



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“COMPORTAMIENTO A CORTANTE DE MUROS
DE MAMPOSTERÍA CONFINADA CON BAJA
RELACIÓN DE ASPECTO SUJETOS A CARGAS
LATERALES”**

TESIS

PRESENTADO POR:

I.C. JOSÉ ANTONIO PINTO SALUM

EN OPCIÓN AL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

OPCIÓN ESTRUCTURAS

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2018

Aunque este trabajo hubiera servido para el Examen de Grado y fuera aprobado por el Sínodo, sólo el autor es responsable de las Doctrinas emitidas en él.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Yucatán, por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis.

Asimismo, agradezco al Programa de Apoyo al Desarrollo y Consolidación de los Cuerpos Académicos (PADECCA) de la UADY y a la empresa Xella Mexicana, S.A. de C.V. por el apoyo económico brindado para el desarrollo de este trabajo de investigación.

RESUMEN

Los muros de mampostería confinada (MMC) son el sistema estructural más utilizado en México y muchos países del mundo. Estos muros pueden construirse con piezas de diversos tipos, como son bloques huecos de concreto (BHC), tabiques sólidos de arcilla, tabiques extruidos de arcilla (TEA) y recientemente bloques de concreto celular de autoclave (BCCA). Existe numerosos trabajos sobre MMC de piezas de BHC o TEA. No existen muchos trabajos sobre MMC de BCCA. En la mayoría de los trabajos se estudiaron muros con relación de aspecto cercana a uno. Existen pocos estudios para muros de mampostería confinada con baja relación de aspecto sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles.

El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto del tipo de pieza en la resistencia a cortante de muros de mampostería confinada con baja relación de aspecto sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Se diseñaron, construyeron y ensayaron dos muros a escala natural. Un muro se construyó con BHC (MBHC) y el otro con BCCA (MCCA). Los muros tuvieron relación de aspecto cercana a 0.5. La altura de los muros fue de 240 cm y la longitud de 453 cm.

Se obtuvieron las historias de carga y distorsión con el tiempo. Se obtuvieron las curvas carga lateral-desplazamiento. Se presentan los patrones de agrietamiento y la evolución del daño con respecto a las distorsiones aplicadas.

Con base en los resultados experimentales de este trabajo y el de diversos autores, se observó que la resistencia a cortante es función de más de una variable, como son, la relación de aspecto (L/H), la relación de esfuerzo axial entre la resistencia a compresión de la mampostería (σ/f_m) y la relación de esbeltez (H/t). Se propuso una ecuación para calcular la resistencia a cortante de muros confinados de cualquier tipo de pieza. La ecuación se simplificó manteniendo un buen ajuste. Se calculó la capacidad de deformación, la degradación de rigidez y la energía disipada de los muros ensayados. De igual manera se compararon estos resultados para el muro MCCA con los ensayados por Alcocer (2017) y Chim (2017). Se concluyó que la ecuación propuesta aproxima de manera satisfactoria la resistencia a cortante de

muros de mampostería confinada. Esta ecuación se puede aplicar a muros con cualquier tipo de pieza

ABSTRACT

In Mexico and many countries, confined masonry walls are the main structural system in buildings. These walls are mainly built with concrete or clay units and, recently, with Autoclaved Aerated Concrete (AAC) units. There are many research studies about confined masonry walls built with concrete or clay units, there are few studies about AAC confined masonry walls. In most of the studies walls aspect ratios close to one were considered. There are few studies about confined walls with small aspect ratios subjected to cyclic lateral loads.

The objective of this work was to study the effect of the types of masonry units on low aspect ratio shear walls subjected cyclic to lateral loads. Two full-scale confined walls with aspect ratio close to 0.5 were designed, built and tested. The height and length were 240 cm and 453 cm, respectively.

Load and distortion history and lateral load-displacement curves were obtained. The cracking patterns and damage evolution of each wall are also presented.

Based on the experimental results of this work and previous works from various authors, it was observed that shear strength depends on more than one variable as it's the aspect ratio (L/H), axial stress and compressive strength ratio (σ/f_m) and the slenderness ratio (H/t). A simplified equation for shear strength of confined masonry walls was proposed. The deformation capacity, stiffness degradation and dissipated energy for the two walls were calculated. Also, these results for the AAC wall were compared with the results presented by Alcocer (2017) and Chim (2017). It was concluded that the simplified equation proposed in this work gives a good approximation of the shear strength for any type of unit.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Generalidades	13
1.2. Objetivo General	14
1.3. Objetivos Específicos	14
1.4. Alcance.....	14
1.5. Contenido	15
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	16
2.1. Mecanismos de falla en muros de mampostería confinada.....	16
2.2. Muros de mamp con comportamiento dominado por cortante.	22
2.3. Reglamentaciones.....	26
2.4. Conclusiones de la revisión de literatura	27
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	28
3.1. Descripción general.....	28
3.2. Determinación de las propiedades de los materiales	28
3.3. Diseño de muros	29
3.4. Construcción de muretes.....	32
3.5. Construcción de muros.....	32
3.6. Diseño del sistema de carga e instrumentación	37
3.7. Ensaye de muros	39
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	41
4.1. Propiedades de los materiales	41
4.2. Ensaye de muretes	43

4.3.	Ensaye de muros	44
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		53
5.1.	Patrón de agrietamiento	53
5.2.	Resistencia a cortante.....	55
5.3.	Capacidad de deformación y resistencia máxima	69
5.4.	Degradación de rigidez.....	73
5.5.	Energía disipada	75
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		77
BIBLIOGRAFÍA.....		79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Muro confinado sujeto a carga axial y lateral	16
Figura 2.2 Grieta de cortante en un muro confinado	18
Figura 2.3 Grieta de flexo-cortante en un muro confinado	20
Figura 2.4 Desplazamiento como cuerpo rígido de un muro confinado	21
Figura 3.1 Vista del ensaye a compresión axial de un cilindro de concreto	28
Figura 3.2 Curvas resistencia- esfuerzo axial de compresión del muro MBHC.....	30
Figura 3.3 Curvas resistencia- esfuerzo axial de compresión del muro MCCA.....	30
Figura 3.4 Geometría de los muros.....	31
Figura 3.5 Vista de murete de BHC.....	32
Figura 3.6 Demolición de bases de concreto	33
Figura 3.7 Colocación de primeras hiladas	34
Figura 3.8 Construcción de muros hasta la mitad de su altura.....	34
Figura 3.9 Construcción de castillos hasta la mitad de su altura.....	35
Figura 3.10 Construcción de mitad superior del muro.....	35
Figura 3.11 Cadena superior del muro.....	36
Figura 3.12 Muros MBHC y MCCA terminados.....	36
Figura 3.13 Esquema general del sistema de carga lateral	37
Figura 3.14 Esquema general del sistema de carga axial.....	38
Figura 3.15 Esquema general del sistema de instrumentación	39
Figura 3.16 Protocolo de carga	40
Figura 4.1 Curva de distribución granulométrica de finos	42

Figura 4.2 Falla de muretes de BHC	43
Figura 4.3 Historia de carga y distorsión de MBHC.....	45
Figura 4.4 Agrietamiento en unión de panel con cadena	45
Figura 4.5 Primer agrietamiento diagonal en el muro.....	45
Figura 4.6 Agrietamiento diagonal en el muro.....	46
Figura 4.7 Patrón de agrietamiento final del muro MBHC	46
Figura 4.8 Curva carga lateral-desplazamiento del muro MBHC	47
Figura 4.9 Historia de carga y distorsión del muro MCCA.....	48
Figura 4.10 Agrietamiento previo al ensaye entre cadena superior y panel.....	49
Figura 4.11 Primer agrietamiento del muro	49
Figura 4.12 Primer agrietamiento diagonal del muro.....	49
Figura 4.13 Patrón de agrietamiento en carga máxima del muro.....	50
Figura 4.14 Patrón de agrietamiento final del muro.....	50
Figura 4.15 Curva carga lateral-desplazamiento del muro MCCA	51
Figura 5.1 Patrón de agrietamiento final en forma de "X"	53
Figura 5.2 Resistencia a cortante normalizada con respecto a la ecuación (2.9)..	56
Figura 5.3 Resistencia a cortante normalizada en función de L/H	60
Figura 5.4 Resistencia a cortante normalizada en función de σ/f_m	60
Figura 5.5 Resistencia a cortante normalizada en función de H/t	60
Figura 5.6 Relación de Resistencias experimental y teórica	65
Figura 5.7 Resistencia experimental y teórica con ecuación (5.5) propuesta	69
Figura 5.8 Envolvente normalizada de los muros MCCA y MBHC.....	70
Figura 5.9 Envolventes de los muros MBHC y MCCA	71
Figura 5.10 Envolventes positivas normalizadas.....	72

Figura 5.11 Envolventes de los muros de BCCA	72
Figura 5.12 Rigidez de ciclo	73
Figura 5.13 Curva de degradación de rigidez de ciclo normalizada	74
Figura 5.14 Degradación de rigidez de muros de BCCA.....	75
Figura 5.15 Curvas de ED acumulada de los muros MBHC y MCCA	76
Figura 5.16 Curvas de ED acumulada de muros de BCCA.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Resistencia a compresión axial del concreto en MBHC y MCCA.....	41
Tabla 4.2 Granulometría del agregado fino para el muro MBHC	42
Tabla 4.3 Resistencia a compresión diagonal en muretes de mampostería	43
Tabla 4.4 Resumen de cargas y desplazamientos registrados para cada evento durante el ensaye del muro MBHC	47
Tabla 4.5 Resumen de cargas y desplazamientos registrados para cada evento durante el ensaye del muro MCCA	52
Tabla 5.1 Evolución del daño con respecto a la distorsión.....	54
Tabla 5.2 Muros de BCCA.....	56
Tabla 5.3 Muros utilizados para ajuste de ecuación.....	57
Tabla 5.4 Coeficientes obtenidos del ajuste	62
Tabla 5.5 Resistencias experimental y teórica	62
Tabla 5.6 Resistencias experimental y teórica	66
Tabla 5.7 Comparación entre la carga de agrietamiento y la carga máxima.....	71

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

El sistema constructivo de muros de mampostería es uno de los más utilizados en la actualidad en gran parte del mundo. Existen diferentes tipos de muros de mampostería, por ejemplo, reforzados interiormente (MRI), no reforzados (MNR), diafragma (MD) y muros confinados (MMC). Los MC son aquellos que cuentan en su perímetro con elementos confinantes de concreto reforzado verticales llamados castillos y horizontales llamados dalas. Para este tipo de muros, los elementos confinantes se construyen después del panel de mampostería. En México se utilizan principalmente MMC debido a su bajo costo y facilidad constructiva. Los MMC se pueden construir con diversos tipos de piezas, entre las que se encuentran los bloques huecos de concreto (BHC), los tabiques sólidos de arcilla (TSA), los tabiques extruidos de arcilla (TEA) y recientemente los bloques sólidos de concreto celular de autoclave (BCCA).

Existen numerosos estudios sobre el comportamiento a cortante de muros de mampostería sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Entre las variables estudiadas se encuentran la cantidad y distribución de acero de refuerzo (Yoshimura et al., 2000), la carga axial (Aztroza et al., 2001), las aberturas y el refuerzo en ellas (Flores et al., 2004), el tipo de mortero y la combinación de piezas (Tena et al., 2009) y la relación de aspecto (Fernández et al., 2014; Pérez et al., 2015; Alcocer, 2017). Se observa que en la mayoría de los trabajos se estudiaron muros con relaciones de aspecto (H/L) cercanas a uno. Existe poca información sobre el comportamiento de muros con bajas relaciones de aspecto. Se observa también que existen numerosos trabajos sobre muros de mampostería confinada de piezas de BHC o TEA, pero existen pocos sobre MMC de BCCA. Para el caso de los MMC de BHC se han estudiado relaciones de aspecto mayores o iguales que 1.17 (Sosa, 2012; Raygoza, 2013). Para el caso de MMC de TEA se han estudiado relaciones de aspecto entre 0.23 y 2.13. Los muros con las menores relaciones de aspecto se

construyeron con castillos intermedios. La menor relación de aspecto estudiada sin castillos intermedios fue de 0.58 (Pérez et al., 2015). Para el caso de MMC de BCCA la menor relación de aspecto estudiada fue de 0.71 (Alcocer, 2017).

Debido a que existen muy pocas investigaciones nacionales o internacionales sobre el comportamiento a cortante de MMC con relación de aspecto cercana a 0.5, es necesario realizar nuevos estudios experimentales sobre dicho tema. Lo anterior permitirá complementar la información existente y formular recomendaciones de diseño para este tipo de estructuras de mampostería con comportamiento dominado por cortante. Se deben considerar diferentes tipos de piezas como son los BHC y BCCA.

1.2. Objetivo General

Evaluar el comportamiento a cortante de muros de mampostería confinada con relación de aspecto de 0.5 sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles.

1.3. Objetivos Específicos

Ensayar muros de mampostería confinada de BHC y BCCA sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles.

Determinar la resistencia a cortante, rigidez, capacidad de deformación y disipación de energía de los muros.

Proponer una ecuación de diseño para muros de mampostería confinada de cualquier tipo de pieza.

1.4. Alcance

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación cuyo objetivo es evaluar el comportamiento de muros de mampostería confinada con baja relación de aspecto sujetos a cargas alterales cíclicas reversibles. Se consideraron en el proyecto dos muros.

1.5. Contenido

Este trabajo cuenta con los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Se presenta una introducción a la problemática que se atiende en esta investigación, el objetivo general, los objetivos particulares, su alcance y una breve descripción del contenido de la tesis.

Capítulo 2. Se presenta la revisión de la literatura sobre los mecanismos de falla en muros de mampostería confinada, muros de mampostería con comportamiento dominado por cortante y reglamentaciones relativas a muros de mampostería confinada. Se incluye en este capítulo las conclusiones de la revisión de la literatura.

Capítulo 3. Se presenta la metodología empleada para evaluar el comportamiento a cortante de los muros con baja relación de aspecto. Se incluye en este capítulo la selección de la variable, la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales, el diseño de los muros, la construcción de los muretes, construcción de los muros, diseño del sistema de carga e instrumentación, procedimiento de ensaye de muretes y protocolo de ensaye de muros.

Capítulo 4. Se presentan los resultados de las propiedades básicas de los materiales y del ensaye de los muros confinados con baja relación de aspecto.

Capítulo 5. Se presenta el análisis de resultados de los muros. Se discute el patrón de agrietamiento, la resistencia a cortante, la capacidad de deformación y resistencia máxima, la degradación de rigidez y la energía disipada. Se propone una ecuación para predecir la resistencia a cortante de muros de mampostería confiada de cualquier tipo de pieza.

Capítulo 6. Se presentan las conclusiones de este trabajo.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

Se presenta a continuación la revisión de la literatura sobre los mecanismos de falla en muros de mampostería confinada y trabajos realizados. Se incluyen estudios analíticos y experimentales de MMC con comportamiento a cortante. Se hace mención de reglamentos existentes para muros de mampostería.

2.1. Mecanismos de falla en muros de mampostería confinada

La combinación de carga axial (P) y carga lateral (V) en un muro de mampostería, empotrado en su base y libre en su parte superior (Figura 2.1), puede inducir diversos mecanismos de falla asociados con la resistencia a cortante, flexión, flexo-cortante y deslizamiento. Para el caso de un muro con altura (H), longitud (L) (Figura 2.1) y castillos de concreto reforzado con un ancho y una altura igual al espesor del muro (t), las resistencias anteriores se pueden determinar como sigue:

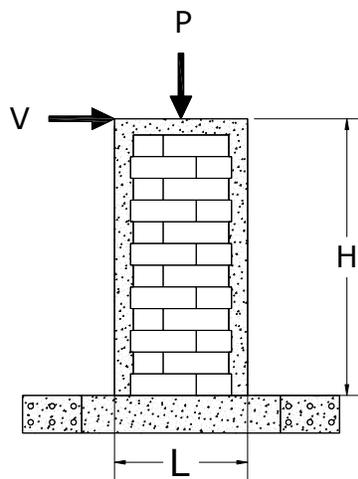


Figura 2.1 Muro confinado sujeto a carga axial y lateral

Resistencia a flexión. Esta resistencia está asociada con el aplastamiento del concreto en la zona de compresión o con la fractura del acero de refuerzo en tensión. La resistencia a flexión del muro se puede determinar con base en las hipótesis de la teoría de flexión (cinemática, constitutiva y equilibrio). Si se asume

una distribución lineal de deformaciones, un bloque rectangular equivalente para los esfuerzos de compresión en el concreto reforzado y una profundidad del eje neutro (c) localizado dentro del castillo en compresión, la resistencia a flexión (M_f) del muro puede determinarse con la ecuación (2.1).

$$M_f = C \cdot \left(\frac{L - \beta_1 \cdot c}{2} \right) + T \left(\frac{L}{2} - r \right) \quad (2.1)$$

Donde:

$$C = 0.85 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot t \quad (2.2)$$

$$T = A_s \cdot f_s \quad (2.3)$$

$$P = C - T \quad (2.4)$$

En las ecuaciones anteriores, β_1 es el parámetro que relaciona c con la profundidad del bloque equivalente de esfuerzos de compresión del concreto, C es la fuerza resultante de los esfuerzos de compresión, T es la fuerza de tensión en el acero de refuerzo del castillo, r es el recubrimiento de dicho acero, f'_c es la resistencia a compresión axial del concreto, A_s es el área de acero de refuerzo del castillo en tensión y f_s es el esfuerzo en dicho acero, obtenido a partir del modelo constitutivo propuesto por Rodríguez y Botero (1996). La carga lateral (V_f) asociada a la resistencia a flexión se puede determinar con la ecuación (2.5).

$$V_f = M_f / H \quad (2.5)$$

Resistencia a cortante. Esta resistencia está asociada con la aparición del primer agrietamiento diagonal en el panel del muro de mampostería (Figura 2.2). Se presentan tres ecuaciones para determinar dicha resistencia.

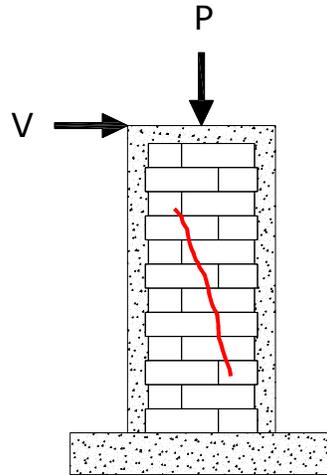


Figura 2.2 Grieta de cortante en un muro confinado

Para muros de CCA reforzados interiormente y no reforzados, la resistencia a cortante (V_{CCA}) del muro puede determinarse con la ecuación (2.6) (ACI 530-13). La ecuación anterior está basada en la teoría de los esfuerzos principales.

$$V_{C1} = 0.95 \cdot L \cdot t \cdot \sqrt{f_{CCA}} \sqrt{1 + \frac{P}{2.4 \cdot \sqrt{f_{CCA}} \cdot L \cdot t}} \quad (2.6)$$

En la ecuación anterior, f_{CCA} es la resistencia a compresión axial del CCA. La resistencia a tensión del CCA (f_{tCCA}) es igual a $2.4 \cdot \sqrt{f_{CCA}}$ (Tanner 2003). Por tanto, la ecuación (2.6) puede reescribirse como la ecuación (2.7).

$$V_{C2} = 0.395 \cdot L \cdot t \cdot f_{tCCA} \sqrt{1 + \frac{P}{f_{tCCA} \cdot L \cdot t}} \quad (2.7)$$

Para muros confinados construidos con piezas de concreto o arcilla, la resistencia a cortante del muro puede determinarse con la ecuación (2.8) (NTCM, 2004). Esta ecuación está basada en la teoría de Mohr-Coulomb.

$$V_{C3}=F_R(0.5v_m^* \cdot A_t+0.3P) \quad (2.8)$$

En la ecuación anterior, F_R es el factor de reducción de resistencia, v_m^* es la resistencia a compresión diagonal de diseño de la mampostería y A_t es el área de la sección transversal del muro.

