



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

**FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“ECUACIONES DE DISEÑO POR CORTANTE PARA
MUROS CONFINADOS DE CCA”**

TESIS

PRESENTADO POR:

I.C. RODRIGO ALBERTO ALCOCER CANCHÉ

**EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
OPCIÓN ESTRUCTURAS**

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2017

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

El concreto celular de autoclave (CCA) es un material ligero compuesto de cemento portland, cal, arena sílica, yeso, agua y aluminio en polvo. Entre los principales tipos de piezas se encuentran los bloques sólidos, los paneles verticales y los paneles horizontales. En México se utilizó por primera vez en el año de 1994 y su uso se ha extendido a diferentes partes de la república.

En el país se utilizan principalmente muros de mampostería confinada para la construcción de viviendas debido a su bajo costo y facilidad constructiva. Tradicionalmente los muros de mampostería confinada se construyen con piezas de concreto o arcilla. En los últimos años se ha empezado a construir muros confinados con piezas de CCA; sin embargo, la reglamentación vigente mexicana, para muros de mampostería, no incluye requisitos explícitos para el diseño de muros confinados de CCA.

El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto de la relación de aspecto en la resistencia a cortante de muros confinados de CCA sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Se diseñaron y ensayaron dos muros confinados de CCA a escala natural con relaciones de aspecto de 0.71 y 1.30. La altura y espesor fueron constantes e iguales a 240 y 15 cm, respectivamente.

Se obtuvieron curvas carga lateral-desplazamiento de los muros. Se presentan los patrones de agrietamiento de cada uno de los muros. Con base en los resultados experimentales de este trabajo y del trabajo de Chim (2017), se observó que la resistencia a cortante depende de la relación de aspecto del muro. Se propusieron ecuaciones para la resistencia a cortante de muros confinados de CCA que incluyen el efecto de la relación de aspecto del muro. Por otro lado, con base en los resultados experimentales de este trabajo, del trabajo de Chim (2017) y del trabajo de Ricalde (2017), se propone una ecuación para la resistencia a flexo-cortante de muros confinados de CCA. Se concluyó que la resistencia a cortante de los muros confinados de CCA depende de la relación de aspecto y que las ecuaciones propuestas aproximan de manera satisfactoria esta resistencia.

ABSTRACT

Autoclaved Aerated Concrete (AAC) is a lightweight material composed of portland cement, lime, silica sand, gypsum, water and aluminum powder. The main types of pieces are solid blocks, vertical panels and horizontal panels. In Mexico AAC was first used in the year 1994 and its use has spread to different parts of the country.

In Mexico, confined masonry walls are mainly used for housing construction due to its low cost and ease of construction. Traditionally, confined masonry walls are built with concrete or clay units. In recent years confined walls have begun to be constructed with AAC units; however, the current Mexican regulations for masonry walls do not include explicit requirements for the design of AAC confined walls.

The objective of this work was to study the effect of the wall aspect ratio on shear strength of AAC confined walls subjected to lateral loads. Two full scale AAC confined walls with aspect ratios of 0.71 and 1.30 were designed and tested. The height and thickness were constant and equal to 240 and 15 cm, respectively.

Lateral load-displacement curves were obtained. The cracking patterns of each wall are presented. Based on the experimental results of this work and the work of Chim (2017), it was observed that the shear strength depends on the wall aspect ratio. Equations for shear strength of AAC confined walls, including the wall aspect ratio effect, were proposed. On the other hand, based on the experimental results of this work, the work of Chim (2017) and the work of Ricalde (2017), a flexural-shear strength equation for AAC confined walls was proposed. It was concluded that the shear strength of the AAC confined walls depends on the aspect ratio and that the equations proposed give a good approximation of it.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Objetivo general	3
1.3. Objetivo específicos	3
1.4. Alcance	4
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	5
2.1. Resistencia de muros.....	5
2.2. Estudios sobre muros de CCA	10
2.3. Estudios sobre muros confinados	15
2.4. Reglamentaciones existentes	16
2.5. Conclusiones de la revisión de literatura.....	16
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	18
3.1. Descripción general.....	18
3.2. Determinación de las propiedades de los materiales	18
3.3. Selección de variable de estudio.....	20
3.4. Diseño de muros confinados.....	20
3.5. Construcción de muros	26
3.6. Diseño del sistema de carga e instrumentación	28
3.7. Ensaye de muros	30
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....	32
4.1. Propiedades mecánicas de los materiales	32
4.2. Ensaye de muros	35

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
5.1. Resistencia a cortante diagonal	42
5.2. Resistencia a flexo-cortante	46
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
BIBLIOGRAFÍA	52

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Muro confinado sujeto a carga axial y lateral	5
Figura 2.2 Falla por flexión de un muro confinado	6
Figura 2.3 Grieta de cortante en un muro confinado	7
Figura 2.4 Grieta de flexo-cortante en un muro confinado	9
Figura 2.5 Desplazamiento como cuerpo rígido de un muro confinado	10
Figura 3.1 Vista del ensaye a compresión axial de un cubo de CCA	18
Figura 3.2 Vista del ensaye a tensión de un bloque de CCA	19
Figura 3.3 Vista del ensaye a compresión axial de un cilindro de concreto	19
Figura 3.4 Vista del ensaye a tensión de una barra de acero	20
Figura 3.5 Esquema de ensaye a compresión diagonal de un murete.....	22
Figura 3.6 Esquema de ensaye a tensión de un bloque de CCA	22
Figura 3.7 Hipótesis empleada para obtener la relación entre v_m y f_{tCCA}	23
Figura 3.8 Curvas resistencia-esfuerzo axial de compresión del muro Mc1	25
Figura 3.9 Curvas resistencia-esfuerzo axial de compresión del muro Mc2	25
Figura 3.10 Geometría de los muros Mc1 y Mc2.....	26
Figura 3.11 Base del muro	27
Figura 3.12 Primera hilada de bloques de CCA	27
Figura 3.13 Primera media altura del muro	27
Figura 3.14 Cadena superior del muro.....	28
Figura 3.15 Vista final de los muros confinados de CCA	28
Figura 3.16 Esquema general del sistema de carga lateral	29
Figura 3.17 Esquema general del sistema de carga axial	29

Figura 3.18 Esquema general del sistema de instrumentación	30
Figura 3.19 Protocolo de carga	31
Figura 4.1 Fallas observadas en los cubos de CCA.....	33
Figura 4.2 Falla típica observada en el bloque de CCA.	34
Figura 4.3 Agrietamiento horizontal y diagonal en las esquinas inferiores del muro Mc1	35
Figura 4.4 Agrietamiento diagonal del muro Mc1	36
Figura 4.5 Grietas diagonales en la parte central y superior del muro Mc1	36
Figura 4.6 Grietas diagonales en la parte inferior y superior de los castillos del muro Mc1	36
Figura 4.7 Patrón de agrietamiento final del muro Mc1	37
Figura 4.8 Curva carga lateral-desplazamiento del muro Mc1	37
Figura 4.9 Grietas por flexo-cortante en ambos lados del muro Mc2.....	39
Figura 4.10 Agrietamiento diagonal del muro Mc2	39
Figura 4.11 Agrietamiento diagonal en la parte central del muro Mc2	39
Figura 4.12 Agrietamiento diagonal en las esquinas inferior y superior de los castillos del muro Mc2.....	40
Figura 4.13 Patrón de agrietamiento final del muro Mc2.....	40
Figura 4.14 Curva carga lateral-desplazamiento del muro Mc2	41
Figura 5.1 Patrones de agrietamiento asociados a la resistencia a cortante diagonal	43
Figura 5.2 Resistencia a cortante normalizada con respecto a la ecuación (3.1).....	44
Figura 5.3 Resistencia a cortante normalizada con respecto a la ecuación (3.2).....	44
Figura 5.4 Resistencia a cortante normalizada con respecto a la ecuación (3.2) modificada.....	44

Figura 5.5 Datos experimentales de los muros confinados de CCA y otros autores. 46

Figura 5.6 Patrones de agrietamiento asociados a la resistencia a flexo-cortante.... 47

INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Contenido de humedad del CCA	32
Tabla 4.2 Resistencia a compresión axial del CCA	32
Tabla 4.3 Resistencia a tensión del CCA	33
Tabla 4.4 Resistencia a compresión axial del concreto de muros Mc1 y Mc2.....	34
Tabla 4.5 Resistencia de fluencia del acero de refuerzo	34
Tabla 4.6 Resumen de cargas y desplazamientos registrados para cada evento durante el ensaye del muro Mc1	38
Tabla 4.7 Resumen de cargas y desplazamientos registrados para cada evento durante el ensaye del muro Mc2	41
Tabla 5.1 Carga lateral asociada a la resistencia a cortante dagonal	42
Tabla 5.2 Resistencia a cortante diagonal experimental y analítica	45
Tabla 5.3 Carga lateral asociada a la resistencia a flexo-cortante	47
Tabla 5.4 Resistencia a flexo-cortante experimental y analítica a H_{fc}	48
Tabla 5.5 Resistencia a flexo-cortante experimental y analítica a $L/2$	49
Tabla 5.6 Resistencia a flexo-cortante experimental y analítica (ecuación (5.4))	50

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

El concreto celular de autoclave (CCA) es un material ligero compuesto de cemento portland, cal, arena sílica, yeso, agua y aluminio en polvo. El CCA se fabrica mezclando los primeros cinco ingredientes en un molde hasta formar una mezcla fluida. Posteriormente, se agrega el aluminio en polvo, el cual funciona como un agente expansivo. La mezcla incrementa su volumen entre dos y tres veces en aproximadamente 4 horas. Después de la expansión, la mezcla es capaz de mantener su forma y soportar su peso propio. Se retira el molde y se corta la mezcla para formar las piezas deseadas. Posteriormente, se introducen las piezas en un autoclave para su proceso de curado por un período de 8 a 12 horas. La presión y temperatura en el autoclave son aproximadamente de 12 kg/cm^2 y 180°C , respectivamente. Después del proceso de curado las piezas de CCA se empacan y están listas para ser transportadas a la obra. Entre los principales tipos de piezas se encuentran los bloques sólidos, los paneles verticales y los paneles horizontales. El CCA se produce en diferentes clases, con resistencias a compresión axial que varían entre 20 kg/cm^2 y 60 kg/cm^2 , y densidades nominales entre 400 kg/m^3 y 700 kg/m^3 (ASTM C 1693).

El CCA fue producido comercialmente por primera vez en Suecia en el año de 1929. Su uso se ha extendido a más de 40 países en todo el mundo, entre los que se encuentran Alemania, Francia, Inglaterra, Holanda, Portugal, China, Estados Unidos de América y México, entre otros. El CCA se comenzó a utilizar en los Estados Unidos de América en el año de 1990. Por su parte, en México se utilizó por primera vez en el año de 1994. Su uso se ha extendido a diferentes partes de la república como son Nuevo León, Ciudad de México, Puebla, Guanajuato, San Luis Potosí, Tamaulipas, Estado de México y Yucatán.

Los muros de mampostería se utilizan ampliamente en la construcción de viviendas. Estos muros se pueden clasificar en no reforzados, reforzados interiormente y confinados, entre otros. Los muros confinados son aquellos que están reforzados en su periferia con elementos de concreto reforzado (cadenas y castillos). En este tipo

de muros primero se construye el panel de mampostería y posteriormente los elementos confinantes. En México se utilizan principalmente muros confinados debido a su bajo costo y facilidad constructiva. Los muros confinados se construyen principalmente con piezas de concreto o arcilla. En los últimos años se ha empezado a construir muros confinados con piezas de CCA.

Existen pocos estudios sobre el comportamiento de muros de mampostería de CCA sujetos a cargas laterales (Tanner et al. 2005a; Tanner et al. 2005b; Penna et al. 2008; Tomazevic et al. 2012; Ravichandran et al. 2012; Mandirola et al. 2012; Yu et al. 2013; Bose et al. 2014). En estos estudios se ensayaron muros con comportamiento dominado por cortante y por flexión. Para el caso de cortante, las principales variables de estudio fueron la relación de aspecto (altura entre longitud del muro), el esfuerzo axial de compresión, el tipo de pieza y el tipo de refuerzo. Para el caso de flexión, las variables de estudio fueron la relación de aspecto, el esfuerzo axial de compresión y el tipo de pieza.

Por otro lado, existen numerosos estudios sobre el comportamiento de muros confinados sujetos a cargas laterales con comportamiento dominado por cortante. Sin embargo, los muros estudiados fueron construidos con piezas de concreto o arcilla. Las variables de estudio fueron el tipo de piezas (San Bartolomé et al. 2010), la combinación de piezas de arcilla y concreto (Tena et al. 2009), los tipos y cantidades de acero de refuerzo en los elementos confinantes (Treviño et al. 2004; Quiroz et al. 2014), la cantidad y separación del acero de refuerzo vertical y horizontal en el panel de mampostería (Yoshimura et al. 2000), el esfuerzo axial de compresión (Urzúa et al. 2001; Raygoza 2012; Sosa 2013), la relación de aspecto (San Bartolomé 1992; Pérez-Gavilán et al. 2015; Raygoza 2012; Sosa 2013), la interacción entre el momento flexionante y la fuerza cortante (Pérez-Gavilán et al. 2011), las aberturas en los muros y el tipo de refuerzo (Flores et al. 2004), y la cantidad y distribución de elementos confinantes (Ventura 2015). Por otra parte, existen pocos estudios sobre el comportamiento de muros confinados sujetos a cargas laterales con comportamiento dominado por flexión (Prieto 2015; Gamboa 2016, Yoshimura et al. 2000). Las variables de estudio fueron la relación de aspecto, el esfuerzo axial de compresión y

la cantidad y separación del acero de refuerzo vertical y horizontal en el panel de mampostería.

