



---

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“MODELACIÓN DEL AGRIETAMIENTO DE  
MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA, CON  
RELACIÓN DE ASPECTO DE 0.75, SUJETOS A  
CARGAS UNIFORMES FUERA DEL PLANO”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**I.C. ANDRÉS SANTIAGO PALEO TORRES**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**OPCIÓN ESTRUCTURAS**

**MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO**

**2016**

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán por la formación académica otorgada.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

## RESUMEN

La mampostería confinada es ampliamente utilizada en México en la construcción de edificaciones. En particular, en la Península de Yucatán la mayoría de las viviendas y edificaciones están hechas a base de muros de mampostería confinada de bloques huecos de concreto. En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY) se han realizado estudios para evaluar el comportamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano con el fin de establecer criterios de diseño estructural. En dichos estudios se han observado distintas etapas en las curvas carga – desplazamiento fuera del plano. La última etapa ha sido estudiada ampliamente, ya que durante esta etapa se presenta la carga máxima, y está asociada a un comportamiento de arco. El estudio de las primeras etapas es importante ya que durante estas se presentan los primeros agrietamientos.

El objetivo general de este trabajo de investigación fue simular computacionalmente la evolución inicial del agrietamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano mediante modelos no lineales con el Método del Elemento Finito.

Se realizaron ensayos y modelos computacionales para obtener el módulo de elasticidad de bloques huecos de concreto de tres celdas sometidos a flexión. Se realizaron modelos computacionales de muretes y muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Se utilizaron elementos hexaedros tridimensionales de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo para los bloques de mampostería y los elementos confinantes y para las juntas de mortero se consideraron interfaces planas que constaron de elementos de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo. Se asumió que el modo básico de agrietamiento es tipo I (modo de abertura), con un comportamiento frágil al formarse las grietas. Se calibró el modelo de muros de mampostería confinada considerando los resultados experimentales de tres ensayos a escala natural de muros con relación de aspecto cercana a 0.75. Con base en los resultados obtenidos se concluyó que los primeros agrietamientos en los muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano ocurren en la cara

de aplicación de carga, la cual no es visible en los experimentos. Los agrietamientos horizontales al centro del muro determinan el cambio de pendiente entre la primera y la segunda etapa y ocurren entre el 37% y el 48% de la carga máxima. Finalmente, los modelos computacionales desarrollados para los muretes de mampostería y los muros de mampostería confinada aproximan bien los resultados experimentales.

## ABSTRACT

The confined masonry is widely used in Mexico in the construction of buildings. In particular, in the Yucatan Peninsula most houses and buildings are made of confined masonry walls of hollow concrete blocks. In the College of Engineering of the Autonomous University of Yucatan (FIUADY), studies have been carried out to evaluate the out-of-plane behavior of confined masonry walls in order to establish structural design criteria. Different phases in the load – displacement out-of-plane curves have been observed from these studies. The last phase has been comprehensively studied, given that the maximum load takes place in this phase; this phase is associated with an arch behavior. The study of the early phases is important because during these initial cracking occurs.

The main objective of this research was to simulate computationally the evolution of cracking in confined masonry walls subjected to uniform out – of – plane loads by nonlinear models using the Finite Element Method.

Tests and computational models were carried out in order to determine the elastic modulus of hollow concrete blocks subjected to flexure. Computational models of masonry walls and confined masonry walls subjected to uniform out-of-plane loads were developed. Tridimensional hexahedral 8-node elements with 3 degrees of freedom per node were used for masonry blocks and confining elements; flat interfaces 8-node elements with 3 degrees of freedom per node were considered. It was assumed that the basic mode of cracking was Mode I (opening mode), with a brittle behavior after cracking. The confined masonry walls model was calibrated considering the experimental results of three full-scale walls with aspect ratio of 0.75. Based on the results obtained, the first cracks in the confined masonry walls subjected to uniform out-of-plane loads take place on the wall face of load application, which is not visible in the experiments. The horizontal cracks in the center of the wall that determine the slope change between stages 1 and 2, occur in a range from 37% to 48% of the maximum load. Finally, the computational models developed for masonry walls and confined masonry walls approximate well experimental results.

# CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1 Planteamiento del problema</b> .....	1
<b>1.2 Objetivos</b> .....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
<b>1.3 Alcance de la tesis</b> .....	3
<b>1.4 Organización de la tesis</b> .....	4
<b>CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LA LITERATURA</b> .....	5
<b>2.1 Propiedades índice de la mampostería y el concreto</b> .....	5
<b>2.2 Ensayes de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano</b> .	7
<b>2.3 Mecánica de la fractura</b> .....	11
<b>2.4 Tipos de elementos finitos</b> .....	12
2.4.1 Elementos sólidos.....	12
2.4.2 Elementos de interfaz plana.....	13
<b>2.4 Modelación de muros de mampostería con el MEF</b> .....	14
2.4.1 Modelos de elementos finitos para muros ante cargas en el plano.....	15
2.4.2 Modelos de elementos finitos para muros ante cargas fuera del plano.....	17
<b>2.6 Observaciones de la revisión de la literatura</b> .....	20
<b>CAPÍTULO III. METODOLOGÍA</b> .....	21
<b>3.1 Descripción general</b> .....	21
<b>3.2 Comportamiento a flexión de bloques huecos de concreto</b> .....	21
<b>3.3 Selección de especímenes ensayados para calibrar los modelos</b> .....	24
3.3.1 Selección de muretes.....	24
3.3.2 Selección de muros de mampostería confinada.....	25
<b>3.4 Análisis del comportamiento de los muros de mampostería confinada</b> .....	31
<b>3.5 Desarrollo de modelos</b> .....	32
3.5.1 Análisis de muretes.....	32
3.5.2 Análisis preliminar de un muro de mampostería confinada.....	34
3.5.3 Calibración del modelo de muros de mampostería confinada.....	37
3.5.4 Análisis finales de muros de mampostería confinada.....	38
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS</b> .....	39

<b>4.1 Bloques</b> .....	39
4.1.1 Ensayes .....	39
4.1.2 Modelos computacionales.....	40
<b>4.2 Análisis del comportamiento de muros de mampostería confinada</b> .....	41
<b>4.3 Muretes</b> .....	43
<b>4.4 Muros de mampostería confinada</b> .....	44
4.4.1 Análisis preliminar de un muro de mampostería confinada.....	44
4.4.2 Análisis de sensibilidad de la resistencia de las juntas de mortero.....	45
4.4.3 Análisis finales de muros de mampostería confinada .....	46
<b>CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	50
<b>5.1 Evolución del agrietamiento</b> .....	50
<b>5.2 Rigideces agrietadas</b> .....	52
<b>5.3 Modelo de un muro parte de una estructura sujeta al empuje de viento</b> .....	53
<b>CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES</b> .....	56
<b>CAPÍTULO VII. REFERENCIAS</b> .....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Evolución del agrietamiento en los ensayos (Moreno, 2014) .....	10
Figura 2.2 Modos básicos de deformación de un cuerpo agrietado .....	11
Figura 2.3 Tipos de materiales de acuerdo a su comportamiento .....	12
Figura 2.4 Sistema de coordenadas naturales en un elemento isoparamétrico hexaedro .....	13
Figura 2.5 Sistema de coordenadas naturales en un elemento de interfaz plana.....	14
Figura 2.6 Enfoques básicos de modelación de grietas .....	15
Figura 3.1 Ensaye a flexión de bloques huecos de concreto de 3 celdas.....	22
Figura 3.2 Cargas y apoyos de ensaye a flexión de bloques .....	23
Figura 3.3 Modelo numérico del ensaye a flexión de bloques huecos.....	23
Figura 3.4 Detalles del murete de Dorantes.....	24
Figura 3.5 Plano constructivo del muro de mampostería confinada de Varela <i>et al.</i> (2012a)	26
Figura 3.6 Sistema de carga y soporte de muros de mampostería confinada de Varela <i>et al.</i> (2012a) .....	26
Figura 3.7 Curva carga – desplazamiento del muro de mampostería confinada de Varela <i>et al.</i> (2012a) .....	27
Figura 3.8 Plano constructivo del muro de mampostería confinada de Varela <i>et al.</i> (2015) ..	28
Figura 3.9 Curva carga – desplazamiento del muro de mampostería confinada de Varela <i>et al.</i> (2015) .....	29
Figura 3.10 Plano constructivo del muro de mampostería confinada de G.Cantón (2016) ....	30
Figura 3.11 Curva carga – desplazamiento del muro de mampostería confinada de G.Cantón (2016) .....	30
Figura 3.12 Modelo computacional del murete ensayado por Dorantes .....	34
Figura 3.13 Condiciones de apoyos del muro de Varela <i>et al.</i> (2012a) .....	36
Figura 3.14 Condiciones de carga del muro de Varela <i>et al.</i> (2012a).....	37
Figura 4.1 Curvas carga – desplazamiento del bloque sometido a flexión .....	39
Figura 4.2 Resultados experimentales y computacionales de la curva carga – desplazamiento de bloques sometidos a flexión .....	40
Figura 4.3 Aproximación de etapas para el muro de Varela <i>et al.</i> .....	42
Figura 4.4 Aproximación de etapas para el muro de Varela <i>et al.</i> (2015) .....	42
Figura 4.5 Aproximación de etapas para el muro de G.Cantón.....	43
Figura 4.6 Carga – desplazamiento al centro de un murete .....	44
Figura 4.7 Evolución del agrietamiento para el modelo preliminar MR1 .....	45

Figura 4.8 Evolución del agrietamiento para el modelo final MR1 .....	47
Figura 4.9 Evolución del agrietamiento para el modelo final MR2 .....	48
Figura 4.10 Evolución del agrietamiento para el modelo final MR3 .....	49
Figura 5.1 Conceptualización de la evolución del agrietamiento en etapas.....	51
Figura 5.2 Mecanismos de las etapas 1 y 2 en un muro de mampostería confinada .....	51
Figura 5.3 Mecanismo de la etapa 3 en un muro de mampostería confinada .....	52
Figura 5.4 Respuesta de modelos agrietados.....	53
Figura 5.5 Respuesta computacional de un muro sujeto al empuje de viento .....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Rigidez de los bloques .....	40
Tabla 4.2 Análisis de sensibilidad de ftp .....	46

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

La mampostería de piezas artificiales (e.g. tabiques, bloques de concreto) es un material ampliamente utilizado en México en la construcción de edificaciones. La mayoría de las viviendas y edificaciones construidas en la Península de Yucatán están hechas a base de muros de mampostería confinada de bloques huecos de concreto. La mampostería confinada es aquella que está reforzada perimetralmente con elementos de concreto reforzado (castillos y dalas).

La mampostería se puede utilizar con fines estructurales, como es el caso de muros cargadores. Estos muros pueden estar sujetos a cargas en el plano y fuera del plano. Estas últimas pueden ser las producidas por las presiones del viento. El diseño de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano en ocasiones no se realiza debido a la falta de especificaciones en el país y, si se realiza, se hace con especificaciones de otros países que no necesariamente están asociadas a las propiedades y el comportamiento de las mamposterías utilizadas en México. Por lo tanto, es necesario desarrollar especificaciones para el diseño de la mampostería basadas en propiedades regionales y nacionales.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY) se han realizado estudios para conocer las propiedades de la mampostería y evaluar el comportamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Las variables de estudio que se han considerado son: condiciones de apoyo (Varela *et al.*, 2011), relación de aspecto y relación de esbeltez (Varela *et al.*, 2012a), carga axial (Varela *et al.*, 2012b), aberturas (Varela *et al.*, 2015) y tipo de pieza (Moreno, 2014).

En dichos estudios se ha observado que en la última etapa en las curvas carga – desplazamiento fuera del plano, el muro tiene un comportamiento de arco. En

dichos estudios se ha analizado ampliamente el comportamiento de arco, ya que durante esta etapa se presenta la carga máxima. Asimismo se han desarrollado diversos modelos analíticos para predecir la carga máxima. Entre los modelos considerados están los de líneas de fluencia, puntal de compresión, puntal de compresión modificado, puntal y resorte y puntal bidireccional.

Los códigos de diseño consideran estados límites de servicio y carga última. Las cargas máximas están asociadas al segundo estado límite y, han sido ampliamente estudiadas como se mencionó anteriormente. El estado límite de servicio en muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano está relacionado con las primeras etapas de comportamiento (tipo placa y de transición), ya que durante éstas se presentan los primeros agrietamientos. Las primeras etapas no han sido estudiadas lo suficiente debido a que la aparición de los primeros agrietamientos en los muros ha sido difícil de detectar durante los experimentos. En general, los modelos computacionales desarrollados para predecir las cargas de agrietamiento no siempre se aproximan a los valores observados experimentalmente. Con base en lo anterior es necesario desarrollar modelos analíticos y computacionales más robustos que aproximen mejor los datos experimentales.

Con el avance de la tecnología ha sido posible la generación de programas computacionales basados en el Método del Elemento Finito (MEF), permitiendo resolver problemas de gran complejidad. El MEF permite modelar elementos y sistemas estructurales en el rango lineal y no lineal. En particular, el MEF puede utilizarse para modelar el comportamiento de pilas, muretes y muros de mampostería. Estos modelos computacionales deben ser calibrados con la información experimental. Los modelos computacionales son ventajosos respecto a los ensayos, ya que tienen un menor costo y consumo de tiempo.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Simular computacionalmente la evolución inicial del agrietamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano mediante modelos no lineales con el Método del Elemento Finito.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Desarrollar modelos no lineales de elementos finitos de muretes sujetos a cargas fuera del plano.
- Desarrollar modelos no lineales de elementos finitos de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano.
- Determinar la evolución del agrietamiento para muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano.

## **1.3 Alcance de la tesis**

En este trabajo se modelaron muros de mampostería confinada, con relación de aspecto cercana a 0.75, sujetos a cargas uniformes fuera del plano. En los modelos computacionales se consideraron bloques huecos de concreto de tres celdas de diferentes espesores. Se utilizaron elementos confinantes de diferentes secciones transversales. Para simular el agrietamiento del muro se utilizó un modelo de agrietamiento discreto. Se consideraron elementos hexaedros tridimensionales de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo para los bloques de mampostería y los elementos confinantes, así como elementos interfaz plana de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo para las juntas de mortero. Se asumió que el modo básico de agrietamiento era de tipo I (apertura de grieta – crack opening), con un comportamiento frágil al formarse las grietas. Con los modelos realizados se simuló computacionalmente las primeras etapas del agrietamiento con el propósito de aproximar las curvas carga – desplazamiento fuera del plano obtenidas experimentalmente.

## **1.4 Organización de la tesis**

En el capítulo 1 se presenta el planteamiento del problema, los objetivos, el alcance y el contenido de la tesis.

En el capítulo 2 se presenta la revisión de la literatura sobre las propiedades índice de la mampostería en el municipio de Mérida, los ensayos llevados a cabo de muros de mampostería sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Se presentan los trabajos sobre modelación con el MEF de muros de mampostería sujetos a cargas en el plano y fuera del plano.

En el capítulo 3 se presenta la metodología utilizada para la realización de esta investigación, que incluye ensayos y modelos computacionales de bloques huecos de concretos sujetos a flexión, selección de especímenes y desarrollo de modelos computacionales de muretes y muros de mampostería confinada.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos y de los modelos computacionales de los bloques, así como los resultados computacionales de los análisis de muretes y muros de mampostería confinada. Se presentan los resultados del análisis de sensibilidad para calibrar los modelos de muros de mampostería confinada. Se comparan los resultados computacionales con los resultados experimentales.

En el capítulo 5 se analizan las tres etapas de la curva carga – desplazamiento fuera del plano y los eventos de agrietamiento asociados a las mismas. Se analizan las rigideces asociadas a los diferentes estados de agrietamiento de los muros y se explica el problema de los puntos de bifurcación que se presentan en los modelos computacionales.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones de esta tesis.

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LA LITERATURA**

Se realizó una revisión de la literatura sobre propiedades índice de la mampostería y el concreto, la resistencia a tensión por flexión de la mampostería y el comportamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Esta revisión incluye estudios analíticos y experimentales. Adicionalmente se aborda brevemente acerca de los conceptos básicos de mecánica de la fractura y el modelado con elementos finitos.

#### **2.1 Propiedades índice de la mampostería y el concreto**

Previo a las investigaciones sobre el comportamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano, en la FIUADY se realizaron estudios acerca de las propiedades índice de la mampostería. En particular se determinó la resistencia a compresión axial de la mampostería (González 2006, González 2010), el módulo de elasticidad del concreto (Rosado 2014), el módulo de elasticidad del mortero y el módulo de elasticidad de bloques huecos de concreto (Hernández 2015) y la resistencia a tensión por flexión fuera del plano paralela y perpendicular a las juntas de mortero de la mampostería (Flores 2008, Dorantes 2011, Baeza 2014, Moreno 2014, Ojeda 2014). A continuación se describen brevemente los estudios realizados.

González (2006) realizó un estudio para conocer las principales características y propiedades mecánicas de los bloques huecos de concreto de tres celdas y 15 cm de espesor, así como los diferentes tipos de morteros que se usan en la construcción de los muros de mampostería; determinó la resistencia a compresión axial y el módulo de elasticidad de la mampostería típica de la Ciudad de Mérida. González (2010), evaluó el comportamiento de la mampostería construida con bloques huecos de concreto de distinto espesor, sujeta a compresión axial; realizó ensayos experimentales de bloques y pilas considerando bloques de 12, 15 y 20 cm de espesor.

Rosado (2014) realizó un estudio semi-empírico acerca del concreto empleado en la región y determinó que el módulo de elasticidad se puede calcular con la Ecuación (2.1) (en MPa), en donde  $E_m$  es el módulo de elasticidad del concreto y  $f'c$  es la resistencia a compresión axial promedio obtenida de ensayos de cilindros de concreto.

$$E_m = 3520\sqrt{f'c} \quad (2.1)$$

Hernández (2015) realizó un estudio acerca de pilas de mampostería de bloques huecos de concreto de tres celdas. En su trabajo realizó ensayos de cubos y cilindros de mortero en proporcionamiento por volumen 1:2:7 (cemento Portland: cal: arena) para determinar el módulo de elasticidad del mortero de la región, obteniendo un valor promedio de 7994 MPa. De los ensayos de bloques concluye que se puede utilizar la Ecuación (2.2) (en MPa) para calcular el módulo de elasticidad de bloques huecos de concreto, en donde  $E_p$  es el módulo de elasticidad en función de  $f_p$  que es la resistencia compresión axial sobre área neta de bloques huecos de concreto.

$$E_p = 3300\sqrt{f_p} \quad (2.2)$$

Flores (2008) determinó la resistencia a tensión por flexión fuera del plano de la mampostería de bloques huecos de concreto de tres celdas con dimensiones nominales de 15 x 20 x 40 cm. La resistencia a tensión por flexión perpendicular a las juntas promedio ( $f_{tpe}$ ) fue de 0.14 MPa y la paralela a las juntas promedio ( $f_{tpa}$ ) fue de 0.40 MPa. Dorantes (2011) determinó dichas resistencias para la mampostería de bloques huecos de concreto de tres celdas con dimensiones nominales de 12 x 20 x 40 cm, obteniendo que  $f_{tpe}$  fue 0.12 MPa y  $f_{tpa}$  fue 0.37 MPa. Baeza (2014) determinó dichas resistencias para la mampostería de tabiques sólidos de arcilla con dimensiones nominales de 11.7 x 5.2 x 23.3 cm, obteniendo que  $f_{tpe}$  fue 0.16 MPa y  $f_{tpa}$  fue 0.56 MPa. Ojeda (2014) determinó dichas resistencias para la mampostería de tabiques multiperforados de arcilla extruida con dimensiones nominales de 11.6 x 20 x 32.7 cm (TAG) y 12 x 12 x 25 cm (TAP), obteniendo que para los TAG  $f_{tpe}$  fue 0.44 MPa y  $f_{tpa}$  fue 0.63 MPa, y para los TAP  $f_{tpe}$  fue 0.45 MPa y  $f_{tpa}$  fue 0.78 MPa. Moreno (2014) determinó dichas resistencias para la mampostería de

bloques huecos de concreto de dos celdas con dimensiones nominales de 12 x 20 x 40 cm, obteniendo que  $f_{tpe}$  fue 0.13 MPa y  $f_{tpa}$  fue 0.33 MPa.

