esta figura se presenta la malla deformada y se señala con línea discontinua negra la posición de la grieta antes de la carga máxima. Se determinó que la resistencia a tensión de los elementos de interfaz de mortero es 0.13 MPa para reproducir la carga máxima (4791 N). En el modelo computacional se formaron dos grietas simultáneamente; sin embargo, en los experimentos únicamente se forma una. Esto se debe a que las resistencias por adherencia bloque-mortero presentan variaciones en un escenario real a diferencia del modelo computacional. La formación de una sola grieta se puede modelar considerando variabilidad en la resistencia a tensión de los elementos de interfaz de mortero.



Figura 14. Esfuerzos normales en la dirección z ( $\sigma_{zz}$ ) y abertura de grieta del murete sometido a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a las juntas

En la Figura 15 se presentan los esfuerzos normales en la dirección x ( $\sigma_{xx}$ ) del murete sometido a tensión por flexión fuera del plano paralela a las juntas. En esta figura se presenta la malla deformada y se señala con línea discontinua negra la posición de la grieta antes de la carga máxima. Se determinó que la resistencia a tensión de los elementos de interfaz de mortero es 0.38 MPa y la resistencia a tensión de los elementos de interfaz de bloque es 0.55 MPa para reproducir la carga máxima (6570.5 N). En el modelo primero se formó la grieta en los elementos de interfaz de mortero y posteriormente se formó la grieta en los elementos de interfaz de bloque. Se puede observar que los modelos computacionales desarrollados en esta investigación reproducen de manera adecuada los dos mecanismos de falla observados experimentalmente. Los modelos de muretes sometidos a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a la junta reproducen la falla por adherencia bloquemortero en la junta horizontal. Los modelos de muretes sometidos a tensión fuera del plano paralela a la junta reproducen la falla combinada por adherencia bloque-mortero en la junta vertical y tensión en bloques.



Figura 15. Esfuerzos normales en la dirección x ( $\sigma_{xx}$ ) y abertura de grieta del murete sometido a tensión por flexión fuera del plano paralela a las juntas

### 4. Discusión de resultados

#### 4.1 Módulo de elasticidad de los bloques

El módulo de elasticidad es una propiedad que se obtiene de ensayes de especímenes sujetos a compresión axial. Se cuentan con pocos estudios sobre el módulo de elasticidad de los bloques huecos de concreto de tres celdas. En particular, Fernández et al. (2016) ensayaron bloques huecos de concreto de 3 celdas verticales y dimensiones nominales de 150 mm x 200 mm x 400 mm (espesor x altura x longitud). Obtuvieron una resistencia a compresión axial sobre área neta de 8.93 MPa v un módulo de elasticidad sobre área neta de 10921 MPa. Estos resultados son consistentes con la Ecuación 1 propuesta por Rosado Gruintal (2014) para concretos elaborados con agregados calizos de Yucatán, México.

$$E_c = 3520\sqrt{f'_c} \tag{1}$$

El módulo de elasticidad de los bloques huecos de concreto para modelar el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería simple fue 4365 MPa. Este valor es aproximadamente el 40% de 10849 MPa, que es el valor obtenido con la Ecuación 1 para a un ensaye a compresión axial. El valor de 4365 MPa para módulo de elasticidad de los bloques es similar al valor obtenido por Novelo Arjona (2020) de 3,852 MPa. En dicho trabajo se ensayaron boques huecos de concreto, sujetos a flexión (Figura 16a). Las características de los bloques ensayados por Novelo Arjona (2020) eran similares a las del estudio de Flores Chan (2008); en particular, la resistencia compresión axial sobre área neta de dichos bloques fue 9.66 MPa. Se midió experimentalmente la rigidez de los bloques huecos de concreto (Figura 16a) y posteriormente se desarrolló un modelo de elementos finitos tridimensional (Figura 16b) para determinar el módulo de elasticidad que se debe utilizar en el modelo para aproximar la experimental. Este modelo rigidez fue realizado en el programa DIANA (TNO 2019), considerando el mismo tamaño y tipo de elemento (HX24L) que en los modelos de muretes desarrollados en este trabajo. En la Figura 17 se presentan las curvas cargadesplazamiento experimentales obtenidas del ensaye de 6 bloques huecos de concreto y la curva obtenida del modelo del Método de los Elementos Finitos considerando el módulo de elasticidad de 3,852 MPa (Novelo Arjona 2020).