En México se cuenta con normas técnicas para el diseño de muros de mampostería (NTCM 2004). En estas normas se establecen los requisitos para el diseño de muros no reforzados, reforzados interiormente y confinados, entre otros. Los requisitos para muros confinados se establecen para muros construidos con piezas de concreto o arcilla. A su vez, en los Estados Unidos de América se cuenta con un reglamento para el diseño de muros de mampostería de CCA (ACI 530-13). En este reglamento sólo se consideran muros de CCA no reforzados y reforzados interiormente.

Con base en lo anterior se observa que no existen estudios experimentales sobre el comportamiento de muros confinados de CCA sujetos a cargas laterales. Por otro lado, se encontró que la reglamentación vigente mexicana y norteamericana, para muros de mampostería, no incluye requisitos explícitos para el diseño de muros confinados de CCA. Por lo tanto, se requieren estudios experimentales sobre el comportamiento de dichos muros. La información obtenida servirá en un futuro para el desarrollo de requisitos de diseño para estructuras a base de muros confinados de CCA.

1.2. Objetivo general

Estudiar el efecto de la relación de aspecto en la resistencia a cortante de muros confinados de CCA sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles.

1.3. Objetivo específicos

Los objetivos específicos del trabajo son:

-) Ensayar muros confinados de CCA con comportamiento dominado por cortante.
-) Proponer ecuaciones de diseño de resistencia a cortante de muros confinados de CCA.

1.4. Alcance

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación cuyo objetivo es evaluar el comportamiento de muros confinados de CCA sujetos a cargas laterales. Se consideraron en el proyecto un total de siete muros, cuatro con comportamiento dominado por cortante y tres por flexión. Los primeros dos muros de cortante se estudiaron en este trabajo y los otros dos en el trabajo de Chim (2017). Los muros con comportamiento por flexión se estudiaron por Ricalde (2017).

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1. Resistencia de muros

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 flexión, cortante, flexo-cortante y deslizamiento. Para un muro con altura (H), longitud (L) 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:

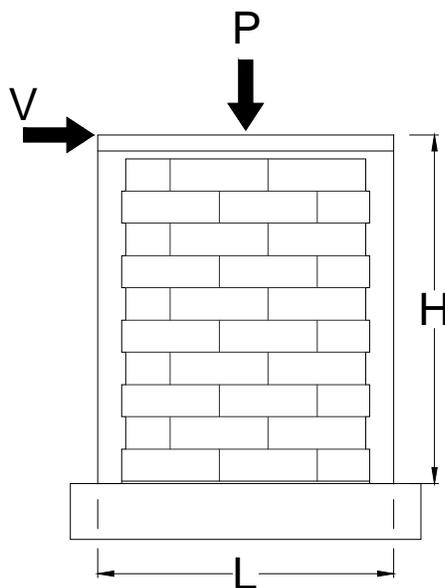


Figura 2.1 Muro confinado sujeto a carga axial y lateral

Resistencia a flexión. Está asociada con el aplastamiento del concreto en la zona de compresión o con la fractura del acero de refuerzo en tensión (Figura 2.2).

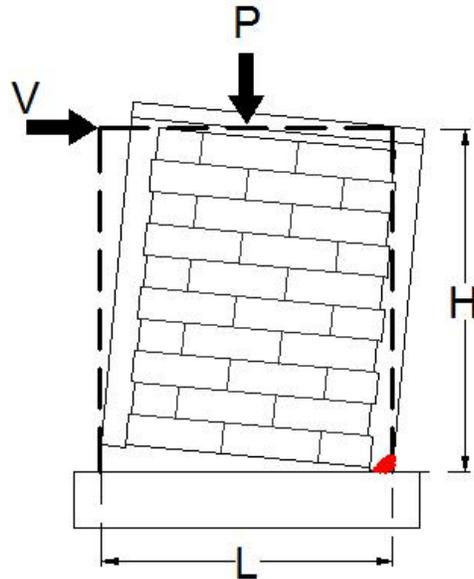


Figura 2.2 Falla por flexión de un muro confinado

La resistencia a flexión 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).

$$M_f = C \left(\frac{L - 1c}{2} \right) + T \left(\frac{L}{2} - r \right) \quad (2.1)$$

Donde

$$C = 0.85 f'_c 1 ct \quad (2.2)$$

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

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

En las ecuaciones anteriores, 1 es el parámetro que relaciona la profundidad del bloque equivalente de esfuerzos de compresión del concreto con el eje neutro, 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 2.3). Se presentan tres ecuaciones para determinar dicha resistencia.

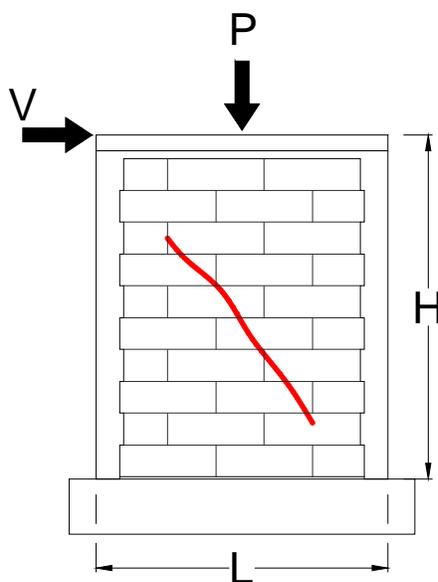


Figura 2.3 Grieta de cortante en un muro confinado

Para muros de CCA no reforzados y reforzados interiormente, la resistencia a cortante puede determinarse con la ecuación (2.6) (ACI 530-13). Esta ecuación se basa en la teoría de los esfuerzos principales.

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

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 $2.4 \sqrt{f_{CCA}}$. (Tanner 2003). Por tanto, la ecuación (2.6) puede reescribirse como se presenta en la ecuación (2.7).

$$V_{C1} = 0.395 L t f_{tCCA} \sqrt{1 + \frac{P}{f_{tCCA} L t}} \quad (2.7)$$

Por otro lado, para muros confinados construidos con piezas de concreto o arcilla, la resistencia a cortante puede determinarse con la ecuación (2.8) (NTCM, 2004). Esta ecuación se basa en la teoría de Mohr-Coulomb.

$$V_{C2} = F_R (0.5 v_m^* A_t + 0.3 P) \quad (2.8)$$

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.

Para muros confinados construidos con bloques huecos de concreto de tres celdas, la resistencia a cortante del muro puede determinarse con la ecuación (2.9) (Sosa 2013). Esta ecuación es una modificación a la ecuación (2.8) en la que se considera el efecto de la relación de aspecto.

$$V_{C3} = 0.46 v_m A_t + 0.3 P \quad (2.9)$$

En la ecuación anterior, v_m es el valor medio de la resistencia a compresión diagonal de la mampostería y γ es el inverso de la relación de aspecto del muro.

Resistencia a flexo-cortante. Esta resistencia está asociada con la formación de una grieta horizontal a una altura igual a longitud media del muro y su posterior propagación en forma diagonal (Figura 2.4).

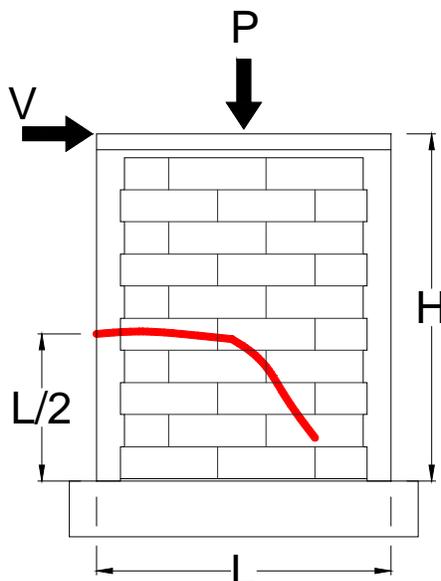


Figura 2.4 Grieta de flexo-cortante en un muro confinado

La carga lateral asociada a la resistencia a flexo-cortante (V_{fc}) puede determinarse con la ecuación (2.10). El primer término de la ecuación se relaciona con la carga requerida para formar la grieta horizontal en el castillo. El segundo 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.

$$V_{fc} = \frac{S_x \left(f_r + \frac{P}{L t} \right)}{H - \frac{L}{2}} + C_v \quad (2.10)$$

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 material. Para el caso de muros de concreto reforzado el valor de C_v puede determinarse con la ecuación (2.11) (ACI 318-14).

$$C_v = 0.16 \sqrt{f'_c} t d \quad (2.11)$$

En la ecuación anterior $0.16\sqrt{f'_c}$ es el 10% de la resistencia a tensión por flexión del concreto (ACI 318-14), y d es la distancia del centroide del acero de refuerzo en tensión a la fibra más lejana en compresión.

Resistencia al deslizamiento. Esta resistencia está asociada con el desplazamiento relativo del muro con respecto a su base (Figura 2.5).

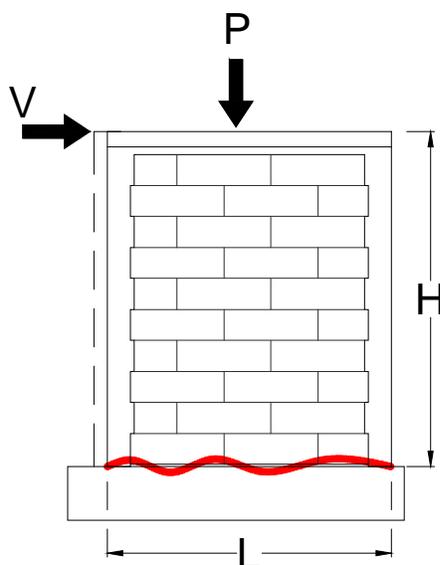


Figura 2.5 Desplazamiento como cuerpo rígido de un muro confinado

La carga lateral asociada a la resistencia al deslizamiento puede determinarse conservadoramente con la ecuación (2.12).

$$V_D = \mu \cdot P \quad (2.12)$$

Para el caso de una grieta horizontal en la base, μ es el coeficiente de fricción entre el CCA y el concreto en la base.

2.2. Estudios sobre muros de CCA

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 flexión fueron construidos a base de paneles horizontales y verticales con refuerzo interior. Se consideraron relaciones de aspecto entre 1.4 y 3.2, esfuerzos axiales de compresión entre 0.32 kg/cm^2 y 2.69 kg/cm^2 . Los muros con comportamiento dominado por cortante fueron construidos 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/cm^2 y 5.8 kg/cm^2 . Los autores concluyeron que el comportamiento de los muros dominados por flexión se caracterizó por grietas horizontales y grietas por flexo-cortante. La falla de los muros se asoció al aplastamiento del CCA en la zona de compresión. 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.

Tanner et al. (2005b) estudiaron el comportamiento por flexión de un edificio de dos niveles de CCA sujeto a cargas cíclicas reversibles. Las dimensiones en planta de edificio fueron de 6.1 m x 2.8 m (largo x ancho). La altura total fue de 5.1 m. El edificio consistió en dos muros paralelos de CCA por nivel, una losa de entrepiso y una losa de azotea. Los muros se construyeron a base de paneles verticales reforzados interiormente con acero vertical en los extremos. Las losas se construyeron utilizando paneles de entrepiso reforzados interiormente. El comportamiento de los muros fue dominado por flexión. Se observó inicialmente la formación de grietas horizontales en la base de los muros, posteriormente grietas verticales en la junta de los paneles verticales situados en los extremos de los muros, después se formaron grietas diagonales en los muros, luego se observó la fluencia del acero de refuerzo por flexión y finalmente se observó el deslizamiento de los muros con respecto su base. La falla

se asoció al excesivo agrietamiento de los muros de CCA y a la formación y propagación de una grieta vertical en la intersección de dos muros.

Varela et al. (2006) propusieron un método para determinar factores de reducción de fuerzas y de amplificación de desplazamiento para el diseño sísmico de estructuras de CCA. En este proceso iterativo se involucra el diseño de estructuras a base de muros reforzados interiormente, la selección y escalamiento de sismos representativos de zonas de Estados Unidos de América, la propuesta de modelos de histéresis para dichos muros y la evaluación de la respuesta sísmica mediante análisis no lineales. Los autores proponen un factor de reducción por ductilidad de 2 y un factor de sobrerresistencia de 1.5. Con base en estos valores se propone un factor de reducción de fuerzas sísmicas de 3 y un factor de amplificación de desplazamientos de 3 para el diseño de estructuras a base de muros de CCA.

Penna et al. (2008) ensayaron 14 muros de CCA sujetos a cargas 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 relación de aspecto de los muros varió entre 0.61 a 1.83. La carga axial varió entre 2.22 kg/cm² y 6.67 kg/cm². 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.

Tomazevic et al. (2011) ensayaron 10 muros de CCA y 3 edificios, a escala 1:4. Los muros se ensayaron bajo cargas cíclicas reversibles y los edificios en una mesa sísmica vibratoria. Los muros se construyeron con bloques solidos de CCA a escala 1:4 y mortero de pared delgada. Para los muros la variable de estudio fue el refuerzo en el muro. Se consideraron cuatro muros no reforzados y seis reforzados interiormente con acero vertical en los extremos. Los muros no reforzados tuvieron un comportamiento dominado por flexión. La falla estuvo asociada a un agrietamiento horizontal en la base del muro, y al aplastamiento de las piezas de CCA en la zona de compresión. Los muros reforzados interiormente tuvieron un comportamiento dominado por cortante. La falla se asoció al agrietamiento diagonal de los muros lo cual produjo la degradación de la rigidez. Los edificios se construyeron a base de muros de bloques solidos de CCA reforzados interiormente con acero vertical. Las variables de estudio fueron el número de niveles, la orientación de la excitación y el peso del edificio. Se consideraron edificios de 3 y 4 niveles, excitaciones en dirección ortogonal y paralela al eje de simetría, y pesos de 2799 kg a 4588 kg. Todos los edificios presentaron un comportamiento dominado por cortante. La falla estuvo asociada al excesivo daño en los muros del primer piso y su posterior colapso. Los autores concluyen que el uso del refuerzo interior incrementó la resistencia a cortante de los muros y aseguró la integridad de la estructura hasta el colapso.