## **2.2 Ensayes de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano**

Varela *et al.* (2011) ensayaron 6 muros de Mampostería Confinada (MC) sujetos a cargas fuera del plano. Las cargas se aplicaron con una bolsa de aire. Los muros se construyeron con bloques huecos de concreto de 3 celdas con dimensiones nominales de 15 x 20 x 40 cm. Las dimensiones de los muros fueron de 360 cm de longitud, 176 cm de altura y 15 cm de espesor. La variable de estudio fue las condiciones de apoyo. Se consideraron apoyos simples en 3 y 4 bordes. En las curvas carga – desplazamiento fuera del plano se observaron diferentes etapas. Cerca del final de la curva, en la última etapa, el comportamiento del muro fue asociado a un comportamiento de arco. Se observó que el patrón de agrietamiento final y la resistencia de los muros con 3 y 4 apoyos fueron similares. Dicho patrón final consistió en una grieta horizontal al centro y grietas diagonales a 45° del centro hacia las cuatro esquinas del muro. El patrón dividió al muro en segmentos y permitió la formación de un mecanismo de colapso. Se observó la deformación en el plano de los elementos confinantes. La falla estuvo asociada a la excesiva rotación de los segmentos del muro (inestabilidad de los segmentos). Se desarrollaron modelos analíticos con base en el MEF para predecir el primer agrietamiento presentado en las primeras etapas de la curva; el análisis fue elástico lineal y se emplearon elementos finitos tipo cascarón de 4 nodos con 6 grados de libertad (gdl) por nodo. Igualmente desarrolló modelos analíticos para predecir la resistencia máxima de los muros con base en el MLFI y el Método de Puntal de Compresión (MPC).

Varela *et al.* (2012a) ensayaron seis muros de MC sujetos a cargas fuera del plano, en los cuales sus variables de estudio fueron la relación de esbeltez y la relación de aspecto. Para estudiar la relación de esbeltez, ensayaron cuatro muros; las dimensiones de los muros de mampostería fueron dos con espesor nominal de 12 cm a base de bloques de 12 x 20 x 40 cm y dos con espesor nominal de 15 cm a base de

bloques de 15 x 20 x 40 cm. Se utilizó el sistema de carga de bolsas y el muro de reacción de Varela *et al.* (2011). Durante los ensayos de los muros, se observaron las mismas etapas observadas por Varela *et al.* (2011) en las curvas carga – desplazamiento fuera del plano; en las primeras etapas se presentaron los primeros agrietamientos y en la última etapa la resistencia máxima. Se calculó la resistencia al agrietamiento con base en el MEF, utilizando elementos tipo Cascarón de 4 nodos con 6 gdl por nodo. Se calculó la resistencia máxima fuera del plano de los especímenes con los métodos MLFI y MPC. Para estudiar la relación de aspecto ensayaron dos muros de mampostería a base de bloques de 15 x 20 x 40 cm, el primero con relación de aspecto cercana a 0.75 y el segundo con relación de aspecto cercana a 1. Ambos muros fueron apoyados en los 4 lados. El patrón de agrietamiento de los muros fue similar al observado en el ensayo de los primeros cuatro muros. Igualmente, en las curvas carga – desplazamiento fuera del plano se observaron las etapas mencionadas anteriormente. El muro 1 falló por la inestabilidad debida al desplazamiento de los bloques mientras que el 2 falló por aplastamiento de la mampostería. Se calculó analíticamente la resistencia al agrietamiento con base en el MEF (elementos tipo Cascarón de 4 nodos con 6 gdl por nodo) y la resistencia máxima con base en el MLFI, MPC y el MPCM (Método del Puntal de Compresión Modificado). Se discute que con el MEF se obtienen mejores resultados para muros con confinamiento de poca rigidez.

Varela *et al.* (2012b) ensayaron dos muros de mampostería confinada a base de bloques de 15 x 20 x 40 cm sujetos a cargas fuera del plano, en los cuales estudiaron el efecto de la carga axial. En ese trabajo se ensayaron muros con relación de aspecto de 0.75. Para calcular la resistencia al agrietamiento se utilizó el MEF con elementos hexaédricos isoparamétricos de ocho nodos con tres gdl por nodo que permitieron modelar los agujeros de los bloques de concreto y el traslape de dichas piezas entre hiladas del muro. Este modelo se utilizó para considerar el efecto combinado de los esfuerzos producidos por la carga axial y por la carga fuera del plano. Se consideró el peso propio de los elementos. Los resultados analíticos obtenidos con este modelo fueron similares a los experimentales. Para calcular la resistencia máxima se utilizaron el MLFI y el MRP (Método del Resorte y el Puntal).

Varela *et al.* (2015) ensayaron cinco muros de mampostería confinada a base de bloques de 15 x 20 x 40 cm sujetos a cargas fuera del plano, su variable de estudio fue las aberturas. Los cinco muros ensayados tuvieron una relación de aspecto cercana a 0.75. El primer muro no tenía aberturas y sirvió de testigo, tres muros tenían una abertura que representaba una puerta y un muro tenía una abertura que representaba una ventana. Durante los ensayos se observaron las etapas mencionadas anteriormente en las curvas carga – desplazamiento fuera del plano. La parte sólida de los muros especímenes se comportó en una primera etapa como una placa apoyada en tres lados. En una segunda etapa se comportó como una placa apoyada perimetralmente. La resistencia al agrietamiento se calculó con el MEF utilizando un modelo tridimensional basado en elementos hexaédricos isoparamétricos de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo con dimensiones de 25 x 25 x 30 mm (longitud x ancho x altura). El muro de mampostería fue modelado tomando en cuenta las celdas del bloque hueco de concreto y el cuatrapeo entre hiladas. No se consideró diferencia por la interfaz entre el mortero y los bloques. Dentro del modelo se incluyó el sistema para cubrir la abertura de los muros. Se consideró el peso propio de los elementos en el modelo. En dicho modelo se asumieron comportamientos elásticos lineales para el concreto y la mampostería. Para el cálculo analítico de la resistencia máxima se utilizó el Método del Puntal y el Resorte Modificado.

Moreno (2014) (Moreno *et al.*, 2015) realizó un trabajo en el que analizó los resultados reportados por Varela *et al.* (2011), Varela *et al.* (2012a), Varela *et al.* (2012b), Varela *et al.* (2015) y adicionalmente el ensaye de 6 muros cuyas variables de estudio fueron la relación de aspecto y el tipo de pieza. Los tres primeros muros que ensayó fueron de una relación de aspecto cercana a 0.75 y fueron a base de bloques huecos de concreto de tres celdas de 15 x 20 x 40 cm (M1), de tabiques multiperforados de arcilla de 11.5 x 20 x 32.5 cm (M2) y de tabiques multiperforados de arcilla de 11.5 x 12 x 25 cm (M3). Los últimos tres muros que ensayó fueron de una relación de aspecto cercada a 1 y al igual que los primeros tres fueron a base de bloques huecos de concreto de tres celdas de 15 x 20 x 40 cm (M3), de tabiques multiperforados de arcilla de 11.5 x 20 x 32.5 cm (M5) y de tabiques multiperforados de arcilla de 11.5 x 12 x 25 cm (M6). Durante el ensaye de sus muros observó las etapas

mencionadas anteriormente. De su trabajo concluye que el patrón de agrietamiento final depende de la relación de aspecto pero no depende ni del tipo de pieza ni de la resistencia a compresión de la mampostería. Posterior al análisis de los resultados experimentales describe los eventos de agrietamiento en la curva carga – desplazamiento fuera del plano (Figura 2.1). Observa que en un inicio se producen agrietamientos horizontales en el centro del muro, seguido por una etapa de degradación del panel de mampostería, que termina con la formación de las grietas a 45° para dar pie a la última etapa, asociada a un comportamiento de arco. Propone conservadoramente utilizar un valor del 25% de la resistencia máxima para obtener la resistencia de agrietamiento. Adicionalmente, desarrolló el Método del Puntal Bidireccional para predecir la carga máxima (Moreno *et al.*, 2014).

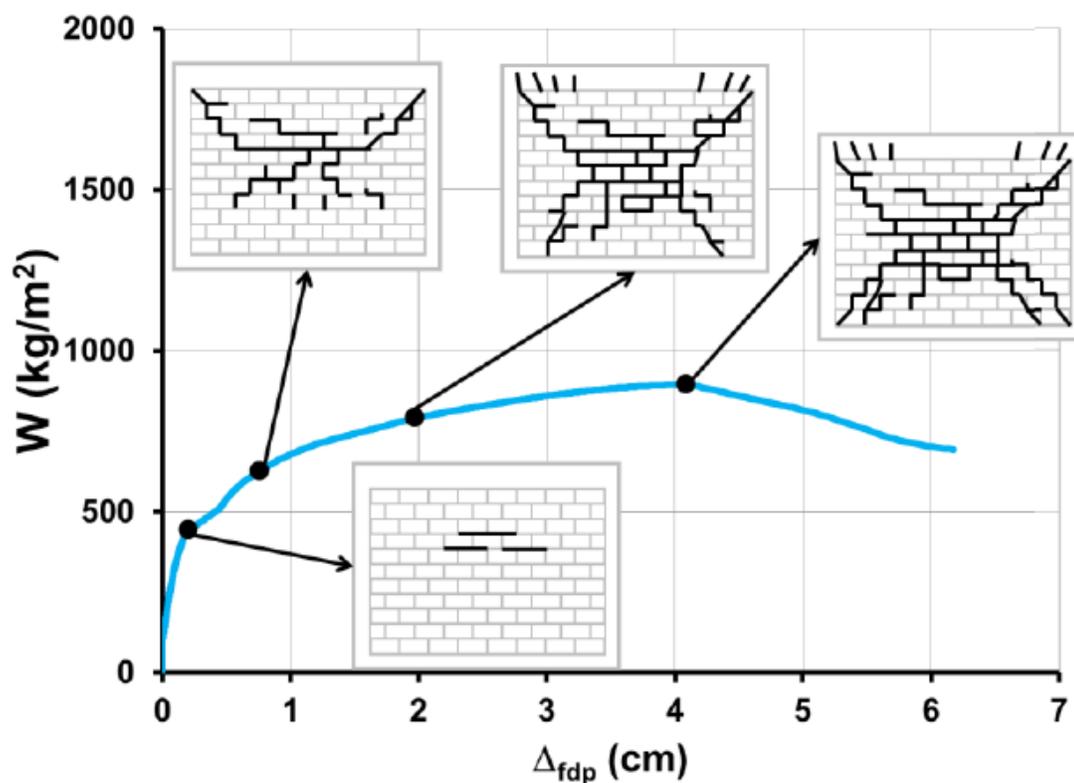


Figura 2.1 Evolución del agrietamiento en los ensayos (Moreno, 2014)

## 2.3 Mecánica de la fractura

La mecánica de la fractura es la teoría que determina la falla del material por un criterio de energía, además de conjugarse con un criterio de resistencia. Dos aspectos fundamentales de la mecánica de la fractura son: el proceso de generación de grietas y el comportamiento de un material después que ha alcanzado una superficie de falla (Bazant y Planas, 1998).

La mecánica de fractura identifica tres modos básicos de deformación en un cuerpo agrietado, los cuales están caracterizados por el movimiento relativo entre las superficies de la grieta. Estos modos son comúnmente referidos como (Figura 2.2): Modo I (modo de abertura), Modo II (modo de deslizamiento), Modo III (modo de torsión o de rasgado).

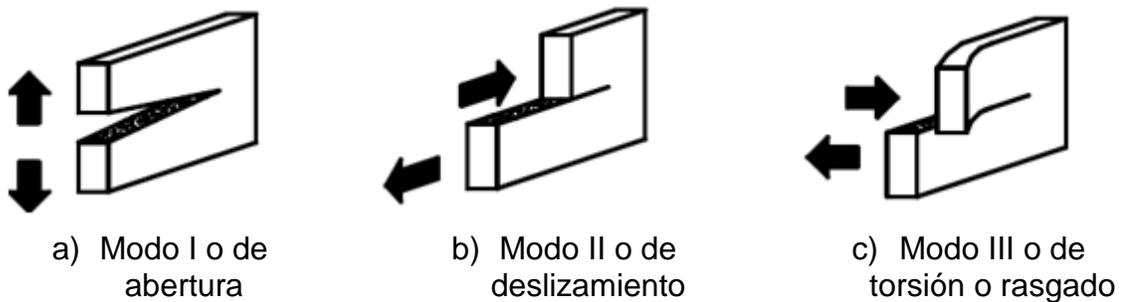


Figura 2.2 Modos básicos de deformación de un cuerpo agrietado

El comportamiento mecánico de las estructuras está fuertemente influenciado por los materiales usados. Basados en su respuesta esfuerzo a tensión - deformación, la mayoría de los materiales utilizados en la ingeniería pueden ser categorizados en materiales frágiles, dúctiles o cuasi-frágiles (Figura 2.3) (Shah, et al., 1995). Los materiales frágiles tienen una rápida disminución de los esfuerzos cuando el material se ha fracturado. Los materiales dúctiles se caracterizan por un comportamiento elasto-plástico después de haber alcanzado el esfuerzo máximo a tensión. Los materiales cuasi-frágiles se caracterizan por un decremento gradual de los esfuerzos después de haberse alcanzado el esfuerzo máximo a tensión.

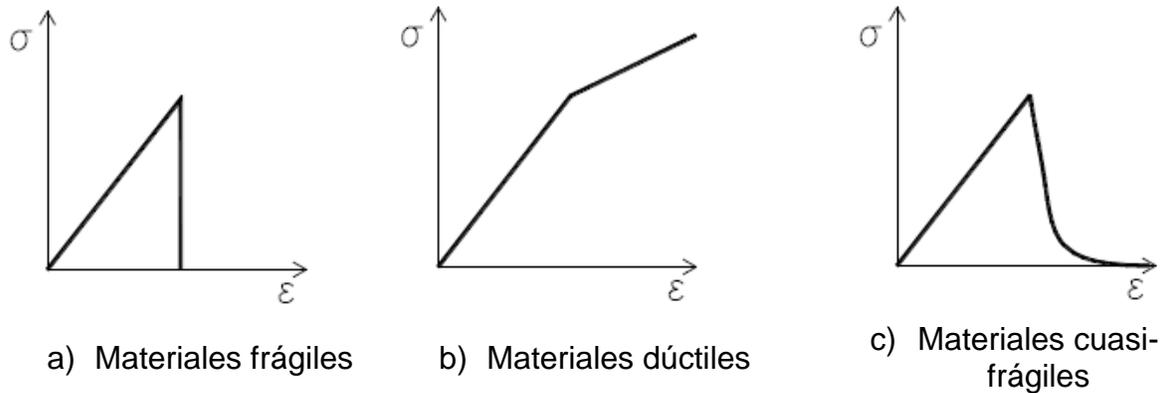


Figura 2.3 Tipos de materiales de acuerdo a su comportamiento

## 2.4 Tipos de elementos finitos

A continuación se muestran de manera breve las características de elementos típicamente utilizados en la modelación tridimensional del agrietamiento en la mampostería, utilizando el programa computacional DIANA (TNO, 2011) en conjunto con la aplicación denominada midas Fx for DIANA, que es un entorno gráfico para el pre – proceso y el post – proceso de modelos del MEF.

### 2.4.1 Elementos sólidos

Los elementos isoparamétricos hexaedros (elementos sólidos) de 8 nodos son denominados "HX24L" en DIANA (Figura 2.4). Este elemento utiliza una interpolación lineal y tiene un esquema de integración de Gauss de 2x2x2. La aproximación del campo de desplazamientos,  $u, v, w$ , puede ser expresada en función de las coordenadas naturales  $\xi, \eta, \zeta$ . Los desplazamientos  $u, v, w$  son en la dirección  $x, y, z$ , respectivamente.

La relación constitutiva general está expresada en la Ecuación (2.3).

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.3)$$

En donde  $\{\sigma\}$  es el vector de esfuerzos  $(\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx})^T$ ,  $\{\varepsilon\}$  es el vector de desplazamientos relativos  $(\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{zz} \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx})^T$  y  $[D]$  es la matriz

constitutiva (Ecuación (2.4)), en función del módulo de elasticidad  $E$  y la relación de poisson  $\nu$ .

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

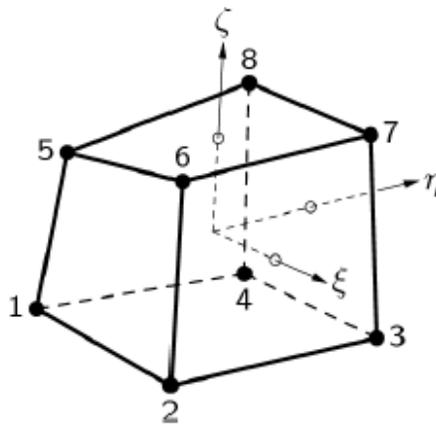


Figura 2.4 Sistema de coordenadas naturales en un elemento isoparamétrico hexaedro

### 2.4.2 Elementos de interfaz plana

En DIANA los elementos de interfaz plana de ocho nodos son denominados "Q24IF" (Figura 2.5). Este elemento está basado en una interpolación lineal. Para este elemento se aplica una integración de Newton – Cotes de  $2 \times 2$ . Los elementos de interfaz describen su comportamiento en las coordenadas naturales  $n, t, s$  en términos de la relación entre los desplazamientos relativos normales ( $\Delta u_n$ ) y cortantes ( $\Delta u_t, \Delta u_s$ ) y las tracciones normales ( $t_n$ ) y cortantes ( $t_t, t_s$ ).

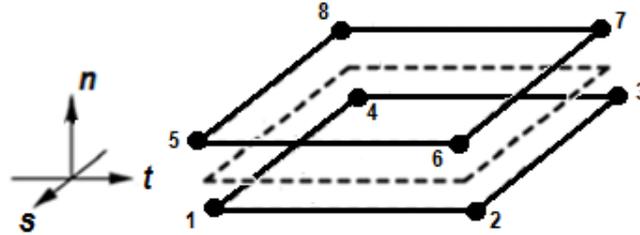


Figura 2.5 Sistema de coordenadas naturales en un elemento de interfaz plana

La relación constitutiva general, es asumida incrementalmente lineal (Ecuación (2.5)).

$$\{t\} = [D] \{\Delta u\} \quad (2.5)$$

En donde  $\{t\}$  es el vector de tracciones  $(t_n \ t_t \ t_s)^T$ ,  $\{\Delta u\}$  es el vector de desplazamientos relativos  $(\Delta u_n \ \Delta u_t \ \Delta u_s)^T$  y  $[D]$  es la matriz (Ecuación (2.6)).

$$D = \begin{bmatrix} D_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & D_{tt} & 0 \\ 0 & 0 & D_{ss} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Las Ecuaciones (2.6, 2.7, 2.8) definen los coeficientes de la matriz de rigidez tangencial, para el caso de modelación de agrietamiento discreto con elementos de interfaz plana.

$$D_{nn} = \frac{\partial t_n}{\partial \Delta u_n} \quad (2.6)$$

$$D_{tt} = \frac{\partial t_t}{\partial \Delta u_t} \quad (2.7)$$

$$D_{ss} = \frac{\partial t_s}{\partial \Delta u_s} \quad (2.8)$$

## 2.4 Modelación de muros de mampostería con el MEF

Se han realizado diversas investigaciones a nivel internacional sobre modelación de la mampostería, con el MEF. Para los muros de mampostería con cargas en el plano se han realizado una gran cantidad de investigaciones, se presenta un breve resumen de algunas de ellas para tener un contexto amplio sobre la modelación de la falla de la mampostería. Posteriormente se presentan trabajos de modelación con el MEF para

muros de mampostería con cargas fuera del plano. La información en este último tema es escasa.

Antes de presentar los trabajos previos sobre modelación computacional de la mampostería es pertinente señalar que para el modelado de materiales que presentan grietas cohesivas se pueden usar tres enfoques básicos (Bazant y Planas, 1998): grieta discreta entre elementos (Figura 2.6a), grieta distribuida en elementos continuos (Figura 2.6b) y grieta embebida en el interior del elemento (Figura 2.6c). Los diversos estudios realizados están basados en los dos primeros enfoques y a que estos dos enfoques han sido implementados en programas de cómputo comerciales del MEF.