Sosa (2013) propuso una modificación a la ecuación (2.8) para BHC. La resistencia a cortante diagonal se puede calcular con la ecuación (2.9). En la ecuación (2.9) α es la relación L/H.

$$V_{cBHC}=0.46(v_m)(\alpha)(A_t) + 0.3P \quad (2.9)$$

Para muros confinados construidos con BCCA, la resistencia a cortante del muro puede determinarse con la ecuación (2.10) (Alcocer, 2017). Esta ecuación es una modificación de la ecuación (2.8).

$$V_{cCCA1}=\left(0.78-0.14 \frac{H}{L}\right) f_{tCCA} L t \sqrt{1+\frac{P}{f_{tCCA} L t}} \quad (2.10)$$

En la ecuación anterior, f_{tCCA} es el valor medio de la resistencia a tensión del CCA.

Resistencia a flexo-cortante. Esta resistencia está asociada con la formación de una grieta horizontal a una altura igual a la longitud media del muro y la posterior propagación de la grieta en forma diagonal (Figura 2.3).

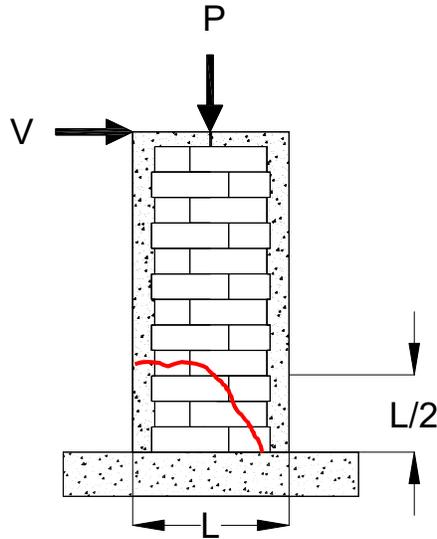


Figura 2.3 Grieta de flexo-cortante en un muro confinado

La carga lateral asociada a la resistencia a flexo-cortante (V_{fc}) puede determinarse con la ecuación (2.11). La primera parte de la ecuación se relaciona con la carga lateral necesaria para formar la grieta horizontal en los castillos y la segunda con la carga adicional que se requiere para inducir la grieta diagonal en el panel de mampostería (C_v). La primera carga se determina con la mecánica de materiales y la segunda con base en pruebas experimentales.

$$V_{fc} = \frac{S_x \cdot \left(f_r + \frac{P}{L \cdot t} \right)}{H - \frac{L}{2}} + C_v \quad (2.11)$$

En la ecuación anterior S_x es el módulo de sección de la sección transversal del muro y f_r es la resistencia a tensión por flexión del concreto del castillo.

Resistencia al deslizamiento. Esta resistencia está asociada al desplazamiento relativo del muro con respecto a su base (Figura 2.4).

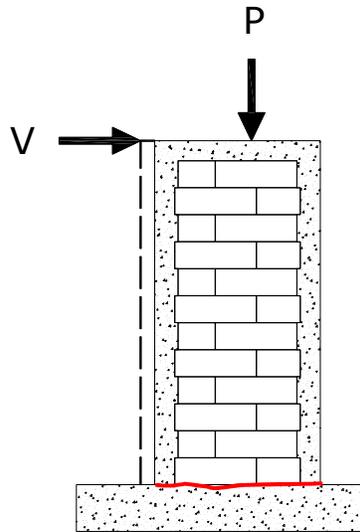


Figura 2.4 Desplazamiento como cuerpo rígido de un muro confinado

La carga lateral asociada a la resistencia al deslizamiento puede con las ecuaciones (2.12) y (2.13) obtenidas por González (2013).

$$V_d = A_t(1.3755\sigma + 0.6854) \quad (2.12)$$

$$V_d = A_n(1.3673\sigma + 1.8498) \quad (2.13)$$

En las ecuaciones (2.12) y (2.13) A_t es el área gruesa del muro, A_n es el área neta del muro y σ es el esfuerzo axial aplicado en el muro.

La ecuación (2.12) se desarrolló para muros de BHC tomando en cuenta el área efectiva de las piezas. La ecuación (2.13) se desarrolló tomando en cuenta el área neta de las piezas.

2.2. Muros de mampostería con comportamiento dominado por cortante.

San Bartolomé et al. (1992) construyeron y ensayaron un edificio a escala 1:2.5 de tres niveles en mesa vibratoria. Las dimensiones en planta fueron 1.18m x 2.48m y consistió en dos muros de mampostería confinada paralelos por nivel, dos losas de entrepiso y una de azotea. Buscaban comparar el comportamiento analítico y experimental del edificio ante cargas sísmicas. De esta investigación se concluyó que los desplazamientos y periodos naturales de vibración obtenidos experimentalmente fueron similares a los obtenidos de manera analítica y que en sismos de gran intensidad se puede llegar a la falla por cortante.

Yoshimura et al. (1996) ensayaron ocho muros confinados y no confinados a escala un medio de una edificación de un nivel. La relación de aspecto estudiada fue de 0.83. Los muros fueron sometidos a carga axial constante y cargas cíclicas reversibles. La variable de estudio fue la cantidad y separación del refuerzo vertical y horizontal en el muro. Se concluyó que ambos refuerzos (vertical y horizontal) en los muros juegan un papel importante para la carga lateral máxima esperada y mejorar la ductilidad. Esto es debido a que altos esfuerzos de corte son inducidos en los paneles de mampostería de los muros especialmente cuando los muros están sujetos a fuerzas laterales. Se observó falla a cortante en los muros.

Aztroza et al. (2004) estudiaron el efecto de la carga axial en muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Tomaron los datos de 52 muros de trabajos anteriores en México, Chile y Venezuela con relación de aspecto entre 0.71 y 2. Los autores concluyen que la presencia de carga vertical (axial) en los muros de mampostería confinada aumenta la capacidad de deformación de los mismos, otro factor importante es la relación de esbeltez.

Treviño et al. (2004) llevaron a cabo 8 ensayos de muros de mampostería confinada con relación de aspecto de 1 sujetos a cargas cíclicas reversibles laterales. Tomaron como variables de estudio el tipo de acero de refuerzo longitudinal y la distribución

de estribos en los castillos. Utilizaron barras corrugadas y armazones electrosoldados. Consideraron dos distribuciones de estribos: uniformes en la longitud y concentrados en los extremos. Se presentaron grietas diagonales que indican el comportamiento de muro dominado por cortante y posteriormente se presentó aplastamiento de la mampostería en la zona de compresión. Concluyeron que las variables estudiadas no influyen significativamente en la resistencia a cortante de los muros.

Flores et al. (2004) realizaron ensayos con dos muros de mampostería confinada de piezas macizas de arcilla de 12cm sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Los muros tuvieron una relación de aspecto de 0.83 (2.50m x 3m), con una abertura al centro de 1.0m x 0.85m. Se estudió el confinamiento de dicha abertura. Uno de los muros se construyó sin elementos confinantes en la abertura y el otro espécimen se confinó la abertura con castillos y cadenas. El comportamiento de los muros fue dominado por cortante. Se concluyó que ambos muros se agrietaron ante la misma carga lateral. El muro con elementos confinantes presentó mayor capacidad de deformación.

Tanner et al. (2005a) ensayaron 17 muros de CCA sujetos a cargas cíclicas reversibles. Se estudiaron ocho muros con comportamiento dominado por flexión y nueve por cortante. Los muros fueron reforzados interiormente con acero de refuerzo vertical en los extremos y uniformemente distribuido a lo largo de la longitud de los muros. Todos los muros se construyeron utilizando un mortero de pared delgada. Las variables de estudio fueron la relación de aspecto, la carga axial y el tipo de pieza. Los muros con comportamiento dominado por cortante fueron contruidos a base de bloques sólidos y de paneles horizontales y verticales con refuerzo interior. Se consideraron relaciones de aspecto entre 0.63 y 3.15, y esfuerzos axiales de compresión entre 2.23 kg/cm² y 5.8 kg/cm². Los autores concluyeron que el comportamiento de los muros dominados por cortante se caracterizó por agrietamiento diagonal en ambas direcciones, y en algunos casos por deslizamiento en las juntas. La falla de los muros se asoció al excesivo agrietamiento diagonal y al aplastamiento del CCA. Finalmente, se propusieron

requisitos para el diseño de muros de CCA, las cuales incluyen las resistencias por cortante, aplastamiento del puntal diagonal, deslizamiento y flexión.

Penna et al. (2008) ensayaron 14 muros de CCA con relaciones de aspecto entre 0.61 y 1.83 y esfuerzo axial entre 2.22 kg/cm^2 y 6.67 kg/cm^2 . Los muros fueron sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Las variables de estudio fueron el tipo de refuerzo utilizado, la relación de aspecto y el esfuerzo axial de compresión. Se consideraron cuatro muros no reforzados, tres muros reforzados con acero horizontal, dos con acero vertical en sus extremos y cinco muros diafragma. Los muros se construyeron utilizando bloques sólidos y mortero de pared delgada. La carga axial varió entre 2.22 kg/cm^2 y 6.67 kg/cm^2 . Los muros con relación de aspecto de 0.61 tuvieron un comportamiento dominado por cortante, mientras que los muros con una relación de aspecto de 1.83 por flexión. Los autores concluyeron que los muros reforzados interiormente presentaron un incremento significativo de su resistencia a flexión comparado con los no reforzados. El uso de acero de refuerzo horizontal demostró una mejora en el control del agrietamiento y un incremento en la ductilidad. El uso de paneles de mampostería de CCA en marcos de concreto reforzado incrementa la resistencia a flexión y la rigidez del marco sin reducir su capacidad de deformación.

Tena et al. (2009) ensayaron cuatro muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Estudiaron el efecto del tipo de mortero de las juntas y el arreglo para dos tipos de piezas combinados. Los muros tuvieron una relación de aspecto de 1 (2.3m x 2.3m) y su comportamiento se vio dominado por cortante. Se presentó agrietamiento diagonal en el panel en ambas direcciones. Los autores concluyen que la resistencia a cortante se ve disminuida en el caso de los muros de piezas combinadas. El tipo de mortero no afectó la resistencia a cortante de los muros.

Pérez et al. (2011) ensayaron dos muros de mampostería de TEA confinada con relación de aspecto igual a 1 sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Estudiaron como variable la interacción momento-cortante. Uno de los muros se

ensayó aplicando un momento flexionante en el extremo superior y el otro sin momento. El comportamiento de los muros fue dominado por cortante. Se presentó agrietamiento diagonal en el panel en ambas direcciones y aplastamiento en los castillos en zona de compresión. Los autores concluyeron que la presencia de momento flexionante en la parte superior del muro reduce la resistencia al agrietamiento, sin embargo, la resistencia al corte no se ve afectada por la variable de estudio.

Fernández et al. (2014) ensayaron cuatro muros de mampostería de BHC confinada sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Las variables estudiadas fueron la relación de aspecto y la carga axial. Para llevar a cabo esta deducción tomaron relaciones de aspecto de 1.17, 1.82 y esfuerzos axiales de 3.72 y 5.59 kg/cm². Para lograr estas relaciones de aspecto se mantuvo la altura de los muros constante en 2.66m. Los muros presentaron un comportamiento dominado principalmente por cortante y se apreciaron grietas diagonales en ambas direcciones. Los autores concluyen que la resistencia a cortante en muros de mampostería confinada es función de su relación de aspecto.

Pérez et al. (2015) ensayaron 7 muros de mampostería de TEA confinada con relaciones de aspecto entre 0.27 y 2.13 sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles estudiando como variable la relación de aspecto, los muros con relación de aspecto menor que 0.58 fueron construidos con elementos confinantes intermedios. Los muros tuvieron comportamiento dominado por cortante y presentaron grietas diagonales en ambas direcciones. Los autores concluyeron que, al aumentar la relación de aspecto, la resistencia a cortante de los muros disminuye especialmente para muros con relación de aspecto menor que 1. La deformación lateral de falla de los muros incrementa al incrementar la relación de aspecto.

Alcocer (2017) y Chim (2017) ensayaron cuatro muros de mampostería confinada de BCCA con relaciones de aspecto entre 0.71 y 2.13. los muros presentaron un comportamiento dominado por cortante y presentaron grietas diagonales en ambas direcciones. Los autores concluyen que la resistencia a cortante aumenta conforme

la relación de aspecto disminuye. Alcocer propuso modificaciones a las ecuaciones de diseño por cortante y flexocortante.

Alcocer (2017), Chim (2017) y Ricalde (2017) determinaron la resistencia a tensión de BCCA clase 4. Los ensayos se realizaron de acuerdo con la norma ASTM-C1006-01. De los ensayos se obtuvo una resistencia a tensión promedio del CCA (f_{tCCA}) igual a 3.88 kg/cm². Determinaron la relación entre v_m y f_{tCCA} igual a $\frac{\pi}{2}$ (ecuación (2.14))

$$v_m = \frac{\pi}{2} f_{tCCA} \quad (2.14)$$

2.3. Reglamentaciones

En México se cuenta con las Normas Técnicas para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM). En estas normas se establecen los requisitos mínimos para el diseño de muros no reforzados, muros reforzados interiormente y muros confinados, entre otros. En las NTCM se definen a los muros confinados como aquellos que están reforzados con castillos y cadenas de concreto reforzado en su periferia los cuales se construyen después del panel de mampostería. Los requisitos de diseño para muros confinados establecidos en las NTCM son para muros construidos con piezas de concreto o arcilla. Por otro lado, en los Estados Unidos de América se cuenta con el Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures (ACI 530-13) en el cual se establecen los requisitos mínimos para el diseño de muros de CCA. Sin embargo, el alcance de este reglamento es solo para muros no reforzados, reforzados interiormente y diafragma.

2.4. Conclusiones de la revisión de literatura

Con base en la revisión de literatura presentada se concluye lo siguiente.

Existe gran cantidad de estudios sobre muros de mampostería confinada sujetos a combinaciones de cargas axial y lateral. Las variables estudiadas fueron la carga axial, cantidad y disposición del acero de refuerzo, aberturas y el confinamiento en ellas, el tipo de mortero y la combinación de piezas, la relación de aspecto. Gran cantidad de estos estudios han sido sobre MMC con comportamiento dominado por cortante. Se concluye que la resistencia a cortante aumenta cuando la relación de aspecto disminuye.

Existe numerosos trabajos sobre MMC de piezas de BHC o TEA. No existen muchos trabajos sobre MMC de BCCA. Para los MMC de bloques huecos de concreto de tres celdas se ha estudiado relaciones de aspecto que varían entre 1.17 y 1.82. Para los MMC de tabiques extruidos de arcilla se han estudiado relaciones de aspecto de 0.27 hasta 2.13. Los muros con relación de aspecto de 0.27 se construyeron con elementos confinantes intermedios lo cual pudo haber afectado su comportamiento. La menor relación de aspecto estudiada en MMC de TEA sin elementos confinantes intermedios es de 0.58. Para MMC de BCCA se han estudiado relaciones de aspecto entre 0.71 y 2.13. Existen estudios para muros de BCCA con menor relación de aspecto, sin embargo, no son muros confinados.

Con base en lo anterior se observa que existen pocos estudios para muros de mampostería confinada con baja relación de aspecto sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles para cualquiera de los tres tipos de pieza mencionadas (BHC, TEA, BCCA). Es necesario realizar estudios experimentales para muros de mampostería confinada con relación de aspecto baja (e.g. 0.5). Se requiere obtener información experimental que pueda servir para desarrollar modelos matemáticos más precisos y confiables.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. Descripción general

Se presentan a continuación las actividades a realizar en esta metodología.

- Determinación de propiedades mecánicas de los materiales.
- Diseño de muros.
- Construcción de muretes.
- Construcción de muros.
- Diseño del sistema de carga e instrumentación.
- Ensaye de muretes.
- Ensaye de muros.
- Análisis de resultados.

3.2. Determinación de las propiedades de los materiales

La resistencia a compresión axial del concreto se determinó con base en la norma NMX-C083-ONNCCE-2002. Se obtuvo la resistencia para cada mezcla de castillos. En la Figura 3.1 se presenta una vista del ensaye a compresión axial de un cilindro de concreto. La granulometría del agregado para la fabricación de mortero se realizó con base en la norma NMX-C486-ONNCCE-2014.



Figura 3.1 Vista del ensaye a compresión axial de un cilindro de concreto

3.3. Diseño de muros

Se consideraron dos muros de mampostería confinada. Se seleccionó como variable el tipo de pieza. Se construyó un muro de BHC y uno de BCCA. Para el diseño de los muros se realizó un proceso iterativo en el que se calculó la resistencia a flexión, cortante, flexo-cortante y deslizamiento. Se varió la cantidad de acero de refuerzo longitudinal y transversal de los elementos confinantes para validar la falla por cortante. La resistencia a flexión se determinó utilizando la ecuación (2.5), se consideró β_1 igual a 0.85 (NTCC 2004). La resistencia a cortante del muro de BHC se determinó con la ecuación (2.9). La resistencia a cortante del muro de BCCA se determinó con la ecuación (2.10). La resistencia a flexo-cortante se determinó utilizando la ecuación (2.11). La resistencia al deslizamiento se determinó utilizando las ecuaciones (2.12) para el muro de BHC y (2.13) para el muro de BCCA.

Para el diseño de los muros se utilizaron los siguientes parámetros constantes:

- Altura (H) constante igual a 240 cm al punto de aplicación de la carga.
- Longitud de muros (L) 450 cm.
- Bloques huecos de concreto de tres celdas de 15x20x40 (espesor x altura x longitud), bloques sólidos de CCA de 15x20x61 (espesor x altura x longitud)
- Sección transversal de castillos de 15 cm x 15 cm.
- Cadena superior en forma de "T" de 15x15x40x10 (espesor del alma x peralte total x ancho del patín x peralte del patín).
- Resistencia a compresión axial de diseño del concreto (f'_c) para castillos y cadenas de 175 kg/cm².
- Esfuerzo axial de compresión en muros de 3 kg/cm². Este esfuerzo corresponde al que se presenta en un muro de planta baja de una construcción de dos niveles de tipo habitacional, tomando en cuenta cargas gravitacionales.

Se determinó la resistencia a cortante, flexión, flexo-cortante y deslizamiento en función del esfuerzo axial de compresión (σ). En la figura Figura 3.2 y Figura 3.3 se

presentan las curvas de las resistencias-esfuerzo axial de compresión obtenidas para ambos muros. En estas figuras se presenta con una línea horizontal el esfuerzo de 3 kg/cm². En la Figura 3.4 se presenta la geometría de los muros de bloques huecos de concreto (MBHC) y de concreto celular de autoclave (MCCA).