Ravichandran et al. (2012) estudiaron el comportamiento de 1 muro diafragma de CCA sujeto a cargas cíclicas reversibles. El muro consistió en un marco de acero y un panel de mampostería de bloques solidos de CCA. Se utilizó mortero de pared delgada en la construcción del panel de mampostería. Primero se estudió el comportamiento del marco de acero sin el panel. Posteriormente, fue construido un panel de mampostería no reforzada de CCA en el interior del marco. El comportamiento del muro estuvo dominado por cortante. La falla se asoció al excesivo agrietamiento diagonal. Los autores concluyen que las recomendaciones de diseño para muros diafragma de CCA de la Masonry Standards Joint Committee (MSJC) dan una buena aproximación de la rigidez lateral. Con base en los resultados experimentales obtenidos, propusieron un

modelo analítico que representa el comportamiento histerético de los muros diafragma de CCA con un marco de acero.

Mandirola et al. (2012) ensayaron 3 muros de CCA sujetos a cargas cíclicas reversibles. Las variables de estudio fueron el tipo de refuerzo en el muro y el esfuerzo axial de compresión. Se consideraron dos muros con acero de refuerzo horizontal en las juntas y uno no reforzado. Los muros se construyeron utilizando bloques solidos de CCA y mortero de pared delgada. Se consideró una relación de aspecto de 0.8 y esfuerzos axiales de compresión entre 4.08 kg/cm^2 y 6.12 kg/cm^2 . El comportamiento de los muros fue dominado por cortante, se presentaron grietas diagonales en ambas direcciones. La falla se asoció al excesivo agrietamiento diagonal y al aplastamiento del CCA. Los autores concluyeron que el uso de refuerzo horizontal disminuye la extensión de las grietas, incrementa la capacidad de deformación del muro y la resistencia a cortante.

Yu et al. (2013) ensayaron 6 muros de CCA sujetos a cargas cíclicas reversibles. Se consideraron cinco muros con castillos en los extremos y un muro no reforzado. La variable de estudio fue el tipo de refuerzo en los muros. Los muros se construyeron con bloques solidos de CCA y mortero de pared delgada. Se consideró una relación de aspecto de 0.52 y un esfuerzo axial de compresión de 7.13 kg/cm^2 . Se empleó un castillo intermedio, y de una a dos cadenas intermedias. El comportamiento de los muros fue dominado por cortante, se presentaron grietas diagonales en ambos sentidos. Los autores concluyen que sin los castillos en los extremos el muro llega a su capacidad de carga inmediatamente después del agrietamiento. El uso de cadenas intermedias previene la ocurrencia y propagación de las grietas por lo que su carga de agrietamiento incrementa con el número cadenas. La ductilidad se mejora si se incrementa la altura de las cadenas intermedias y la cantidad de columnas. Los elementos confinantes mejoran el comportamiento por cortante de los muros de CCA.

Bose et al. (2014) evaluaron el comportamiento de un muro diafragma a escala 1:2.5 sujeto a cargas cíclicas reversibles. El marco del muro fue de concreto reforzado. El panel de mampostería se construyó con bloques sólidos de CCA y utilizando mortero pared delgada. Se consideró un esfuerzo axial de 0.066 kg/cm^2 . Primero se ensayó el marco de concreto sin el panel de CCA. Posteriormente se ensayó el marco de concreto con el panel. El comportamiento del muro fue dominado por cortante. El panel presentó agrietamiento diagonal en ambos sentidos. La falla final fue caracterizada por la formación de articulaciones plásticas en las columnas de concreto reforzado y al aplastamiento del panel en la zona de compresión. Los autores concluyen que a niveles de distorsión bajos el panel toma la mayor parte del esfuerzo cortante. Al incrementarse la distorsión hay una mejor distribución de cargas entre el panel y el marco, lo cual lleva a un mecanismo de fluencia temprano que genera una mejor disipación de energía.

2.3. Estudios sobre muros confinados

El comportamiento de los muros confinados sujetos a cargas laterales ha sido ampliamente estudiado. Existen numerosos estudios de muros confinados con comportamiento dominado por cortante construidos con piezas de arcilla y concreto. En dichos estudios se han considerado diferentes variables de estudio, como el tipo de piezas (San Bartolomé et al. 2010), la combinación de piezas de arcilla y concreto (Tena et al. 2009), los tipos y cantidades de acero de refuerzo en los elementos confinantes (Treviño et al. 2004; Quiroz et al. 2014), la cantidad y separación de acero de refuerzo vertical y horizontal en el panel de mampostería (Yoshimura et al. 2000), el esfuerzo axial de compresión (Urzúa et al. 2001; Raygoza 2012; Sosa 2013), la relación de aspecto (H/L) (San Bartolomé 1992; Pérez-Gavilán 2015; Raygoza 2012; Sosa 2013), la interacción entre el momento flexionante y la fuerza cortante (Pérez-Gavilán et al. 2011), las aberturas en los muros y el tipo de refuerzo en estas (Flores et al. 2004), la cantidad y distribución de elementos confinantes (Ventura 2015). Por otro lado, existen pocos estudios de muros confinados con comportamiento dominado por flexión construidos con piezas de concreto o arcilla. Las variables de estudio fueron la relación de aspecto (Prieto 2015), el esfuerzo axial de compresión (Gamboa

2016) y la cantidad y separación de acero de refuerzo vertical y horizontal en el panel de mampostería (Yoshimura et al. 2000).

2.4. Reglamentaciones existentes

En México se cuenta con las Normas Técnicas para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM, 2004). 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.

2.5. Conclusiones de la revisión de literatura

Con base en la revisión de la literatura presentada anteriormente se concluye que existen pocos estudios sobre el comportamiento de muros de CCA sujetos a cargas laterales. Dichos estudios se enfocaron principalmente en muros no reforzados, reforzados interiormente y diafragma, cuyo comportamiento puede ser diferente al de los muros confinados de CCA. Los muros estudiados tuvieron un comportamiento dominado por cortante y flexión. Para el primer caso, las variables estudiadas fueron la relación de aspecto, el esfuerzo axial de compresión y el tipo de pieza. Para el segundo caso, fueron la relación de aspecto, el esfuerzo axial de compresión y el tipo de pieza.

Existen numerosos estudios de muros confinados con comportamiento dominado por cortante sujetos a cargas laterales. Sin embargo, los muros estudiados se construyeron con piezas de concreto o arcilla. Entre las variables de estudio se

encuentran el tipo de pieza, los tipos y cantidades de acero de refuerzo, el esfuerzo axial de compresión y la relación de aspecto.

Existen pocos estudios de muros confinados con comportamiento dominado por flexión sujetos a cargas laterales. En dichos estudios los muros fueron construidos con piezas de concreto o arcilla. Las variables estudiadas fueron la relación de aspecto, el esfuerzo axial de compresión, la cantidad y separación de acero de refuerzo vertical y horizontal en el panel de mampostería.

En México se cuenta con normas técnicas para el diseño de muros de mampostería (NTCM, 2004). En estas normas se establecen los requisitos para el diseño de muros no reforzados, reforzados interiormente y confinados, entre otros. Los requisitos para muros confinados se establecen para muros construidos con piezas de concreto o arcilla. A su vez, en los Estados Unidos de América se cuenta con un reglamento para el diseño de muros de CCA (ACI 530-13). En este reglamento se consideran muros de CCA no reforzados y reforzados interiormente.

Con base en lo anterior se observa que no existen estudios sobre el comportamiento de muros confinados de CCA sujetos a cargas laterales. Adicionalmente, se encontró que la reglamentación vigente mexicana para muros de mampostería fue establecida para muros construidos con piezas de concreto o arcilla, no se incluyen requisitos explícitos para el diseño de muros confinados de CCA. La reglamentación existente para muros de CCA en los Estados Unidos de América no incluye requisitos para muros confinados. Por lo tanto, se requieren estudios experimentales sobre el comportamiento de dichos muros. La información obtenida servirá en un futuro para el desarrollo de requisitos de diseño para estructuras a base de muros confinados de CCA.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. Descripción general

Se enlistan las actividades realizadas en la metodología de este trabajo: (1) Determinación de las propiedades de los materiales. (2) Selección de variable de estudio. (3) Diseño de muros. (4) Construcción de muros. (5) Diseño del sistema de carga e instrumentación. (6) Ensaye de muros. Detalles de dichas actividades se presentan en las siguientes secciones.

3.2. Determinación de las propiedades de los materiales

El contenido de humedad y la resistencia a compresión axial del CCA se determinó con base en la norma ASTM C1693-11. Para el primer caso, se utilizaron tres cubos con dimensiones nominales de 10 cm por lado. Para el segundo caso, se ensayaron seis cubos de las mismas dimensiones. El ensaye a compresión axial de los cubos se realizó en una maquina universal SATEC con capacidad de 60 ton. Se validaron las cargas aplicadas utilizando una celda de carga conectada a un sistema de adquisición de datos independiente. La capacidad de la celda de carga fue de 22.70 ton. En la Figura 3.1 se presenta una vista del ensaye a compresión axial de un cubo de CCA.



Figura 3.1 Vista del ensaye a compresión axial de un cubo de CCA

La resistencia a tensión del CCA se determinó con base en la norma ASTM C1006-01. Se ensayaron seis bloques de CCA con dimensiones nominales de 15 cm x 20 cm x 61 cm (espesor x altura x longitud). El ensaye a tensión se realizó en una máquina universal SATEC con capacidad de 60 ton. Se validaron las cargas aplicadas utilizando una celda de carga conectada a un sistema de adquisición de datos independiente. La capacidad de la celda de carga fue de 4.5 ton. En la Figura 3.2 se presenta una vista del ensaye a tensión de un bloque de CCA.



Figura 3.2 Vista del ensaye a tensión de un bloque de CCA

La resistencia a compresión axial del concreto se determinó con base en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2002. Se elaboraron tres cilindros con dimensiones nominales de 15 x 30 cm (diámetro por altura) para la mezcla de concreto empleada en la construcción de los castillos de cada muro. Los ensayes de los cilindros se realizaron en una máquina universal SATEC con capacidad de 60 ton. En la Figura 3.3 se presenta una vista del ensaye a compresión axial de un cilindro de concreto.



Figura 3.3 Vista del ensaye a compresión axial de un cilindro de concreto

La resistencia de fluencia del acero de refuerzo se determinó con base en la norma NMX-C-407-ONNCCE-2001. Se ensayaron dos muestras del acero utilizado en la construcción de los castillos de los muros. Las muestras tuvieron una longitud total de 50 cm y una longitud calibrada de 20 cm. El ensaye se realizó en una máquina universal SATEC con capacidad de 60 ton. En la Figura 3.4 se presenta una vista del ensaye a tensión de una barra de acero.



Figura 3.4 Vista del ensaye a tensión de una barra de acero

3.3. Selección de variable de estudio

La variable de estudio fue la relación de aspecto (H/L). Con base en la revisión de la literatura se determinó el rango de relaciones de aspecto que han sido estudiadas, considerando únicamente muros confinados sin cadenas y castillos intermedios. Dicho rango de relaciones de aspecto varía de 0.5 a 3.0. Se propusieron cuatro relaciones de aspecto para cubrir el rango establecido. Las relaciones de aspecto finales se obtuvieron a través de un proceso iterativo. Se mantuvo constante la altura y se varió la longitud. Las relaciones de aspecto obtenidas fueron: 0.71, 1.30, 1.94 y 2.64. Para este trabajo se utilizaron las relaciones de aspecto de 0.71 y 1.30.

3.4. Diseño de muros confinados

Se consideran dos muros confinados de CCA a escala natural. El diseño de los muros se basó en un proceso iterativo en el cual se determinaron las resistencias por flexión, cortante, flexo-cortante y deslizamiento. 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 se determinó modificando las ecuaciones (2.7), (2.8) y (2.9). En la ecuación (2.7) se cambió el factor de 0.395 por 0.48 para considerar la resistencia a cortante promedio (Tanner et. al. 2005a). Dicha modificación se incluye en la ecuación (3.1).

$$V_{C1} = 0.48 L t f_{tCCA} \sqrt{1 + P / (f_{tCCA} L t)} \quad (3.1)$$

En la ecuación (2.8) se consideró un valor de F_R igual a 1. Se cambió la resistencia a compresión diagonal de diseño de la mampostería (v_m^*) por la resistencia a compresión diagonal promedio de la mampostería (v_m). Adicionalmente, v_m se expresó en función de la resistencia a tensión del CCA (f_{tCCA}). Las modificaciones se incluyen en la ecuación (3.2).

$$V_{C2} = 0.25 f_{tCCA} L t + 0.3 P \quad (3.2)$$

En la ecuación (2.9) se expresó v_m en función de f_{tCCA} . Dicha modificación se incluye en la ecuación (3.3).

$$V_{C3} = 0.23 f_{tCCA} L t + 0.3 P \quad (3.3)$$

La relación entre v_m y f_{tCCA} se determinó como sigue: por un lado, v_m se determina del ensaye de muretes (Figura 3.5). v_m está asociada al esfuerzo promedio sobre el área transversal de la diagonal del murete, ecuación (3.4).