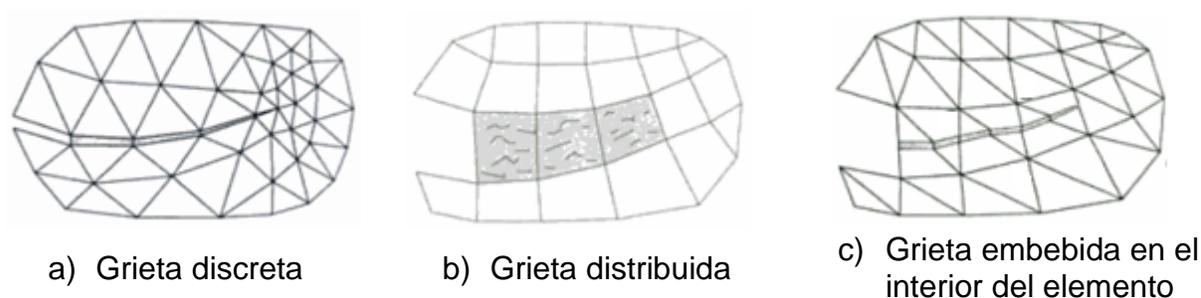


Figura 2.6 Enfoques básicos de modelación de grietas

En el modelo de grieta discreta, se considera la propagación de la grieta entre elementos, las fuerzas cohesivas son simuladas ya sea por condiciones de frontera no lineales mixtas o usando elementos de interfaz conectando los nodos en ambos lados de la grieta. En el modelo de grieta distribuida, se consideran formulaciones convencionales de elementos finitos y se modifican las relaciones constitutivas esfuerzo – deformación para simular el efecto de la abertura de la grieta en el elemento. En el modelo de grieta embebida en el interior del elemento, se considera la localización de la zona de agrietamiento, para después reemplazar la aproximación del campo de desplazamientos para considerar la presencia de la grieta (Bazant y Planas, 1998).

#### 2.4.1 Modelos de elementos finitos para muros ante cargas en el plano

Lourenço y Rots (1997) desarrollaron un modelo de interfaz con múltiples superficies de plasticidad para analizar muros mampostería sujetos a cargas laterales en el plano.

El modelo fue comparado con ensayos de cinco muros de mampostería de 100 x 100 cm a base de tabiques sólidos de arcilla de 10 cm de espesor, los cuales fueron sometidos a cargas laterales en el plano, en combinación con carga axial. Dos muros fueron construidos con una abertura al centro y los otros tres fueron sólidos con variaciones en la carga axial. En los modelos de elementos finitos usaron elementos cuadriláteros de esfuerzo plano (8 nodos) y elementos lineales de interfaz (6 nodos) para las juntas de mortero. Cada tabique fue modelado con una malla de 4 x 2 elementos. Se concluyó que los resultados numéricos aproximaron adecuadamente los experimentales.

Lourenço *et al.* (1998) realizaron un modelo anisotrópico continuo para aproximar el comportamiento de muros de mampostería ante cargas en el plano. El modelo constitutivo de los muros fue de plasticidad y se seleccionaron dos criterios de falla; el primero fue para un comportamiento dúctil y el segundo para un comportamiento frágil. Los resultados fueron comparados con resultados experimentales de nueve muros de mampostería a base de bloques huecos de concreto de 200 cm de altura, 360 cm de ancho y 15 cm de espesor sujetos a cargas en el plano en combinación con carga axial. En el modelo matemático usaron una malla de 24 x 15 elementos cuadriláteros de cuatro nodos para la mampostería y una malla de 2 x 15 elementos triangulares de tres nodos para los flancos de los muros. Se concluyó que el modelo fue capaz de predecir el comportamiento de la mampostería con los dos criterios planteados y tuvo una buena aproximación para las cargas de falla.

da Porto *et al.* (2010) realizaron un estudio acerca de la mampostería a base de tabiques multiperforados de arcilla sujetos a cargas cíclicas laterales en el plano. Construyeron muros de 125 cm de altura, 100 cm de ancho y 30 cm de espesor y los ensayaron aplicando cargas laterales reversibles en combinación con carga axial. Con los resultados obtenidos se calibraron cuatro modelos de elementos finitos. Se consideraron modelos continuos y discretos. Para ambos se consideraron elementos cuadriláteros de ocho nodos y se realizaron análisis lineales y no lineales. Se concluyó que con los resultados obtenidos con los modelos matemáticos se aproximaron adecuadamente los experimentales.

Akhveissy y Desai (2011) realizaron un estudio acerca de un análisis no lineal a través de un modelo de elementos finitos con un modelo constitutivo unificado. Para probar el modelo usaron los resultados experimentales de un muro de tabiques sólidos de 100 cm de altura, 100 cm de ancho y 10 cm de espesor, sujeto a carga lateral en el plano en combinación con carga axial. Para el análisis numérico, los bloques y las juntas fueron modelados con elementos cuadriláteros de esfuerzo plano (8 nodos). El muro consistió en una malla de 10 x 20 elementos isoparamétricos. Se concluyó que los resultados obtenidos con los modelos matemáticos aproximaron adecuadamente los experimentales.

#### 2.4.2 Modelos de elementos finitos para muros ante cargas fuera del plano

Lourenço (2000) realizó un estudio acerca del comportamiento lineal y no lineal de placas y cascarones sujetos a cargas fuera del plano mediante un modelo continuo anisotrópico. En este modelo empleó el criterio de falla de Rankine para la parte a tensión y el criterio de falla de Hill para la parte a compresión. El modelo fue validado con resultados experimentales obtenidos de ensayar cinco muros de mampostería a base de bloques huecos de concreto. Los muros fueron de 15 cm de espesor y una altura de 280 cm, su relación de aspecto varió de 0.80 a 0.50, y fueron ensayados con una presión constante fuera del plano. Para el análisis numérico se utilizó el software DIANA y se emplearon elementos finitos tipo cascarón degradados de 8 nodos con una integración en el plano de Gauss de 2 x 2 y una integración a través del espesor de Simpson de 7 puntos. El modelo fue capaz de predecir el comportamiento de la mampostería a flexión con una buena aproximación.

Milani *et al.* (2006) realizaron un estudio acerca de una técnica de homogenización simplificada para el análisis de la mampostería sometida a cargas fuera del plano. La superficie de falla anisotrópica basada en la definición de una representación polinómica de los componentes del tensor de esfuerzos en un número finito de subdominios, se combina con elementos finitos triangulares utilizados para analizar los límites superior e inferior. Se presentan varias comparaciones entre el modelo propuesto y datos experimentales, para muros sometidos a flexión en diferentes

orientaciones y para diferentes paneles cargados fuera del plano. Los resultados del análisis límite permiten identificar la distribución de fuerzas internas en las secciones críticas y obtener los modos de colapso así como las cargas de falla. Para el análisis límite inferior, se adoptó un análisis de elementos finitos basado en un elemento placa triangular a flexión. Este elemento triangular se prefirió en lugar de elementos más precisos, debido a su simplicidad y el bajo número de incógnitas que participan en la optimización. Para el análisis límite superior, se adoptó un modelo de elementos finitos basado en un elemento triangular. El campo de desplazamiento se supone lineal dentro de cada elemento y las velocidades nodales se toman como variables de optimización. La disipación plástica sólo se produce a lo largo de cada interfaz entre dos triángulos adyacentes o en un lado límite de un elemento. Los cálculos numéricos se compararon con resultados experimentales de dos universidades. Para la primera fueron muros a base de bloques huecos de concreto de 280 cm de altura y 340, 500 (3) y 580 cm de ancho, sometidos a carga fuera de plano. Para la segunda cinco muros de tabiques sólidos de arcilla de 247.5 cm de altura y 560 cm de ancho. Se encontró una buena aproximación en todos los casos. Por otro lado, algunas limitaciones típicas del enfoque de análisis límite deben ser consideradas, como por ejemplo, su incapacidad para predecir desplazamientos en colapso y la suposición de una capacidad de deformación plástica del material infinita, hipótesis que deben ser comprobadas caso por caso, dependiendo tanto de la geometría como de la distribución de las cargas aplicadas.

Beam y Schultz (2011) desarrollaron modelos de elementos finitos no lineales, y los utilizaron para simular la respuesta de doce muros postensionados de mampostería 354 cm de altura, ancho de 81 cm y espesor de 10 cm que fallaron ante cargas uniformes aplicadas fuera del plano ensayados en un laboratorio. Las variables incluyeron el tipo de mampostería, relación de esbeltez, grado de restricción, y la magnitud de pretensado. Los muros de mampostería postensados sometidos a cargas fuera del plano mostraron dos fases distintas de comportamiento de carga-deflexión. La primera se definió por la respuesta elástica lineal de la carga hasta el agrietamiento de la mampostería a causa de la tensión por flexión. El agrietamiento normalmente se produjo en las juntas cuando la combinación del esfuerzo de compresión de

pretensado más el peso propio, y la resistencia de unión entre mortero y bloques fueron superados por la tensión por flexión del esfuerzo aplicado. El segundo comportamiento fue característico de la fase postagrietamiento y la respuesta fue no lineal hasta la falla. Las relaciones fuerza-desplazamiento obtenidas de las pruebas experimentales de los muros fueron simuladas utilizando modelos desarrollados mediante el uso de una versión ampliada del programa de Dynamic Response Analysis of Inelastic Two-Dimensional Structures (DRAIN-2DX), y los resultados mostraron la influencia de la resistencia a la tensión, tipo de mampostería, magnitud de pretensado, y las restricciones en respuesta a la carga lateral fuera de plano. Se utilizaron elementos de dos nodos tipo marco para modelar la mampostería en el muro postensado. El elemento fue idealizado como una serie de líneas paralelas de mampostería que tienen ubicación específica dentro de la sección transversal. Se utilizaron veintiún elementos para representar la mampostería. Se añadieron segmentos de extremo a extremo para la construcción de un elemento. El comportamiento no lineal del elemento, bajo carga axial y flexión combinada, se aproximó por relaciones esfuerzo – deformación multilineales para los elementos. Se concluye que las simulaciones realizadas de elementos finitos reproducen el comportamiento inicial elástico de los muros de las pruebas, carga máxima, el desplazamiento en la carga máxima, y el comportamiento posterior a la carga máxima.

Reccia *et al.* (2012) investigaron la factibilidad del uso del MEF en conjunción con el Método de los Elementos Discretos (DEM) para reproducir el comportamiento de la mampostería. Los elementos finitos permiten modelar la deformación elástica, mientras que los algoritmos de elementos discretos permiten hacer frente a los procesos de interacción, fractura y fragmentación. Se propuso un modelo discreto de mampostería, que supone que los bloques son rígidos y están conectados por una interfaz de mortero, esto es apropiado para la mampostería histórica, donde el mortero es mucho más deformable que los bloques y el espesor de las juntas es insignificante. Por lo tanto los bloques se pueden modelar como cuerpos rígidos (elementos finitos) conectados por interfaces de tipo Mohr – Coulomb de espesor cero (elementos discretos). En el estudio analizaron dos tipos de mampostería, uno que tiene piezas traslapadas y presenta un comportamiento monolítico y otro que tiene piezas apiladas

y se comporta como dos paneles separados. Para el análisis se utilizó el software Y2D para análisis MEF/DEM de código abierto. La malla es de elementos 2D de tres nodos con longitud característica de 6 cm, cada block fue discretizado en ocho elementos, el número de elementos en el modelo varía de 64 a 256. El espesor del muro se mantuvo en 48 cm y la relación de esbeltez varió de 0.4 a 4. El módulo de elasticidad de los bloques fue de 1000 MPa, el del mortero de  $1 \times 10^{-6}$  MPa y el coeficiente de Poisson para ambos fue nulo. Debido al espesor de los muros y el hecho de que la mampostería estudiada consistía en paneles dobles, los modos de falla eran deslizamiento o volteo. Concluyen que la aplicación del método es adecuada para simular el comportamiento de ese tipo de muros ya que presenta resultados aproximados.

## **2.6 Observaciones de la revisión de la literatura**

De la revisión de la literatura se concluye que:

- Se cuenta con suficiente información experimental de resistencia a tensión por flexión de la mampostería y de comportamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano.
- Las variables que más influyen en la resistencia máxima de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano son: relación de aspecto, resistencia a compresión axial de la pieza y relación de esbeltez.
- Se han estudiado y desarrollado diferentes métodos para obtener el valor de la carga máxima de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano (e.g. Líneas de Fluencia, Puntal y Resorte, Puntal de Compresión, Puntal bidireccional). Por otra parte, los estudios para determinar la carga de agrietamiento en este tipo de muros han sido escasos.
- La mayoría de los modelos del MEF desarrollados han sido utilizados para mampostería no reforzada y con cargas en el plano.
- En los trabajos de modelación con el MEF de mampostería con cargas fuera del plano se han empleado mayormente modelos no lineales con un enfoque de falla distribuida en elementos continuos tipo placa.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 Descripción general**

El objetivo general de este trabajo fue simular computacionalmente la evolución inicial del agrietamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano mediante modelos no lineales con el Método del Elemento Finito. Se utilizaron modelos tridimensionales con elementos isoparamétricos hexaédricos y elementos de interfaz plana. Se aproximó el comportamiento de las primeras etapas de la curva carga – desplazamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada. Los modelos fueron calibrados con base en los resultados de los ensayos y los modelos computacionales. Para alcanzar el objetivo de este trabajo de investigación se realizaron las siguientes actividades:

1. Comportamiento a flexión de bloques huecos de concreto
2. Selección de especímenes ensayados para calibrar los modelos
  - 2.1. Selección de muretes
  - 2.2. Selección de muros de mampostería confinada
3. Análisis del comportamiento de los muros de mampostería confinada
4. Desarrollo de modelos con el Método del Elemento Finito
  - 4.1. Análisis de muretes
  - 4.2. Análisis preliminar de un muro de mampostería confinada
  - 4.3. Calibración del modelo de muros de mampostería confinada
  - 4.4. Análisis finales de muros de mampostería confinada

#### **3.2 Comportamiento a flexión de bloques huecos de concreto**

Se realizaron modelos preliminares de muretes de mampostería de bloques huecos de concreto y se observó que la rigidez del modelo computacional era significativamente mayor que la rigidez obtenida experimentalmente. Se concluyó que

el módulo de elasticidad considerado no era adecuado. Por lo anterior, se realizaron ensayos y modelos computacionales para obtener el módulo de elasticidad de bloques huecos de concreto de tres celdas sometidos a flexión. Se seleccionaron cuatro bloques para los ensayos, los cuales fueron del mismo lote que los empleados por Paleo (2013), con una resistencia promedio sobre área neta de 9.66 MPa. Los ensayos (Figura 3.1) se realizaron bajo el esquema de flexión a cuatro puntos en la máquina universal marca “SATEC” con una capacidad de 60 toneladas ubicada en el Laboratorio de Estructuras y Materiales de la FIUADY. Para la lectura del desplazamiento al centro del bloque se utilizó un potenciómetro lineal marca ETI modelo LCP12S-25, de 1.2 cm de longitud. Los apoyos se encontraron a 1.25 cm del borde de los bloques y las cargas se aplicaron a 13.75 cm de los bordes (Figura 3.2). La rigidez del bloque ( $K$ ) se calculó con la Ecuación (3.1), considerando que la respuesta observada es lineal hasta aproximadamente el 80% de la carga máxima.

$$K = \frac{P_2 - P_1}{\delta_2 - \delta_1} \quad (3.1)$$

En donde  $P_1$  y  $\delta_1$  son la carga y el desplazamiento asociados a un 30% de la carga máxima y  $P_2$  y  $\delta_2$  son la carga y el desplazamiento asociados a un 60% de la carga máxima.

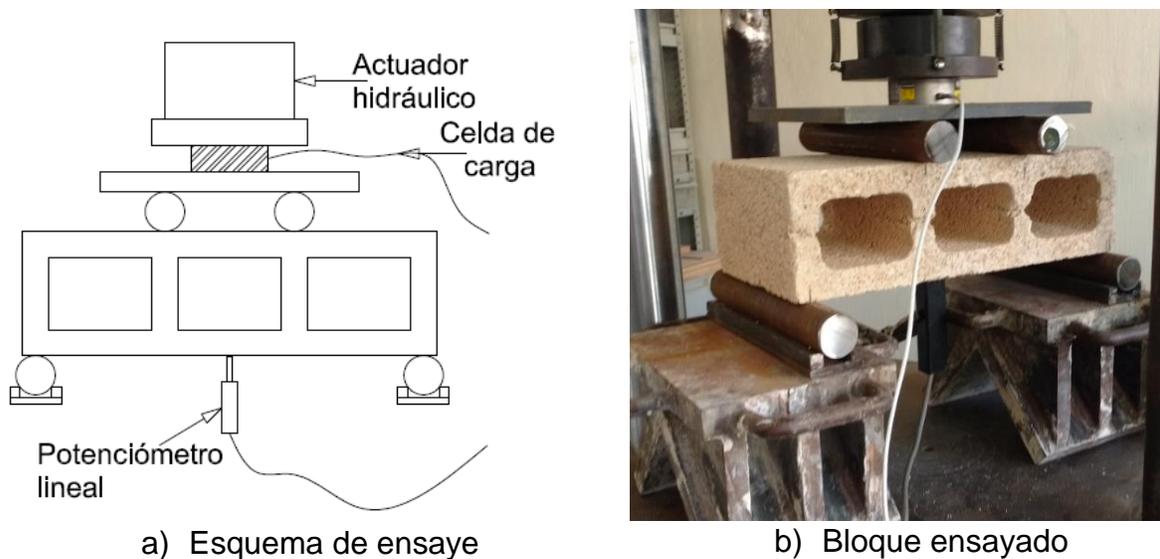


Figura 3.1 Ensayo a flexión de bloques huecos de concreto de 3 celdas



- Condiciones de carga y apoyos: los apoyos se colocaron conforme a la prueba experimental restringiendo en la dirección  $y$  y los nodos posicionados a 1.25 cm de los bordes. Se aplicó una carga de 1500 N en la dirección  $y$ .

### 3.3 Selección de especímenes ensayados para calibrar los modelos

En este trabajo se estudió el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada construidos con bloques huecos de concreto. Para este propósito se consideraron dos tipos de ensayos. El primero corresponde al ensaye de muretes sujetos a cargas fuera del plano, utilizados para obtener la resistencia a tensión por flexión perpendicular a las juntas. El segundo corresponde al ensaye de muros de mampostería confinada a escala natural sujetos a cargas uniformes fuera del plano.

#### 3.3.1 Selección de muretes

El murete seleccionado para verificar el modelo fue el ensayado por Dorantes (2011), que corresponde al ensaye para obtener la resistencia a tensión por flexión perpendicular a las juntas. Se seleccionó este ensaye ya que la falla se produce en las juntas y permite verificar que la resistencia asociada a la interfaz plana sea adecuada. En la Figura 3.4 se presentan los detalles constructivos del murete.

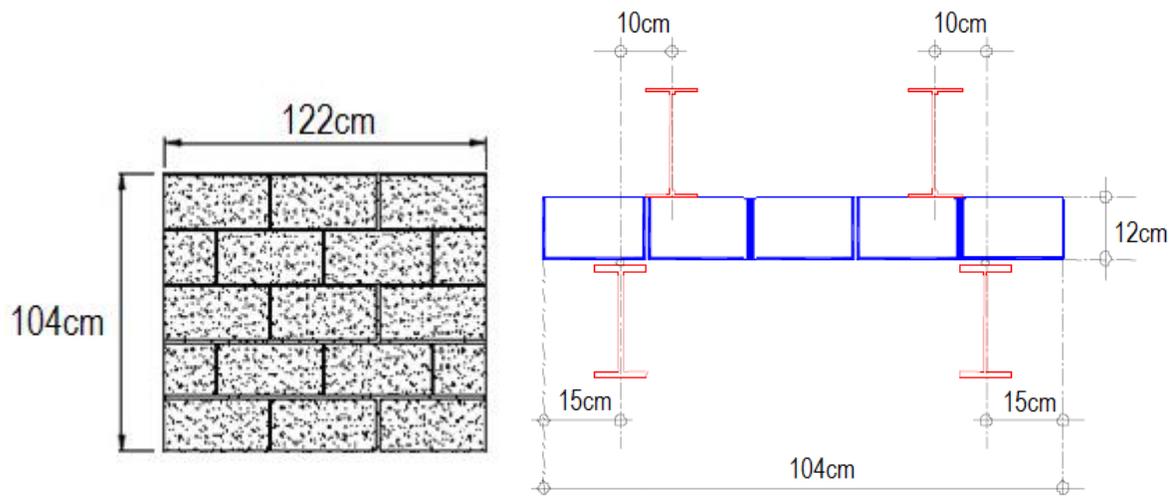


Figura 3.4 Detalles del murete de Dorantes

El murete fue sometido a flexión mediante la aplicación de carga en dos vigas metálicas ubicadas a 25 cm de los bordes. Los apoyos simples fueron mediante dos barras redondas lisas ubicadas a 15 cm de los bordes. El ensaye se llevó a cabo de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM E72-02.