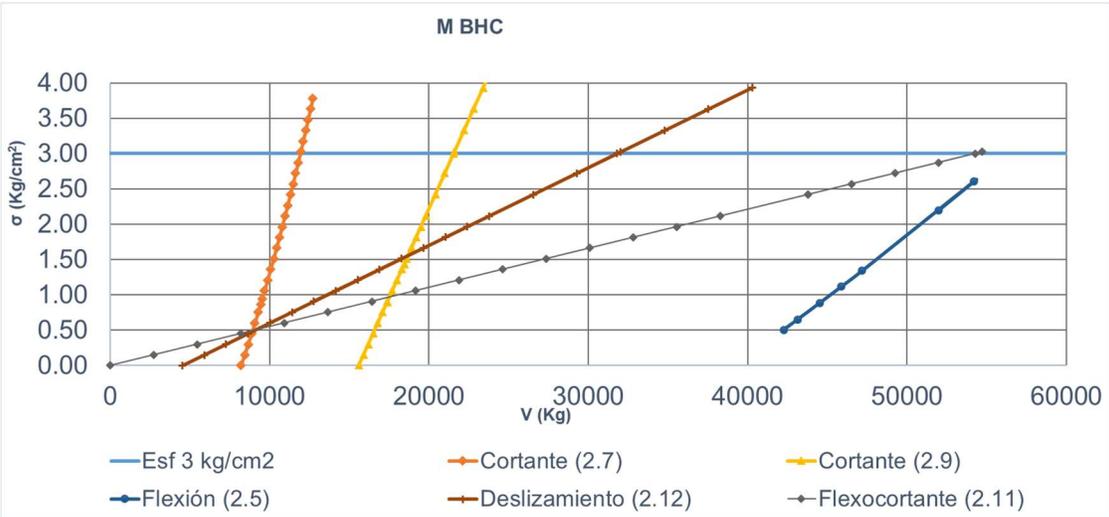


Figura 3.2 Curvas resistencia- esfuerzo axial de compresión del muro MBHC

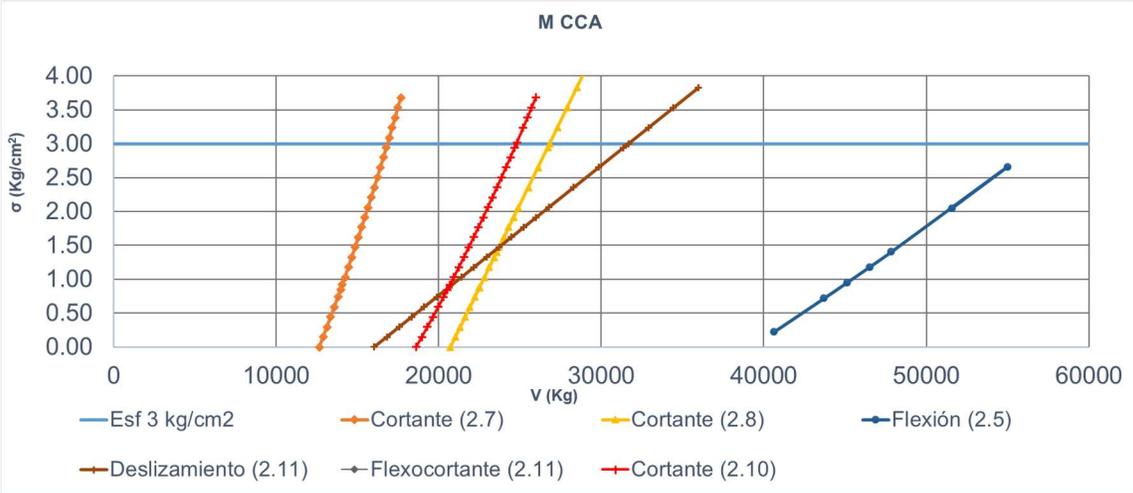


Figura 3.3 Curvas resistencia- esfuerzo axial de compresión del muro MCCA

Se validó la falla por cortante. La cantidad de acero de refuerzo obtenida fue:

- Acero de refuerzo longitudinal en castillos y cadenas consistente de 4 barras de diámetro nominal de 3/8", con un esfuerzo nominal de fluencia (f_y) de 4200 kg/cm²
- Acero de refuerzo transversal de castillos consistente en estribos de alambrión de diámetro nominal de 1/4" espaciados a cada 20 cm, con un esfuerzo nominal de fluencia de 2530 kg/cm²

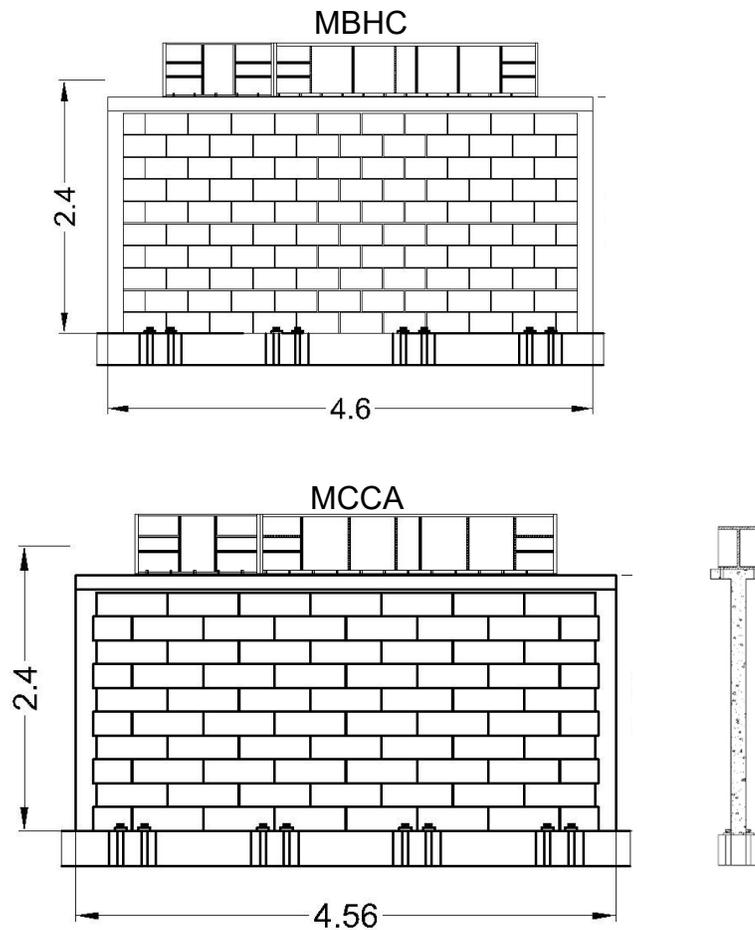


Figura 3.4 Geometría de los muros

3.4. Construcción de muretes

Se construyeron 3 muretes cuadrados de BHC. Las dimensiones fueron de 122 cm por lado y un espesor de 14.5 cm. Los muretes fueron construidos a plomo y nivel por un trabajador experimentado. Se utilizó mortero en proporción volumétrica 1:2:7 (cemento portland: cal: arena). Se realizó el traslape de las piezas a su longitud media. Se almacenaron por al menos 28 días en el laboratorio. La construcción y el ensaye se realizó conforme a lo establecido en la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010. En la Figura 3.5 se presenta una vista del ensaye de un murete.



Figura 3.5 Vista de murete de BHC

3.5. Construcción de muros

Los muros fueron construidos a plomo y nivel por un trabajador experimentado. Para la construcción se reutilizaron bases de concreto de trabajos previos. Se demolió parcialmente las bases de concreto existentes (Figura 3.6). Se habilitó el acero de refuerzo de la base y de los castillos.

Para el muro de BHC se colocó la primera hilada utilizando mortero en proporción por volumen 1:2:7 (cemento portland: cal: arena) (Figura 3.7). Se colocaron las hiladas siguientes traslapando las piezas a su longitud media (Figura 3.8).

Posteriormente se colocó el concreto de los castillos hasta la mitad de su altura (Figura 3.9). Se colocaron las hiladas de la mitad superior del muro (Figura 3.10). Finalmente se colocó el concreto de la cadena superior del muro en forma de “T” (Figura 3.11).

Para el muro de BCCA se utilizó dos tipos de morteros. Se colocó la primera hilada cuidando el plomo y nivelación. En la junta horizontal entre la base y la primera hilada se utilizó mortero en proporción por volumen 1:3 (cemento portland: arena). En las juntas verticales se utilizó mortero de pared delgada. Se esperó 24 horas después de colocar la primera hilada. Se colocaron las siguientes hiladas con mortero de pared delgada. Se colocó un dentado de 2.5cm en las hiladas par entre el panel y el castillo. La construcción de los castillos y la cadena superior fue similar al muro de BHC. Se almacenaron los muros en el laboratorio por al menos 28 días (Figura 3.12).



Figura 3.6 Demolición de bases de concreto



Figura 3.7 Colocación de primeras hiladas



Figura 3.8 Construcción de muros hasta la mitad de su altura



Figura 3.9 Construcción de castillos hasta la mitad de su altura



Figura 3.10 Construcción de mitad superior del muro



Figura 3.11 Cadena superior del muro



Figura 3.12 Muros MBHC y MCCA terminados

3.6. Diseño del sistema de carga e instrumentación

El sistema de carga está dividido en dos partes: sistema de carga lateral y sistema de carga axial. El sistema de carga lateral consistió en dos marcos metálicos, una viga de acero de distribución de carga y dos actuadores hidráulicos de doble vía. Los marcos metálicos se colocaron en paralelo. Se anclaron a una losa de reacción mediante barras roscadas. Los marcos se unieron por medio de una viga metálica a la altura de aplicación de la carga. La viga de distribución de carga se colocó sobre el muro y se unió a la viga “T” del muro con tornillos. Los tornillos se postensaron para evitar el deslizamiento. Los actuadores hidráulicos se colocaron en paralelo. Los actuadores se conectaron a la viga que une los marcos con tornillos. Un actuador hidráulico se unió a la viga de distribución de carga con un pasador y el otro con una celda de carga tipo pasador (CCP) con capacidad de 407 kN (40.86 ton). Los actuadores hidráulicos tienen una capacidad de 318 kN (32 ton) a tensión. En la Figura 3.13 se presenta un esquema del sistema de carga lateral.

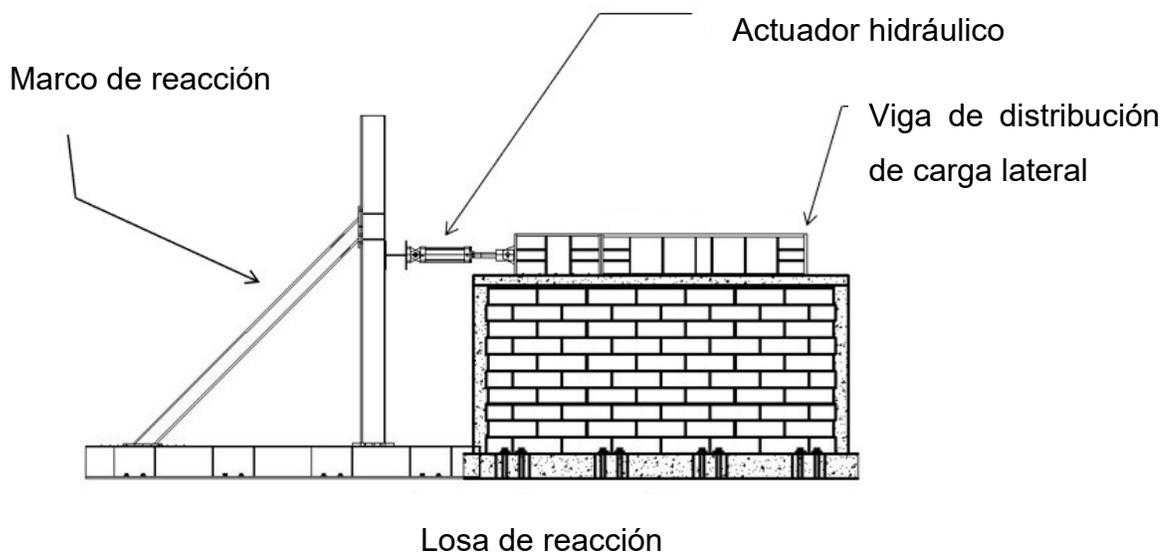


Figura 3.13 Esquema general del sistema de carga lateral

El sistema de carga axial consistió en dos mecanismos. Cada sistema de carga axial consta de una viga balancín, una viga de repartición de carga axial, dos tensores de acero y un actuador hidráulico de 323.62 kN (33 ton) de capacidad. Para mantener

la carga constante se utilizó un servo control mecánico. Los tensores se conectaron a la losa de reacción en un extremo y a la viga balancín en el otro. Se colocó un actuador hidráulico en cada sistema. Las vigas balancín se apoyaron sobre las vigas de repartición de carga axial. Las vigas de repartición de carga axial se apoyaron mediante neoprenos en la viga de distribución de carga lateral. Los neoprenos se colocaron de tal manera que se distribuyó la carga axial de manera uniforme en el muro. En la Figura 3.14 se presenta un esquema del sistema de carga axial.

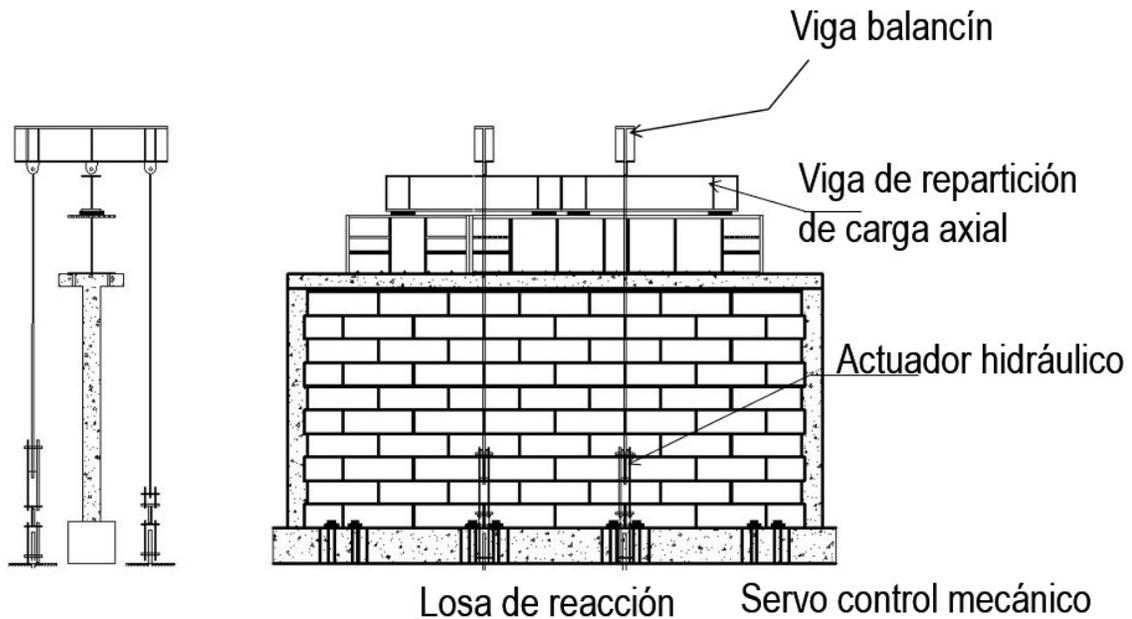


Figura 3.14 Esquema general del sistema de carga axial

La carga axial se midió con celdas de carga tipo dona (CCD) con capacidad de 222.61 kN (22.7 ton) en cada tensor. Se midieron las presiones en los sistemas hidráulicos con transductores de presión con capacidad de 5000 psi (350 kg/cm²). Se midieron desplazamientos horizontales, el acortamiento y alargamiento de los castillos y de las diagonales. Los desplazamientos horizontales se midieron con potenciómetros de polea de 13 cm (PP1, PP2 y PP3). Los desplazamientos verticales se midieron con potenciómetros de polea de 5 cm (PP4 y PP5). Los alargamientos y acortamientos de las diagonales se midieron con potenciómetros de polea de 30 cm (PP6 y PP7). Se midieron desplazamientos relativos entre la base del muro y el muro y entre la cadena superior y la viga de distribución de carga

lateral. Los desplazamientos relativos se midieron con potenciómetros lineales de 25 cm (PL). En la Figura 3.15 se presenta un esquema del sistema de instrumentación para el ensaye de los muros.

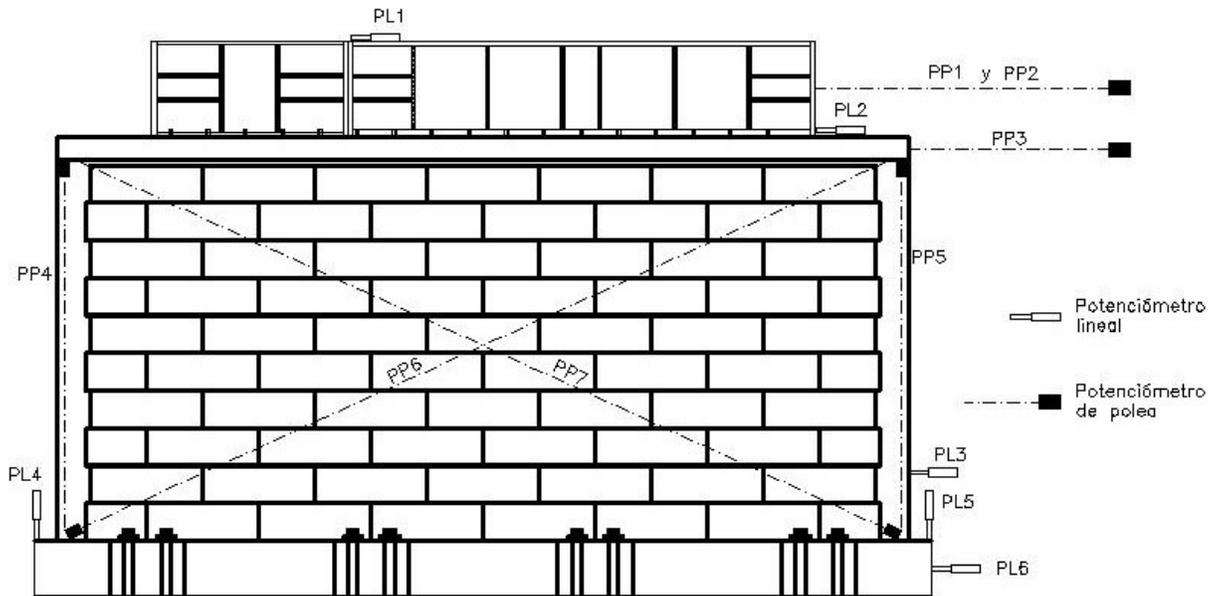


Figura 3.15 Esquema general del sistema de instrumentación

3.7. Ensaye de muros

El ensaye de los muros se realizó con base en el protocolo de carga establecido en el apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Mampostería de Distrito Federal (NTC-DF, 2004). Los ciclos de carga están divididos en dos etapas (Figura 3.16). La primera etapa está controlada por carga y la segunda está controlada por distorsiones. En la etapa controlada por carga, los primeros dos ciclos corresponden al 25% de la carga de agrietamiento esperada. Los siguientes dos al 50%. Los dos ciclos siguientes corresponden a la carga de agrietamiento. La segunda etapa se controla por distorsión. Los primeros dos ciclos de esta etapa corresponden a una distorsión de 0.002. Los siguientes pares de ciclos corresponden a incrementos de 0.002 en la distorsión.

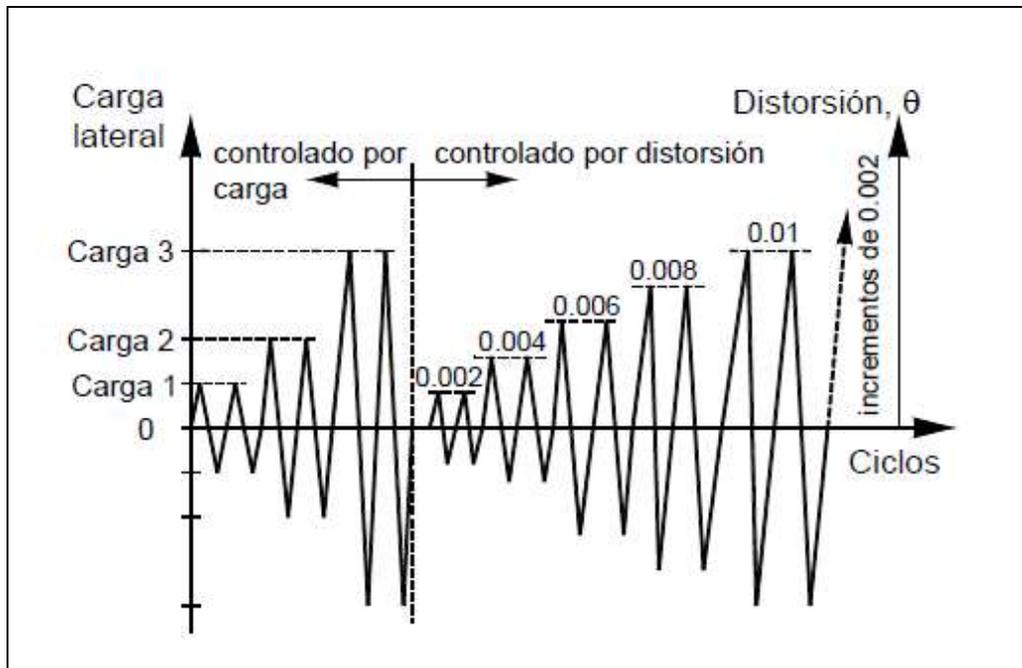


Figura 3.16 Protocolo de carga

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. Propiedades de los materiales

Las propiedades de los BCCA se toman de los trabajos de Alcocer (2017), Chim (2017) y Ricalde (2017) ya que ensayaron piezas del mismo lote. La resistencia a compresión axial promedio (f_{CCA}) fue de 4.32 MPa (44.13 kg/cm²). La resistencia a tensión promedio del CCA (f_{tCCA}) fue de 0.38 MPa (3.88 kg/cm²). Los coeficientes de variación fueron 0.11 y 0.08 respectivamente.

En la Tabla 4.1 se presenta la resistencia a compresión axial del concreto (f'_c) de los castillos de los muros MBHC y MCCA. Las resistencias promedio fueron de 19.16 MPa (187 kg/cm²) y 18.75 MPa (184 kg/cm²), respectivamente. Los coeficientes de variación fueron de 0.01 y 0.02 para MBHC y MCCA, respectivamente.