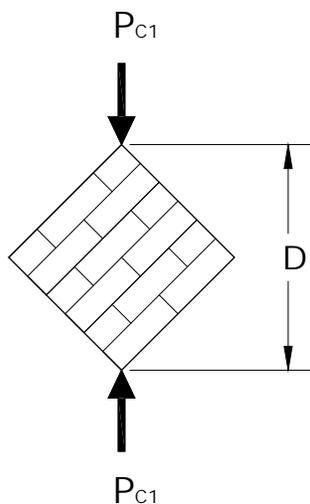


Figura 3.5 Esquema de ensaye a compresión diagonal de un murete

$$v_m = \frac{P_{C1}}{D t_1} \quad (3.4)$$

En la ecuación anterior, D es la longitud de la diagonal del murete, t_1 es el espesor del murete y P_{C1} la carga de compresión a la falla.

Por otra parte, f_{tCCA} se determina del ensaye a tensión de bloques (Figura 3.6). Esta resistencia está asociada al esfuerzo máximo de tensión en el área transversal de la pieza. La resistencia a tensión del CCA puede determinarse con la ecuación (3.5).

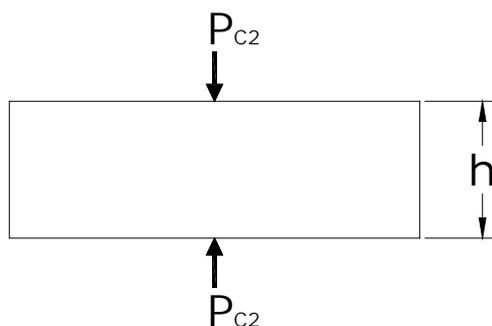


Figura 3.6 Esquema de ensaye a tensión de un bloque de CCA

$$f_{tCCA} = \frac{2 \cdot P_{C2}}{b \cdot h} \quad (3.5)$$

En la ecuación anterior, b es el espesor del bloque de CCA, h la altura del bloque y P_{C2} la carga de compresión a la cual falla el bloque.

Asumiendo que P_{C1} y P_{C2} son iguales, que el murete tendrá una falla en el material (Figura 3.7), y que D y h son de la misma longitud, se obtiene la ecuación (3.6).

$$v_m = \frac{1}{2} f_{tCCA} \quad (3.6)$$

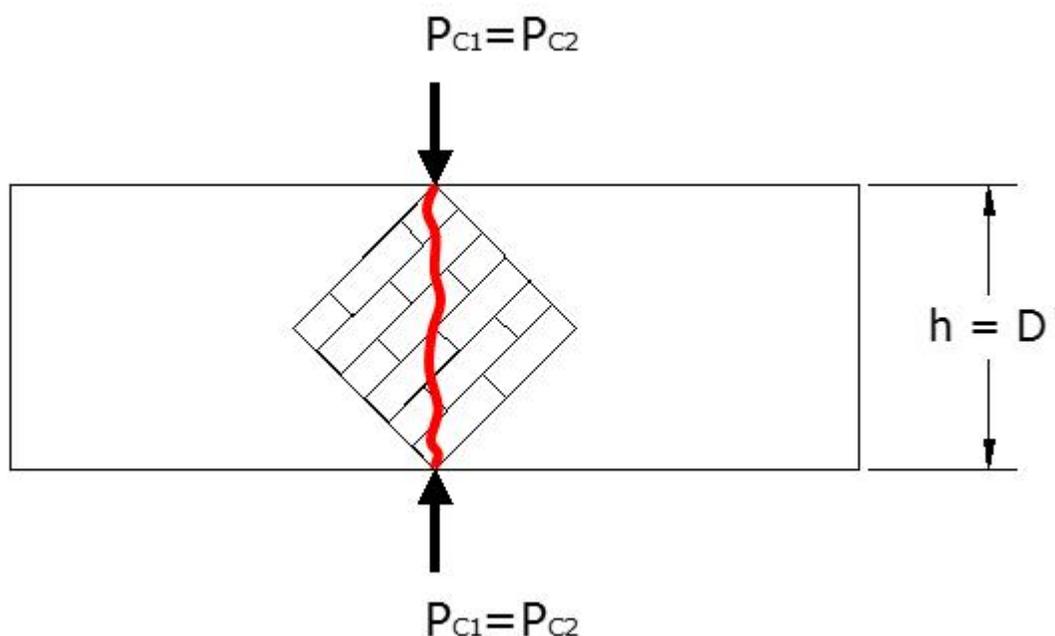


Figura 3.7 Hipótesis empleada para obtener la relación entre v_m y f_{tCCA}

La relación entre v_m y f_{tCCA} (ecuación (3.6)) se validó utilizando datos de ensayos a compresión diagonal de muretes construidos con piezas de CCA clase 4 (Hernández 2015). De dichos ensayos se obtuvo un valor promedio de v_m de 6.06 kg/cm^2 . De los ensayos a tensión de piezas de CCA clase 4, realizados en este trabajo, se obtuvo un valor promedio de f_{tCCA} de 3.88 kg/cm^2 . La relación entre los promedios de v_m y f_{tCCA} fue igual a $\frac{1}{2}$.

La resistencia a flexo-cortante se determinó utilizando la ecuación (2.10). Se consideraron las propiedades de la sección transformada a concreto (Modulo de sección y área), f_r se consideró igual a $2.374 \sqrt{f'_c}$ (Moreno et. al. 2015). El término C_v se determinó como se presenta en la ecuación (3.7).

$$C_v = 0.1 f_r t L \quad (3.7)$$

La resistencia al deslizamiento se determinó utilizando la ecuación (2.12). Se consideró un coeficiente de fricción entre el CCA y el concreto (μ) igual a uno.

Para el diseño de los muros Mc1 y Mc2 se utilizaron los siguientes parámetros:

-) Altura del muro al punto de aplicación de carga lateral (H) de 240 cm
-) Longitud de muros (L) de 336 cm (Mc1) y 185 cm (Mc2)
-) Espesor de muro (t) de 15 cm
-) Sección transversal de castillos y cadenas de 15 cm x 15 cm
-) Resistencia a compresión axial promedio del CCA (f_{CCA}) de 44.13 kg/cm²
-) Resistencia a tensión promedio del CCA (f_{tCCA}) de 3.88 kg/cm²
-) Resistencia a compresión axial de diseño del concreto (f'_c) para castillos y cadenas de 175 kg/cm²
-) 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 y cadenas consistente en estribos de alambra de diámetro nominal de 1/4" espaciados a cada 20 cm, con un esfuerzo nominal de fluencia de 2530 kg/cm²
-) Esfuerzo axial de compresión de 3 kg/cm². Este esfuerzo se obtuvo con base en un análisis de cargas gravitacionales en edificios habitacionales construidos con muros y losas de CCA de 2 niveles.

Se determinó la resistencia a flexión (ecuación (2.5)), cortante (ecuaciones ((3.1), (3.2) y (3.3)), flexo-cortante (ecuación (2.10)) y deslizamiento (ecuación (2.12)) en función del esfuerzo axial de compresión (). En la Figura 3.8 y Figura 3.9 se presentan las curvas resistencia-esfuerzo axial de compresión obtenidas para los muros. En dichas figuras se representan con una línea horizontal el esfuerzo axial de 3 kg/cm². En la Figura 3.10 se presenta la geometría de los muros Mc1 y Mc2, respectivamente.

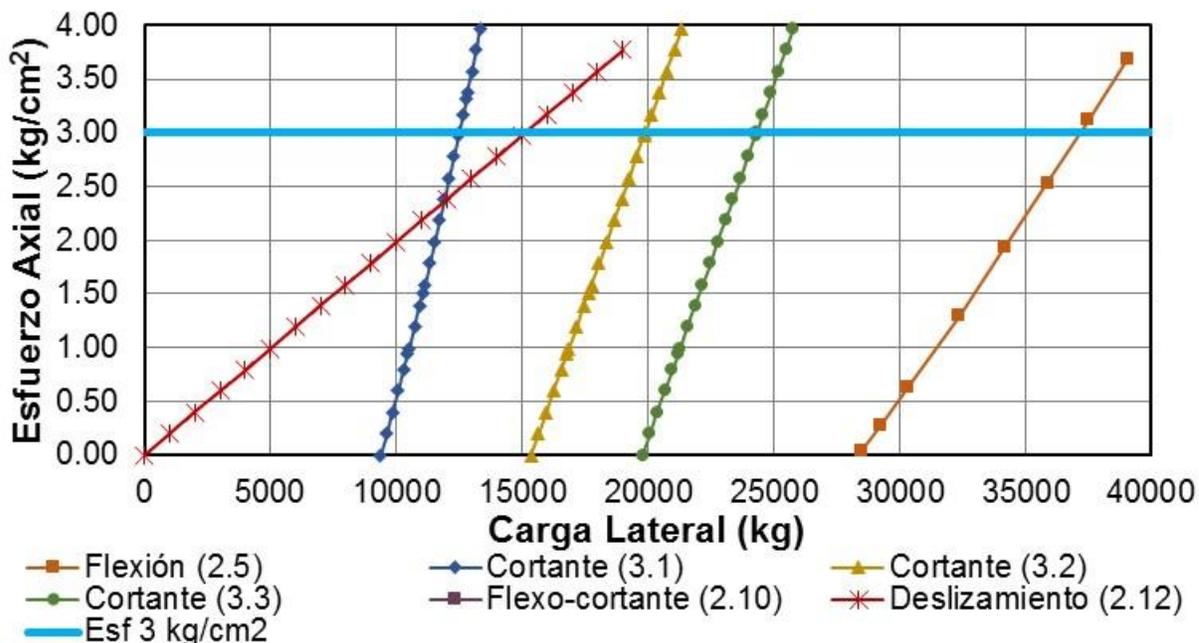


Figura 3.8 Curvas resistencia-esfuerzo axial de compresión del muro Mc1

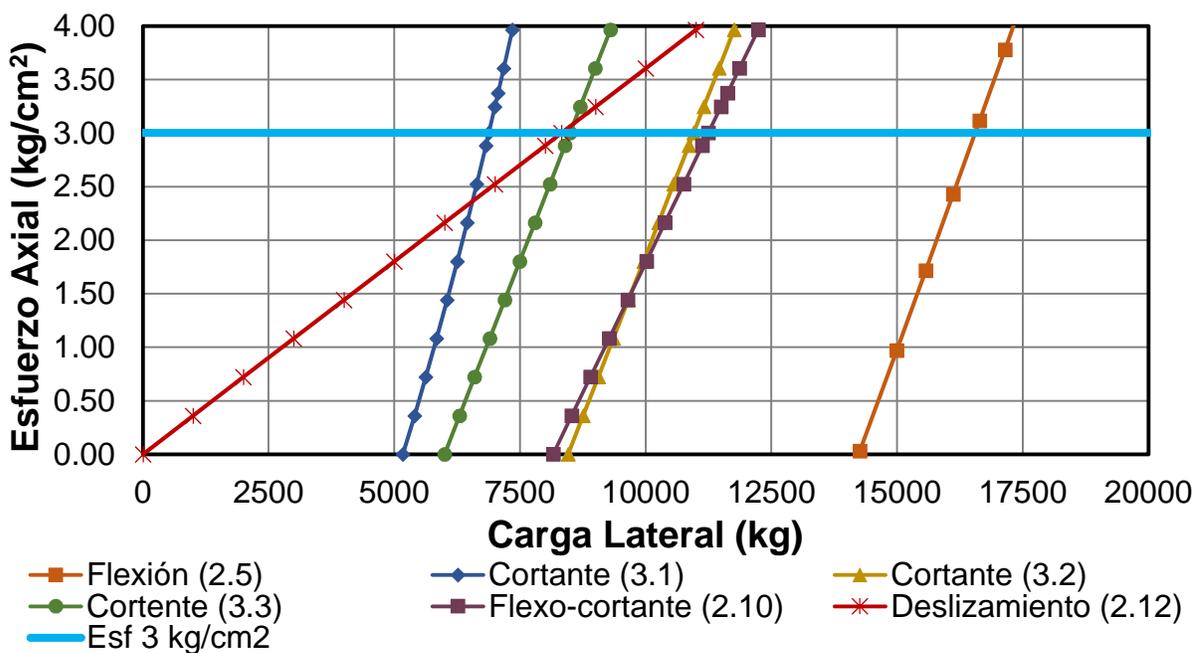


Figura 3.9 Curvas resistencia-esfuerzo axial de compresión del muro Mc2

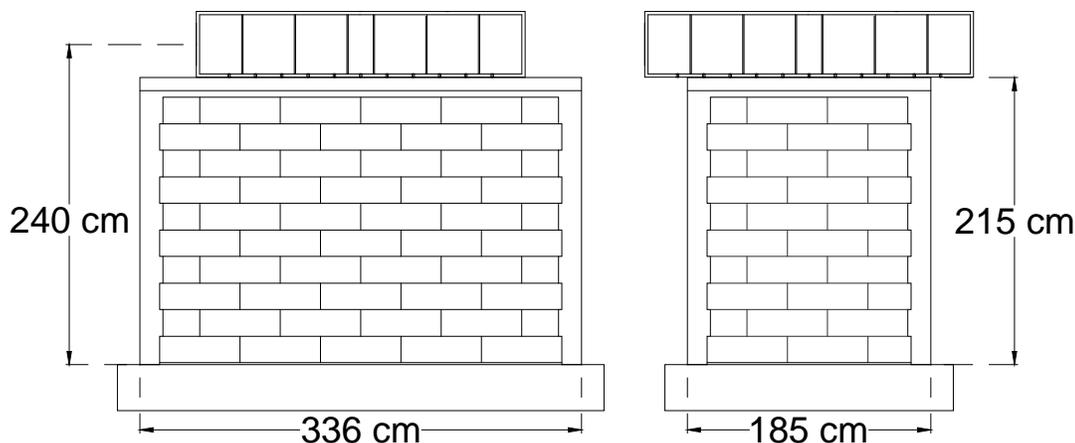


Figura 3.10 Geometría de los muros Mc1 y Mc2

3.5. Construcción de muros

Los muros fueron construidos a plomo y nivel por trabajadores experimentados de la región. Primero se construyó la base de concreto reforzado del muro (Figura 3.11). Posteriormente se colocó la primera hilada de bloques usando dos tipos de mortero. En la junta horizontal se utilizó un mortero en proporción por volumen 1:3 (cemento portland: arena) y en las verticales, mortero de pared delgada (Figura 3.12). Se esperó 24 horas para mantener la nivelación y el plomo de la primera hilada. Se colocaron las hiladas subsecuentes hasta la mitad de la altura del muro. La colocación de los bloques se realizó traslapando su longitud media y con un dentado de 2.5 cm por lado en cada hilada par. Se construyeron los castillos hasta la altura media (Figura 3.13). Se repitió el mismo proceso para la segunda mitad superior del muro. Debido a este proceso constructivo, se formó una junta constructiva en los castillos. Finalmente, se construyó la cadena superior del muro (Figura 3.14). En la Figura 3.15 se presenta una vista de los muros terminados.