Las características del murete son las siguientes:

- Relación de aspecto de 0.85.
- Murete construido con bloques huecos de concreto de dimensiones nominales 12 x 20 x 40 cm, con un espesor de celda de 2.5 cm.
- Resistencia promedio de las piezas de 6.73 MPa.
- Mortero de las juntas de 1 cm de espesor, con proporcionamiento por volumen de 1:2:7 (cemento Portland: cal: arena).

### 3.3.2 Selección de muros de mampostería confinada

Los muros seleccionados para calibrar el modelo fueron los ensayados por Varela *et al.* (2012a), Varela *et al.* (2015) y G.Cantón (2016). Estos muros tuvieron características similares: muros con relación de aspecto cercana a 0.75 y hechos de bloques huecos de concreto de tres celdas verticales.

En la Figura 3.5 se presenta el plano constructivo del muro ensayado por Varela *et al.* (2012a). El muro fue sometido a cargas uniformes fuera del plano y para aplicar las cargas se utilizaron dos bolsas de aire, que se apoyan en un muro de reacción (Figura 3.6a).

Los apoyos se realizaron empotrando la base del muro y restringiendo el desplazamiento fuera del plano de la periferia del muro mediante un sistema de soporte a base de perfiles tubulares de acero localizados a lo largo de los elementos confinantes (Figuras 3.6a y 3.6b).

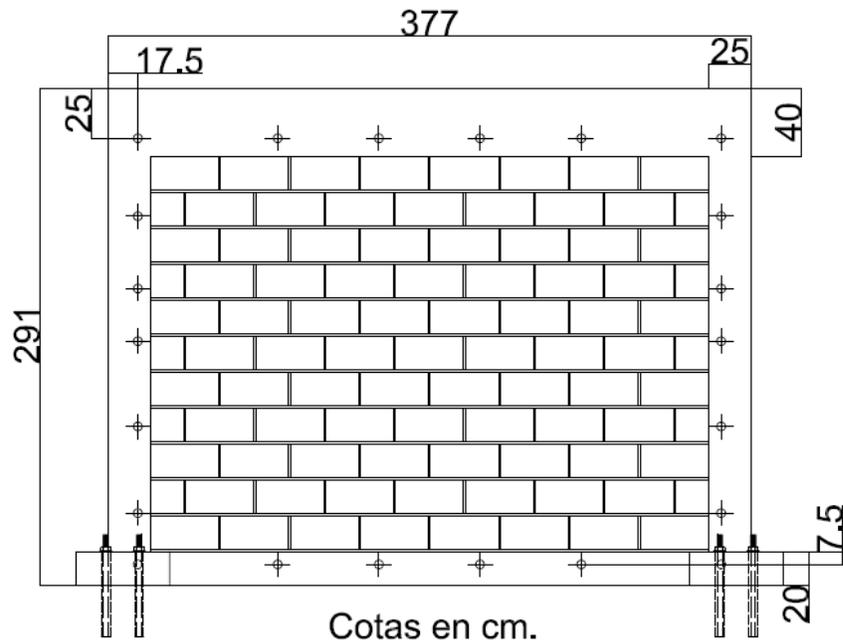


Figura 3.5 Plano constructivo del muro de mampostería confinada de Varela *et al.* (2012a)

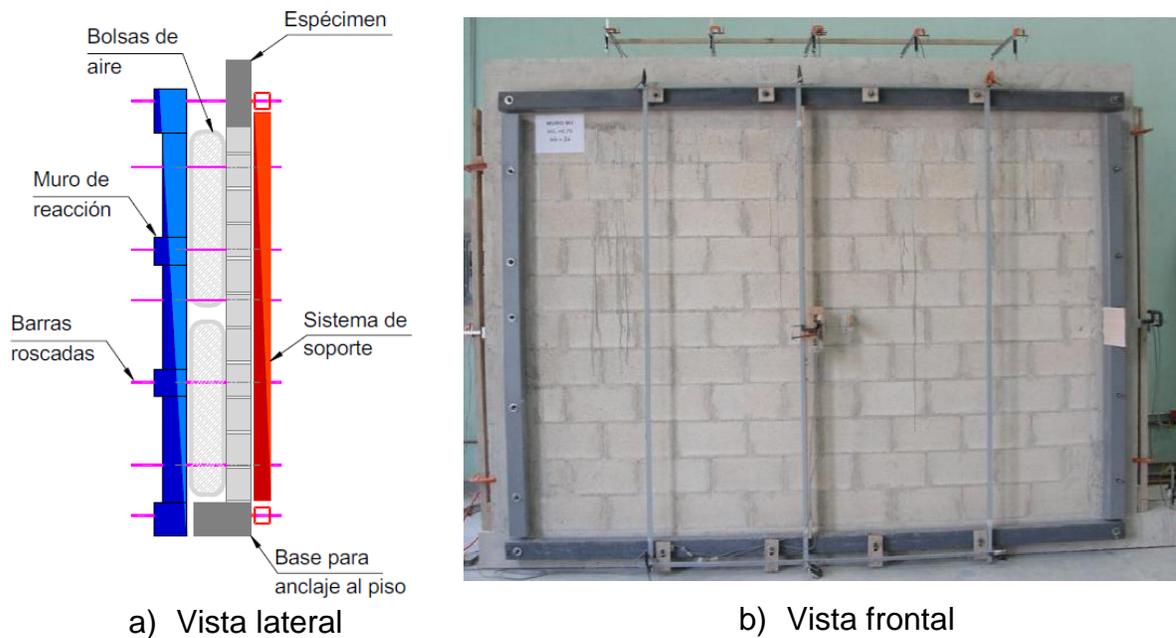


Figura 3.6 Sistema de carga y soporte de muros de mampostería confinada de Varela *et al.* (2012a)

El sistema de soporte fue diseñado para permitir la rotación de los elementos confinantes al hacer contacto por medio de barras redondas soldadas a los tubulares,

aunque en los ensayos se observó cierta restricción a rotar. Las características del muro fueron las siguientes:

- Relación de aspecto de 0.76.
- Panel de mampostería a base de bloques huecos de concreto de dimensiones nominales 12 x 20 x 40 cm, con un espesor de celda de 2.5 cm.
- Resistencia promedio de las piezas de 6.73 MPa.
- Mortero de las juntas de 1 cm de espesor, con proporcionamiento por volumen 1:2:7 (cemento Portland: cal: arena).
- Resistencia a compresión axial del concreto de 19.62 MPa.
- Cadena inferior de sección transversal 12 x 20 cm.
- Castillos de sección transversal 12 x 25 cm.
- Cadena superior de sección transversal 12 x 40 cm.

En la figura 3.7 se presenta la curva carga – desplazamiento fuera del plano obtenida del ensayo del muro. La carga máxima del muro fue de 11.91 KPa.

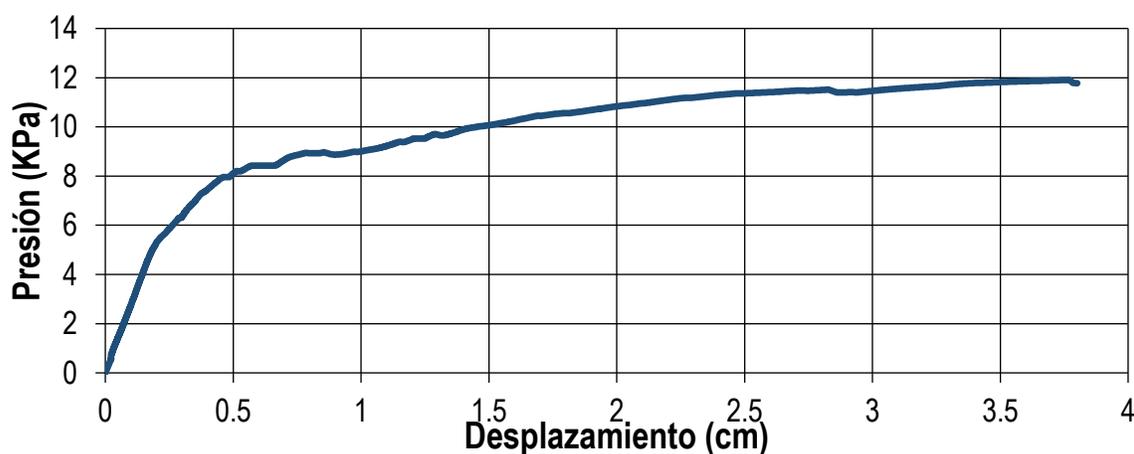


Figura 3.7 Curva carga – desplazamiento del muro de mampostería confinada de Varela *et al.* (2012a)

En la Figura 3.8 se presenta el plano constructivo del muro ensayado por Varela *et al.* (2015). El muro fue sometido a cargas uniformes fuera del plano y para aplicar las cargas se utilizó el sistema propuesto por Varela *et al.* (2012a).

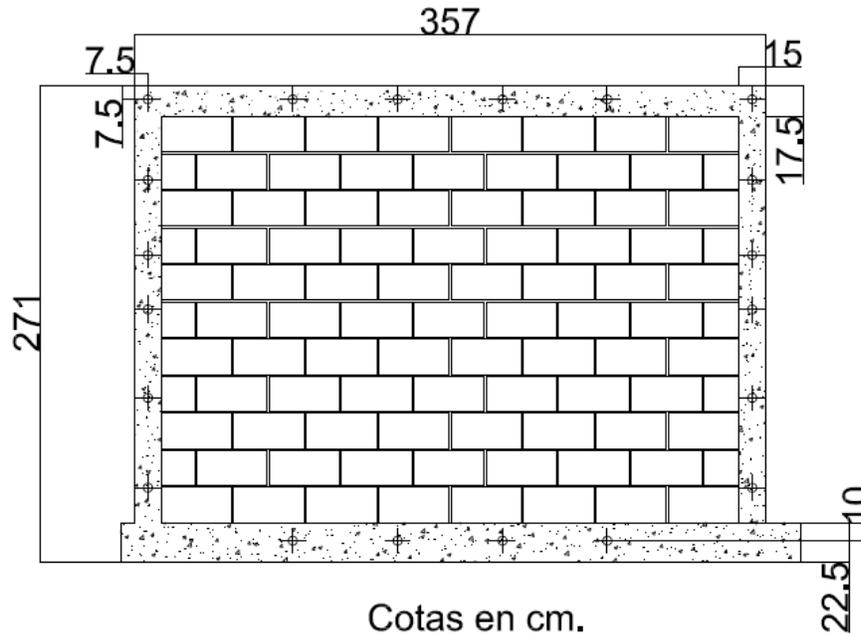


Figura 3.8 Plano constructivo del muro de mampostería confinada de Varela *et al.* (2015)

Los apoyos son empotramiento en la base del muro y restricción al desplazamiento fuera del plano en el perímetro del muro mediante un mismo sistema de soporte a base de perfiles tubulares de acero localizados a lo largo de los elementos confinantes, similar al que utilizaron Varela *et al.* (2012a). Las características del muro fueron las siguientes:

- Relación de aspecto de 0.76.
- Panel de mampostería a base de bloques huecos de concreto de dimensiones nominales 15 x 20 x 40 cm, con un espesor de celda de 2.5 cm.
- Resistencia promedio de las piezas de 13.32 MPa.
- Mortero de las juntas de 1 cm de espesor, con proporcionamiento por volumen 1:2:7 (cemento Portland: cal: arena).
- Resistencia a compresión axial del concreto de 25.51 MPa.
- Cadena inferior de sección transversal 15 x 22.5 cm.
- Castillos de sección transversal 15 x 15 cm.
- Cadena superior de sección transversal 15 x 17.5 cm.

En la figura 3.9 se presenta la curva carga – desplazamiento fuera del plano obtenida del ensaye del muro. La carga máxima del muro fue de 11.98 KPa.

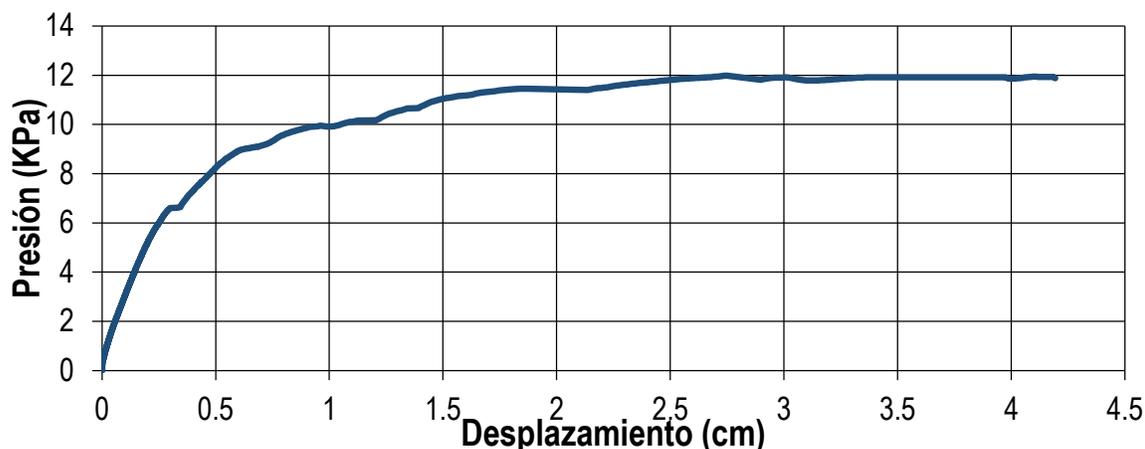
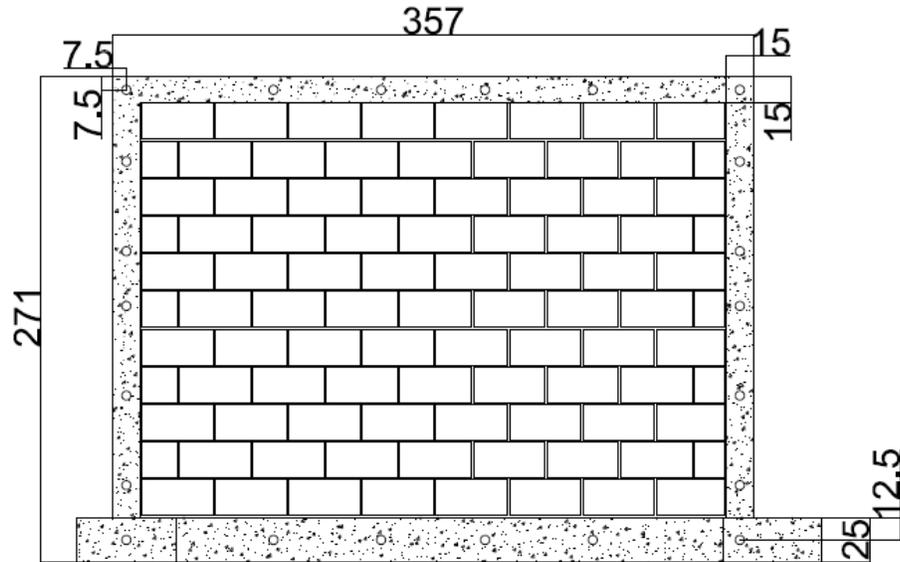


Figura 3.9 Curva carga – desplazamiento del muro de mampostería confinada de Varela *et al.* (2015)

En la Figura 3.10 se presenta el plano constructivo del muro ensayado por G.Cantón (2016). El muro fue sometido a cargas uniformes fuera del plano y para aplicar las cargas se utilizó el sistema descrito por Varela *et al.* (2012a). Los apoyos son empotramiento en la base del muro y restricción al desplazamiento fuera del plano en el perímetro del muro mediante un mismo sistema de soporte a base de perfiles tubulares de acero localizados a lo largo de los elementos confinantes, similar al que utilizaron Varela *et al.* (2012a). Las características del muro fueron las siguientes:

- Relación de aspecto de 0.76.
- Panel de mampostería a base de bloques huecos de concreto de dimensiones nominales 15 x 20 x 40 cm, con un espesor de celda de 2.5 cm.
- Resistencia promedio de las piezas de 8.22 MPa.
- Mortero de las juntas de 1 cm de espesor, con proporcionamiento por volumen 1:2:7 (cemento Portland: cal: arena).
- Resistencia a compresión axial del concreto de 27.57 MPa.
- Cadena inferior de sección transversal 15 x 25 cm.
- Castillos de sección transversal 15 x 15 cm.
- Cadena superior de sección transversal 15 x 15 cm.



Cotas en cm.

Figura 3.10 Plano constructivo del muro de mampostería confinada de G.Cantón (2016)

En la figura 3.11 se presenta la curva carga – desplazamiento fuera del plano obtenida del ensaye del muro. La carga máxima del muro fue de 11.58 KPa.

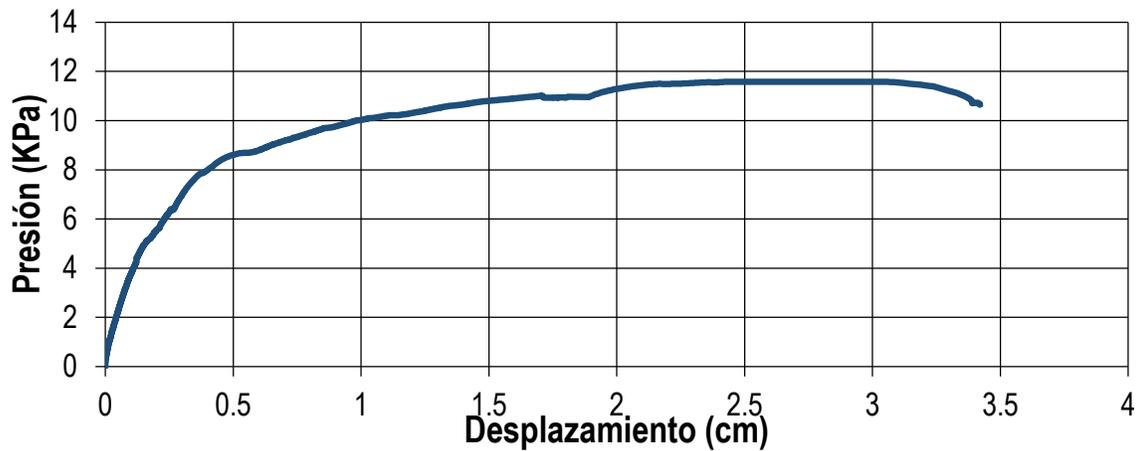


Figura 3.11 Curva carga – desplazamiento del muro de mampostería confinada de G.Cantón (2016)

### **3.4 Análisis del comportamiento de los muros de mampostería confinada**

En este trabajo de investigación se simuló la evolución del agrietamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Para identificar los niveles de carga a los cuales ocurrieron los eventos de agrietamiento asociados a los cambios de rigidez observados experimentalmente, se realizó un análisis de las curvas carga – desplazamiento fuera del plano y de los reportes de la evolución del agrietamiento de los muros seleccionados. En dicho análisis se realizaron las siguientes actividades:

- Identificación de niveles de carga a los que sucedieron los agrietamientos. Se observaron que los agrietamientos horizontales en la cara frontal (cara libre) al centro del muro se presentaron en un rango entre el 35% y el 50% de la carga máxima. Se observaron que los agrietamientos a 45° en la cara frontal del muro ocurrieron en un rango entre el 65% y el 75% de la carga máxima.
- Definición de etapas de comportamiento en las curvas carga – desplazamiento fuera del plano. Se definió la primera etapa de comportamiento en un rango de 0 a 35% de la carga máxima, que describe el comportamiento inicial del muro hasta antes de que ocurran los agrietamientos horizontales al centro de cara frontal del muro, el comportamiento observado en esta etapa es aproximadamente lineal. Se definió una segunda etapa en un rango de 50% a 65% de la carga máxima, que describe el comportamiento del muro después de los agrietamientos horizontales al centro de la cara frontal del muro y antes de que ocurran los agrietamientos a 45°, el comportamiento observado en esta etapa es aproximadamente lineal.
- Definición del punto de cambio de pendiente entre las primeras dos etapas. La localización de este punto se calculó como la intersección de las rectas obtenidas mediante un ajuste por mínimos cuadrados de las etapas 1 y 2.