Tabla 4.1 Resistencia a compresión axial del concreto en MBHC y MCCA

Cilindro	f'_c MPa(kg/cm ²)	
	MBHC	MCCA
1	19.16(188)	19.16(188)
2	18.85(185)	18.24(179)
3	19.06(187)	18.85(185)
Promedio	19.06(187)	18.75(184)
C.V.	0.01	0.02

En la Tabla 4.2 se presentan los resultados de la granulometría del agregado fino utilizado para el mortero de los muretes y del muro BHC. La granulometría cumple con los límites establecidos (NMX-C-485,2014). En la Figura 4.1 se presenta la gráfica correspondiente a esta granulometría

Tabla 4.2 Granulometría del agregado fino para el muro MBHC

Malla N°	Peso retenido (g)	Material retenido (%)	Acumulado (%)	Pasa (%)
3/8"	0.00	0.00	0.00	100.00
4	0.00	0.00	0.00	100.00
8	128.00	15.37	15.37	84.63
16	217.00	26.05	41.42	58.58
30	170.00	20.41	61.82	38.18
50	141.00	16.93	78.75	21.25
100	96.00	11.52	90.28	9.72
200	30.00	3.60	93.88	5.00
Pasa 200	51.00	6.12	100.00	0.00
Total:	833.00	100.00		

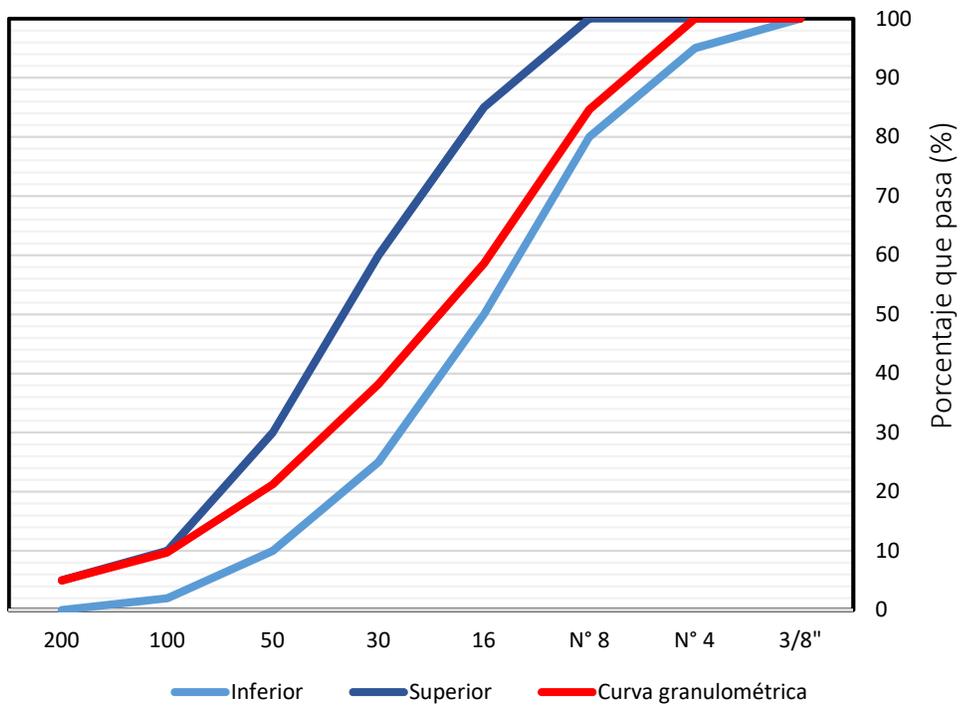


Figura 4.1 Curva de distribución granulométrica de finos

4.2. Ensayo de muretes

En la Tabla 4.3 se presentan las resistencias obtenidas del ensayo de muretes. La resistencia a compresión diagonal (v_m) varió entre 0.24 y 0.28 MPa (2.41 y 2.82 kg/cm²). El valor promedio de v_m fue de 0.26 MPa (2.67 kg/cm²). El modo de falla para todos los muretes fue por tensión en la diagonal a través de las piezas (Figura 4.2). Este resultado es similar al promedio obtenido por Marin (2006) de 0.27 MPa (2.78 kg/cm²) para piezas de la región.

Tabla 4.3 Resistencia a compresión diagonal en muretes de mampostería

Murete	P max kN (ton)	Vm Mpa (kg/cm ²)	Modo de falla
Murete 1	58.77 (5.99)	0.24 (2.41)	Tensión diagonal
Murete 2	66.84 (6.81)	0.27 (2.77)	Tensión diagonal
Murete 3	68.64 (6.99)	0.28 (2.82)	Tensión diagonal
Media	64.75 (6.60)	0.26 (2.67)	
CV	0.08	0.08	



Figura 4.2 Falla de muretes de BHC

4.3. Ensaye de muros

Se describe para cada muro el número de ciclos de carga lateral y la carga axial aplicada. Se presenta la historia de cargas y distorsiones con el tiempo. El eje vertical izquierdo corresponde a la carga lateral aplicada (kN), el eje vertical derecho corresponde a la distorsión del muro (%) y el eje horizontal corresponde al tiempo de ensaye (segundos). Se describe la evolución del patrón de agrietamiento. Las grietas marcadas en color negro se formaron en los ciclos de carga positivos. Las marcadas en color rojo se formaron en el ciclo de carga negativo. Se presentan las curvas carga lateral-desplazamiento. El eje vertical corresponde a la carga lateral aplicada al muro (kN) y el eje horizontal corresponde al desplazamiento horizontal en el punto de aplicación de carga (mm). Se presenta en la historia con el tiempo y en la curva carga lateral-desplazamiento los puntos de agrietamiento por cortante, carga máxima y carga última. Se utilizaron marcadores en forma de círculo, cuadrado y triángulo, respectivamente.

En el ensaye del muro MBHC se aplicaron 11 ciclos de carga lateral. La carga axial real durante el ensaye fue 198.3 kN (20.21 ton). El esfuerzo axial real en el muro fue de 0.30MPa (3.04 kg/cm²). En la Figura 4.3 se presenta la historia de carga y distorsión del muro MBHC con respecto al tiempo. El primer evento observado fue la formación de una grieta horizontal de aproximadamente 60cm. La grieta se observó en la parte central entre la cadena superior y la última fila de bloques durante el quinto ciclo de carga (Figura 4.4). El siguiente evento observado fue la formación de grietas en diagonal a ambos lados del muro (Figura 4.5Figura 4.4). Se observó la formación de más grietas diagonales en el panel y se alcanzó la carga máxima (Figura 4.6). Finalmente, las grietas se propagaron a los elementos confinantes y se formó una grieta horizontal entre la penúltima y la última hilada lo que ocasionó la falla del muro (Figura 4.7). En la Figura 4.7 se presenta el patrón final de agrietamiento en el que se observa las grietas en forma de "X". En la Figura 4.8 se presenta la curva carga lateral-desplazamiento del muro MBHC.

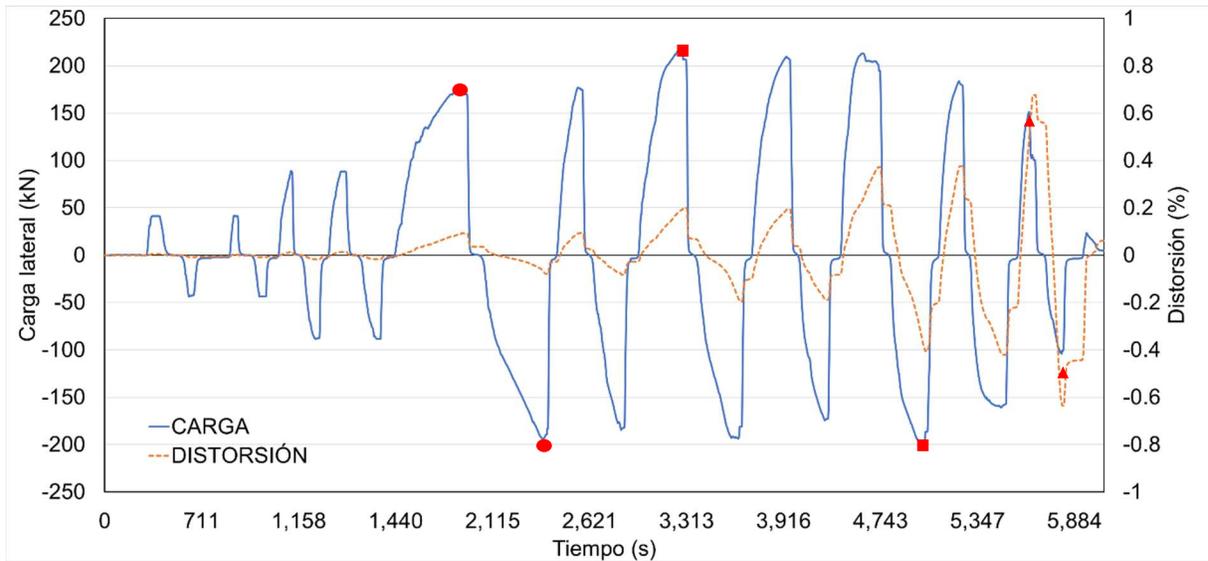


Figura 4.3 Historia de carga y distorsión de MBHC

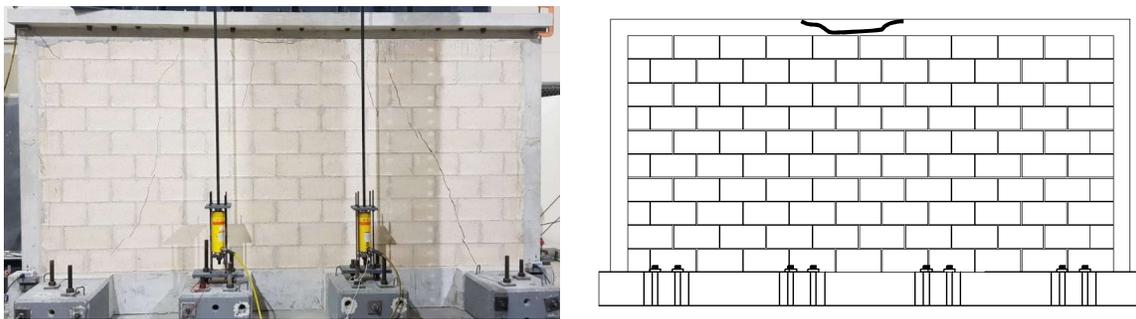


Figura 4.4 Agrietamiento en unión de panel con cadena

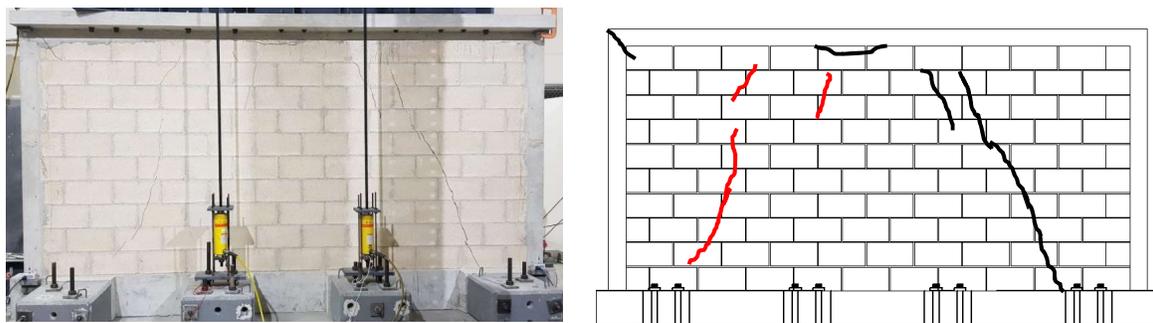


Figura 4.5 Primer agrietamiento diagonal en el muro

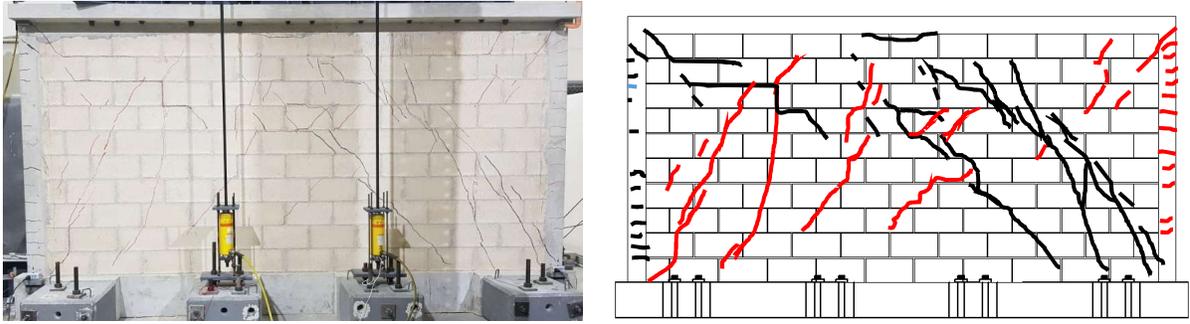


Figura 4.6 Agrietamiento diagonal en el muro

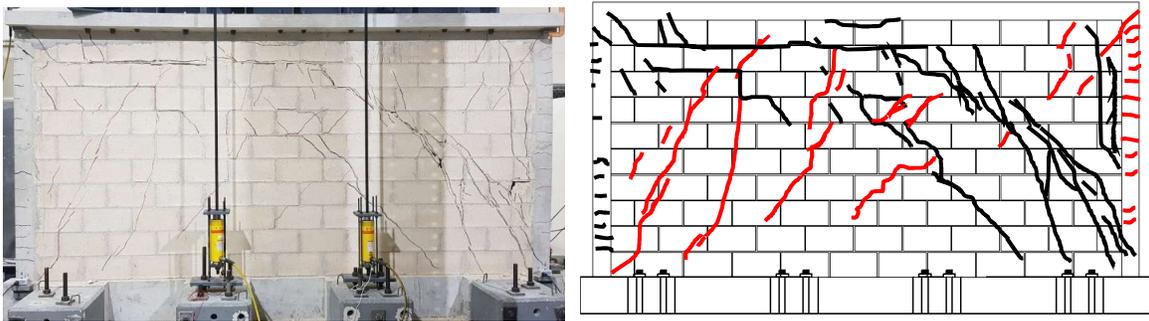


Figura 4.7 Patrón de agrietamiento final del muro MBHC

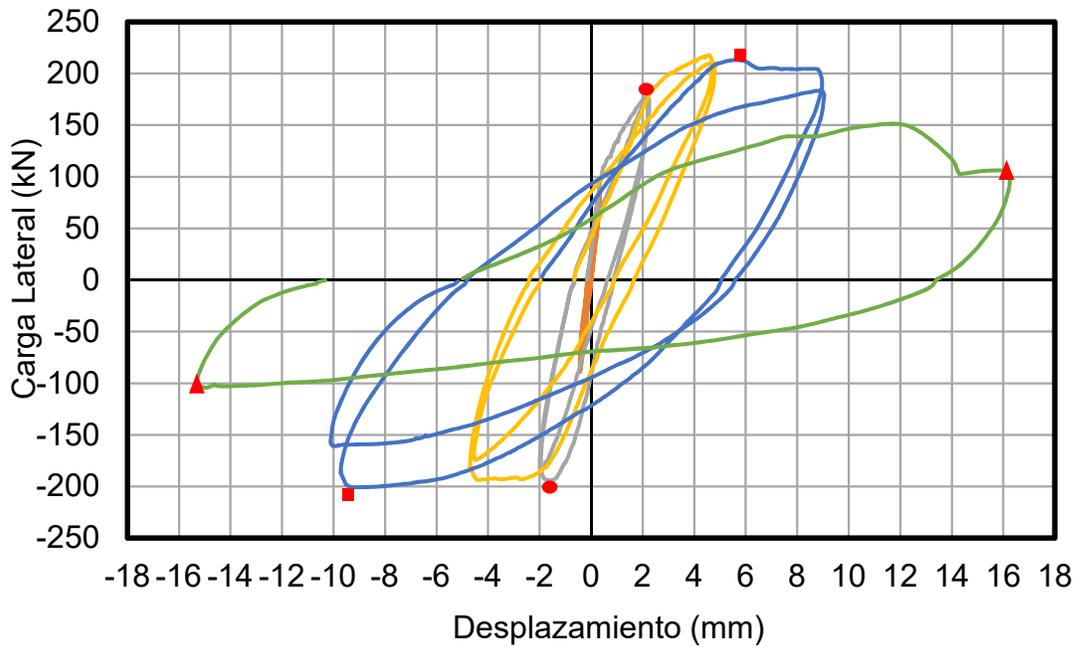


Figura 4.8 Curva carga lateral-desplazamiento del muro MBHC

En la Tabla 4.4 se presentan las cargas de agrietamiento, máxima y última con sus correspondientes desplazamientos observados durante el ensaye del muro MBHC.

Tabla 4.4 Resumen de cargas y desplazamientos registrados para cada evento durante el ensaye del muro MBHC

	Sentido	Ciclo	Carga kN (ton)	Desplazamiento (Distorsión) mm (%)
Carga agrietamiento	Positivo	5	177.17 (18.06)	2.18 (0.091)
	Negativo	5	194.33 (19.81)	1.56 (0.065)
Carga máxima	Positivo	7	217.68 (22.19)	4.61 (0.192)
	Negativo	9	200.81 (20.47)	9.14 (0.381)
Carga última	Positivo	11	100.26 (10.22)	16.25 (0.677)
	Negativo	11	100.06 (10.20)	15.29 (0.637)

En el ensaye del muro MCCA se aplicaron 22 ciclos de carga lateral. La carga axial aplicada fue de 204 kN (20.7 ton). La carga axial produjo un esfuerzo de 0.31 MPa (3.02 kg/cm²). En la Figura 4.9 se presenta la historia de carga y distorsión del muro MCCA. El primer evento observado fue la formación de una grieta horizontal entre la cadena superior y la última hilada de bloques. La formación de esta grieta se atribuye al proceso de postensado de la viga metálica y la cadena superior (Figura 4.10). En el ciclo 5 se observó el agrietamiento en el panel. En el sentido positivo se observó una grieta vertical inducida por el agrietamiento previo. En el sentido negativo se observaron dos grietas diagonales el centro del panel (Figura 4.11). En el ciclo 7 se observó la formación de una grieta diagonal en el sentido negativo. Se observó una grieta por flexo-cortante en el sentido positivo, esto debido a que la grieta vertical dividió al muro en dos partes para este sentido (Figura 4.12). Posteriormente se observó la formación de más grietas diagonales en ambos sentidos. Se alcanzó la carga máxima en los ciclos 15 y 16 en los sentidos negativo y positivo, respectivamente (Figura 4.13). Las grietas se propagaron a los elementos confinantes, lo que ocasionó la falla del muro. En la Figura 4.14 se presenta el patrón de agrietamiento final del muro MCCA donde se observa el patrón en forma de “X”. En la Figura 4.15 se presenta la curva carga lateral-desplazamiento del muro MCCA.