Figura 3.11 Base del muro



Figura 3.12 Primera hilada de bloques de CCA



Figura 3.13 Primera media altura del muro

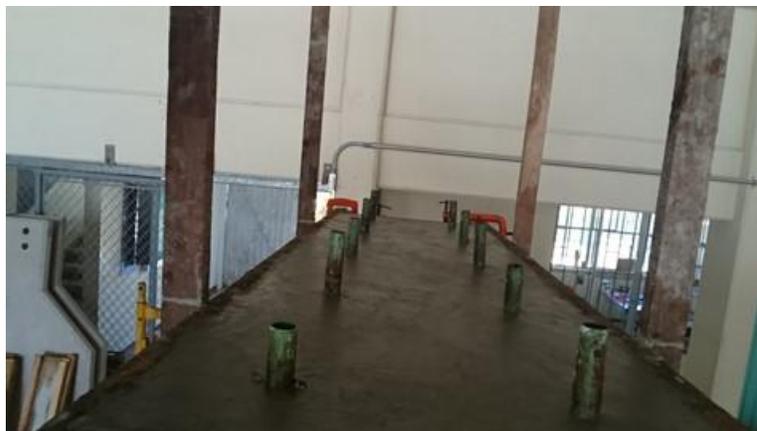
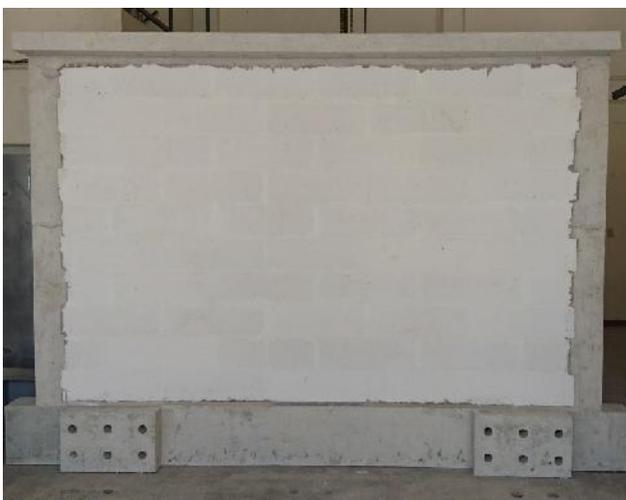


Figura 3.14 Cadena superior del muro



Mc1



Mc2

Figura 3.15 Vista final de los muros confinados de CCA

3.6. Diseño del sistema de carga e instrumentación

El sistema de carga se dividió en dos partes: un sistema de carga lateral y un sistema de carga axial. El primero consistió de dos marcos de reacción de acero conectados en paralelo, una viga de aplicación de carga de acero y un actuador hidráulico de doble vía con capacidad de 32 ton a tensión y a compresión (Figura 3.16).

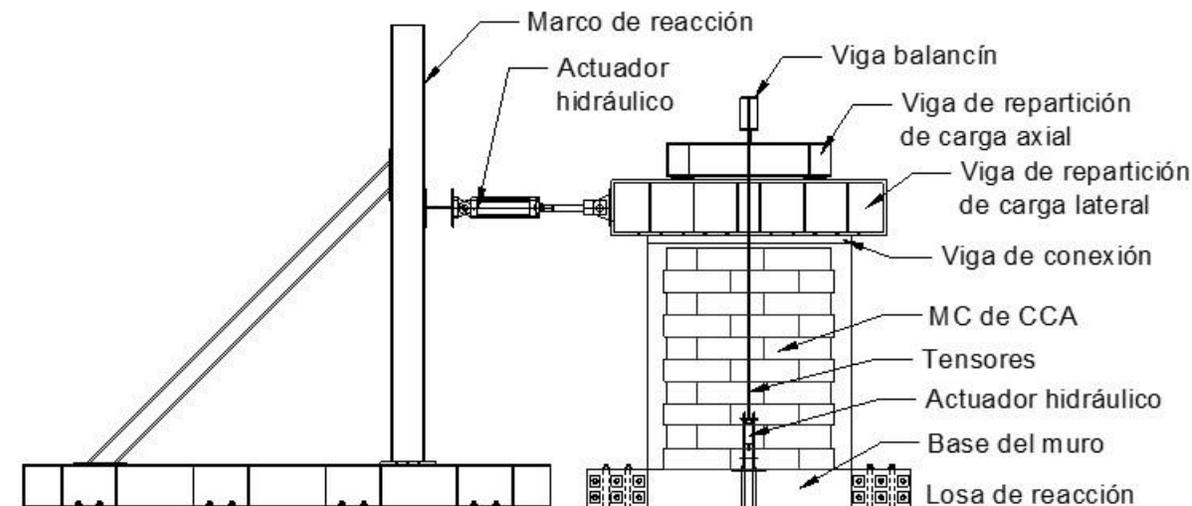


Figura 3.16 Esquema general del sistema de carga lateral

El sistema de carga axial consistió de una viga balancín, una viga de repartición de carga axial, dos tensores y un actuador hidráulico con capacidad de 33 Ton (Figura 3.17). Para mantener constante la carga axial se utilizó un servo control mecánico.

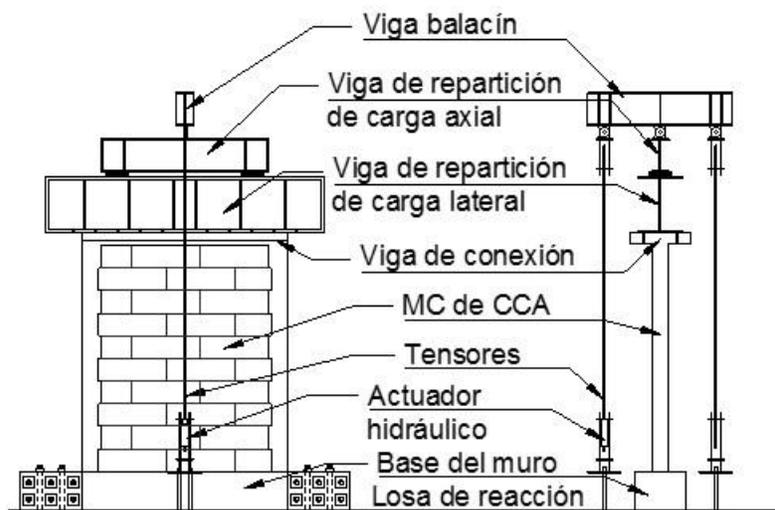


Figura 3.17 Esquema general del sistema de carga axial

Los desplazamientos horizontales del muro se midieron utilizando potenciómetros de polea (PP) de 5 y 13 cm de carrera. Se colocaron dos en el punto de aplicación de carga (PP1 y PP2) y uno al centro de la cadena superior del muro (PP3). Los desplazamientos verticales del muro se midieron utilizando PP de 5 cm. Se colocó uno en cada castillo (PP4 y PP5). El acortamiento y alargamiento de la diagonal del

muro se midió utilizando PP de 5 cm (PP6 y PP7). Los desplazamientos relativos se midieron utilizando potenciómetros lineales de vástago (PL) de 1.5 cm. Se colocaron cinco: entre la viga repartición de carga lateral y la cadena superior del muro (PL1), otro entre el muro y la base del muro (PL3), y tres entre la base del muro y la losa de reacción (PL2, PL4 y PL5). La carga axial aplicada al muro se midió utilizando celdas de carga tipo dona (CCD) con capacidad de 22.7 ton. Se colocaron dos CCD, una en cada extremo inferior de los tensores. Las cargas laterales aplicadas al muro se midieron utilizando una celda de carga tipo pasador (CCP) con capacidad de 40.86 ton. La celda se colocó en el extremo móvil del actuador hidráulico utilizado para aplicar la carga lateral. Adicionalmente, se midió la presión en los actuadores hidráulicos utilizando transductores de presión con capacidad de 350 y 700 kg/cm². Se colocaron dos transductores de presión en las entradas del actuador hidráulico de carga lateral y uno en la entrada del actuador hidráulico de carga axial. En la Figura 3.18 se presenta el esquema general de la instrumentación.

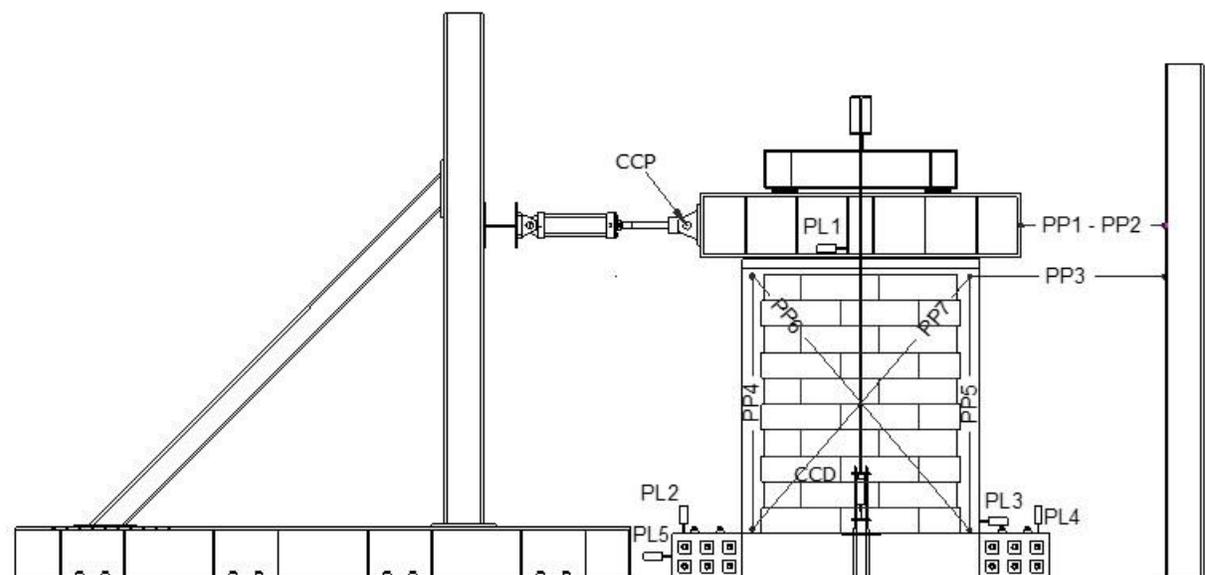
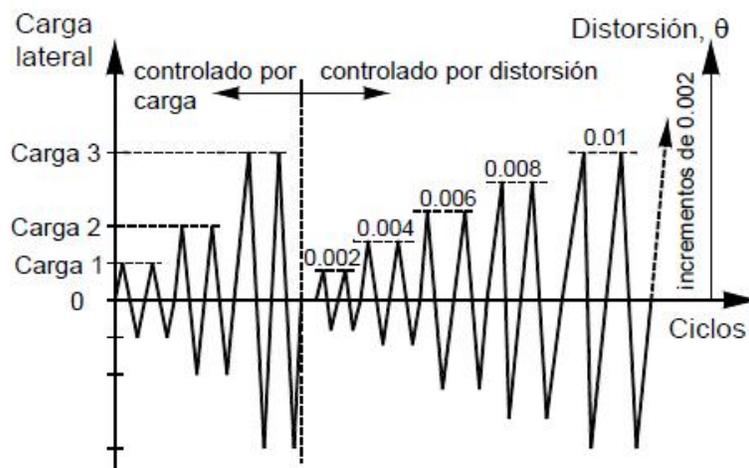


Figura 3.18 Esquema general del sistema de instrumentación

3.7. Ensayo de muros

El ensayo de los muros se realizó con base en el protocolo de carga establecido en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (Figura 3.19) (NTCM, 2004). Los primeros seis ciclos tuvieron un control

por carga y los posteriores por distorsión. En la Figura 3.19, la carga 3 corresponde a la carga de agrietamiento. Los ciclos posteriores a la carga 3 fueron controlados por incrementos de distorsión de 0.002.



Carga 1 = 0.25 veces la carga calculada de agrietamiento o fluencia
 Carga 2 = 0.5 veces la carga calculada de agrietamiento o fluencia
 Carga 3 = carga de agrietamiento o primera fluencia (experimental)

Figura 3.19 Protocolo de carga

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. Propiedades mecánicas de los materiales

En la Tabla 4.1 se presenta el contenido de humedad del CCA. La humedad promedio fue de 8.42 % con un coeficiente de variación (CV) del 0.17. El promedio de la humedad se encontró entre el 5% y 15% especificado en la ASTM C1693-11.