### 3.5 Desarrollo de modelos con el Método del Elemento Finito

En este trabajo de investigación se desarrollaron dos tipos de modelos computacionales basados en el MEF. El primero corresponde a muretes de mampostería sujetos a cargas fuera del plano y el segundo a muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano.

En los ensayos de los muretes y muros se observó que los agrietamientos ocurren principalmente en las juntas. Para simular este comportamiento se consideró un modelo de grieta discreta mediante el uso de elementos de interfaz plana para las juntas de mortero, se asumió que el modo fundamental de agrietamiento es en Modo I (abertura) y que posterior al agrietamiento se tiene un comportamiento frágil (sin ablandamiento) ya que en la junta mortero – block la falla es por adherencia.

Se realizaron análisis de convergencia para ambos modelos utilizando un refinamiento tipo H (aumentando la densidad de la malla de elementos finitos de 63584 a 484480 elementos para el modelo computacional del muro de referencia), para corroborar que los resultados de los modelos no fueran sensibles al tamaño de los elementos (diferencia menor del 5%).

#### 3.5.1 Análisis de muretes

Se modelaron muretes sujetos a cargas fuera del plano con el propósito de corroborar que las propiedades materiales fueran las adecuadas para simular posteriormente el comportamiento de muros de mampostería confinada. Las características del murete modelado corresponden a los valores promedios de los especímenes ensayados por Dorantes (2011).

El modelado del murete fue el siguiente:

- Geometría: murete de 120 x 100 cm conformado por 5 filas de 3 bloques huecos de concreto de 3 celdas de dimensiones 12 x 20 x 40 cm con espesor de paredes de 2.5 cm, unidos en las juntas por elementos de interfaz plana de

espesor nulo, considerados en las paredes exteriores de los bloques para las juntas horizontales, y en toda la pared para las juntas verticales.

- Tipos de elementos: los bloques de concreto fueron modelados utilizando elementos isoparamétricos hexaedros de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo; las dimensiones de las aristas de los elementos fueron cercanas a 2.5 cm. Las juntas fueron modeladas con interfaces planas que constaron de elementos de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo (sección 2.3).
- Propiedades de materiales: para los bloques se consideró un módulo de elasticidad de 1120 MPa con base en la ecuación  $E_m = 432\sqrt{f_p}$  obtenida en este trabajo de investigación (sección 4.1.2), en donde  $f_p$  es la resistencia a compresión promedio sobre el área neta de los bloques de 12 cm, la cual fue de 6.73 MPa (Dorantes, 2011); la relación de poisson fue de 0.2 para concreto (Wight y MacGregor, 2009). Las propiedades de la interfaz plana utilizadas fueron de 0.1166 MPa de resistencia a la tensión (Dorantes, 2011) y 799.4 N/mm<sup>3</sup> de módulo de rigidez normal, el cual fue obtenido considerando un módulo de elasticidad del mortero de 7994 MPa (Hernández, 2015) y un espesor de las juntas de 1 cm. A falta de información experimental, se consideró un módulo de rigidez tangencial de 10000 N/mm<sup>3</sup> para restringir las deformaciones tangenciales.
- Condiciones de carga y apoyos (Figura 3.12): los apoyos se colocaron conforme a la prueba experimental restringiendo los nodos posicionados a 15 cm de los bordes en la dirección  $y$ . Se utilizaron 3 grupos de cargas, el primero corresponde a las fuerzas de cuerpo (peso propio) del murete, donde se consideró un peso volumétrico de 17 KN/m<sup>3</sup> (GDF, 2004a); el segundo corresponde al peso del equipo de aplicación de carga de 968 N, el tercero corresponde a las cargas aplicadas por los gatos hidráulicos en el ensaye.
- Análisis no lineal: se aplicó un control por carga, que consistió en la aplicación de las cargas de peso propio en 2 pasos de 50%; el peso propio incluye el peso del murete y del equipo. Finalmente, se aplicaron pasos de carga en función de la carga máxima reportada en el ensaye real del murete ( $C_{max}=19.31$  KPa), quedando 18 pasos del 5% de  $C_{max}$  y en 15 pasos de 1% de  $C_{max}$ . Para

resolver el sistema de ecuaciones no lineales se utilizó el método de Newton – Raphson Regular con criterios de convergencia de energía y desplazamiento.

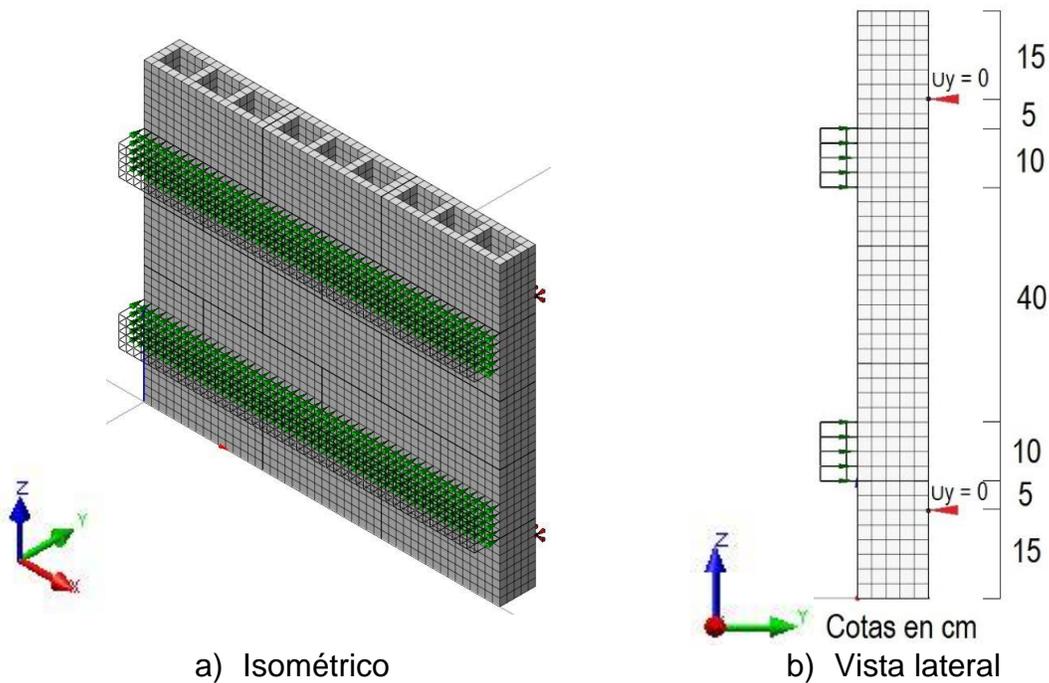


Figura 3.12 Modelo computacional del murete ensayado por Dorantes

### 3.5.2 Análisis preliminar de un muro de mampostería confinada

Se modeló el muro ensayado por Varela *et al.* (2012a), el cual sirvió como referente para los análisis computacionales posteriores. Las características del muro fueron:

- Geometría: muro de 370 x 280 cm con un panel de mampostería conformado por 11 filas de 8 bloques huecos de concreto de 3 celdas de dimensiones nominales 12 x 20 x 40 cm con espesor de paredes de 2.5 cm, unidos en las juntas por elementos de interfaz plana de espesor nulo, considerados en las paredes exteriores de los bloques para las juntas horizontales, y en toda la pared para las juntas verticales. Adicionalmente, en la cara posterior (cara de aplicación de la carga), a una distancia de 20 cm del borde interior de los castillos y paralelamente a los mismos, se consideraron interfaces planas de espesor nulo para simular el agrietamiento vertical reportado en la cara posterior de los muros durante los ensayos. Los elementos confinantes constaron de una

cadena inferior de 20 cm de peralte y 12 cm de espesor, castillos de 25 cm de ancho y 12 cm de espesor, y cadena superior de 40 cm de peralte y 12 cm de espesor.

- Tipos de elementos: los bloques de concreto y los elementos confinantes fueron modelados utilizando elementos isoparamétricos hexaedros de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo; las dimensiones de las aristas de los elementos fueron cercanas a 2.5 cm. Las juntas fueron modeladas con elementos de interfaz plana de 8 nodos y 3 grados de libertad por nodo.
- Propiedades de materiales: Propiedades de materiales: para los bloques se consideraron las mismas propiedades utilizadas para el modelo del murete. Para los elementos confinantes se consideró un módulo de elasticidad de 15660 MPa con base en la Ecuación (2.1), la cual es función de la resistencia compresión axial de cilindros de concreto  $f'_c$ , que fue de 19.8 MPa (Varela *et al.*, 2012a). La relación de poisson fue de 0.2 para concreto (Wight y MacGregor, 2009). Las propiedades de la interfaz plana utilizadas en la unión mortero – block fueron las mismas que para el modelo del murete. En las interfaces planas colocadas en los bloques, localizadas a 20 cm de los castillos, se consideró 0.45 MPa de resistencia a la tensión para bloques huecos de concreto (Hernández, 2015); el espesor de esta unión es nulo, a diferencia de la junta de mortero, y se asumió un modo de agrietamiento tipo I (abertura), se consideraron valores de 10000 N/mm<sup>3</sup> para los módulos de rigidez normal y tangenciales.
- Condiciones de carga y apoyos: los apoyos (Fig. 3.13) se colocaron conforme a la prueba experimental, empotrando la base ( $u_x = 0$ ,  $u_y = 0$ ,  $u_z = 0$ ) y restringiendo el desplazamiento fuera del plano ( $u_y = 0$ ) los nodos de los elementos confinantes posicionados a 12.5 cm de la base para la cadena inferior, a 17.5 cm de los bordes para los castillos y a 25 cm del borde superior para la cadena superior. Se asumió que los elementos confinantes podían rotar libremente.

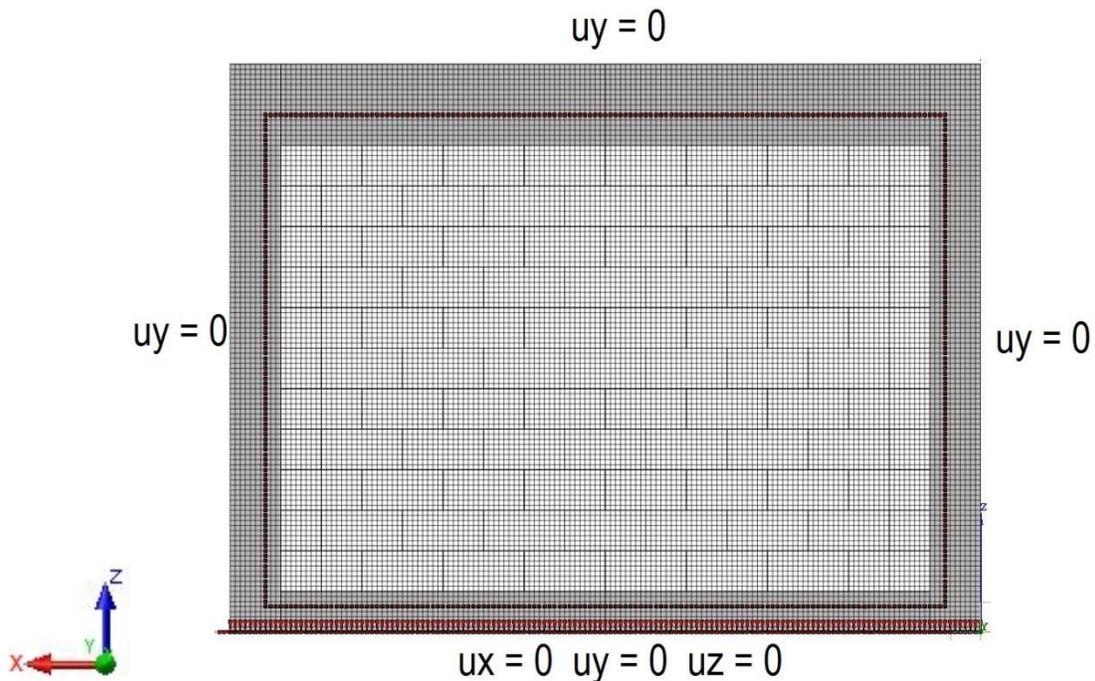


Figura 3.13 Condiciones de apoyos del muro de Varela *et al.* (2012a)

Se utilizaron 2 grupos de cargas. El primer grupo correspondió a fuerzas de cuerpo (peso propio) del muro; se consideró un peso volumétrico de  $17 \text{ KN/m}^3$  (GDF, 2004a) para los bloques y un peso volumétrico de  $24 \text{ KN/m}^3$  (GDF, 2004b) para el concreto de los elementos confinantes. El segundo grupo de cargas correspondió a las cargas fuera del plano aplicadas sobre la superficie del panel de mampostería que tuvo contacto con las bolsas de acuerdo a los ensayos; ya que estas no abarcaban toda la superficie del muro (Fig. 3.14).

- Análisis no lineal: se aplicó un control por carga, que consistió en la aplicación de las cargas de peso propio en 2 pasos de 50%; el peso propio incluye el peso de los bloques y los elementos confinantes. Finalmente, se aplicaron pasos de carga en función de la carga máxima reportada en el ensaye real del muro ( $C_{\text{max}}=11.92 \text{ KPa}$ ), quedando en 70 pasos del 1% de  $C_{\text{max}}$ . Para resolver el sistema de ecuaciones no lineales se utilizó el método de Newton – Raphson Regular con criterios de convergencia de energía y desplazamiento.

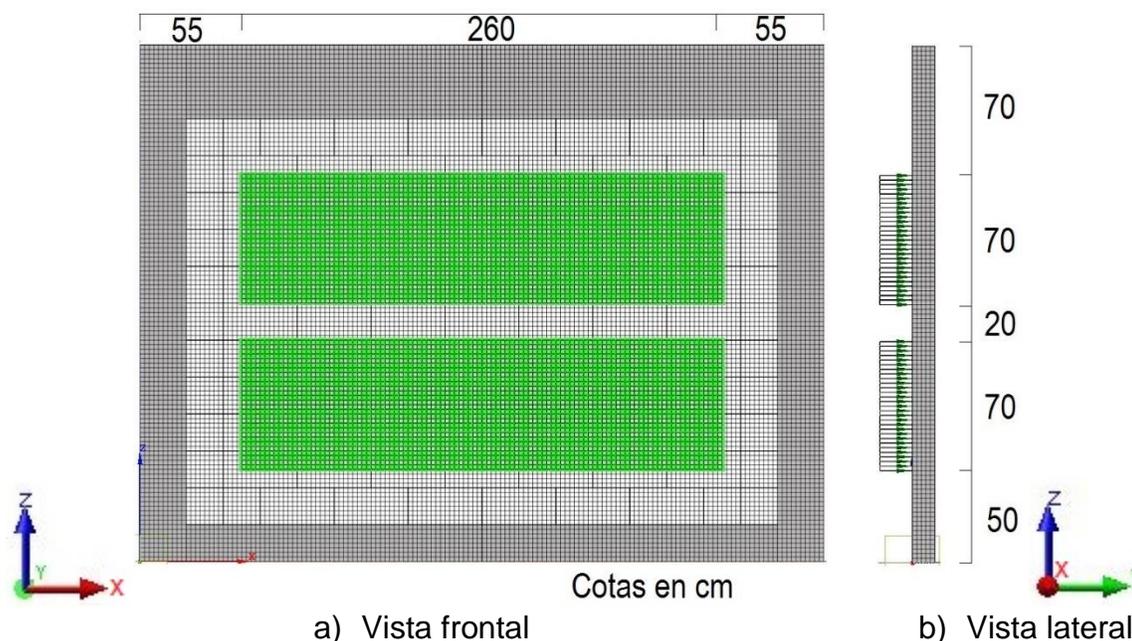


Figura 3.14 Condiciones de carga del muro de Varela *et al.* (2012a)

### 3.5.3 Calibración del modelo de muros de mampostería confinada

Del análisis preliminar de un muro de mampostería confinada se observó que el modelo aproximó las pendientes de las primeras etapas pero no el nivel de carga al que sucede el cambio entre etapas. Se realizó un análisis de sensibilidad de los muros seleccionados, MR1 (Varela *et al.*, 2012a), MR2 (Varela *et al.*, 2015) y MR3 (G.Cantón, 2016). La variable de estudio fue la adherencia (resistencia a tensión) de las juntas mortero – block. El incremento de la resistencia tensión de las juntas en los muros de mampostería confinada tiene como propósito simular la restricción a la apertura de grietas por efecto del confinamiento. Se varió la resistencia de la junta con los siguientes valores: 1ftp (0.1166 MPa), 2ftp (0.2332 MPa), 2.25ftp (0.2624 MPa), 2.5ftp (0.2915 MPa), 2.75ftp (0.3207 MPa) y 3ftp (0.3498 MPa).

Con base en los resultados del análisis de sensibilidad, se identificó el valor de la resistencia a tensión de las juntas que permite que el modelo computacional aproxime el valor del de cambio de rigidez entre la etapa 1 y la etapa 2 observado experimentalmente (sección 3.4). Para los modelos finales se consideró el valor

promedio de la resistencia a la tensión de las juntas mortero – block obtenido del análisis de sensibilidad.

### 3.5.4 Análisis finales de muros de mampostería confinada

Con los parámetros considerados para el modelo preliminar de muros de mampostería confinada y la calibración de la resistencia de las juntas mortero – block, se realizaron los modelos finales de los muros ensayados por Varela *et al.* (2012a), Varela *et al.* (2015) y G.Cantón (2016).

Se modeló nuevamente el muro ensayado por Varela *et al.* (2012a). Solamente se cambió la resistencia a tensión de las interfaces planas, tomando el valor promedio del análisis de sensibilidad, que fue de 0.2915 MPa.

Se modeló el muro ensayado por Varela *et al.* (2015), cuyas características fueron similares a las del modelo computacional final realizado para el muro de mampostería confinada ensayado por Varela *et al.* (2012a), con las siguientes diferencias: se consideraron las dimensiones de elementos confinantes y bloques descritas en la sección 3.3.2; se consideró un módulo de elasticidad de 1576 MPa, considerando un  $f_p$  de 13.32 MPa reportado por Varela *et al.* (2015); para los elementos confinantes se consideró un módulo de elasticidad de 17775 MPa, considerando un  $f'_c$  de 25.5 MPa reportado por Varela *et al.* (2015).

Se modeló el muro ensayado por G.Cantón (2016), cuyas características fueron similares a las del modelo computacional final realizado para el muro de mampostería confinada ensayado por Varela *et al.* (2012a), con las siguientes diferencias: se consideraron las dimensiones de elementos confinantes y bloques descritas en la sección 3.3.2; se consideró un módulo de elasticidad de 1238 MPa, considerando un  $f_p$  de 8.22 MPa reportado por G.Cantón (2016); para los elementos confinantes se consideró un módulo de elasticidad de 18475 MPa, considerando un  $f'_c$  de 27.6 MPa reportado por G.Cantón (2016).

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas a los bloques huecos de concreto de tres celdas, así como los correspondientes modelos computacionales. Se presenta el análisis de las curvas carga – desplazamiento fuera del plano de los resultados experimentales de los muros de mampostería confinada seleccionados. Se presentan los resultados de los modelos computacionales correspondientes a los muretes y los muros de mampostería confinada. Se comparan los resultados computacionales con los experimentales.

#### 4.1 Bloques

##### 4.1.1 Ensayes

En la Figura 4.1 se presentan las curvas carga – desplazamiento al centro de la pieza, de los bloques ensayados (B1, B2, B3 y B4). En esta figura se observa que el comportamiento es lineal hasta aproximadamente el 80% de la carga máxima.