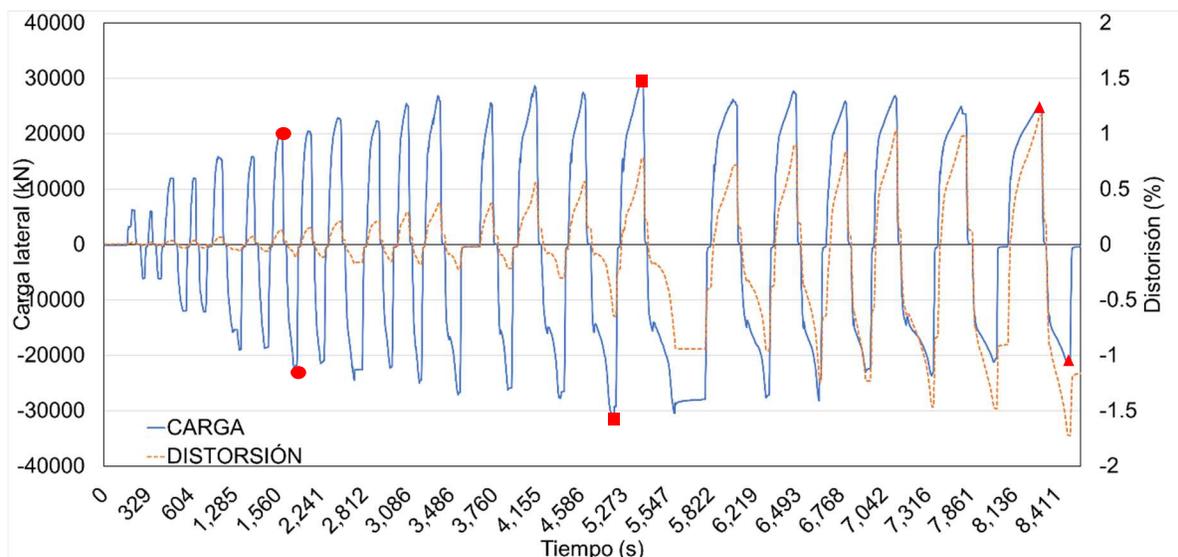


Figura 4.9 Historia de carga y distorsión del muro MCCA

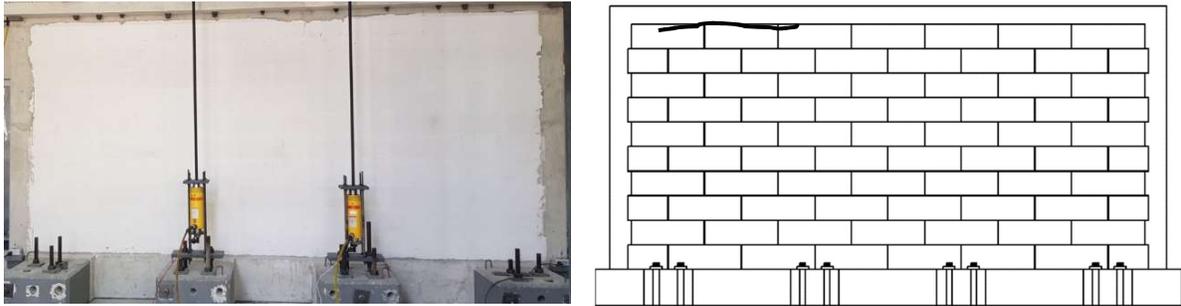


Figura 4.10 Agrietamiento previo al ensaye entre cadena superior y panel

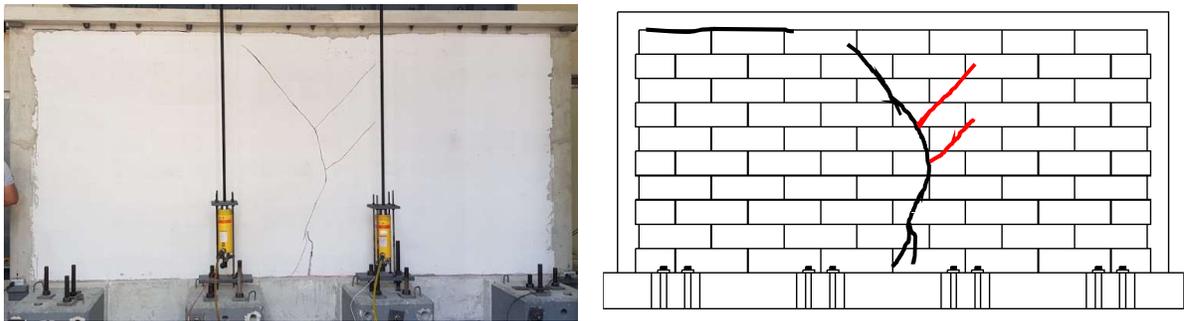


Figura 4.11 Primer agrietamiento del muro

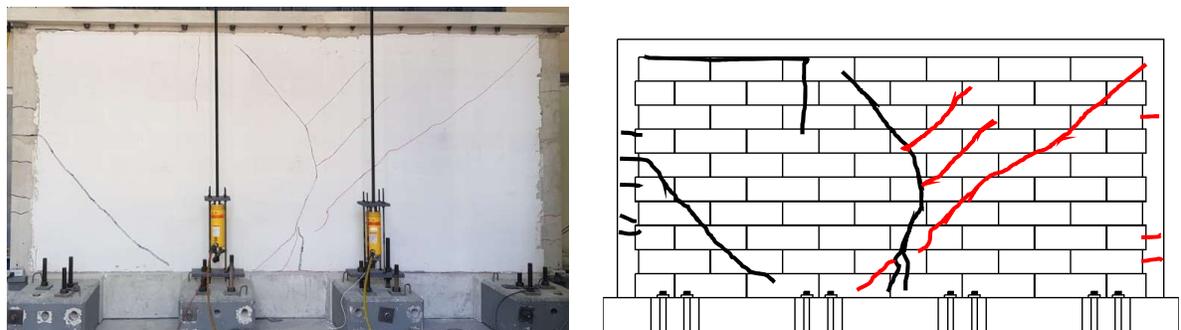


Figura 4.12 Primer agrietamiento diagonal del muro

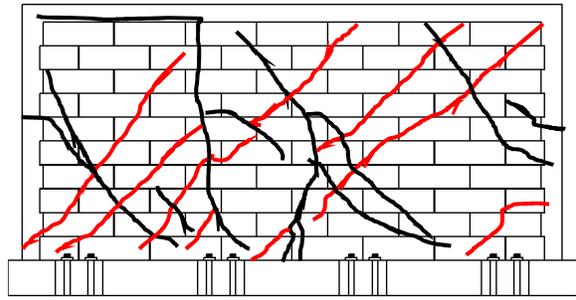


Figura 4.13 Patrón de agrietamiento en carga máxima del muro

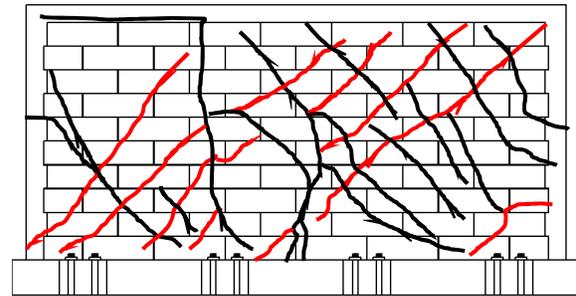


Figura 4.14 Patrón de agrietamiento final del muro

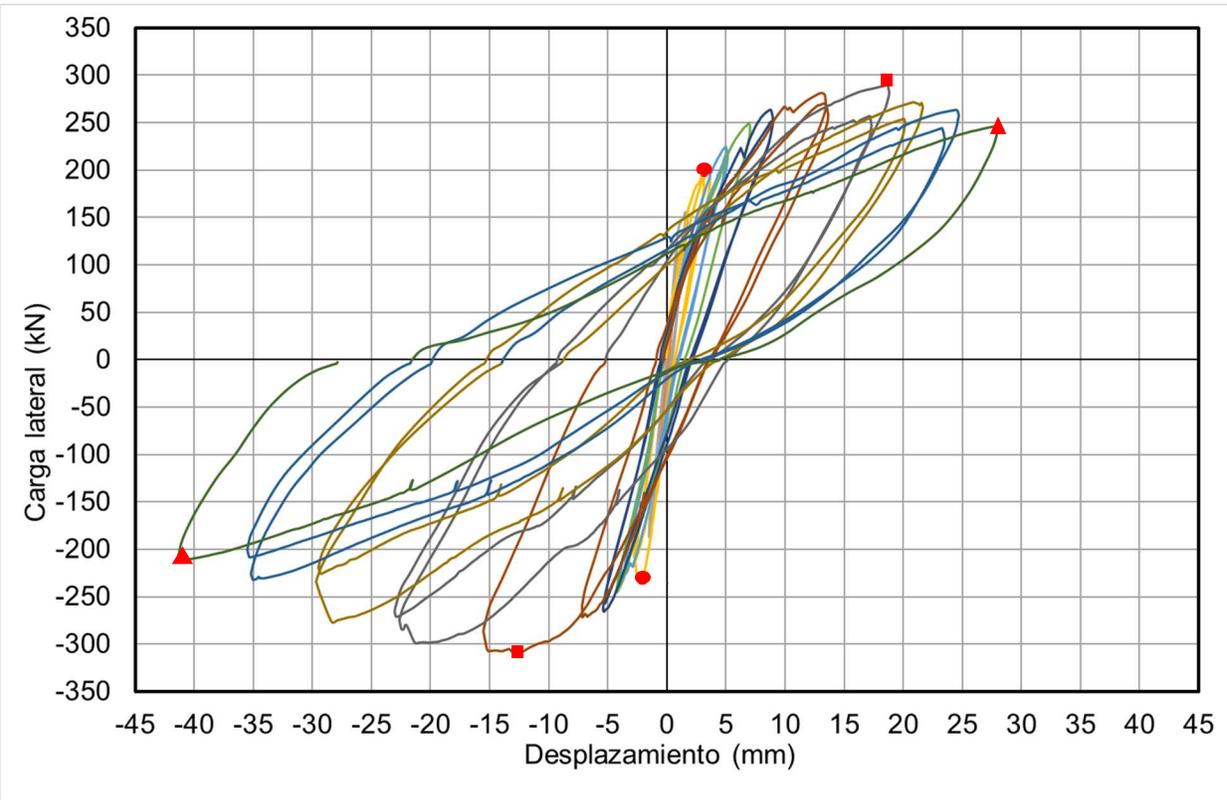


Figura 4.15 Curva carga lateral-desplazamiento del muro MCCA

En la Tabla 4.5 se presentan las cargas de agrietamiento, máxima y última con sus respectivos desplazamientos observados durante el ensaye del muro MCCA.

Tabla 4.5 Resumen de cargas y desplazamientos registrados para cada evento durante el ensaye del muro MCCA

	Sentido	Ciclo	Carga kN (ton)	Desplazamiento (Distorsión) mm (%)
Agrietamiento	Positivo	5	156.37 (15.94)	1.73 (0.072)
	Negativo	5	186.98 (19.06)	1.46 (0.061)
Agrietamiento flexo- cortante	Positivo	7	201.40 (20.53)	3.55 (0.148)
Agrietamiento cortante	Negativo	7	234.85 (23.94)	1.66 (0.090)
Carga máxima	Positivo	16	289.59 (29.52)	18.45 (0.769)
	Negativo	15	311.96 (31.80)	12.89 (0.537)
Carga última	Positivo	22	246.33 (25.11)	27.84 (1.16)
	Negativo	22	206.11 (21.01)	41.30 (1.721)

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presenta una discusión de los resultados experimentales obtenidos. Se comparan los resultados con los obtenidos por otros autores. Se discuten los patrones de agrietamiento, la resistencia a cortante, la capacidad de deformación, la resistencia máxima, la degradación de rigidez y la energía disipada.

5.1. Patrón de agrietamiento

Se observó la falla por cortante para ambos muros. En el muro MBHC la grieta por cortante se presentó en el ciclo esperado (5). En el muro MCCA en el sentido positivo se observó un agrietamiento vertical. Este agrietamiento provocó que el muro se dividiera en dos partes para ese sentido de carga positivo. Debido a esta división en el ciclo 7 se observó un agrietamiento asociado a flexo-cortante en el sentido positivo. En el sentido negativo se observó agrietamiento diagonal en el panel como primer agrietamiento por cortante (ciclo 7). El patrón final de agrietamiento para ambos muros fue en "X" (Figura 5.1).

Se observó para ambos muros que las grietas se propagaron en los bloques y no en las juntas. No se observaron grietas entre los elementos confinantes verticales y el panel.

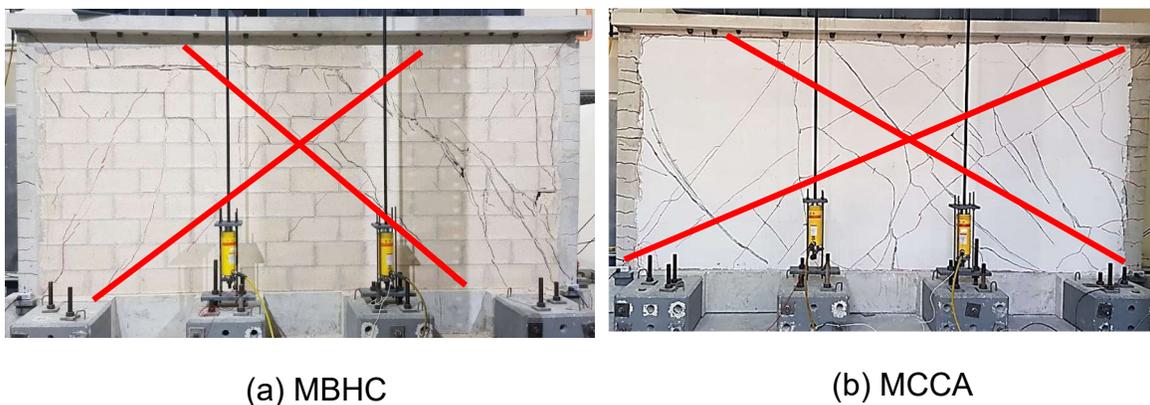
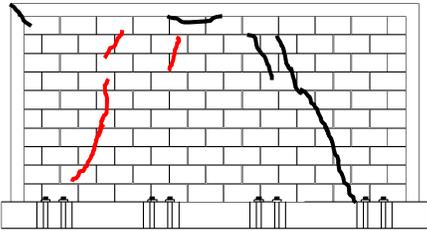
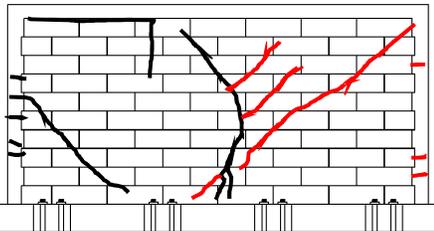
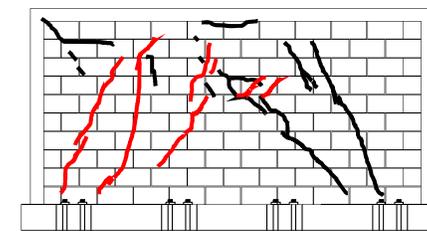
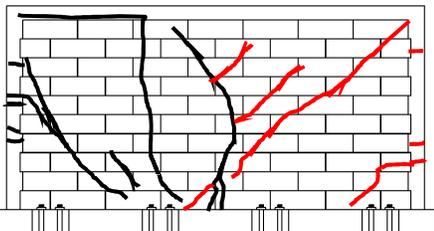
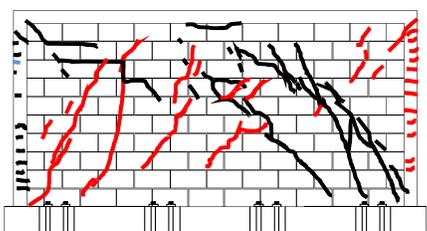
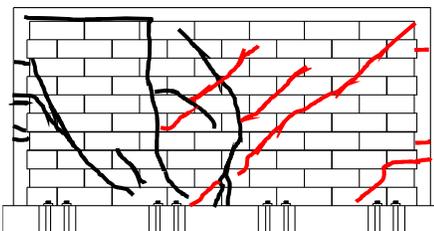
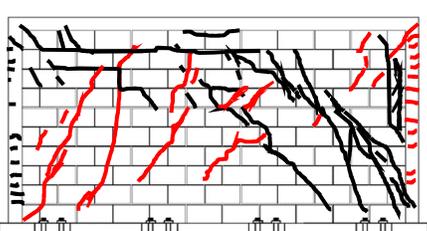
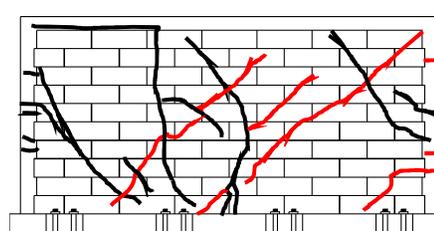


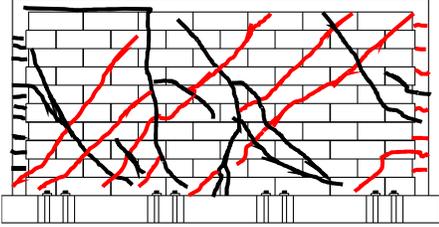
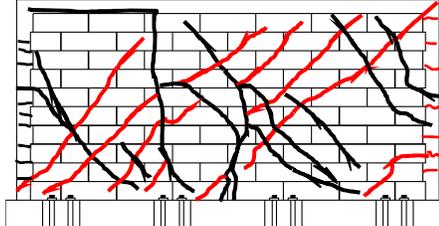
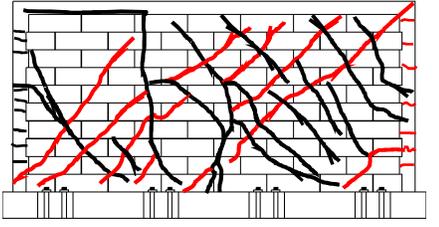
Figura 5.1 Patrón de agrietamiento final en forma de "X"

En la Tabla 5.1 se presenta el agrietamiento para ambos muros con respecto a la distorsión aplicada. Se observó mayor nivel de daño a menor distorsión en el muro

MBHC. Esto se atribuye a que las piezas de BHC perdieron pedazos al agrietarse el muro. En el muro MCCA el daño se concentró al inicio en las primeras grietas mientras que en el muro MBHC se distribuyó en el panel.

Tabla 5.1 Evolución del daño con respecto a la distorsión

distorsión	MBHC	MCCA
Agrietamiento	 <p data-bbox="548 787 836 829">distorsión = 0.00091</p>	 <p data-bbox="1018 787 1305 829">distorsión = 0.00090</p>
0.002		
0.004		
0.006		

0.008		
0.012		
0.016		

5.2. Resistencia a cortante

Para evaluar el efecto de la relación de aspecto en el comportamiento a cortante de muros de mampostería confinada de BCCA se consideraron los muros Mc1 y Mc2 ensayados por Alcocer (2017), los muros Mc3 y Mc4 ensayados por Chim (2017) y el muro MCCA ensayado en este trabajo. Estos muros fueron construidos con piezas de un mismo lote. Los ensayos se realizaron con esfuerzos axiales similares. En la Tabla 5.2 se presenta un resumen de las características geométricas de los cinco muros (altura (H), relación de aspecto (H/L), espesor (t)), la carga axial (P), el esfuerzo axial (σ) y la carga de agrietamiento lateral (V_{agr}) aplicados durante el ensaye y quien realizó el ensaye.

Tabla 5.2 Muros de BCCA

Muro	H (cm)	L (cm)	H/L	t (cm)	P kN (kg)	σ MPa (kg/cm ²)	V _{agr} kN (kg)	Autor
MCCA	240	456	0.53	15	202.50 (20657)	0.31 (3.02)	234.81 (23936.00)	Pinto (2018)
Mc1	240	336	0.71	15	164.00 (16723)	0.33 (3.32)	185.04 (18862.39)	Alcocer (2017)
Mc2	240	185	1.30	15	91.77 (9358)	0.33 (3.37)	81.94 (8352.70)	Alcocer (2017)
Mc3	240	124	1.94	15	61.12 (6233)	0.33 (3.35)	49.76 (5072.38)	Chim (2017)
Mc4	240	91	2.64	15	50.03 (5102)	0.37 (3.74)	31.12 (3172.27)	Chim (2017)

En la Figura 5.2 se presenta la resistencia a cortante experimental normalizada con respecto a la ecuación (2.9) sin coeficientes (V_{norm}), en función de la relación de aspecto. Se observa una tendencia lineal y un coeficiente de correlación de 92.54%.