Figura 16. Ensaye a flexión de bloques huecos de concreto (unidades en mm) (Novelo Arjona 2020)



Figura 17. Resultados experimentales y computacionales de la curva carga - desplazamiento de bloques huecos de concreto sometidos a flexión (Novelo Arjona 2020)

4.2 Rigidez de los muretes de mampostería simple

En la Figura 18 se presenta la curva carga – desplazamiento fuera del plano al centro del

murete sometido a tensión por flexión fuera del plano paralela a la junta obtenida con el modelo lineal (línea roja), el modelo no lineal (línea discontinua verde) y el ensaye experimental (línea azul). La curva experimental graficada corresponde al resultado de un murete; sin embargo, todas las curvas experimentales fueron similares (Flores Chan, 2008). El modelo no lineal tiene un comportamiento aproximadamente lineal. Esto es porque el agrietamiento en el modelo no lineal se produce en los últimos pasos de carga, dado que la grieta se propaga de manera rápida. Los modelos computacionales fueron calibrados para aproximar la rigidez del primer ciclo de carga experimental; sin embargo, en el experimento se puede observar degradación de la rigidez de ciclo (línea discontinua) al comparar diferentes ciclos. La degradación de rigidez de ciclo y los desplazamientos inelásticos después de cada ciclo de carga que se observan experimentalmente, son resultado de un proceso complejo que es difícil de medir. Estos dos fenómenos se pueden asociar a la degradación de la adherencia bloque–mortero y al comportamiento no lineal a tensión de los materiales. Estos dos fenómenos no son reproducidos por los modelos no lineales desarrollados en este trabajo.



Figura 18. Curva carga – desplazamiento fuera del plano al centro del murete sometido a tensión por flexión fuera del plano paralela a la junta

# **4.3** Resistencia a tensión de los elementos de interfaz

La resistencia a tensión de los elementos de interfaz de mortero de la junta horizontal y vertical fue 0.13 MPa y 0.38 MPa, respectivamente. La relación entre estas resistencias a tensión fue 2.9. Desde el punto de vista mecánico, no se esperaría una diferencia tan grande entre las dos resistencias, ya que ambas están asociadas a un mismo mecanismo de falla (adherencia bloque-mortero) y se utilizaron los mismos materiales. Sin embargo, esta diferencia en resistencias se puede asociar a que:

• El agrietamiento en los muretes sometidos a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a la junta se propaga de manera continua (Figura 1) y súbita; esto es, no hay restricciones para la abertura de la grieta.  El agrietamiento en los muretes sometidos a tensión por flexión fuera del plano paralela a la junta se propaga de manera discontinua (Figura 3) (Drysdale et al. 1999; Varela et al. 2009) y la presencia de los bloques restringe la abertura de la grieta como se ilustra en la Figura 19. En esta figura se grafican los desplazamientos normales en los elementos de interfaz al centro del murete. En esta figura se observa que los mayores desplazamientos normales (abertura de grieta) se presentan en los elementos de interfaz de mortero (color rojo). El elemento de interfaz de mortero se agrieta primero ya que tiene menor resistencia y simultáneamente el elemento de interfaz del bloque restringe la abertura de la grieta en el elemento de interfaz del mortero que ha iniciado la etapa de ablandamiento por deformación.



Figura 19. Abertura de la grieta en elementos de interfaz para el murete sometido a tensión por flexión fuera del plano paralela a la junta

La resistencia a tensión de los elementos de interfaz de bloque fue 0.55 MPa. Este valor es similar a la resistencia a tensión de los bloques huecos de concreto ensayados por Novelo Arjona (2020), que fue 0.48 MPa. Estos ensayes se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C1006-07 (American Society for Testing and Materials 2013).

## 5. Conclusiones

En este trabajo de investigación se desarrollaron modelos tridimensionales lineales y no lineales del Método del Elemento Finito de muretes de mampostería simple sujetos a cargas fuera del plano. Los muretes eran de bloques huecos de concreto de tres celdas verticales. Con los modelos se analizó la rigidez, la resistencia a tensión y el proceso de agrietamiento de muretes. Los resultados de este trabajo de investigación permiten concluir que:

• El módulo de elasticidad de los bloques huecos de concreto para modelar el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería simple fue 4365 MPa. Este valor corresponde aproximadamente al 40% del módulo de elasticidad de los bloques huecos de concreto obtenido de ensayes bajo cargas axiales. Este resultado es consistente con lo observado en los ensayes de bloques huecos de concreto, sujetos a cargas fuera del plano.