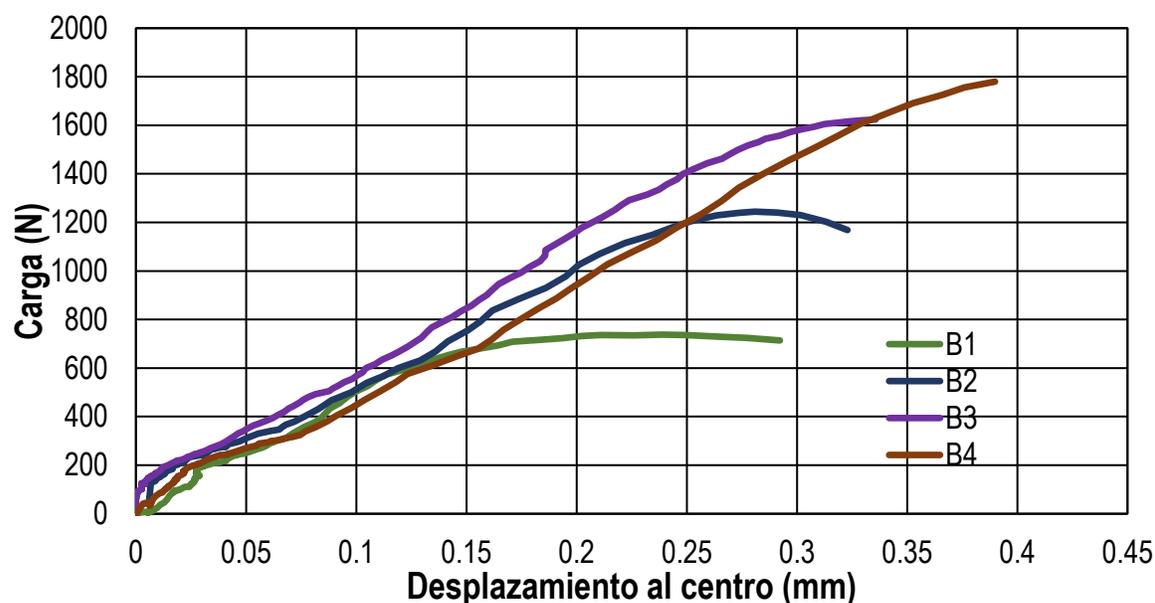


Figura 4.1 Curvas carga – desplazamiento del bloque sometido a flexión

En la Tabla 4.1 se presentan las rigideces calculadas para cada bloque. La rigidez promedio de los ensayos es de 4898 N/mm.

Tabla 4.1 Rigidez de los bloques

Bloque	$P_1$ (N)	$P_2$ (N)	$\delta_1$ (mm)	$\delta_2$ (mm)	K (N/mm)
B1	220	434	0.041	0.088	4523
B2	380	754	0.072	0.151	4756
B3	480	993	0.078	0.175	5315
B4	542	1075	0.118	0.225	4997
<b>Media</b>					<b>4898</b>
<b>Coefficiente de Variación</b>					<b>0.07</b>

#### 4.1.2 Modelos computacionales

En la Figura 4.2 se presenta la comparación de los resultados experimentales y computacionales de los bloques. Para el modelo computacional se determinó que un módulo de elasticidad de 1342 MPa para el bloque permite obtener la rigidez de 4898 N/mm obtenida del promedio de los resultados experimentales.

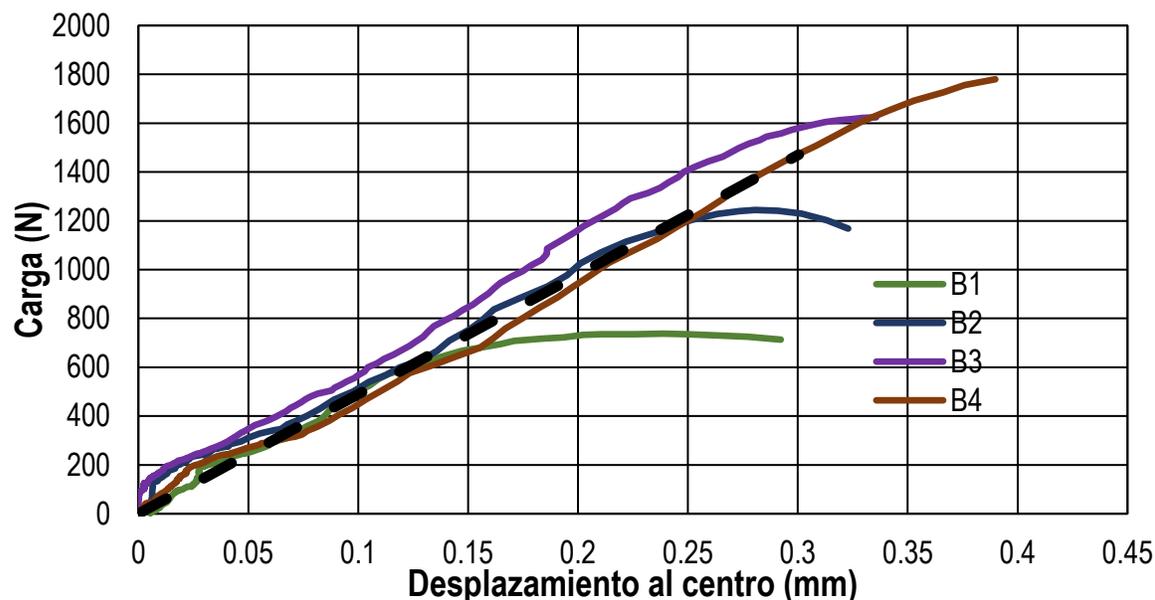


Figura 4.2 Resultados experimentales y computacionales de la curva carga – desplazamiento de bloques sometidos a flexión

Cuando se comparan los resultados obtenidos del modelo computacional del bloque ensayado a flexión con los resultados experimentales de un bloque ensayado a compresión axial, se observa que el módulo de elasticidad asociado a un comportamiento a flexión es significativamente inferior al asociado a un comportamiento a compresión axial. En particular, para estas mediciones se observa que modificando la Ecuación (2.2) por un factor de 0.13 se aproxima el módulo de elasticidad de los bloques sometidos a flexión para ser empleado en los modelos computacionales. A falta de información experimental, en este trabajo se utilizó la Ecuación (4.1) para calcular el módulo de elasticidad de la mampostería sometida a cargas fuera del plano, en función la resistencia a compresión axial sobre área neta de bloques huecos de concreto de tres celdas ( $f_p$ ).

$$E_m = 432 \sqrt{f_p} \quad (4.1)$$

El módulo de elasticidad obtenido con la ecuación 4.1 es similar al empleado en los modelos computacionales de Reccia *et al.* (2012).

## **4.2 Análisis del comportamiento de muros de mampostería confinada**

Del análisis de las curvas carga – desplazamiento fuera del plano obtenidas de los ensayos se calcularon los niveles de carga en los que ocurre el cambio de pendiente entre las etapas 1 y 2.

En la figura 4.3 se ilustran las aproximaciones lineales obtenidas mediante ajustes de mínimos cuadrados para las etapas 1 y 2 del muro de Varela *et al.* (2012a). Se observa que el punto de intersección entre las aproximaciones lineales corresponde a un valor de 5.24 KPa, que corresponde al 44% de la carga máxima.

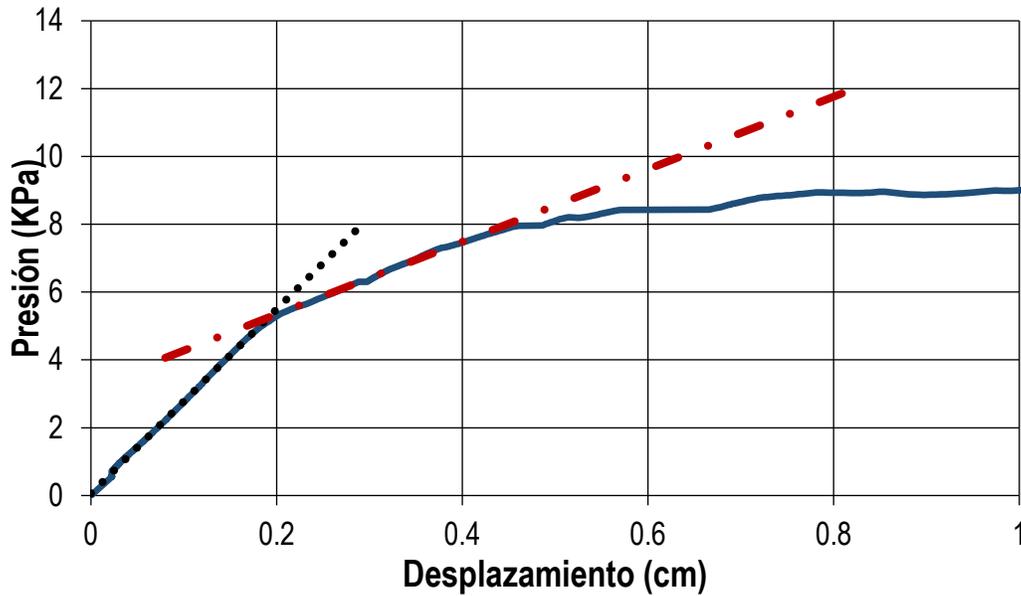


Figura 4.3 Aproximación de etapas para el muro de Varela *et al.* (2012a)

En la figura 4.4 se ilustran las aproximaciones lineales obtenidas mediante ajustes de mínimos cuadrados para las etapas 1 y 2 del muro de Varela *et al.* (2015). Se observa que el punto de intersección entre las aproximaciones lineales corresponde a un valor de 5.71 KPa, que corresponde al 47.7% de la carga máxima.

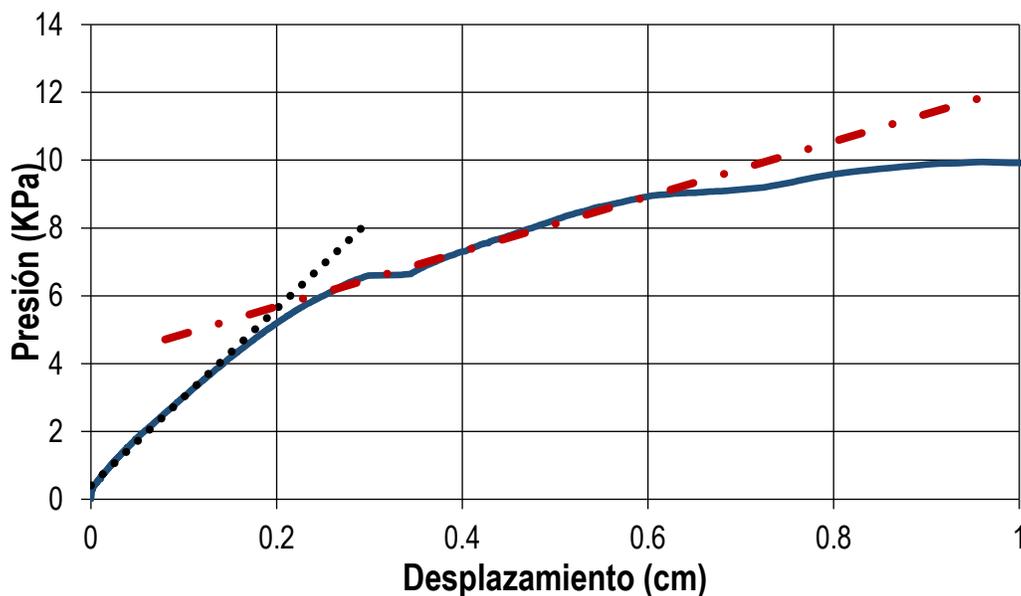


Figura 4.4 Aproximación de etapas para el muro de Varela *et al.* (2015)

En la figura 4.5 se ilustran las aproximaciones lineales obtenidas mediante ajustes de mínimos cuadrados para las etapas 1 y 2 del muro de G.Cantón (2016). Se observa

que el punto de intersección entre las aproximaciones lineales corresponde a un valor de 4.32 KPa, que corresponde al 37.3% de la carga máxima.

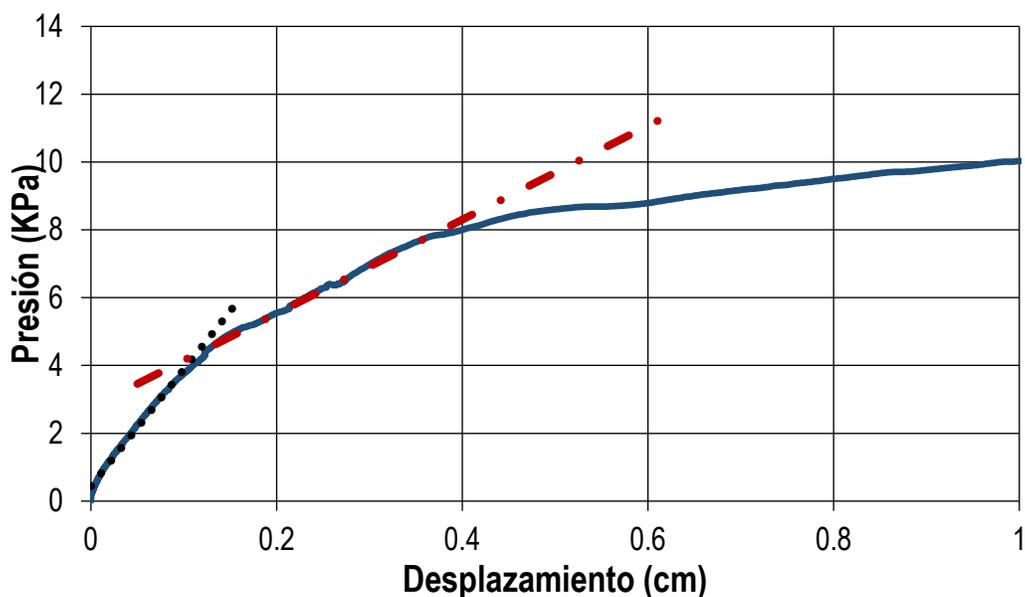


Figura 4.5 Aproximación de etapas para el muro de G. Cantón (2016)

### 4.3 Muretes

Se modeló un murete de mampostería considerando una resistencia a tensión para la junta de 0.1166 MPa. Se obtuvo una carga máxima de 3070 N que corresponde al 94% de la carga máxima promedio obtenida experimentalmente. En la Figura 4.6 se presenta la comparación de una curva carga – desplazamiento típica al centro de un murete obtenida del ensaye con la obtenida del análisis computacional. Se observa en esta figura que el modelo computacional aproxima adecuadamente la parte lineal de la envolvente del ensaye.

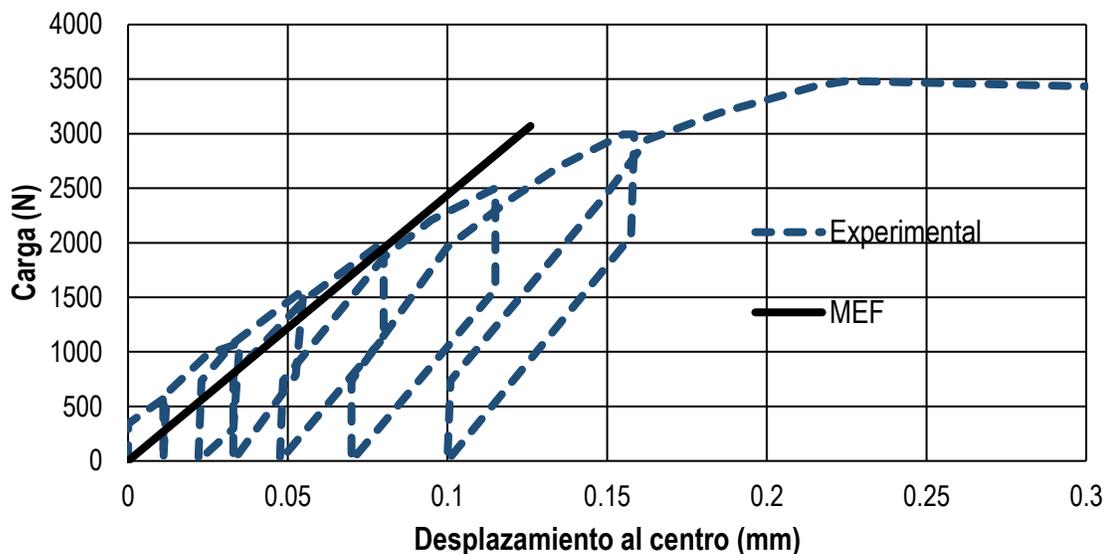


Figura 4.6 Carga – desplazamiento al centro de un murete

## 4.4 Muros de mampostería confinada

### 4.4.1 Análisis preliminar de un muro de mampostería confinada

En la Figura 4.7 se presentan los resultados computacionales de la modelación preliminar del muro de Varela *et al.* (2012a) y se comparan con los resultados experimentales del mismo; adicionalmente se presentan los eventos de agrietamiento que ocurren en el modelo computacional. En esta figura las líneas negras gruesas corresponden a las grietas en la cara posterior del muro (cara de aplicación de la carga) y las líneas discontinuas rojas corresponden a las grietas en la cara frontal del muro (cara libre y visible durante el experimento). De los resultados computacionales, se obtuvo que la primera grieta se presenta en la cara posterior en la unión entre la cadena inferior y la primera hilada de bloques. El segundo evento de agrietamiento corresponde a la formación de dos grietas horizontales que se presentan en la zona central del panel de mampostería del muro. El tercer evento de agrietamiento se presenta en la cara posterior del muro en la unión de mortero de la hilada superior de bloques. Finalmente se presentan en la cara posterior del muro las grietas verticales en los bloques adyacentes a los castillos.

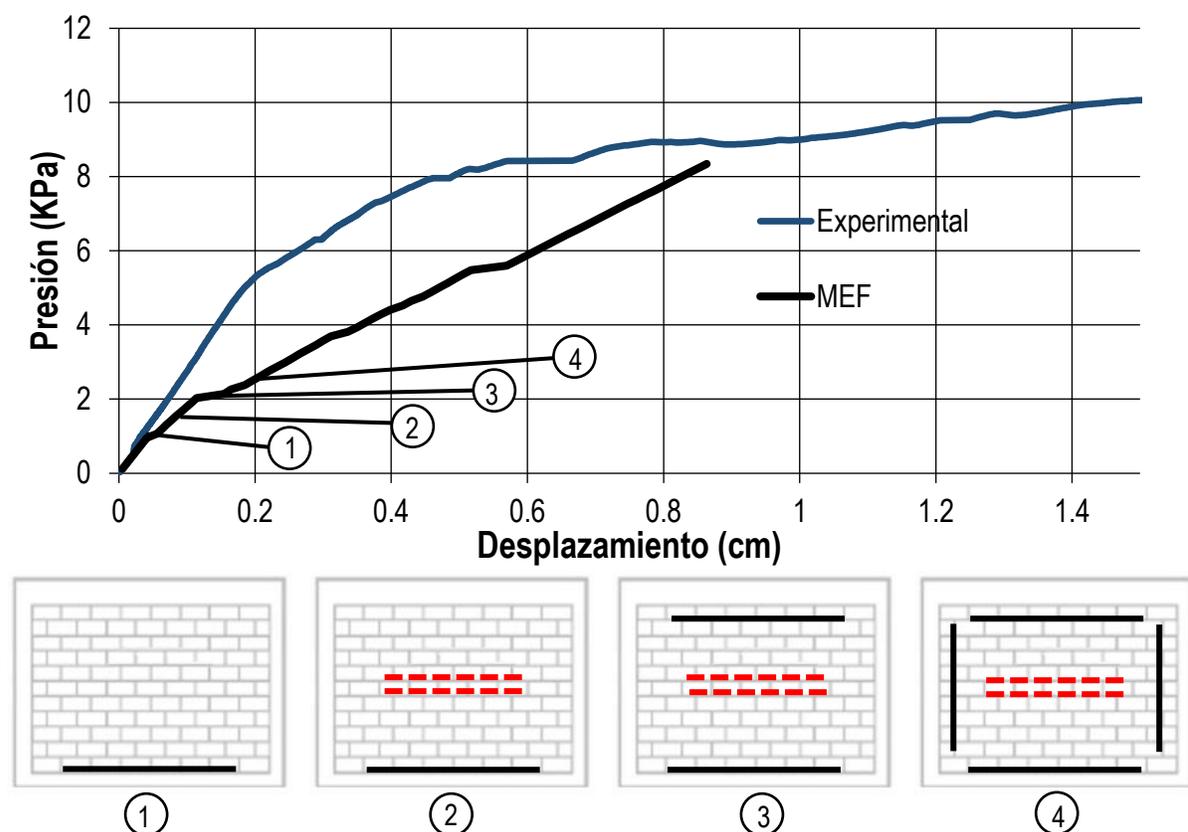


Figura 4.7 Evolución del agrietamiento para el modelo preliminar MR1

Se observa que el cambio de pendiente ocurre a una carga de 2.15 KPa, mientras que en la curva experimental ocurre a una carga de 5.24 KPa (sección 4.2). Adicionalmente, el modelo no predice el nivel de carga en el cual ocurre el cambio de pendiente entre las etapas 1 y 2. Para los puntos en los cuales ocurren los agrietamientos, el modelo presenta desplazamientos significativamente mayores que los experimentales.