Tabla 4.1 Contenido de humedad del CCA

Cubo	Humedad (%)
R3	6.79
M3	9.48
A3	9.00
Promedio	8.42
CV	0.17

En la Tabla 4.2 se presenta la resistencia a compresión axial (f_{CCA}) del CCA. La resistencia promedio fue de 44.13 kg/cm² con un CV del 0.11. El promedio de la resistencia fue mayor que los 40 kg/cm² especificados en la ASTM C1693-11 para CCA clase 4. En la Figura 4.1 se presentan las fallas observadas en los cubos de CCA ensayados.

Tabla 4.2 Resistencia a compresión axial del CCA

Cubo	f_{CCA} (kg/cm²)
R2	45.82
M2	46.33
A2	51.42
R4	41.47
M4	37.13
A4	42.63
Promedio	44.13
CV	0.11

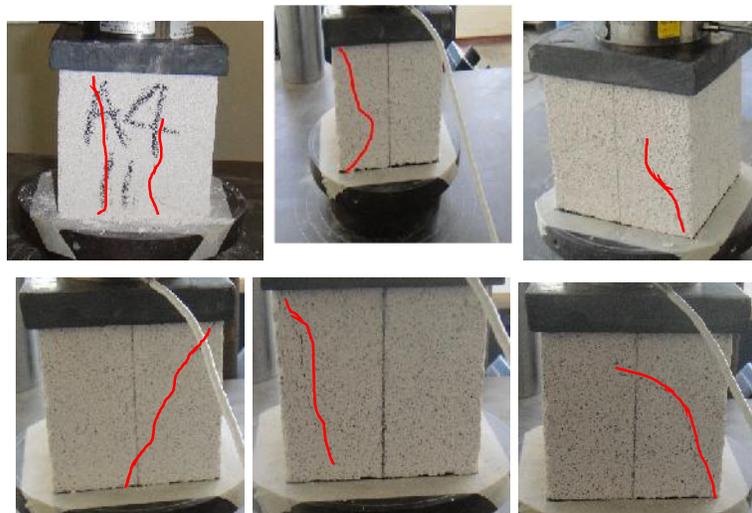


Figura 4.1 Fallas observadas en los cubos de CCA

En la Tabla 4.3 se presenta la resistencia a tensión del CCA (f_{tCCA}). La resistencia promedio fue de 3.88 kg/cm^2 con un CV del 0.08. En la Figura 4.2 se presenta la falla típica observada en los bloques de CCA.

Tabla 4.3 Resistencia a tensión del CCA

Bloque	f_{tCCA} kg/cm²
B1	3.62
B2	3.86
B3	3.61
B4	4.25
B5	3.69
B6	4.23
Promedio	3.88
CV	0.08



Figura 4.2 Falla típica observada en el bloque de CCA.

En la Tabla 4.4 se presenta la resistencia compresión axial del concreto (f_c) de los castillos de los muros Mc1 y Mc2. Las resistencias promedio fueron de 181 y 196 kg/cm^2 con CV de 0.02 y 0.06, respectivamente.

Tabla 4.4 Resistencia a compresión axial del concreto de muros Mc1 y Mc2

Cilindro	f_c (kg/cm^2)	
	Mc1	Mc2
C-1	184	200
C-2	181	184
C-3	178	205
Promedio	181	196
C.V.	0.02	0.06

En la Tabla 4.5 se presenta la resistencia de fluencia del acero de refuerzo (f_y). La resistencia promedio fue de 4545 kg/cm^2 con un CV de 0.05.

Tabla 4.5 Resistencia de fluencia del acero de refuerzo

Muestra	f_y (kg/cm^2)
1	4690
2	4400
Promedio	4545
CV	0.05

4.2. Ensaye de muros

En el ensaye del muro Mc1 se aplicaron 14 ciclos de carga lateral. El esfuerzo axial de compresión aplicado durante el ensaye fue de 3.30 kg/cm^2 . El primer evento observado fue la formación de una grieta horizontal entre la primera hilada de bloques de CCA y la base de concreto, junto con grietas horizontales en la parte inferior de los castillos y grietas diagonales en las esquinas inferiores del muro (Figura 4.3). Posteriormente se formaron nuevas grietas horizontales en la parte superior de los castillos y grietas diagonales en el muro (Figura 4.4). Se observó la propagación de las grietas diagonales existentes y la formación de nuevas grietas diagonales principalmente en la parte central y superior del muro (Figura 4.5). Finalmente, se observó la propagación de las grietas diagonales dentro de la parte inferior y superior de los castillos, lo cual produjo la falla del muro (Figura 4.6). En la Figura 4.7 se presenta el patrón de agrietamiento final del muro Mc1 donde se observa el tradicional patrón en forma de "X". Las grietas en negro corresponden a los ciclos de carga positivos y las grietas en roja a los ciclos negativos. La curva carga-desplazamiento del muro Mc1 se presenta en la Figura 4.8. La carga se refiere a la carga lateral aplicada en el muro (CCP) y el desplazamiento al medido en el punto de aplicación de dicha carga (PP1 y PP2).

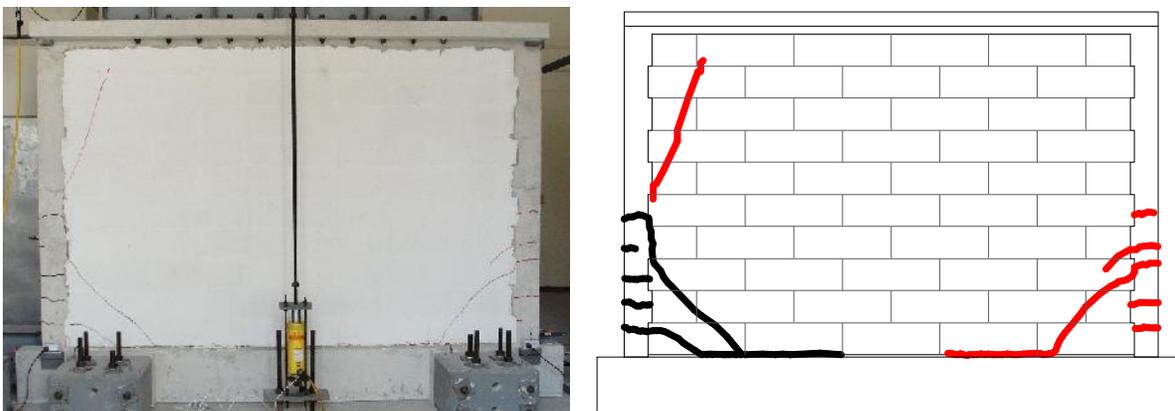


Figura 4.3 Agrietamiento horizontal y diagonal en las esquinas inferiores del muro Mc1

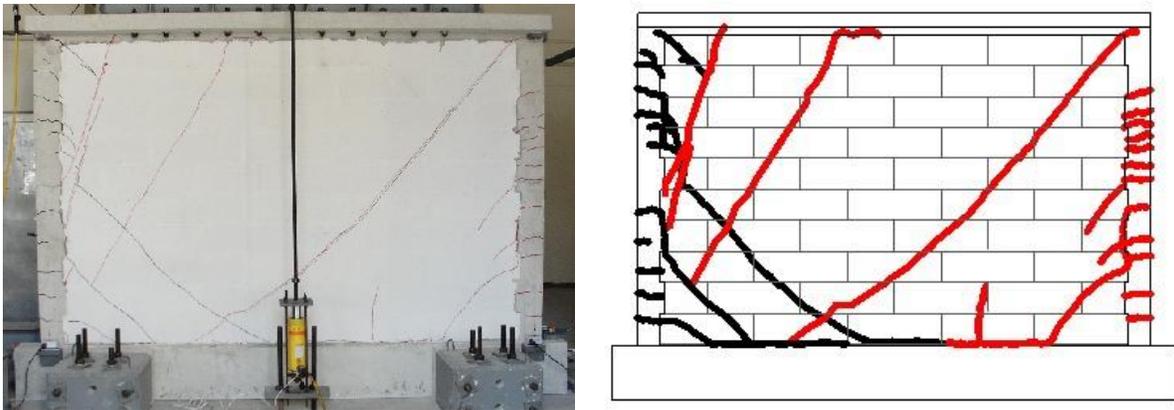


Figura 4.4 Agrietamiento diagonal del muro Mc1



Figura 4.5 Grietas diagonales en la parte central y superior del muro Mc1



Figura 4.6 Grietas diagonales en la parte inferior y superior de los castillos del muro Mc1

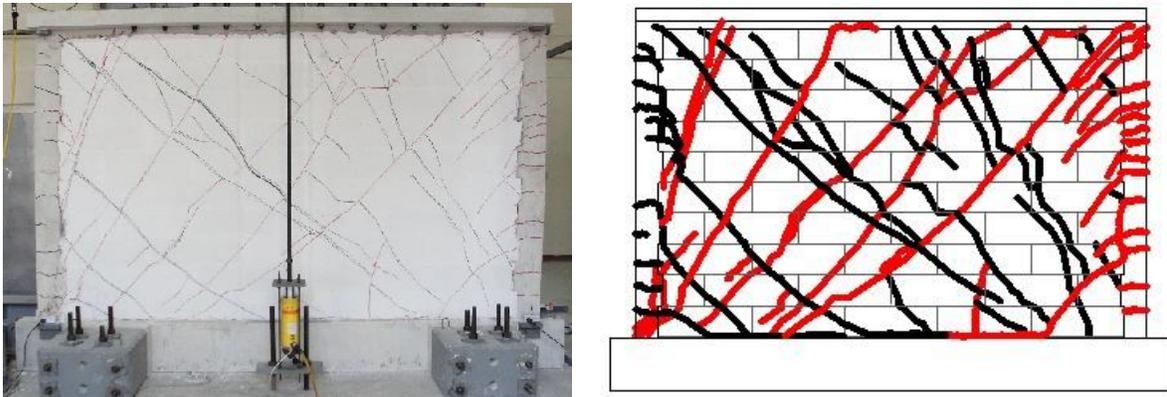


Figura 4.7 Patrón de agrietamiento final del muro Mc1

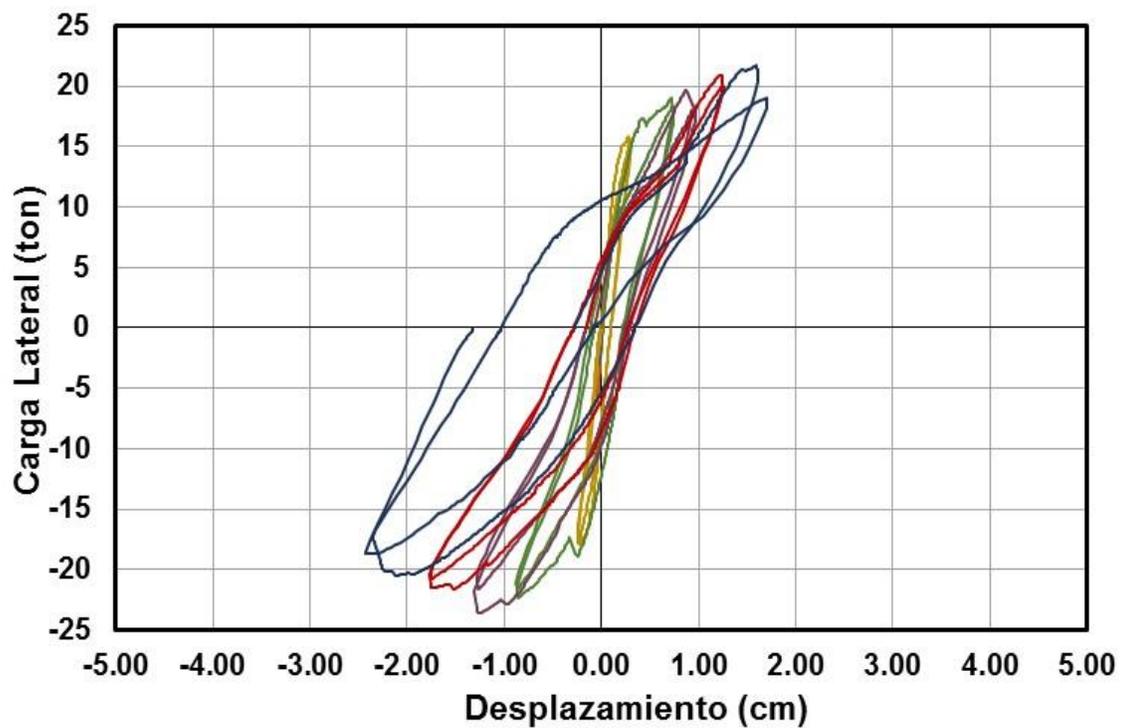


Figura 4.8 Curva carga lateral-desplazamiento del muro Mc1

En la Tabla 4.6 se presentan la carga de agrietamiento por flexión, carga de agrietamiento por cortante, carga máxima y carga última, con sus respectivos desplazamientos observados durante el ensaye del muro Mc1.

Tabla 4.6 Resumen de cargas y desplazamientos registrados para cada evento durante el ensaye del muro Mc1

Evento	Sentido	Ciclo	Carga (kg)	Desplazamiento (cm)	
Agrietamiento por flexión	Positivo	5	15816	0.28	Figura 4.3
	Negativo	5	17924	0.23	
Agrietamiento por cortante	Negativo	7	18869	0.24	Figura 4.4
Carga máxima	Positivo	13	21730	1.60	Figura 4.5
	Negativo	9	23621	1.24	
Carga última	Positivo	14	19001	1.70	Figura 4.7
	Negativo	14	18738	2.42	

En el ensaye del muro Mc2 se aplicaron 13 ciclos de carga lateral. El esfuerzo axial de compresión aplicado durante el ensaye fue de 3.33 kg/cm^2 . El primer evento observado fue la formación de grietas por flexo-cortante en ambos lados del muro (Figura 4.9). La parte diagonal se formó al mismo tiempo que la horizontal a una altura de 110 cm desde la base del muro. Posteriormente se formaron grietas diagonales en la parte central del muro (Figura 4.10). Se observó la propagación de las grietas diagonales existentes en la parte central del muro y la formación de nuevas grietas diagonales en el muro (Figura 4.11). Finalmente, se observó la propagación de las grietas diagonales dentro de la parte inferior y superior de los castillos, lo cual produjo la falla del muro (Figura 4.12). En la Figura 4.13 se presenta el patrón de agrietamiento final del muro Mc2 donde se observa de nuevo el tradicional patrón en forma de "X". La curva carga-desplazamiento del muro Mc2 se presenta en la Figura 4.14.