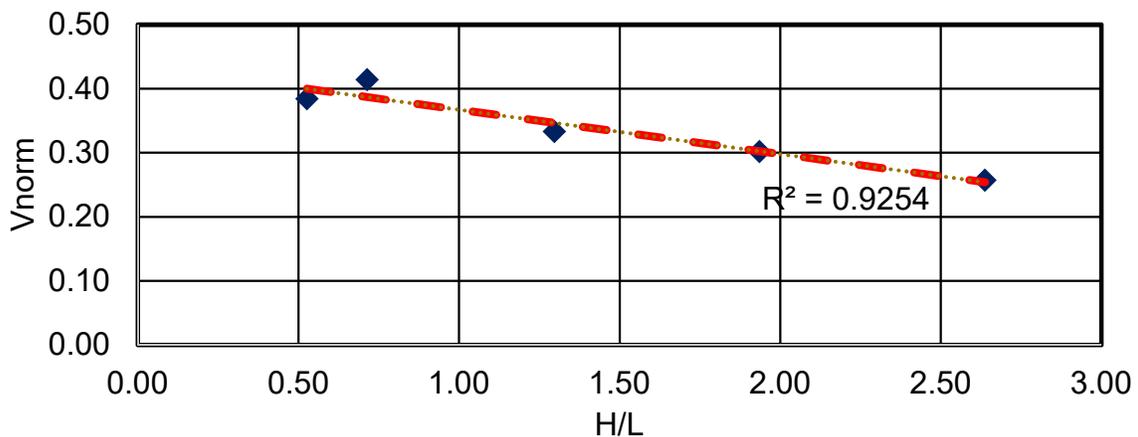


Figura 5.2 Resistencia a cortante normalizada con respecto a la ecuación (2.9)

Este comportamiento con alta correlación se observa para muros con el mismo tipo de pieza y esfuerzo axial. Se recopilieron datos de otros muros con comportamiento a cortante ensayados por diversos autores. Estos datos y los de la Tabla 5.2 se utilizaron para ajustar una ecuación para predecir la resistencia a cortante. Se consideraron muros de BHC, TEA, BCCA y piezas combinadas. En la Tabla 5.3 se presentan los datos geométricos de los muros (altura (H), relación de aspecto (H/L),

espesor (t), la carga axial (P), el esfuerzo axial (σ) y la carga de agrietamiento lateral (V_{agr}) aplicados durante el ensaye y quien realizó el ensaye.

Tabla 5.3 Muros utilizados para ajuste de ecuación

Muro	H (cm)	L (cm)	H/L	t (cm)	P kN (kg)	σ MPa (kg/cm²)	V_{agr} kN (kg)	Autor
E1	291	152	1.91	14.50	144.83 (14769)	0.65 (6.70)	55.13 (5622)	Raygoza (2012)
E2	291	234	1.24	14.50	144.87 (14773)	0.42 (4.35)	94.24 (9610)	Raygoza (2012)
E3	291	234	1.24	14.50	96.48 (9839)	0.28 (2.90)	67.20 (6853)	Raygoza (2012)
E4	290	111	2.62	14.50	72.44 (7387)	0.45 (4.59)	27.64 (2819)	Raygoza (2012)
M1	291	228	1.28	11.50	95.64 (9753)	0.36 (3.72)	50.70 (5170)	Sosa (2013)
M2	291	228	1.28	11.50	143.72 (14656)	0.54 (5.59)	79.53 (7090)	Sosa (2013)
M3	291	146	1.99	11.50	61.24 (6245)	0.36 (3.72)	33.34 (3400)	Sosa (2013)
M4	291	146	1.99	11.50	92.03 (9385)	0.54 (5.59)	40.10 (4090)	Sosa (2013)
MBHC	240	456	0.53	14.50	195.82 (19968)	0.29 (3.02)	185.64 (18930)	Pinto (2018)
ME1	250	115	2.17	12	68.99 (7035)	0.50 (5.10)	45.09 (4598)	Pérez (2015)
ME2	250	165	1.52	12	98.99 (10094)	0.50 (5.10)	71.10 (7250)	Pérez (2015)
ME3	250	207	1.21	12	124.18 (12663)	0.50 (5.10)	88.39 (9014)	Pérez (2015)
ME4	250	255	0.98	12	152.97 (15599)	0.50 (5.10)	100.50 (10248)	Pérez (2015)
ME5	250	375	0.67	12	224.97 (22941)	0.50 (5.10)	251.60 (25656)	Pérez (2015)
MCC-1	230	230	1.00	12	21.57 (2200)	0.07 (0.80)	48.94 (4997)	Tena (2009)

MCC-2	230	230	1.00	12	21.57 (2200)	0.07 (0.80)	48.94 (4997)	Tena (2009)
MCC-3	230	230	1.00	12	21.57 (2200)	0.07 (0.80)	39.19 (3997)	Tena (2009)
MCC-4	230	230	0.69	12	21.57 (2200)	0.07 (0.80)	21.60 (2203)	Tena (2009)
1	390	610	0.64	20	693.76 (70744)	0.56 (5.80)	729.74 (74413)	Tanner (2005)
3	380	610	0.62	20	533.81 (54434)	0.43 (4.46)	361.87 (36901)	Tanner (2005)
4	390	610	0.64	20	533.81 (54434)	0.43 (4.46)	491.82 (50152)	Tanner (2005)
5	380	610	0.62	20	266.90 (27217)	0.21 (2.23)	276.90 (28236)	Tanner (2005)
7	380	370	1.03	20	355.87 (36289)	0.48 (4.90)	254.90 (25993)	Tanner (2005)
9	390	240	1.63	20	266.90 (27217)	0.55 (5.67)	167.94 (17125)	Tanner (2005)
18	380	370	1.03	20	199.93 (20387)	0.27 (2.76)	171.94 (17533)	Tanner (2005)
19	380	550	0.69	20	257.90 (26299)	0.23 (2.39)	248.91 (25382)	Tanner (2005)
0	250	250	1.00	12	147.10 (15000)	0.49 (5.00)	98.06 (10000)	Zepeda (1996)
421	245	250	0.98	15	202.26 (20625)	0.54 (5.50)	123.56 (12600)	Treviño (2004)
422	245	250	0.98	15	202.26 (20625)	0.54 (5.50)	96.10 (9800)	Treviño (2004)
423	245	250	0.98	15	202.26 (20625)	0.54 (5.50)	133.37 (13600)	Treviño (2004)
424	245	250	0.98	15	202.26 (20625)	0.54 (5.50)	148.08 (15100)	Treviño (2004)
601	245	250	0.98	15	202.26 (20625)	0.54 (5.50)	141.21 (14400)	Treviño (2004)
602	245	250	0.98	15	202.26 (20625)	0.54 (5.50)	166.71 (17000)	Treviño (2004)

603	245	250	0.98	15	202.26 (20625)	0.54 (5.50)	167.69 (17100)	Treviño (2004)
604	245	250	0.98	15	202.26 (20625)	0.54 (5.50)	157.88 (16100)	Treviño (2004)
N60-B1-UM	80	120.6	0.66	9.3	62.78 (6402)	0.56 (5.71)	30.18 (3078)	Haach (2010)
M1	230	300	0.77	15	135.33 (13800)	0.30 (3.07)	122.58 (12500)	Marinilli (2004)
N1	250	250	1.00	12	117.68 (12000)	0.39 (4.00)	180.44 (18400)	Zepeda (1997)
CM30J-1	155.5	107	1.45	10	42.79 (4364)	0.40 (4.08)	70.24 (7163)	Bourzam (2008)
CM30J-2	155.5	107	1.45	10	149.79 (15275)	1.40 (14.28)	101.39 (10339)	Bourzam (2008)

En la Figura 5.3 se presenta la resistencia a cortante experimental normalizada con respecto a la ecuación (2.9) sin coeficientes (V_{norm}), en función del inverso de la relación de aspecto (L/H) para todos los muros. Se observó un mejor ajuste tomando como variable el inverso de la relación de aspecto. Se asumió que la resistencia a cortante debe ser función de más de una variable. Se proponen como variables de ajuste el inverso de la relación de aspecto (L/H), la relación del esfuerzo axial y la resistencia a compresión de la mampostería (σ_{fm}) y la relación de esbeltez (H/t). En las figuras Figura 5.4 y Figura 5.5 se presenta la resistencia a cortante experimental normalizada con respecto a la ecuación (2.9) en función de la resistencia a compresión de la mampostería (σ_{fm}) y la relación de esbeltez (H/t) respectivamente.

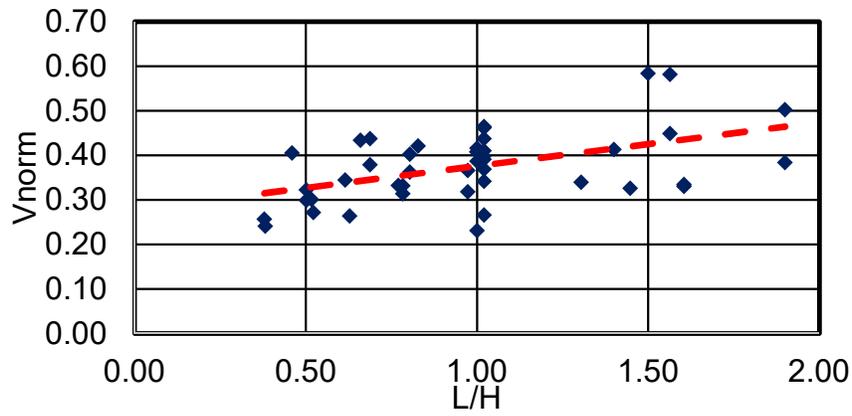


Figura 5.3 Resistencia a cortante normalizada en función de L/H

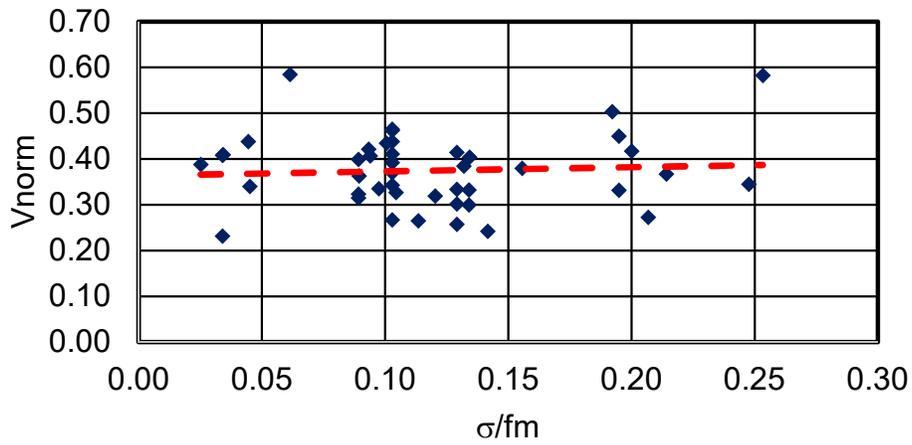


Figura 5.4 Resistencia a cortante normalizada en función de σ/f_m

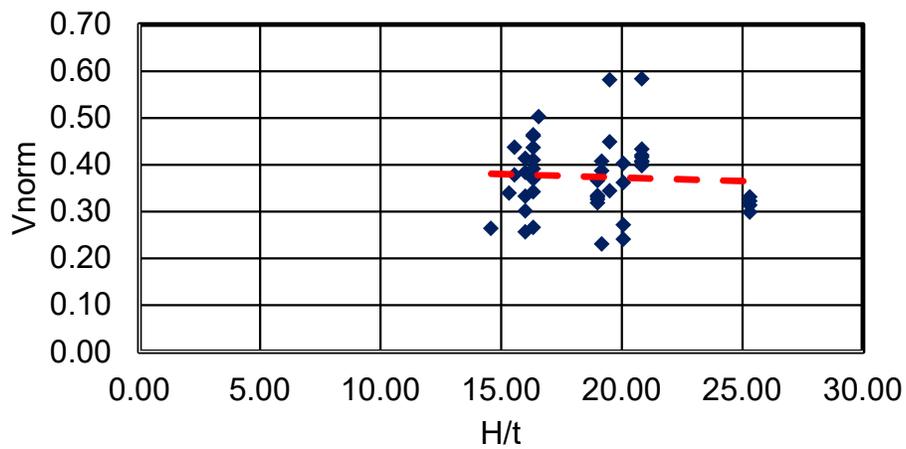


Figura 5.5 Resistencia a cortante normalizada en función de H/t

A partir de la ecuación (2.9) se propone la ecuación (5.1). No se toma en cuenta el coeficiente de carga axial (0.3). Para obtener un mejor ajuste se desarrolló algebraicamente para obtener la ecuación (5.3). Este desarrollo permite tener coeficientes independientes para ambos términos de la ecuación.

$$V_c = \left[\left(\alpha_1 \frac{L}{H} + C_1 \right) \left(\alpha_2 \frac{\sigma}{fm} + C_2 \right) \left(\alpha_3 \frac{H}{t} + C_3 \right) \right] (v_m L t + P) \quad (5.1)$$

$$V_c = \left[\left(\alpha_1 \frac{L}{H} + C_1 \right) \left(\alpha_2 \frac{\sigma}{fm} + C_2 \right) \left(\alpha_3 \frac{H}{t} + C_3 \right) \right] (v_m L t) \quad (5.2)$$

$$+ \left[\left(\alpha_4 \frac{L}{H} + C_4 \right) \left(\alpha_5 \frac{\sigma}{fm} + C_5 \right) \left(\alpha_6 \frac{H}{t} + C_6 \right) \right] (P)$$

$$V_c = \left[\left(\alpha_1 \frac{L}{H} \right) + \left(\alpha_2 \frac{\sigma}{fm} \right) + \left(\alpha_3 \frac{H}{t} \right) + \alpha_4 \left(\frac{L}{H} \right) \left(\frac{\sigma}{fm} \right) + \alpha_5 \left(\frac{L}{H} \right) \left(\frac{H}{t} \right) \right. \quad (5.3)$$

$$\left. + \alpha_6 \left(\frac{\sigma}{fm} \right) \left(\frac{H}{t} \right) + \alpha_7 \left(\frac{L}{H} \right) \left(\frac{\sigma}{fm} \right) \left(\frac{H}{t} \right) + C_1 \right] (v_m L t)$$

$$+ \left[\left(\alpha_8 \frac{L}{H} \right) + \left(\alpha_9 \frac{\sigma}{fm} \right) + \left(\alpha_{10} \frac{H}{t} \right) + \alpha_{11} \left(\frac{L}{H} \right) \left(\frac{\sigma}{fm} \right) \right.$$

$$\left. + \alpha_{12} \left(\frac{L}{H} \right) \left(\frac{H}{t} \right) + \alpha_{13} \left(\frac{\sigma}{fm} \right) \left(\frac{H}{t} \right) + \alpha_{14} \left(\frac{L}{H} \right) \left(\frac{\sigma}{fm} \right) \left(\frac{H}{t} \right) + C_2 \right] (P)$$

Se normalizó la carga de agrietamiento con respecto a la ecuación (5.3). Se realizó el ajuste por regresión lineal, utilizando el método de mínimos cuadrados. En la Tabla 5.4 se presentan los coeficientes obtenidos para determinar la resistencia a cortante. En la Tabla 5.5 Resistencias experimental y teórica se compara las resistencias a cortante experimentales con las correspondientes teóricas obtenidas con la ecuación (5.3) y los coeficientes de la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Coeficientes obtenidos del ajuste

α_1	-6.055	α_8	5.960
α_2	-64.635	α_9	64.101
α_3	-0.321	α_{10}	0.307
α_4	70.695	α_{11}	-69.459
α_5	0.352	α_{12}	-0.317
α_6	3.737	α_{13}	-3.619
α_7	-4.207	α_{14}	4.033
C1	5.937	C2	-5.427

Tabla 5.5 Resistencias experimental y teórica

Muro	V exp kN (kg)	V teo kN (kg)	Vteo/Vexp
E1	55.13 (5622)	40.07 (4086.82)	0.73
E2	94.24 (9610)	92.87 (9470.89)	0.99
E3	67.20 (6853)	67.76 (6909.74)	1.01
E4	27.64 (2819)	25.20 (2569.66)	0.91
M1	50.70 (5170)	67.70 (6903.70)	1.34
M2	79.53 (7090)	87.86 (8959.74)	1.26
M3	33.34 (3400)	32.64 (3328.19)	0.98
M4	40.10 (4090)	19.30 (1968.44)	0.48
MBHC	185.64 (18930)	171.47 (17485.93)	0.92
MCCA	234.81 (23936.00)	240.25 (24498.75)	1.02

Mc1	185.04 (18862.39)	152.95 (15596.63)	0.83
Mc2	81.94 (8352.70)	69.25 (7061.77)	0.85
Mc3	49.76 (5072.38)	42.36 (4320.18)	0.85
Mc4	31.12 (3172.27)	29.48 (3006.45)	0.95
ME1	45.09 (4598)	31.36 (3198.25)	0.70
ME2	71.10 (7250)	56.61 (5773.20)	0.80
ME3	88.39 (9014)	83.23 (8487.05)	0.94
ME4	100.50 (10248)	115.83 (11811.31)	1.15
ME5	251.60 (25656)	233.91 (23852.51)	0.93
MCC-1	48.94 (4997)	50.81 (5181.96)	1.04
MCC-2	48.94 (4997)	50.81 (5181.96)	1.04
MCC-3	39.19 (3997)	37.23 (3797.31)	0.95
MCC-4	21.60 (2203)	36.20 (3692.02)	1.68
1	729.74 (74413)	722.02 (73626.09)	0.99
3	361.87 (36901)	435.25 (44382.97)	1.20
4	491.82 (50152)	431.41 (43992.30)	0.88
5	276.90 (28236)	279.85 (28537.28)	1.01
7	254.90 (25993)	264.36 (26957.19)	1.04
9	167.94 (17125)	166.92 (17021.38)	0.99
18	171.94 (17533)	172.16 (17556.15)	1.00

19	248.91 (25382)	249.43 (25435.08)	1.00
0	98.06 (10000)	125.43 (12790.95)	1.28
421	123.56 (12600)	210.35 (21450.29)	1.07
422	96.10 (9800)	141.27 (14405.99)	1.14
423	133.37 (13600)	141.27 (14405.99)	1.47
424	148.08 (15100)	141.27 (14405.99)	1.06
601	141.21 (14400)	141.27 (14405.99)	0.95
602	166.71 (17000)	141.27 (14405.99)	1.00
603	167.69 (17100)	141.27 (14405.99)	0.85
604	157.88 (16100)	141.27 (14405.99)	0.84
N60-B1-UM	30.18 (3078)	141.27 (14405.99)	0.89
M1	122.58 (12500)	132.21 (13482.32)	1.08
N1	180.44 (18400)	180.87 (18443.66)	1.00
CM30J-1	70.24 (7163)	57.20 (5833.06)	0.81
CM30J-2	101.39 (10339)	94.10 (9596.91)	0.93
Promedio			1.00
CV			19%

En la Figura 5.6 se presenta en el eje horizontal la resistencia teórica y en el eje vertical la resistencia experimental. La línea roja tiene pendiente 1 y representa el ajuste exacto cuando la resistencia experimental es igual a la teórica. Se observa

un buen ajuste respecto a la línea roja. Se obtuvo un coeficiente de correlación de 97.56%.