- El modelo no lineal tiene un comportamiento aproximadamente lineal. Esto es porque el agrietamiento en el modelo no lineal se produce en los últimos pasos de carga y la grieta se propaga de manera rápida.
- La resistencia a tensión de los elementos de interfaz de la junta de mortero horizontal y vertical fue 0.13 MPa y 0.38 MPa, respectivamente. La relación entre estas resistencias a tensión fue 2.9.
- Los modelos computacionales no lineales desarrollados en esta investigación reproducen de manera

adecuada los dos mecanismos de falla observados experimentalmente. Los modelos de muretes sometidos a tensión por flexión fuera del plano perpendicular a la junta reproducen la falla por adherencia bloque-mortero en la junta horizontal. Los modelos de muretes sometidos a tensión por flexión fuera del plano paralela a la junta reproducen la falla combinada por adherencia bloque-mortero en la junta vertical y tensión en bloques.

## Agradecimientos

La cuarta autora agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para realizar sus estudios de Maestría en Ingeniería en la Universidad Autónoma de Yucatán.

## Referencias

American Society for Testing and Materials. (2013). "Standard test method for splitting tensile strength of masonry units", ASTM C1006-07. ASTM International, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.

American Society for Testing and Materials. (2015a). "Standard Test Methods for Flexural Bond Strength of Masonry", ASTM E518 / E518M-15. ASTM International, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.

American Society for Testing and Materials. (2015b). "Standard Test Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction", ASTM E72-15. ASTM International, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.

American Society for Testing and Materials. (2019). "Standard Test Methods for Measurement of Masonry Flexural Bond Strength", ASTM C1072-19. ASTM International, West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.

Drysdale R. G., Hamid A. A. y Baker L. R. (1999). "Masonry Structures. Behavior and Design". 2a edición, The Masonry Society, Boulder, Colorado, Estados Unidos de América.

Fernández L. E., Hernández J. A. y Varela J. L. (2016). Comportamiento no lineal de pilas de mampostería de bloques huecos de concreto sujetas a compresión axial. En "Memorias del XX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural", Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Mérida, Yucatán, México.

Fernández L. E., Paleo A. S., Varela J. L., Moreno J. A., y G. Cantón J. A. (2018). Modelación del agrietamiento de muros de mampostería confinada, sujetos a cargas uniformes fuera del plano. En

"Memorias del XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural", Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Campeche, Campeche, México.

Flores Chan R. A. (2008). "Determinación de la resistencia a tensión fuera del plano de la mampostería de bloques huecos de concreto". Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán, México.

Gobierno de la Ciudad de México. (2017). "Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería". Gaceta Oficial de la Ciudad de México, México.

Hordijk D. A. (1991). "Local Approach to Fatigue of Concrete". Tesis de Doctorado, Universidad Tecnológica de Delft, Delft, Holanda.

Moreno-Herrera J., Varela-Rivera J. y Fernandez-Baqueiro L. (2014). Bidirectional strut method: out-of-plane strength of confined masonry walls. "Canadian Journal of Civil Engineering", 41, 1029-1035.

Moreno-Herrera J., Varela-Rivera J. y Fernandez-Baqueiro L. (2016). Out-of-plane design procedure for confined masonry walls. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 142 (2), 1-12.

Municipio de Mérida. (2018). "Normas Técnicas Complementarias de Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería". Gaceta Municipal, Mérida, Yucatán, México.

Novelo Arjona M. E. (2020). "Modelación del agrietamiento de muros de mampostería confinada, con relación de aspecto mayor a 1, sujetos a cargas uniformes fuera del plano". Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Rosado Gruintal A. I. (2014). "Desempeño elástico y plástico del concreto fabricado con agregados reciclados de origen calizo de residuos de demolición". Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

TNO (2019). "DIANA User's Manual". TNO, Delft, Holanda.

Van Mier J. (1997). "Fracture processes of concrete". CRC Press, Boca Raton, Florida, Estados Unidos de América.

Varela J. L., Flores R. A., Fernández L. E. y Vargas G. (2009). Determinación de la resistencia a tensión fuera del plano de la mampostería de bloques huecos de concreto. "Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY", 13(1), 13-23.

Varela-Rivera J. L., Navarrete-Macias D., Fernández-Baqueiro L. E. y Moreno E. I. (2011). Outof-plane behaviour of confined masonry walls. "Engineering Structures", Elsevier, 33, 1734-1741.

Varela-Rivera J., Polanco-May M., Fernandez-Baqueiro L. y Moreno E. I. (2012a). Confined masonry walls subjected to combined axial loads and out-of-plane uniform pressures. "Canadian Journal of Civil Engineering", 39, 439-447.

Varela-Rivera J. L., Moreno-Herrera J., López-Gutiérrez I. y Fernandez-Baqueiro L. (2012b). Outof-plane strength of confined masonry walls. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 138 (11), 1331-1341.

Varela-Rivera J. L., Chan-Esquivel S., Fernandez-Baqueiro L. E. y Moreno-Herrera J. A. (2015). Muros de mampostería confinada con aberturas sujetos a cargas fuera del plano. "Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo", 7(1), 52-65.