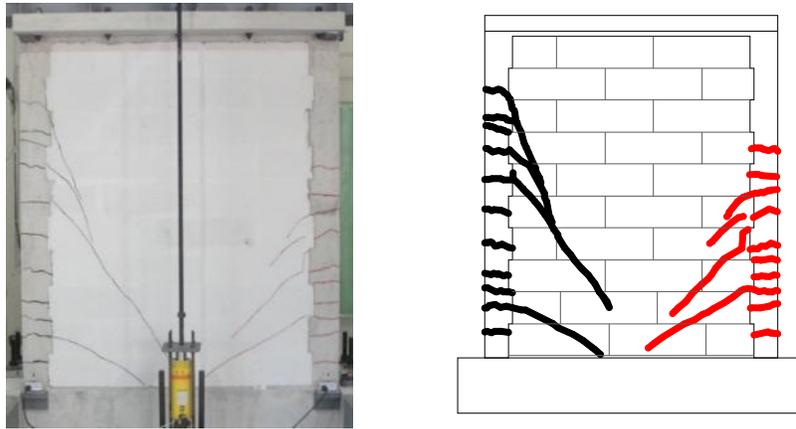


Figura 4.9 Grietas por flexo-cortante en ambos lados del muro Mc2

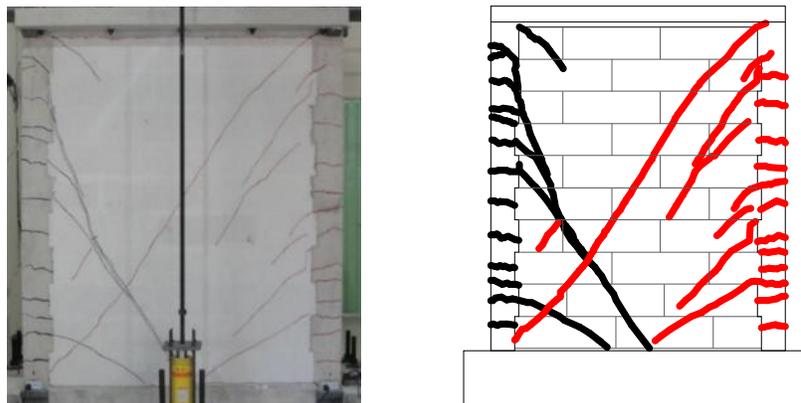


Figura 4.10 Agrietamiento diagonal del muro Mc2



Figura 4.11 Agrietamiento diagonal en la parte central del muro Mc2

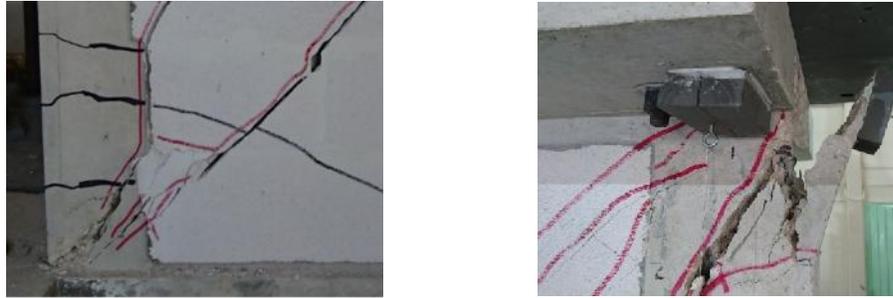


Figura 4.12 Agrietamiento diagonal en las esquinas inferior y superior de los castillos del muro Mc2



Figura 4.13 Patrón de agrietamiento final del muro Mc2

En la Tabla 4.7 se presentan la carga de agrietamiento por flexo-cortante, carga de agrietamiento por cortante, carga máxima y carga última, con sus respectivos desplazamientos observados durante el ensaye del muro Mc2.

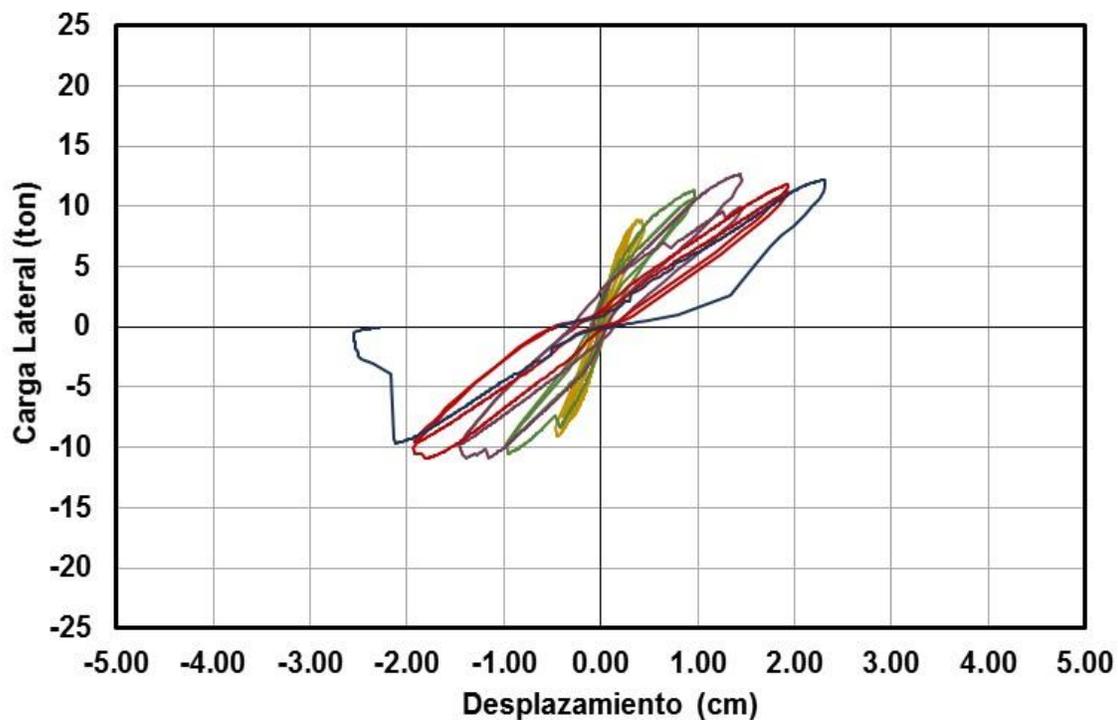


Figura 4.14 Curva carga lateral-desplazamiento del muro Mc2

Tabla 4.7 Resumen de cargas y desplazamientos registrados para cada evento durante el ensaye del muro Mc2

Evento	Sentido	Ciclo	Carga (kg)	Desplazamiento (cm)	
Agrietamiento por flexo-cortante	Positivo	5	8836	0.41	Figura 4.9
	Negativo	5	9069	0.45	
Agrietamiento por cortante	Negativo	7	8356	0.42	Figura 4.10
Carga máxima	Positivo	9	12685	1.44	Figura 4.11
	Negativo	9	10885	1.15	
Carga última	Positivo	13	12232	2.31	Figura 4.13
	Negativo	13	9621	2.13	

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Resistencia a cortante diagonal

Para estudiar el efecto de la relación de aspecto en la resistencia a cortante, se consideraron los muros Mc1 y Mc2 ensayados en este trabajo, junto con los muros Mc3 y Mc4 ensayados por Chim (2017). En la Tabla 5.1 se presentan las relaciones de aspecto (H/L) y los esfuerzos axiales de compresión () aplicados en dichos muros. En la Tabla 5.1 se presentan también las cargas laterales (V_c) asociadas a los primeros agrietamientos diagonales. Estas cargas se asocian con la resistencia a cortante diagonal de los muros. Los patrones de agrietamiento correspondientes a las resistencias a cortante de los muros se presentan en la Figura 5.1. En la Tabla 5.1 se observa que, conforme la relación de aspecto aumenta, la resistencia a cortante de los muros disminuye.

Tabla 5.1 Carga lateral asociada a la resistencia a cortante diagonal

Muro	H/L	\uparrow (kg/cm ²)	V_c (kg)
Mc1	0.71	3.30	18869
Mc2	1.30	3.33	8356
Mc3	1.94	3.35	5073
Mc4	2.64	3.74	3173

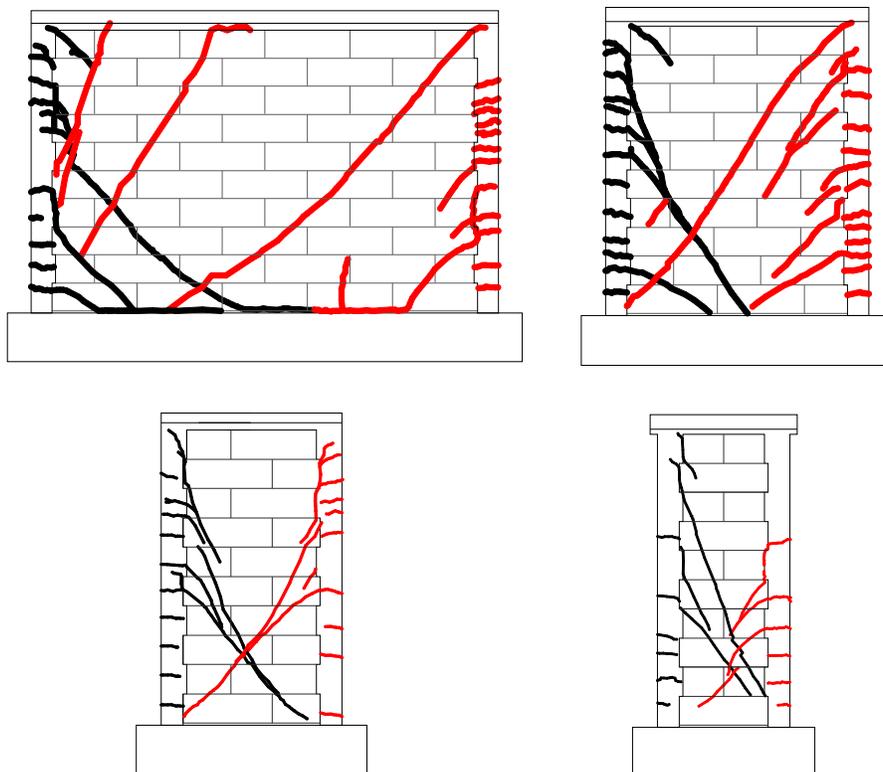


Figura 5.1 Patrones de agrietamiento asociados a la resistencia a cortante diagonal

En la Figura 5.2, 5.3 y 5.4 se presenta la resistencia a cortante experimental normalizada en función de la relación de aspecto de los muros (H/L). En el primer caso, la resistencia se normaliza con respecto a la ecuación (3.1) sin considerar el coeficiente de 0.48. En el segundo caso, se normaliza con respecto a la ecuación (3.2) sin considerar el coeficiente de 0.25. En el tercer caso, se normaliza como en el caso anterior, pero restando la contribución de la carga axial ($0.3P$) en el numerador. En dichas figuras se observa que la resistencia a cortante puede aproximarse linealmente con respecto a la relación de aspecto. Por tal motivo, se realizaron regresiones lineales utilizando el método de mínimos cuadrados de donde se obtuvieron las ecuaciones (5.1), (5.2) y (5.3) para determinar la resistencia a cortante de los muros. En la Figura 5.2, 5.3 y 5.4 se observa que el coeficiente de correlación R^2 es 0.95, 0.95 y 0.96, respectivamente.