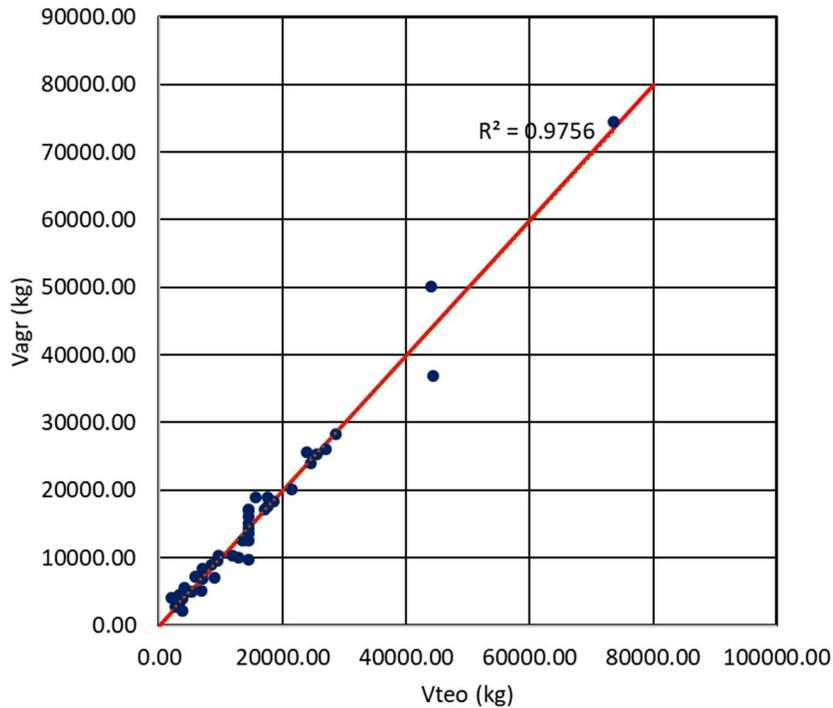


Figura 5.6 Relación de Resistencias experimental y teórica

Se realizó el análisis para determinar el peso de cada una de las variables. Se simplificó la ecuación (5.3) con la menor cantidad de variables. Se ajustó la ecuación (5.4) de la misma manera.

$$V_c = \left[C_1 + \left(\alpha_1 \frac{\sigma}{f_m} \right) + \alpha_2 \left(\frac{L}{H} \right) \left(\frac{\sigma}{f_m} \right) \right] (v_m L t) + \left[C_2 + \alpha_3 \left(\frac{L}{H} \right) \left(\frac{\sigma}{f_m} \right) \right] (P) \quad (5.4)$$

De la regresión lineal por el método de mínimos cuadrados se obtuvo la ecuación (5.5). En la Tabla 5.6 se compara la resistencia a cortante experimental con las analíticas obtenidas con la ecuación (5.5). Para obtener un mejor ajuste se eliminan los dos muros con mayor dispersión respecto a 1 (Vteo/Vexp). Los muros eliminados fueron MCC-4 (1.68) y 423 (1.47). Estos muros pueden ser considerados como

datos anómalos. En la Tabla 5.6 se presenta la relación entre la carga de agrietamiento experimental y la teórica calculada con la ecuación (5.5).

$$V_c = \left[0.535 - 2.11 \frac{\sigma}{f_m} - 0.94 \left(\frac{L}{H} \right) \left(\frac{\sigma}{f_m} \right) \right] (v_m L t) + \left[0.25 + 2.62 \left(\frac{L}{H} \right) \left(\frac{\sigma}{f_m} \right) \right] (P) \quad (5.5)$$

Tabla 5.6 Resistencias experimental y teórica

Muro	V exp kN (kg)	V teo kN (kg)	Vteo/Vexp
E1	55.13 (5622)	77.43 (7895.77)	1.40
E2	94.24 (9610)	90.99 (9278.97)	0.97
E3	67.20 (6853)	67.42 (6875.23)	1.00
E4	27.64 (2819)	36.41 (3713.07)	1.32
M1	50.70 (5170)	60.18 (6136.67)	1.19
M2	79.53 (7090)	85.96 (8765.59)	1.24
M3	33.34 (3400)	35.50 (3620.05)	1.06
M4	40.10 (4090)	47.43 (4837.11)	1.18
MBHC	185.64 (18930)	199.69 (20363.48)	1.08
MCCA	234.81 (23936.00)	192.94 (19674.52)	0.82
Mc1	185.04 (18862.39)	134.19 (13684.17)	0.73
Mc2	81.94 (8352.70)	69.49 (7086.03)	0.85
Mc3	49.76 (5072.38)	45.38 (4628.14)	0.91
Mc4	31.12 (3172.27)	32.83 (3348.25)	1.06

ME1	45.09 (4598)	37.75 (3849.74)	0.84
ME2	71.10 (7250)	59.15 (6031.68)	0.83
ME3	88.39 (9014)	79.35 (8091.57)	0.90
ME4	100.50 (10248)	101.10 (10309.78)	1.01
ME5	251.60 (25656)	176.91 (18040.57)	0.70
MCC-1	48.94 (4997)	55.11 (5619.90)	1.12
MCC-2	48.94 (4997)	55.11 (5619.90)	1.12
MCC-3	39.19 (3997)	39.64 (4042.56)	1.01
1	729.74 (74413)	686.67 (70021.46)	0.94
3	361.87 (36901)	476.92 (48632.57)	1.32
4	491.82 (50152)	469.95 (47921.77)	0.96
5	(28236)	279.43 (28494.80)	1.01
7	276.90 (25993)	246.10 (25095.26)	0.97
9	167.94 (17125)	145.31 (14817.74)	0.87
18	171.94 (17533)	170.31 (17367.58)	0.99
19	248.91 (25382)	254.88 (25991.34)	1.02
0	98.06 (10000)	107.64 (10976.50)	1.10
421	123.56 (12600)	234.40 (23902.29)	1.19
422	96.10 (9800)	141.62 (14441.79)	1.15
424	148.08 (15100)	141.62 (14441.79)	1.06

601	141.21 (14400)	141.62 (14441.79)	0.96
602	166.71 (17000)	141.62 (14441.79)	1.00
603	167.69 (17100)	141.62 (14441.79)	0.85
604	157.88 (16100)	141.62 (14441.79)	0.84
N60-B1-UM	30.18 (3078)	141.62 (14441.79)	0.90
M1	122.58 (12500)	142.09 (14489.90)	1.16
N1	180.44 (18400)	180.22 (18377.41)	1.00
CM30J-1	70.24 (7163)	62.99 (6423.67)	0.90
CM30J-2	101.39 (10339)	92.45 (9427.32)	0.91
Promedio			1.00
CV			15%

En la Figura 5.7 se presenta la relación de resistencias experimental y teórica calculada con la ecuación (5.5). Se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.958. El promedio de los datos es de 1. El coeficiente de variación es 15%.

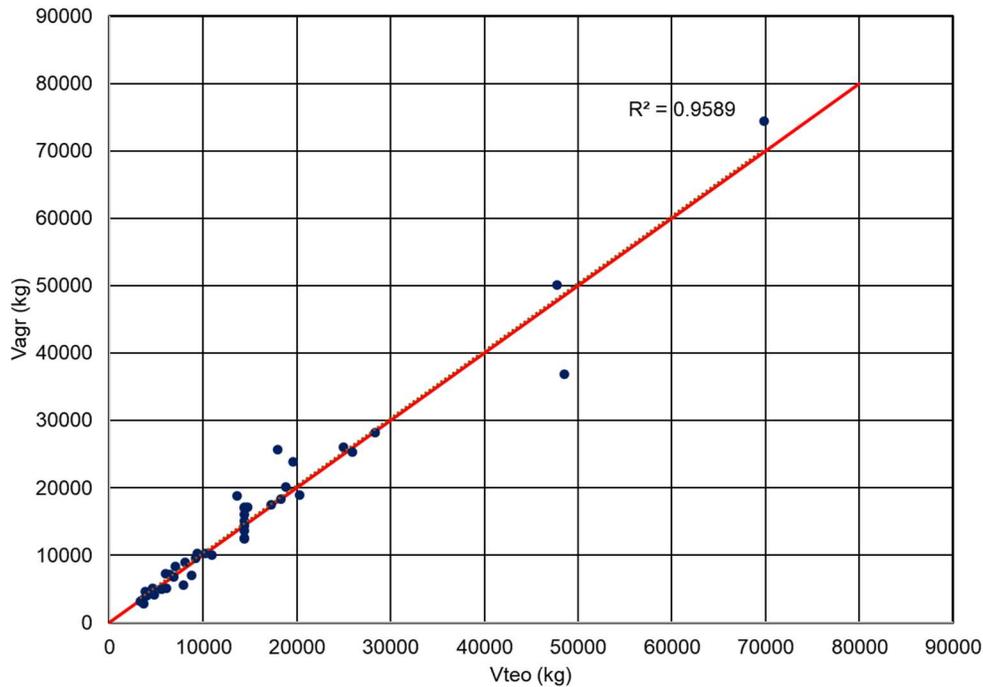


Figura 5.7 Resistencia experimental y teórica con ecuación (5.5) propuesta

5.3. Capacidad de deformación y resistencia máxima

Se define la capacidad de deformación como el desplazamiento último (Δu) entre el desplazamiento del agrietamiento por cortante (Δa). En la Figura 5.8 se presenta la parte positiva de la envolvente del muro MBHC y la parte negativa de la envolvente del muro MCCA. Se toma la parte negativa del MCCA ya que en este sentido se presentó el agrietamiento por cortante. En el eje horizontal se presenta el desplazamiento normalizado con respecto al desplazamiento asociado a la carga de agrietamiento por cortante ($\Delta/\Delta a$). El eje vertical corresponde a la carga normalizada con respecto a la carga de agrietamiento por cortante. Se observa que el muro MCCA tuvo mayor capacidad de deformación. Se atribuyó la mayor capacidad de deformación a la formación de grietas verticales. Debido a la formación de estas grietas posteriores al primer agrietamiento cortante, el muro pudo trabajar como dos muros de longitud $L/2$. De esta figura se observa también que la degradación de resistencia es gradual para el muro MCCA. Para el MBHC la degradación de resistencia es rápida. Se atribuyó la mayor degradación de

resistencia al tipo de pieza. Las piezas de BHC al agrietarse se desprendían pedazos. Las piezas de BCCA se agrietaron pero no perdieron pedazos de la misma. Al perder partes de la pieza el muro perdió resistencia rápidamente, esto se asocia al tipo de pieza hueca.

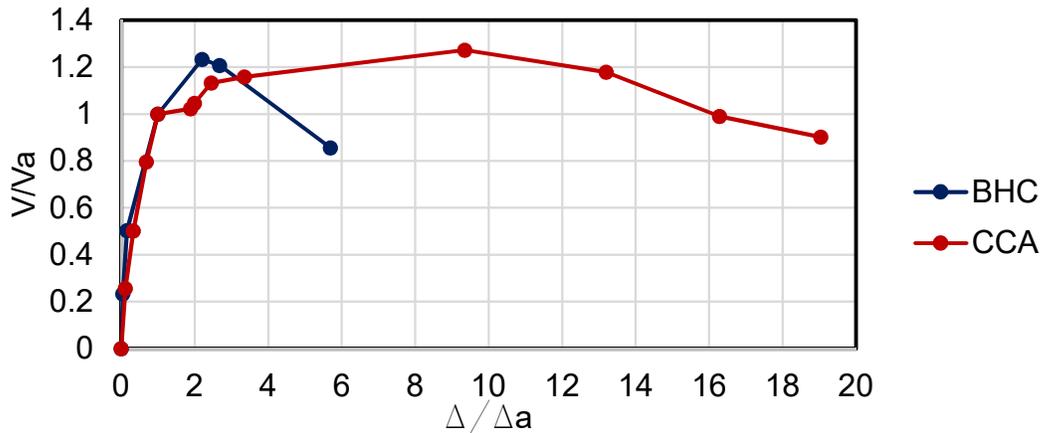


Figura 5.8 Envoltorio normalizado de los muros MCCA y MBHC

En la Tabla 5.7 se compara la carga de agrietamiento con la carga máxima. Se observa que la carga máxima para el muro MCCA fue 32% mayor que la de agrietamiento. La carga máxima para el muro MBHC fue 23% mayor que la de agrietamiento. Sosa (2013) determinó la carga máxima promedio para 8 muros de BHC como 28% mayor que la carga de agrietamiento. Chim (2017) determinó la carga máxima promedio para 4 muros de BCCA como 35% mayor que la carga de agrietamiento. En ambos casos se observó que cuando la relación de aspecto disminuye, la carga máxima respecto de la carga de agrietamiento también disminuye.

En la Figura 5.9 se presentan las curvas envolventes de los muros MCCA y MBHC. Se observa que el muro MCCA tiene mayor resistencia al agrietamiento por cortante, carga máxima y capacidad de deformación.

Tabla 5.7 Comparación entre la carga de agrietamiento y la carga máxima

Muro	Vagr kN (ton)	Vmax kN (ton)	Vmax/Vagr
MBHC	177.07 (18.05)	217.68 (22.19)	1.23
MCCA	234.81 (23.94)	311.96 (31.81)	1.32

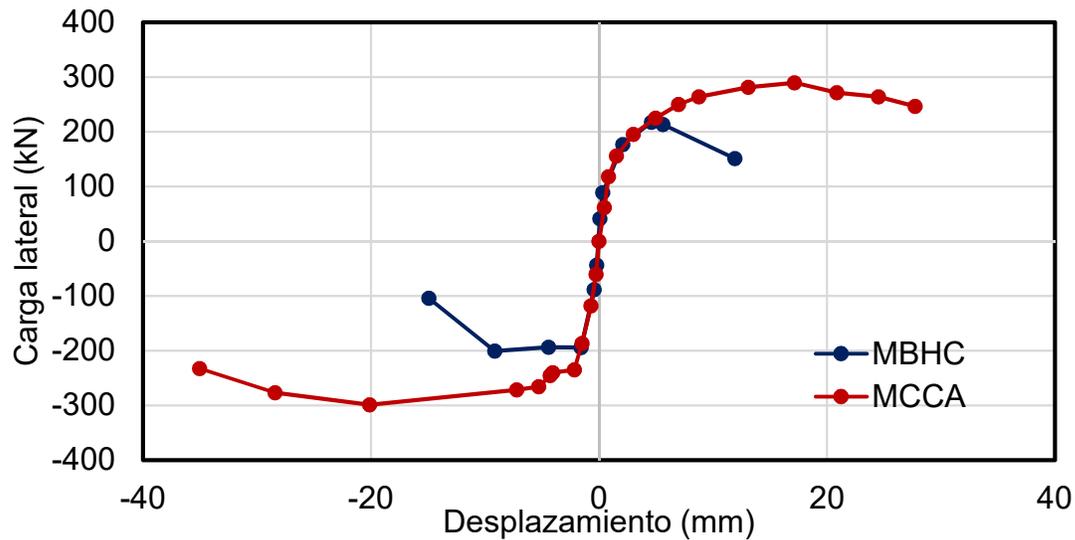


Figura 5.9 Envolturas de los muros MBHC y MCCA

Se puede comparar los muros ensayados por Alcocer (2017) y Chim (2017) con el muro MCCA ensayado en este trabajo. En la Figura 5.10 se presenta la envolvente normalizada de los cinco muros. Se observó mayor capacidad de deformación en el muro MCCA. Se esperaba una capacidad de deformación similar o menor a los muros con mayor relación de aspecto. Se atribuye la mayor capacidad de deformación a la formación de grietas verticales en el panel y horizontales entre el panel y los elementos confinantes.

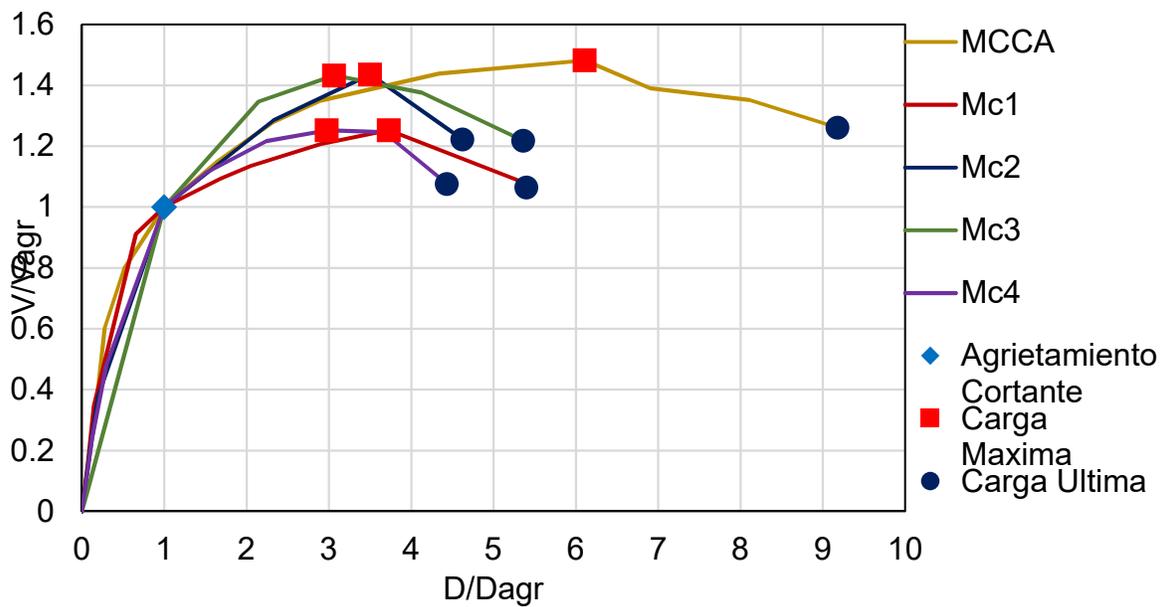


Figura 5.10 Envoltentes positivas normalizadas

En la Figura 5.11 se presentan las envoltentes de los muros de BCCA. Las curvas se limitaron al mismo nivel de degradación de rigidez, hasta el 85% de la carga máxima. Se observa que cuando la relación de aspecto disminuye, la carga de agrietamiento, la carga máxima y la rigidez de los muros aumentan.

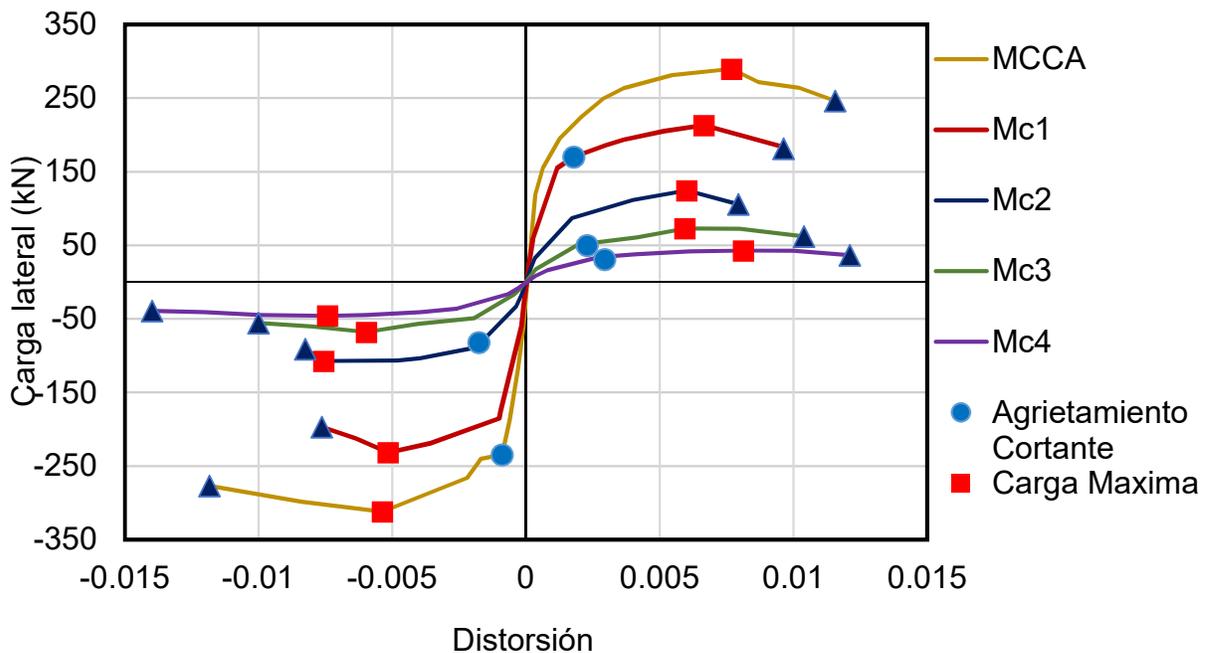


Figura 5.11 Envoltentes de los muros de BCCA

5.4. Degradación de rigidez

El grado de deterioro de rigidez lateral de los muros de mampostería se relaciona con el concepto de degradación de rigidez de ciclo. La rigidez de ciclo se define como la pendiente de la recta secante que une los puntos de distorsión máxima en el sentido positivo y negativo de un mismo ciclo, en la Figura 5.12 se presenta como una línea punteada la línea secante.

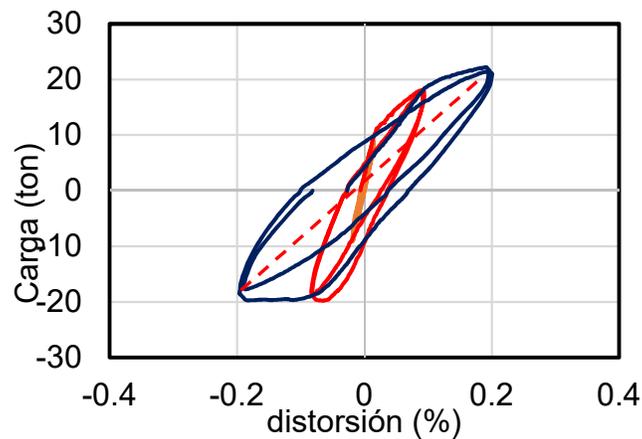


Figura 5.12 Rigidez de ciclo

Con el propósito de observar la degradación de la rigidez lateral con respecto a la distorsión, se normalizó la rigidez de cada ciclo (K_c) con respecto a la rigidez de ciclo inicial (K_{ci}). En la Figura 5.13 se presenta en el eje vertical la rigidez de ciclo normalizada con la rigidez del primer ciclo y en el eje horizontal se presenta la distorsión. Se observa que la relación K_c/K_{ci} es mayor para el muro MCCA para un mismo nivel de distorsión. En un sistema de piso rígido en el que los muros alcancen un mismo nivel de distorsión, el daño se concentraría en el muro MBHC como se observa en la Tabla 5.1.