#### 4.4.2 Análisis de sensibilidad de la resistencia de las juntas de mortero

Los resultados del análisis de sensibilidad permiten determinar el valor de la resistencia de las juntas de mortero que debe utilizarse en los modelos computacionales para simular el efecto de confinamiento para predecir la resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada. En la tabla 4.2 se presentan los niveles de carga en los que ocurre el cambio de pendiente (cp) entre las etapas 1 y 2, en función de la resistencia a tensión de las juntas (ftp); se toma como valor base un

ftp de 0.2915 MPa. El valor de cp obtenido del modelo computacional se compara con el obtenido de la curva experimental (cpe) (sección 4.2) a través de la relación (cp/cpe).

Tabla 4.2 Análisis de sensibilidad de ftp

ftp (MPa)	MR1		MR2		MR3	
	cp (KPa)	cp/cpe	cp (KPa)	cp/cpe	cp (KPa)	cp/cpe
1ftp (0.1166 MPa)	2.14	0.41	2.28	0.40	2.32	0.54
2ftp (0.2332 MPa)	3.81	0.73	4.19	0.73	4.28	0.99
2.25ftp (0.2624 MPa)	4.17	0.80	4.55	0.80	4.63	1.07
2.5ftp (0.2915 MPa)	4.65	0.89	5.03	0.88	5.21	1.21
2.75ftp (0.3207 MPa)	5.01	0.96	5.51	0.96	5.67	1.31
3ftp (0.3498 MPa)	5.48	1.05	6.11	1.07	6.14	1.42

Se observa que para los muros MR1 y MR2 el factor de ajuste que aproxima el nivel de carga es de 2.75, mientras que para el muro MR3 es de 2, con un valor promedio de 2.5, que corresponde a una resistencia de la junta de 0.2915 MPa.

#### 4.4.3 Análisis finales de muros de mampostería confinada

En la Figura 4.8 se presentan la comparación de la curva experimental del muro de Varela *et al.* (2012a) con la curva obtenida del modelo computacional considerando una resistencia a tensión de la junta de 0.29 MPa, y un ajuste de los desplazamientos descrito en la sección 5.2. Se presentan los eventos de agrietamiento observados en el modelo computacional; las líneas negras gruesas corresponden a las grietas en la cara posterior del muro (cara de aplicación de la carga) y las líneas discontinuas rojas corresponden a las grietas en la cara frontal del muro (cara libre). De los resultados computacionales, se obtuvo que la primera grieta se presenta en la cara posterior en la unión entre la cadena inferior y la primera hilada de bloques. El segundo evento de agrietamiento corresponde a la formación de dos grietas horizontales que se presentan en la zona central del panel de mampostería del muro. El tercer evento de agrietamiento se presenta en la cara posterior del muro en la junta de mortero de la hilada superior de bloques. Finalmente, a una carga muy cercana al tercer evento, se presentan en la cara posterior del muro las grietas verticales en los bloques adyacentes a los castillos.

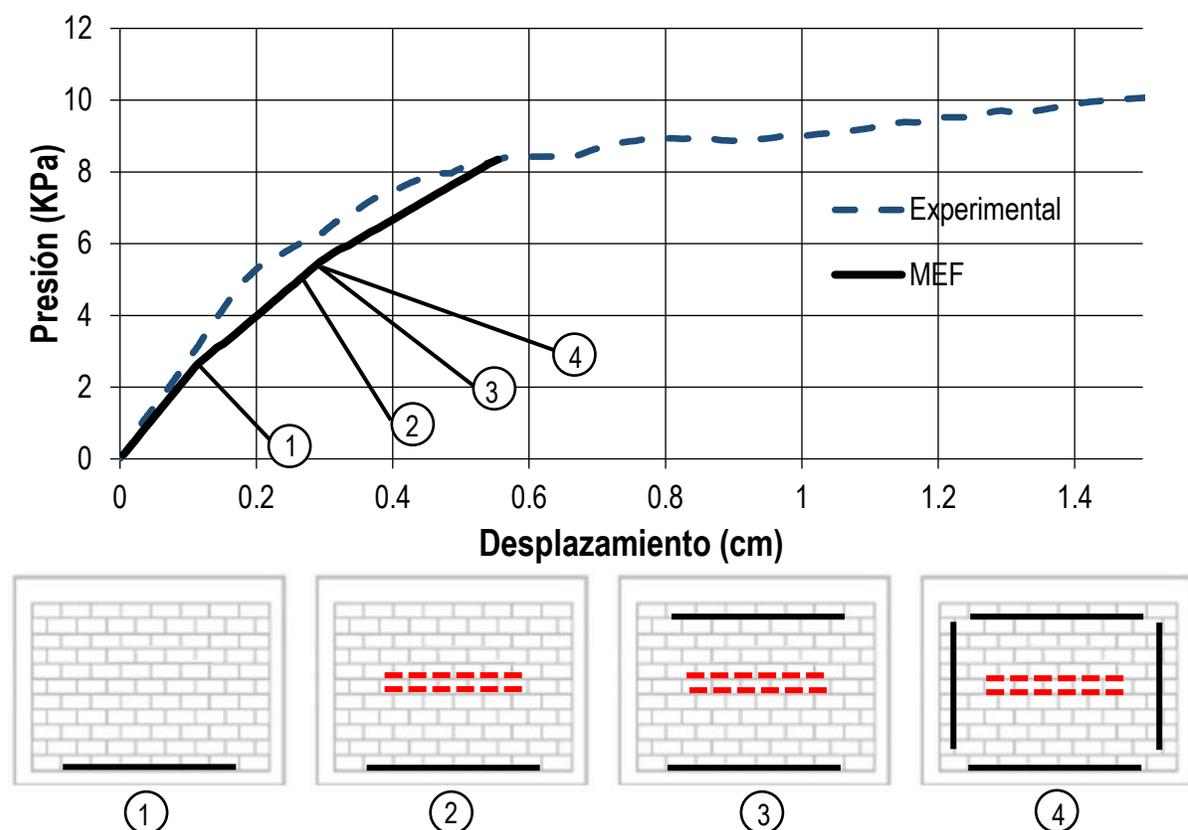


Figura 4.8 Evolución del agrietamiento para el modelo final MR1

En la Figura 4.9 se presenta la comparación de la curva experimental del muro de Varela *et al.* (2015) con la curva obtenida del modelo computacional considerando una resistencia a tensión de la junta de 0.29 MPa, y un ajuste de los desplazamientos descrito en la sección 5.2. Se presentan los eventos de agrietamiento observados en el modelo computacional; las líneas negras gruesas corresponden a las grietas en la cara posterior del muro (cara de aplicación de la carga) y las líneas discontinuas rojas corresponden a las grietas en la cara frontal del muro (cara libre). De los resultados computacionales, se obtuvo que la primera grieta se presenta en la cara posterior en la unión entre la cadena inferior y la primera hilada de bloques. El segundo evento de agrietamiento corresponde a la formación de dos grietas horizontales que se presentan en la zona central del panel de mampostería del muro. El tercer evento de agrietamiento se presenta en la cara posterior del muro en la junta de mortero de la hilada superior de bloques. Finalmente se presentan en la cara posterior del muro las grietas verticales en los bloques adyacentes a los castillos.

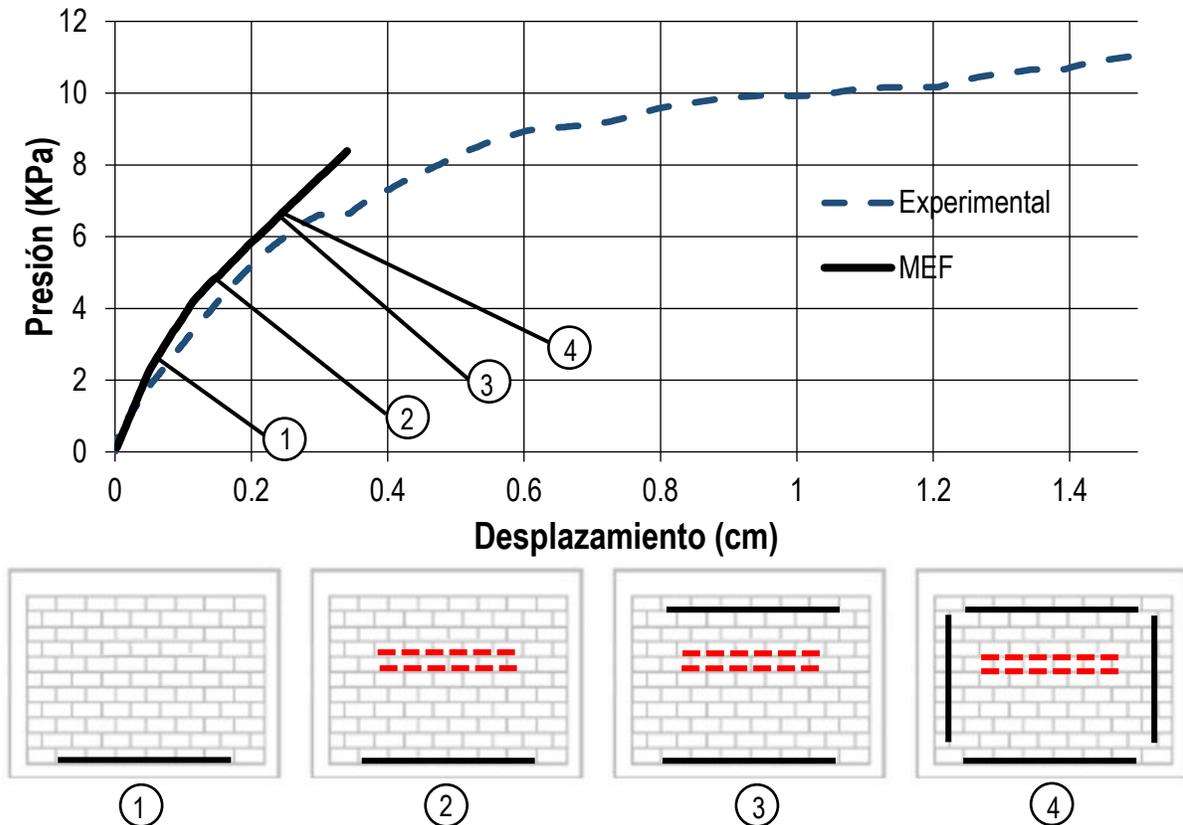


Figura 4.9 Evolución del agrietamiento para el modelo final MR2

En la Figura 4.10 se presenta la comparación de la curva experimental del muro de G.Cantón (2016) con la curva obtenida del modelo computacional considerando una resistencia a tensión de la junta de 0.29 MPa, y un ajuste de los desplazamientos descrito en la sección 5.2. Se presentan los eventos de agrietamiento observados en el modelo computacional; las líneas negras gruesas corresponden a las grietas en la cara posterior del muro (cara de aplicación de la carga) y las líneas discontinuas rojas corresponden a las grietas en la cara frontal del muro (cara libre). De los resultados computacionales, se obtuvo que la primera grieta se presenta en la cara posterior en la unión entre la cadena inferior y la primera hilada de bloques. El segundo evento de agrietamiento corresponde a la formación de dos grietas horizontales que se presentan en la zona central del panel de mampostería del muro. El tercer evento de agrietamiento se presenta en la cara posterior del muro en la junta de mortero de la hilada superior de bloques. Finalmente se presentan en la cara posterior del muro las grietas verticales en los bloques adyacentes a los castillos.

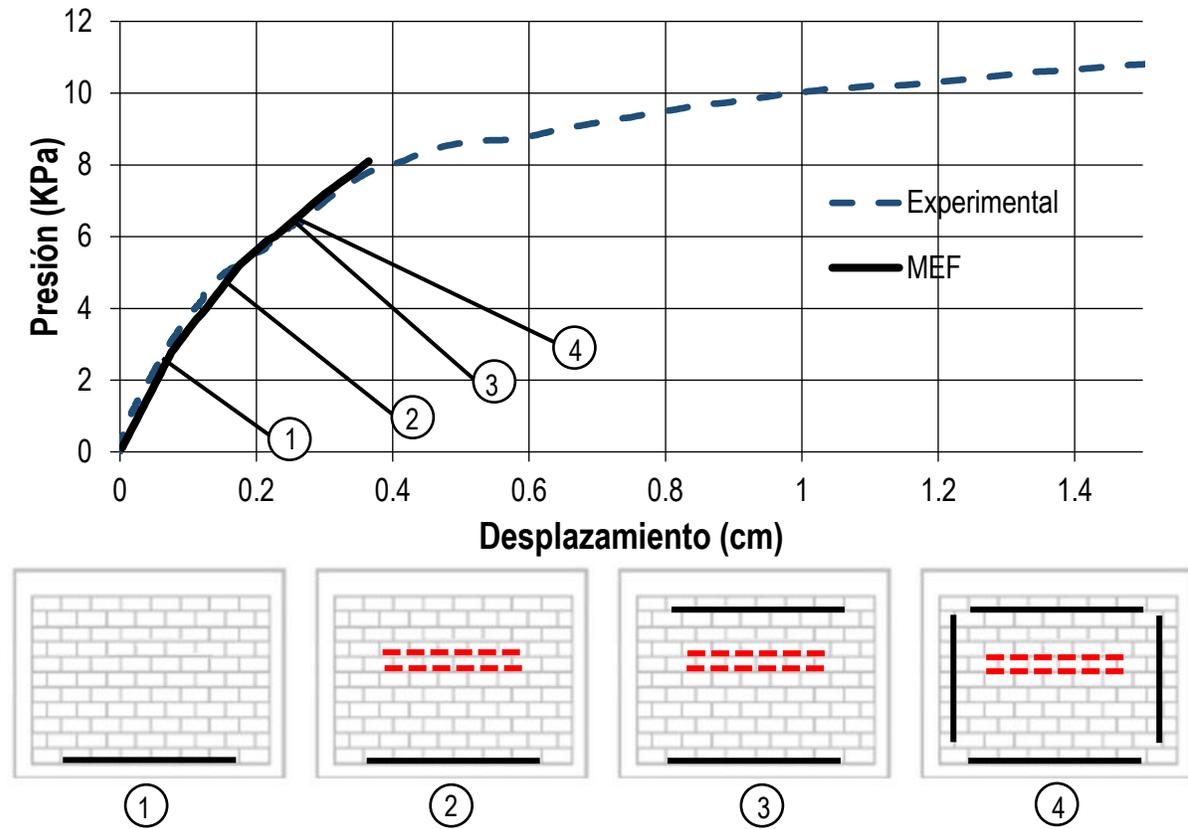


Figura 4.10 Evolución del agrietamiento para el modelo final MR3

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los análisis realizados a partir de los resultados obtenidos de los modelos computacionales de muros de mampostería confinada y del análisis de los ensayos. Se discute la evolución del agrietamiento y las rigideces degradadas asociadas a los eventos de agrietamiento

#### 5.1 Evolución del agrietamiento

De los resultados obtenidos en los ensayos y modelos computacionales de muros de mampostería confinada, se puede concluir que la evolución del agrietamiento es en tres etapas. En la Figura 5.1 se presenta un modelo trilineal en el que se observan las rigideces asociadas a las tres etapas de la curva. La primera etapa corresponde a un estado sin agrietar en los primeros pasos de carga y posteriormente con agrietamientos horizontales en la cara posterior del muro en la unión de la cadena inferior con la primera hilada de bloques. La segunda etapa inicia con la formación de la grieta horizontal en la cara frontal al centro del muro y posteriormente se forman en la cara posterior del muro las grietas horizontales en la hilada superior de bloques y las grietas verticales adyacentes a los castillos. La tercera etapa, que no fue simulada computacionalmente pero si ha sido observada durante los ensayos (Moreno, 2014), está relacionada con la formación de las grietas a 45° y al mecanismo de falla, en el cual se divide el muro en segmentos.

Inicialmente, el muro tiene un comportamiento de placa. Posteriormente, se produce un cambio de rigidez entre la primera y la segunda etapa asociado a la formación de las grietas horizontales al centro del muro. En este punto, en la dirección horizontal el muro tiene un comportamiento tipo viga, mientras que en el sentido vertical el muro tiene un comportamiento gobernado por la formación de un mecanismo de puntal (Figura 5.2). Este cambio súbito de rigideces, determina la degradación de la rigidez global del muro.

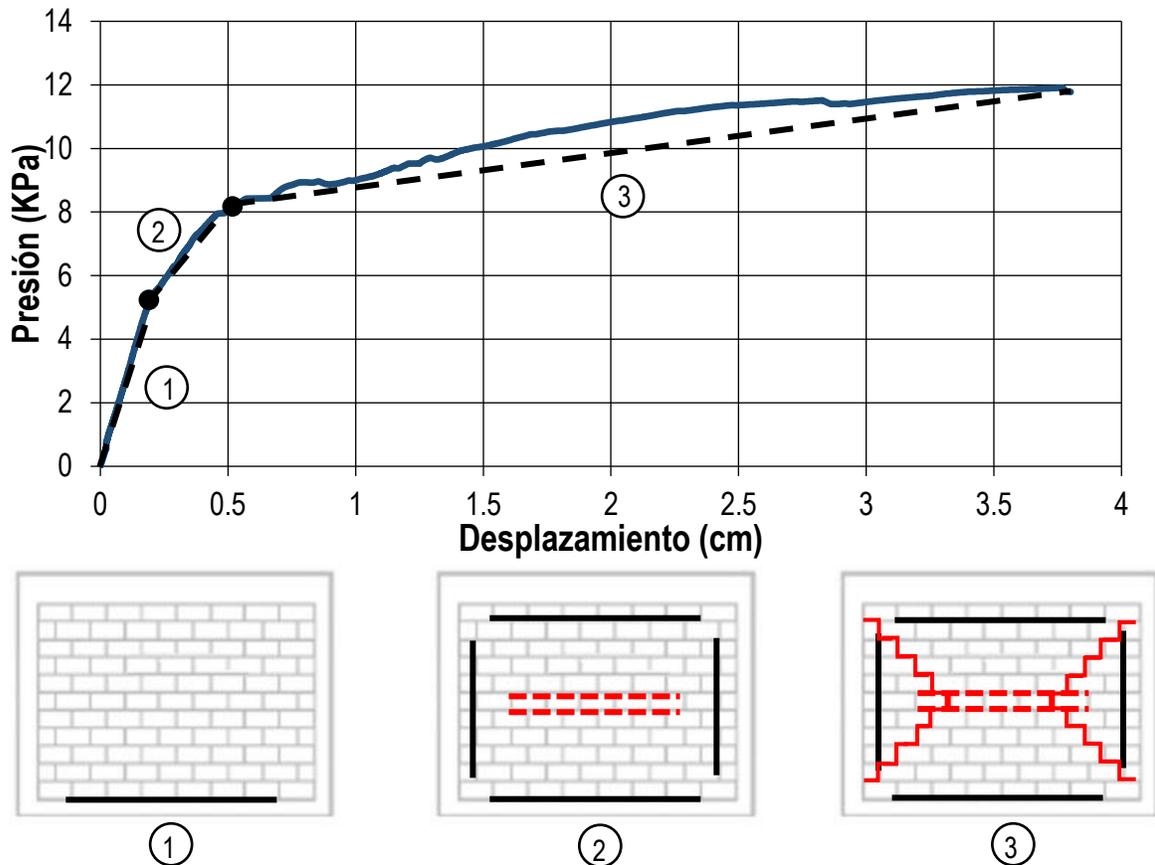


Figura 5.1 Conceptualización de la evolución del agrietamiento en etapas

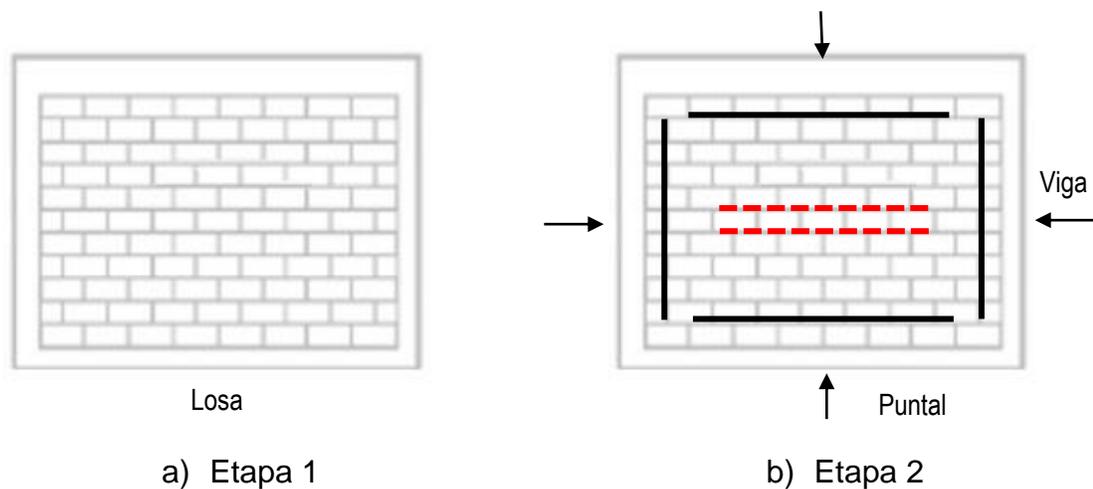


Figura 5.2 Mecanismos de las etapas 1 y 2 en un muro de mampostería confinada

La tercera etapa está asociada a la formación de las grietas a  $45^\circ$  y que resulta en la formación del mecanismo final de falla. El comportamiento del muro está asociado a la formación de mecanismos de puntales en ambas direcciones del muro (Figura 5.3).