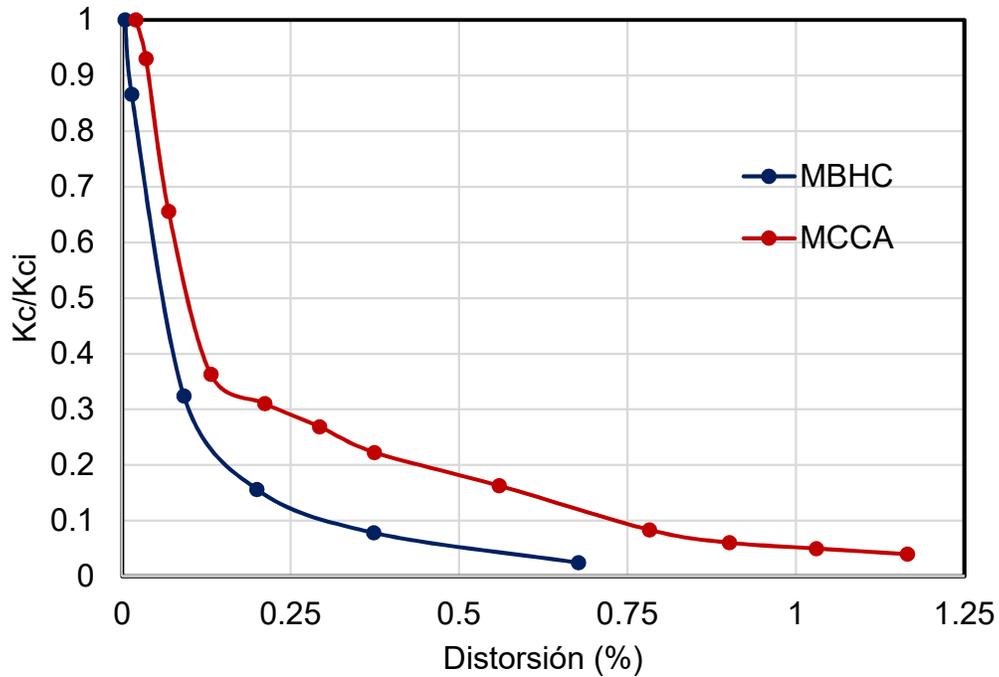


Figura 5.13 Curva de degradación de rigidez de ciclo normalizada

La degradación de rigidez fue de 64% y 68% posterior al agrietamiento para el muro MCCA y el muro MBHC, respectivamente. Para la carga máxima la degradación de rigidez para ambos muros fue de 84%.

En la Figura 5.14 se presentan las curvas de degradación de rigidez de los cinco muros de BCCA. Se observa un comportamiento similar. Se observa que la degradación de rigidez posterior al agrietamiento del muro MCCA fue mayor. Es importante notar que para un mismo nivel de distorsión, conforme aumenta la relación de aspecto es mayor la relación K_c/K_{ci} . En un sistema de piso rígido el daño se concentraría en los muros de menor relación de aspecto.

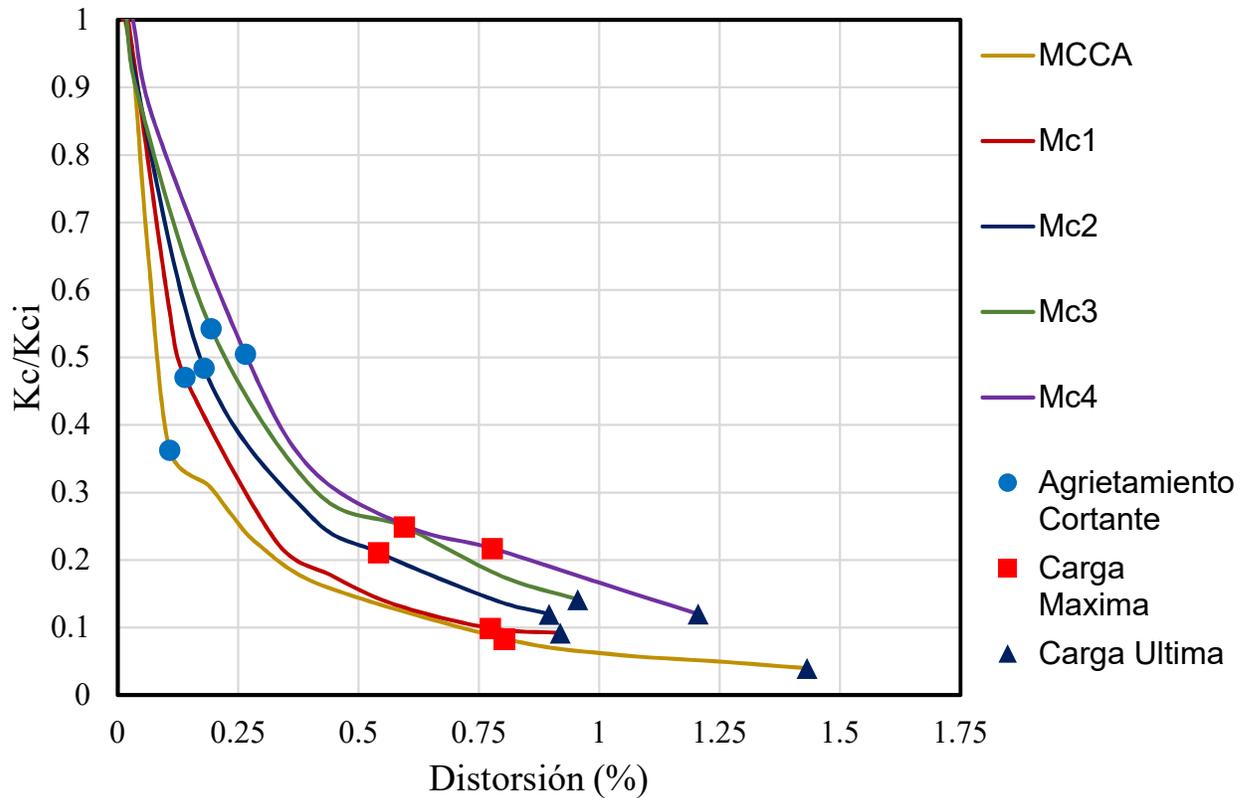


Figura 5.14 Degradación de rigidez de muros de BCCA

5.5. Energía disipada

Se calculó la energía disipada (ED) como el área contenida en un lazo histerético de la curva carga lateral-desplazamiento. La energía disipada acumulada es la suma de las áreas contenidas en los lazos histeréticos hasta el ciclo estudiado (n). La energía disipada acumulada se correlaciona con el nivel de daño en los muros (Pérez Gavilán et al., 2011). En la Figura 5.15 se presenta la energía disipada acumulada para ambos muros. Antes del agrietamiento en ambos casos la energía disipada es prácticamente cero. Después del agrietamiento se observa que la energía disipada acumulada es similar para ambos muros. En los primeros ciclos posteriores al agrietamiento se observa que la pendiente es mayor para MBHC. Esto se relaciona con un mayor nivel de daño en los primeros ciclos. El muro MCCA estuvo sometido a más ciclos de carga lateral por lo que disipó más energía hasta llegar a la falla.

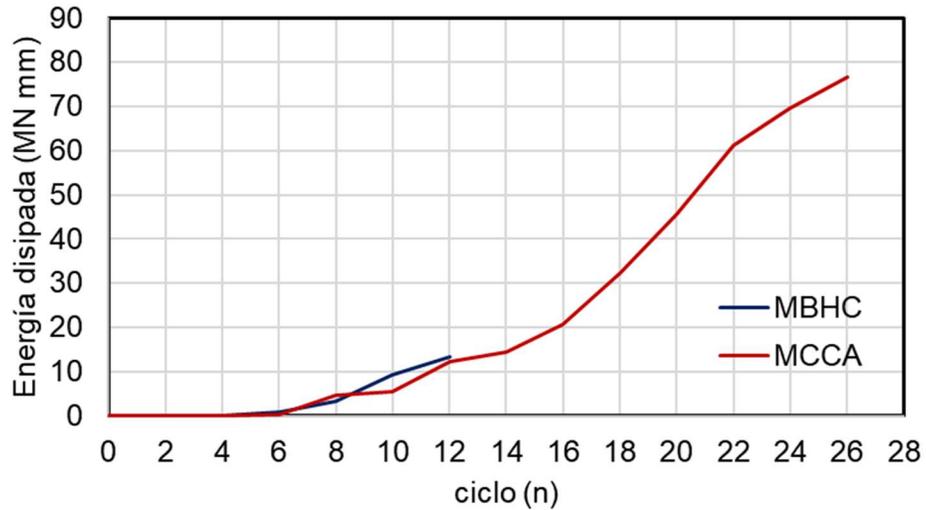


Figura 5.15 Curvas de ED acumulada de los muros MBHC y MCCA

En la Figura 5.16 se presentan las curvas de energía disipada acumulada para los muros de BCCA. Se observa que cuando disminuye la relación de aspecto aumenta la energía disipada. Esto se debe a que al disminuir la relación de aspecto aumenta la resistencia y el área de los lazos histeréticos es mayor. El muro M1 disipó más energía inicialmente debido a que se agrietó en ciclos anteriores al MCCA.

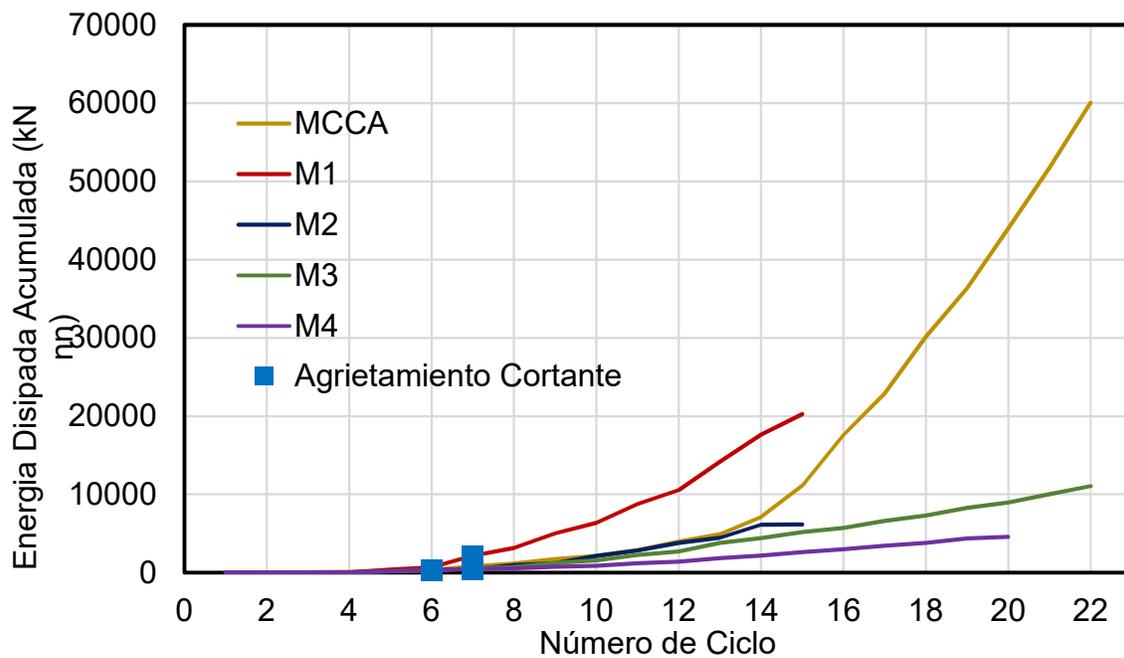


Figura 5.16 Curvas de ED acumulada de muros de BCCA

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Con base en los muros ensayados en este trabajo y los de otros autores citados en este texto se formulan las siguientes conclusiones:

- El patrón de agrietamiento final de los muros MBHC y MCCA corresponde al agrietamiento por cortante. El patrón de agrietamiento tuvo forma de "X". Se observaron grietas en diagonal en las piezas y no en las juntas. No se observaron grietas verticales entre los elementos confinantes y el panel.
- Se observó mayor nivel de daño para menores distorsiones en el muro MBHC. El muro MCCA fue sometido a mayores distorsiones hasta alcanzar un nivel de daño similar.
- Se observa que la resistencia a cortante es función de distintas variables relacionadas entre sí (L/H , σ/f_m , H/t). Esta relación se observa en diferentes tipos de piezas.
- Se propone una ecuación basada en el criterio de Mohr-Culomb para determinar la resistencia de MMC. Esta ecuación se puede aplicar a muros de cualquier tipo de pieza. La ecuación se simplificó manteniendo una buena aproximación en la relación del resultado teórico con el experimental. Se observó que las principales variables son: L , t , v_m , P , L/H y σ/f_m .
- La degradación de resistencia posterior a la carga máxima fue mayor para el muro MBHC. En ambos casos fue mayor al 30%. La capacidad de deformación fue mayor para el muro MCCA.
- La rigidez inicial fue mayor para el muro MBHC. La carga de agrietamiento por cortante y la carga máxima fueron mayores para el muro MCCA. La carga máxima fue aproximadamente 25% más que la carga de agrietamiento. La carga máxima respecto a la carga de agrietamiento disminuye conforme disminuye la relación de aspecto. Para los 5 muros de BCCA comparados se observa que cuando disminuye la relación de aspecto aumenta la resistencia a cortante y la rigidez del muro.

- La degradación de rigidez fue mayor para el muro MBHC. Este concepto puede ser útil si se analiza un sistema de diafragma rígido con muros de diferentes tipos de pieza. Si ambos muros se someten al mismo nivel de distorsión, el daño se concentraría en el muro MBHC. Para los muros de BCCA comparados la degradación de rigidez es mayor cuando la relación de aspecto disminuye.
- La disipación de energía acumulada fue similar para ambos muros hasta un mismo ciclo. El muro MCCA disipó mayor cantidad de energía a un nivel de daño similar al MBHC. Para los muros de BCCA comparados se observó que la energía disipada es mayor cuando la relación de aspecto disminuye.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACI. (2013). Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures (TMS 402-13 / ACI 530-13 / ASCE 5-13; TMS 602-13 / ACI 530.1-13 / ASCE 6-13). 2013 edition. Farmington Hills, MI.
2. ACI318 (2002): Building Code Requirements for Structural Concrete Code and Commentary. 2014 edition. Farmington Hills, MI.
3. Alcocer R.A. (2017). Ecuaciones de diseño por cortante para muros confinados de CCA. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
4. ASTM - American Society for Testing and Materials. (2011). Standard Specification for Autoclaved Aerated Concrete (AAC), ASTM C 1693
5. ASTM - American Society for Testing and Materials. (2007). Standard Specification for Precast Autoclaved Aerated Concrete (PAAC) Wall Construction Units, ASTM C 1386, West Conshohocken, PA, 2007.
6. ASTM - American Society for Testing and Materials. (2001). Standard Specification for Splitting Tensile Strength of Masonry Units, ASTM C 1006, West Conshohocken, PA, 2001.
7. ASTM - American Society for Testing and Materials. (2002). Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages, ASTM E 519, West Conshohocken, PA, 2002.
8. Aztroza M., Schmidt A. (2004). Capacidad de deformación de muros de albañilería confinada para distintos niveles de desempeño. Revista de ingeniería sísmica No. 70: 59-75.
9. Bourzam A., Goto T., Miyajima M.(2008). Shear capacity prediction of confined masonry walls subjected to cyclic lateral loading. Doboku Gakkai Ronbunshuu vol. 64 No. 4 692-704.

10. Chim R.U. (2017). Comportamiento a cortante en muros confinados de concreto celular de autoclave: Efecto de la relación de aspecto. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
11. Fernández Baqueiro L. E., Sosa Moreno M. I. y Varela Rivera J. L. (2014). Resistencia en el plano de muros de mampostería confinada: efecto de la relación de aspecto. “Memorias del XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural”, 13-15 de noviembre, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
12. Flores L. E., Mendoza J. A., Reyes C. (2004). Ensayo de muros de mampostería con y sin refuerzo alrededor de la abertura. En “Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural”, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero, México.
13. Haach, V. G., Vasconcelos, G., & Lourenço, P. B. (2010). Experimental Analysis of Reinforced Concrete Block Masonry Walls Subjected to In-Plane Cyclic Loading. Journal of Structural Engineering, 136(4), 452–462.
14. Marinilli A., Castilla E. (2004). Experimental evaluation of confined masonry walls with several confining-columns. 13th World Conference of Earthquake Engineering, Vancouver, B. C., Canada. Paper No. 2129
15. NTCM - Gobierno del Distrito Federal (2004), Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, "Gaceta Oficial del Distrito Federal", México.
16. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (1997a), "Industria de la construcción- Agregados para concreto - Análisis granulométrico-Método de prueba", NMXC- 077-ONNCCE-1997, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
17. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2002) "Industria de la construcción - Concreto-Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto - Método de prueba", NMX-C-083-ONNCCE-2014, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.

18. Penna Andrea, Magenes Guido, Calvi G. Michele, Costa Alexandre A. (2008) Seismic Performance of AAC Infill and Bearing Walls with Different Reinforcement Solutions. In Proceedings of the 14th International Brick and Block Masonry Conference, Sydney, Australia, February 17-20.
19. Pérez Gavilán J. J., Manzano A., Bravo G. R. (2013). Efecto del momento flexionante en la fuerza cortante que produce el agrietamiento por tensión diagonal en muros de mampostería confinada. Revista de ingeniería sísmica, 88:1-22.
20. Pérez Gavilán J., Flores L., and Alcocer S. (2015). An experimental study of confined masonry walls with varying aspect ratio. Earthquake Spectra, 31(2): 945-968.
21. Raygoza L.E. (2012). Muros de mampostería confinada de bloques huecos de 15 cm, con relación de aspecto mayor a uno, sujetos a cargas laterales. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
22. Ricalde J. L. (2017). Flexión en muros confinados de concreto celular de autoclave: Efecto de la carga axial. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
23. RILEM 1993: Autoclaved Aerated Concrete: Properties, Testing and Design, RILEM Recommended Practice, RILEM Technical Committees 78- MCA and 51-ALC, E & FN Spon, London.
24. Rodríguez M., Botero J. C. (1996). Aspectos del comportamiento sísmico de estructuras de concreto reforzado considerando las propiedades mecánicas de aceros de refuerzo producidos en México. "Publicación Series Instituto de Ingeniería-UNAM", 575.
25. San Bartolomé, A., Quiun, D. y Torrealva, D. (1992). Seismic behaviour of a three-story scale confined masonry Structure. Tenth world Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, Países Bajos.
26. Sosa M.I. (2013). Comportamiento de muros de mampostería confinada de bloques huecos de concreto, sujetos a cargas laterales en su plano. Tesis de

Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.

27. Tanner Jennifer E., Varela Jorge L., Klinger Richard E. (2005) Design and Seismic Testing of Two-Story, Full Scale Autoclaved Aerated Concrete Assemblage Specimen. ACI Structural Journal, Volume 102, Issue 1, 114-119, January 1.
28. Tena, A., Juárez, A., and Salinas, V.H. (2009). Cyclic behavior of combined and confined masonry walls. Journal of Engineering Structures, 31(1):240-259.
29. Treviño, E.L., Alcocer, S.M., and Flores, L.E. (2004). Investigación experimental del comportamiento de muros de mampostería confinada de bloques de concreto sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles reforzados con acero de grados 60 y 42. En "Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural". Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Acapulco, México.
30. Varela J. L., Tanner Jennifer E., Klingner Richard E. (2006) Development of seismic force reduction and displacement amplification factors for autoclaved aerated concrete structures. Earthquake Spectra, Volume 22, No. 1, "67-286.
31. Xella Mexicana. Disponible en <http://www.hebel.mx> Recuperado el 18 de abril de 2017
32. Yoshimura K., Kikuchi K., Okamoto Z., Sanchez T. (1996). Effect of vertical and horizontal wall reinforcement on seismic behaviour of confined masonry walls. In "11th World Conference of Earthquake Engineering", Paper no. 191, Acapulco, Mexico.
33. Zepeda J.A., Pineda J.A. y Alcocer S.M. (1996) Comportamiento ante cargas laterales de muros de mampostería confinada reforzados con malla electrosoldada, X Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Mérida, México, noviembre, pp. 919-925.