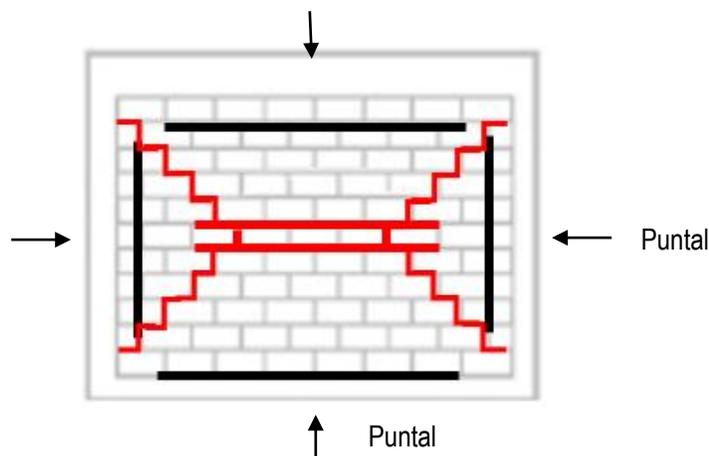


Figura 5.3 Mecanismo de la etapa 3 en un muro de mampostería confinada

## 5.2 Rigideces agrietadas

Del análisis de sensibilidad se observa que a medida que se incrementa la resistencia a tensión de la interfaz plana, tanto de la junta vertical como de la junta horizontal, los eventos de agrietamiento ocurren a niveles mayores de carga fuera del plano. Por otra parte, se observa que al formarse una grieta en el modelo, éste realiza iteraciones hasta encontrar la convergencia en el modelo elástico lineal agrietado equivalente. En la figura 5.4 se presentan las rigideces asociadas a los modelos agrietados del muro de Varela *et al.* (2012a). Estos modelos agrietados consistieron en suprimir las interfaces planas que conectaban los nodos en las zonas donde se presenta el agrietamiento y posteriormente realizar un análisis elástico lineal, para cada una de las cuatro condiciones de agrietamiento observados (CrW1, CrW2, CrW3, CrW4). Se observa que para cada evento de agrietamiento, el modelo computacional no lineal no encuentra la convergencia hasta alcanzar la respuesta del modelo agrietado elástico lineal correspondiente al estado de agrietamiento. Esto es, el modelo es incapaz de seguir la curva de respuesta aplicando las cargas por control de fuerzas, dado que el modelo presenta puntos de bifurcación en los pasos de carga en los que ocurren agrietamientos; por la trayectoria que se obtiene del modelo se asume que sigue una solución no trivial diferente al camino básico (de Borst *et al.*, 2012). En este trabajo de investigación se propuso un ajuste que consistió en recalcular el desplazamiento del

paso de carga en el que ocurre el agrietamiento con base en la rigidez entre los dos pasos de carga anteriores al paso de agrietamiento.

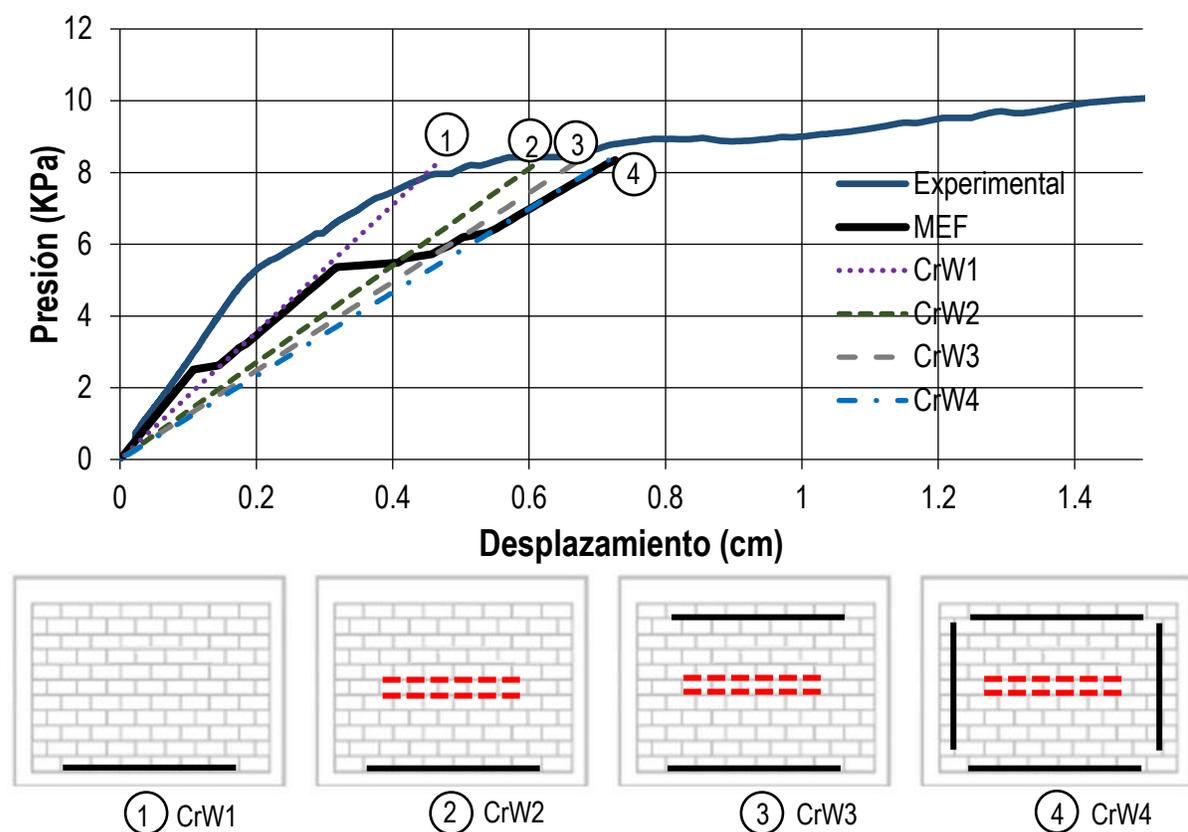


Figura 5.4 Respuesta de modelos agrietados

### 5.3 Modelo de un muro parte de una estructura sujeta al empuje de viento

Los tres modelos computacionales de muros de mampostería confinada tenían como propósito reproducir las observaciones de los tres estudios experimentales seleccionados. Por lo tanto, las condiciones de apoyo y carga constituyeron aproximaciones a las establecidas en los estudios experimentales. En esta sección se presenta la respuesta de un muro de mampostería confinada con la geometría y materiales de G.Cantón (2016), pero con dos cambios en las condiciones de frontera que representen a un muro que sea parte de una estructura y que esté sujeta al empuje

del viento. Para este propósito se modifican las condiciones de frontera como se describe a continuación:

- 1) Los cuatro elementos confinantes están restringidos al desplazamiento en las tres direcciones, así como a la rotación.
- 2) Las cargas se aplican sobre toda la superficie del muro.

En la figura 5.5 se presenta la curva de respuesta del nuevo modelo (MEF2) y se compara con los resultados del modelo computacional original (MEF1) y los resultados experimentales (Experimental) que tuvieron las condiciones de frontera descritas en la sección 2.2; adicionalmente, se presenta la evolución de los eventos de agrietamiento. Se presentan los eventos de agrietamiento observados en el modelo computacional, los cuales cambian de orden al cambiar las condiciones de frontera; las líneas negras gruesas corresponden a las grietas en la cara posterior del muro y las líneas discontinuas rojas corresponden a las grietas en la cara frontal del muro. La primera grieta se presenta en la cara posterior en la unión entre la cadena inferior y la primera hilada de bloques. El segundo evento de agrietamiento se presenta en la cara posterior del muro en la junta de mortero de la hilada superior de bloques. El tercer evento de agrietamiento corresponde a la formación de dos grietas horizontales que se presentan en la zona central del panel de mampostería del muro. Finalmente se presentan en la cara posterior del muro las grietas verticales en los bloques adyacentes a los castillos.

Adicionalmente, se observa que la pendiente inicial de la curva es similar a la del modelo MEF1, hasta que se presenta el segundo evento de agrietamiento en donde la curva del modelo MEF2 es más flexible. Las grietas horizontales al centro del muro se presentan a una carga de 4.17 KPa, el cual es un valor inferior al presentado en el modelo MEF1 de 5.21 MPa.

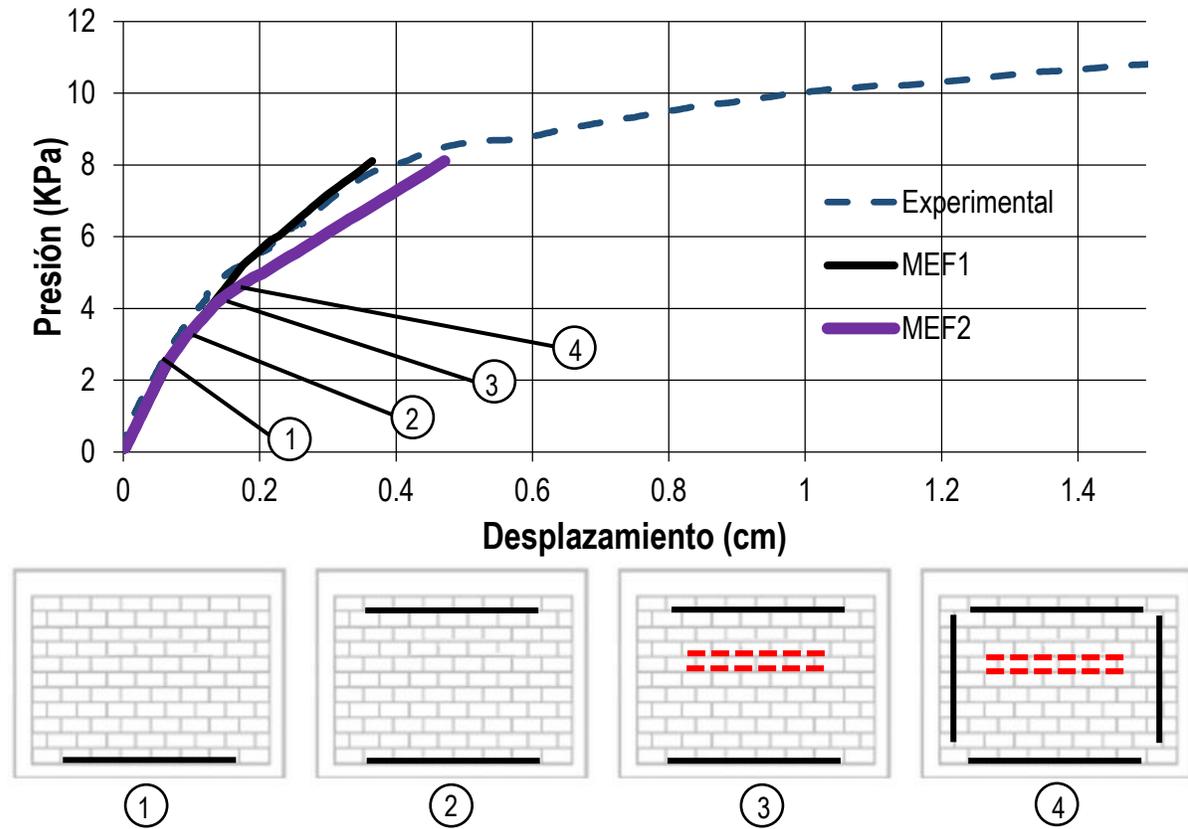


Figura 5.5 Respuesta computacional de un muro sujeto al empuje de viento

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo de investigación fue simular computacionalmente la evolución del agrietamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano mediante modelos no lineales con el Método del Elemento Finito. Para este propósito se ensayaron a flexión bloques huecos de concreto de tres celdas y se realizaron modelos computacionales de bloques para determinar el módulo de elasticidad de los bloques sujetos a flexión. Se realizaron modelos tridimensionales no lineales de muretes y muros de mampostería confinada. Se analizaron los resultados experimentales y computacionales obtenidos en esta investigación y se comparan con los obtenidos por Dorantes (2011), Varela *et al.* (2012a), Varela *et al.* (2015) y G.Cantón (2016). Con base en los resultados obtenidos de esta investigación se formulan las siguientes conclusiones:

1. El modelo computacional del murete de mampostería aproxima adecuadamente la resistencia y rigidez obtenida experimentalmente.
2. El modelo computacional de los muros de mampostería confinada seleccionados permitió determinar la secuencia de agrietamiento inicial. Esta secuencia de agrietamiento consistió en un primer evento de agrietamiento correspondiente a una grieta horizontal y que se presenta en la cara posterior del muro (cara de aplicación de la carga), en la unión entre la cadena inferior y la primera hilada de bloques. El segundo evento de agrietamiento corresponde a la formación de dos grietas horizontales en la parte central de la cara frontal del muro (cara libre). El tercer evento de agrietamiento corresponde a una grieta horizontal que se presenta en la cara posterior del muro, en la junta entre las dos últimas hiladas de bloque. El último evento de agrietamiento corresponde a las grietas verticales cercanas a los castillos en la cara posterior del muro.

3. El comportamiento de un muro de mampostería confinada sujeto a cargas fuera del plano se puede dividir en tres etapas. En la primera etapa el muro tiene un comportamiento de placa. En la segunda etapa el muro tiene un comportamiento de viga en la dirección horizontal y un comportamiento gobernado por la formación de un puntal en la dirección vertical. En la tercera etapa el muro tiene un comportamiento gobernado por mecanismos de puntales en las dos direcciones.
4. Las tres etapas de comportamiento de un muro de mampostería confinada sujeto a cargas fuera del plano están asociadas a la evolución del agrietamiento. La primera etapa inicia con un estado sin agrietamiento y posteriormente se produce una grieta horizontal en la cara posterior de la primera hilada del muro. La segunda etapa inicia con la formación de grietas horizontales al centro del muro y posteriormente se presenta una grieta horizontal en la cara posterior en la junta entre las últimas dos hiladas de bloque y grietas verticales paralelas a los castillos.
5. Del análisis de la información experimental existente, se observa que los agrietamientos horizontales al centro del muro que determinan el inicio de la segunda etapa de comportamiento ocurren entre un rango de 37% a 48% de la carga máxima.
6. Con un ajuste en la resistencia de las juntas, los modelos de muros de mampostería confinada aproximan de manera satisfactoria la respuesta obtenida experimentalmente para las primeras dos etapas. Se modificó la resistencia a tensión de las juntas por un factor de 2.5, este incremento en la resistencia de las juntas está asociado al confinamiento de la mampostería.
7. De los resultados computacionales de un muro sujeto al empuje del viento, se observa que los eventos de agrietamiento son similares a los presentados en el modelo computacional que representa el ensaye (modelo original), con la diferencia de que la formación de las dos grietas horizontales en la parte central ocurren después de la formación de la grieta horizontal en la junta entre las dos

últimas hiladas de bloque. La pendiente inicial en la curva carga – desplazamiento fuera del plano es similar a la del modelo original, hasta que ocurre el segundo evento de agrietamiento. El agrietamiento al centro del muro ocurre a un menor nivel de carga en comparación con el modelo original.

## CAPÍTULO VII

### REFERENCIAS

Akhaveissy A.H., Desai C.S. (2011). Unreinforced masonry walls: nonlinear finite element analysis with a unified constitutive model. Arch Comput Methods Eng 18:485–502.

Baeza Quintero J. (2014). Muros de mampostería confinada de tabiques sólidos sujetos a cargas fuera del plano. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Bažant Zdeněk P., Planas Jaime (1998). Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials, 1° edición, CRC Press, U.S.A.

Bean Popehn Jennifer R., Schultz Arturo E. (2011). Finite-Element Models for Slender, Posttensioned Masonry Walls Loaded Out-of-Plane. “Journal of Structural Engineering”, ASCE, 137(12), 1489-1498.

da Porto Francesca, Guidi Giovanni, Garbin Enrico, Modena Claudio. In-plane behavior of clay masonry walls: experimental testing and finite-element modeling. “Journal of Structural Engineering”, ASCE, 136(11), 1379-1392.

de Borst René, Crisfield Mike A., Remmers Joris J.C., Verhoosel Clemens V. (2012). Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, 2° edición, Wiley, U.K.

Dorantes Sansores A. (2011). Resistencia a tensión por flexión fuera del plano de muretes de mampostería de 12 cm de espesor. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

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

GDF – Gobierno del Distrito Federal (2004a), Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de Estructuras de Mampostería, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.

GDF – Gobierno del Distrito Federal (2004b), Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de Estructuras de Concreto, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México.

González Torres V. (2006). Determinación de la resistencia a compresión axial de la mampostería de bloques de concreto usada en Yucatán. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

González Herrera M. (2010). Comportamiento de la mampostería de bloques huecos de concreto de distintos espesores, sujeta a compresión axial. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México

Hernández Santillán J. (2015). Modelación de la fractura en la mampostería típica de la península de Yucatán. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Lourenço Paulo B., Rots Jan G. (1997). Multisurface Interface Model For Analysis of Masonry Structures. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 123(7), 660-668.

Lourenço Paulo B., Rots Jan G., Blaauwendraad Johan (1998). Continuum model for masonry: parameter estimation and validation. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 124(6), 642-652.

Lourenço Paulo B. (2000). Anisotropic softening model for masonry plates and shells. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 126(9), 1008-1016.

Milani Gabriele, Lourenço Paulo B, Tralli Antonio. (2006). Anisotropic softening model for masonry plates and shells. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 132(10), 1650-1663.

Moreno Herrera J. (2014). Propuesta de diseño para muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

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

Moreno H. J., Varela R. J., Fernandez B. L., (2015). Out-of-Plane Design Procedure for Confined Masonry Walls. Journal of Structural Engineering, ASCE, 142(2), 1-12.

Ojeda Tuz M. (2014). Resistencia a compresión axial y a tensión por flexión de la mampostería de piezas multiperforadas de arcilla extruida de 12 cm de espesor. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Paleo Torres A. (2013). Propiedades índice de la mampostería de bloques huecos de concreto de 12 cm de espesor. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

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

Reccia Emanuele, Cazzani Antonio, Cecchi Antonella (2012). FEM-DEM modeling for out-of-plane loaded masonry panels: a limit analysis approach. The Open Civil Engineering Journal 6: 231-238.

Shah, S. P., Swartz, S. E. y Ouyang, C. (1995). Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock, and other quasi-brittle materials. EUA: John Wiley and Sons.

TNO (2011). DIANA. Manual de usuario. Delft: TNO.

Varela R. J., Navarrete M. D, Fernández B. L., Moreno E. I. (2011). Out of plane behavior of confined masonry walls. "Engineering Structures", 33(5), 1734-1741. 55.

Varela R. J., Moreno H. J., López G. I., Fernández B. L., Moreno E. I. (2012a). Out-of-plane strength of confined masonry walls. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 138(11), 1331 -1341. 56.

Varela R. J., Polanco M. M., Fernández B. L., Moreno E. I. (2012b). Confined masonry walls subjected to combined axial loads and out-of-plane uniform pressures. "Canadian Journal of Civil Engineering", 39(4), 439-447.

Varela R. J, Chan E. S., Fernández B. L., Moreno H. J. (2015). Comportamiento de muros de mampostería confinada con aberturas sujetos a cargas fuera del plano. "Concreto y cemento. Investigación y desarrollo", 7(1), 52-65.

Wight, J. y MacGregor, J. (2009). Reinforced concrete mechanics y design. s.l.:Pearson.