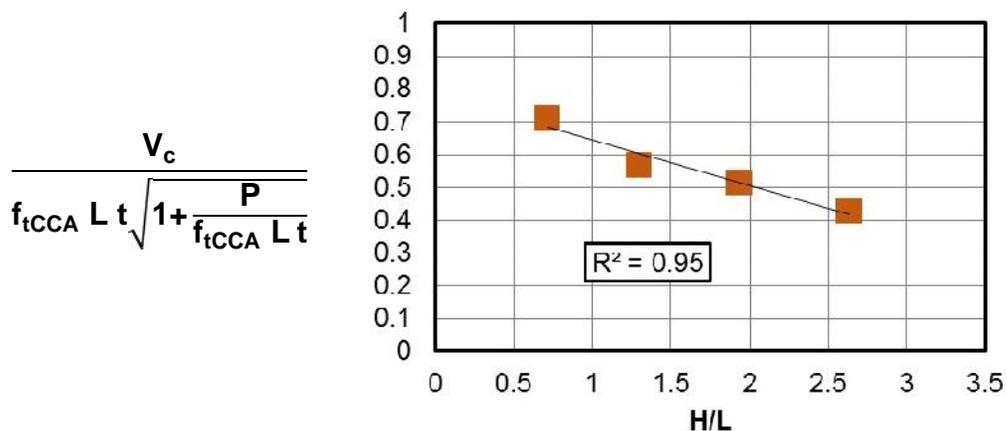


Figura 5.2 Resistencia a cortante normalizada con respecto a la ecuación (3.1)

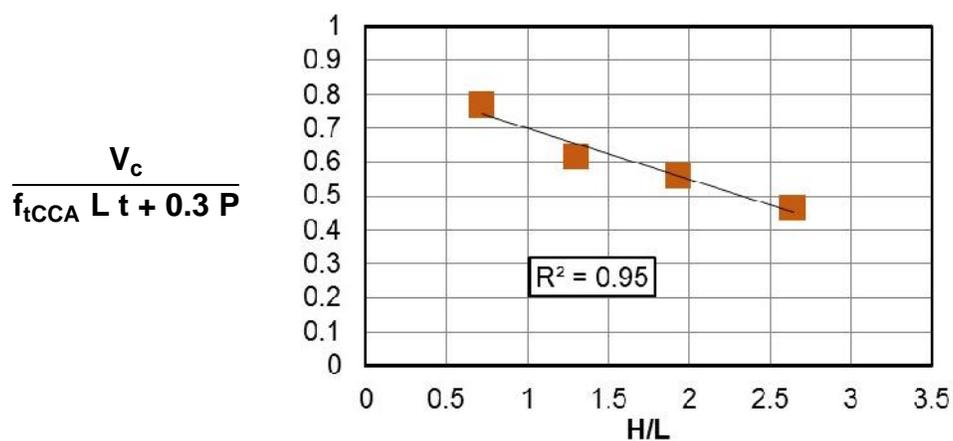


Figura 5.3 Resistencia a cortante normalizada con respecto a la ecuación (3.2)

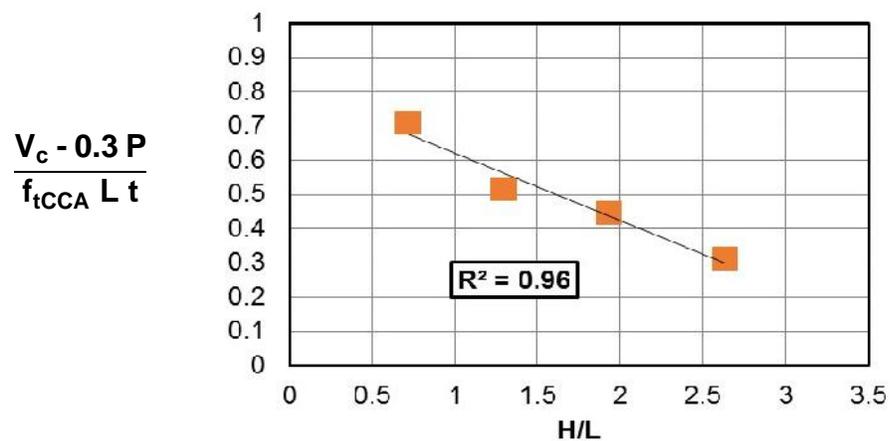


Figura 5.4 Resistencia a cortante normalizada con respecto a la ecuación (3.2) modificada

$$V_{cCCA1} = \left(0.78 - 0.14 \frac{H}{L}\right) f_{tCCA} L t \sqrt{1 + \frac{P}{f_{tCCA} L t}} \quad (5.1)$$

$$V_{cCCA2} = \left(0.85 - 0.15 \frac{H}{L}\right) (f_{tCCA} L t + 0.3 P) \quad (5.2)$$

$$V_{cCCA3} = \left(0.82 - 0.20 \frac{H}{L}\right) f_{tCCA} L t + 0.3 P \quad (5.3)$$

En la Tabla 5.2 se comparan las resistencias a cortante experimentales con las correspondientes analíticas obtenidas con las ecuaciones (5.1), (5.2) y (5.3). Se observa que, la relación entre la resistencia analítica y experimental tienen una diferencia no mayor al 6 %. Por otra parte, el promedio de las relaciones entre las resistencias analíticas y experimentales es, en general, igual a 1, con un CV de 0.04.

Tabla 5.2 Resistencia a cortante diagonal experimental y analítica

MURO	V_c (kg)	V_{cCCA1} (kg)	V_{cCCA2} (kg)	V_{cCCA3} (kg)	$\frac{V_{cCCA1}}{V_c}$	$\frac{V_{cCCA2}}{V_c}$	$\frac{V_{cCCA3}}{V_c}$
Mc1	18868	18112	18254	18259	0.96	0.97	0.97
Mc2	8356	8808	8897	8843	1.05	1.06	1.06
Mc3	5073	5015	5086	4994	0.99	1.00	0.98
Mc4	3173	3048	3102	3080	0.96	0.98	0.97
				Promedio	0.99	1.00	1.00
				CV	0.04	0.04	0.04

En la Figura 5.5 se presenta la resistencia a cortante de los muros estudiados en este trabajo junto con las reportadas por otros autores en función de la relación de aspecto. Las resistencias a cortante se normalizaron como se discutió para la Figura 5.2. Se incluyen muros confinados de bloques huecos de concreto ensayados en la FIUADY (Raygoza 2012; Sosa 2013), muros confinados de tabiques extruidos de arcilla ensayados en la UNAM (Pérez Gavilán et al. 2015), muros confinados construidos con piezas de concreto y tabiques de arcilla ensayados en la UAM (Tena-Colunga et, al. 2009) y muros reforzados interiormente y no reforzados de CCA ensayados en

la Universidad de Texas en Austin (Tanner et al. 2005a). En la Figura 5.5 se observa, en general, que la resistencia a cortante de los muros disminuye conforme la relación de aspecto aumenta. Por otro lado, se observa que existe una gran dispersión entre los datos reportados por diferentes autores. Esta dispersión en los datos, se debe en general, al tipo de piezas utilizado en la construcción de los muros, los espesores de los muros y al sistema de carga axial empleado durante el ensaye.

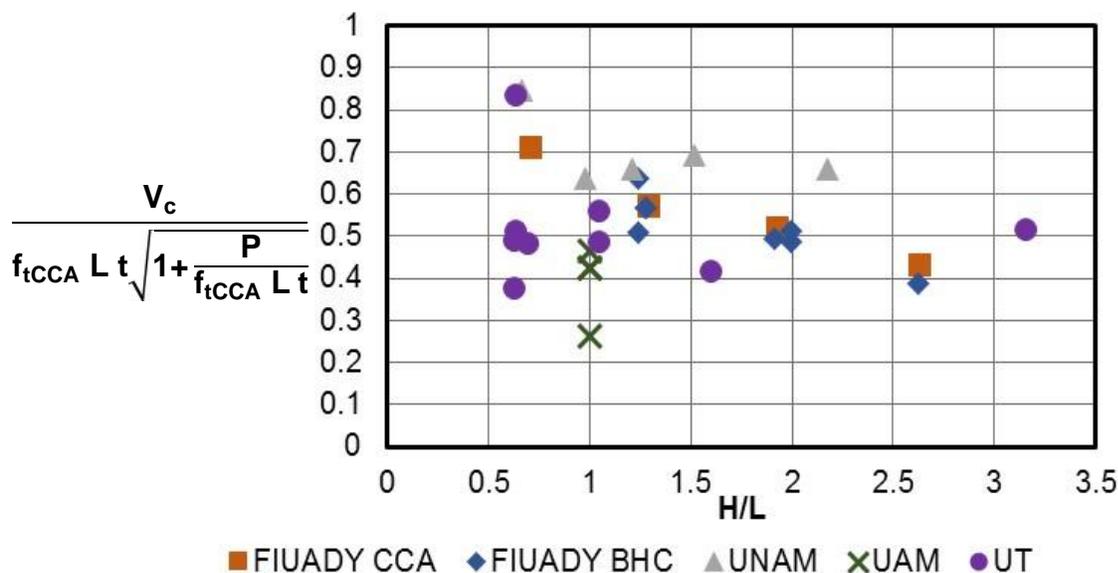


Figura 5.5 Datos experimentales de los muros confinados de CCA y otros autores

5.2. Resistencia a flexo-cortante

Para estudiar la resistencia a flexo-cortante, se consideró el muro Mc2 ensayado en este trabajo, los muros Mc3 y Mc4 ensayados por Chim (2017) y los muros Mf1 a Mf3 ensayados por Ricalde (2017). En los muros Mc3, Mc4 y Mf1 a Mf3 se reportó la aparición de agrietamientos por flexo-cortante. En la Tabla 5.3 se presentan las alturas (H), las longitudes (L), las relaciones de aspecto (H/L) y los esfuerzos axiales de compresión (Ξ) de los muros. En dicha tabla se incluyen las cargas laterales (V_{fc}) asociadas al agrietamiento por flexo-cortante junto con las alturas correspondientes a las cuales se observó dicho agrietamiento (H_{fc}). Las cargas laterales anteriores se relacionan con la resistencia a flexo-cortante de los muros. Para el caso de los muros

Mc2 y Mf1 a Mf3, la parte horizontal de la grieta por flexo-cortante se formó en la junta constructiva de los castillos. Por su parte, la parte diagonal se formó a partir de la junta vertical entre el concreto y el panel de CCA. La grieta horizontal se formó en la junta constructiva debido a que la resistencia a tensión por flexión del concreto (f_r) en esta zona fue menor que la esperada para un concreto monolítico (Mousa 2015). En los reglamentos de mampostería actuales (NTCM, 2004 y ACI 530-13) no se considera la resistencia a flexo-cortante como un estado límite de falla. Los patrones de agrietamiento asociados a la resistencia a flexo-cortante se presentan en la Figura 5.6.

Tabla 5.3 Carga lateral asociada a la resistencia a flexo-cortante

Muros	L (cm)	H (cm)	H/L	$\dagger 1$ (kg/cm ²)	V _{fc} (kg)	H _{fc} (cm)
Mc2	185	240	1.30	3.33	8836	0.60L
Mc3	124	240	1.94	3.35	5177	0.73L
Mc4	91	240	2.64	3.74	3479	0.99L
Mf1	124	280	2.26	2.56	2970	0.89L
Mf2	124	280	2.26	4.66	4100	1.05L
Mf3	124	280	2.26	7.43	4965	1.05L

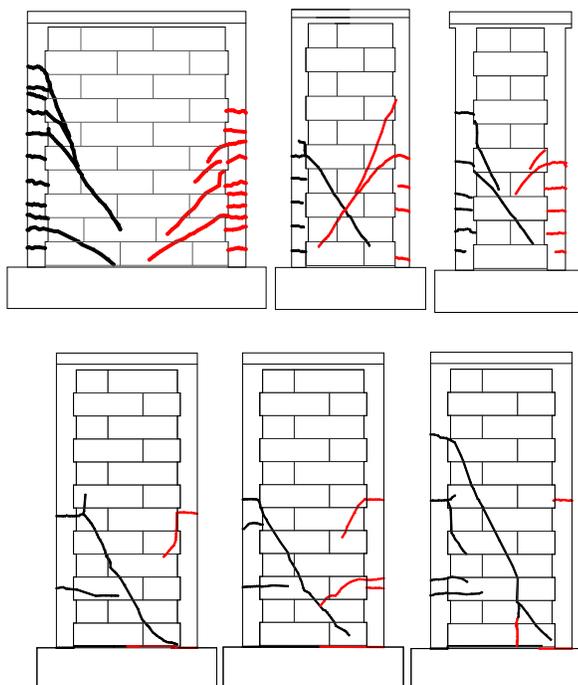


Figura 5.6 Patrones de agrietamiento asociados a la resistencia a flexo-cortante

En la Tabla 5.4 y 5.5 se presenta la resistencia a flexo-cortante experimental y su correspondiente analítica. En ambos casos la resistencia analítica se determinó con la ecuación (2.10). En la Tabla 5.4 se utilizó la altura a la cual se observó la grieta por flexo-cortante (H_{fc}) y se redujo la resistencia a tensión por flexión del concreto en los muros donde se observó el agrietamiento en la junta constructiva. En la Tabla 5.5 se utilizó una altura de grieta igual a la longitud media de los muros junto con la resistencia a tensión por flexión del concreto sin reducciones. En ambos casos se utilizó el módulo de sección transformado a concreto. Se asumió que el término C_v es igual a cero debido a que la parte diagonal de la grieta por flexo-cortante se formó al mismo tiempo que la parte horizontal.

Tabla 5.4 Resistencia a flexo-cortante experimental y analítica a H_{fc}

Muro	V_{fc} (kg)	Altura Grieta (H_{fc})	R-f_r	$V_{fc(H_{fc})}$ (kg)	$\frac{V_{fc(H_{fc})}}{V_{fc}}$
Mc2	8836	0.60L	0.50	9331	1.06
Mc3	5177	0.73L	1.00	6841	1.32
Mc4	3479	0.99L	1.00	4107	1.18
Mf1	2970	0.89L	0.50	3262	1.10
Mf2	4100	1.05L	0.50	4730	1.15
Mf3	4965	1.05L	0.50	6137	1.23
				Promedio	1.17
				CV	0.08

Tabla 5.5 Resistencia a flexo-cortante experimental y analítica a L/2

Muro	V_{fc} (kg)	Altura Grieta (H_{fc})	f_r	V_{fc(L/2)} (kg)	$\frac{V_{fc(L/2)}}{V_{fc}}$
Mc2	8836	0.50L	1.00	12981	1.47
Mc3	5177	0.50L	1.00	5765	1.11
Mc4	3479	0.50L	1.00	3167	0.91
Mf1	2970	0.50L	1.00	4270	1.44
Mf2	4100	0.50L	1.00	4967	1.21
Mf3	4965	0.50L	1.00	6008	1.21
Promedio					1.23
CV					0.17

En las Tabla 5.4 y 5.5 se observa que el promedio de la relación entre la resistencia a flexo-cortante analítica y experimental es mayor que 1, por lo que en ambos casos se sobrestima la resistencia a flexo-cortante de los muros con la ecuación (2.10). Para que el promedio de dicha relación sea igual a uno se modificó la ecuación (2.10), quedando la ecuación (5.4). Se propone utilizar una altura de grieta igual a la longitud media del muro. El coeficiente de 0.82 es el inverso del promedio obtenido en la Tabla 5.5.

$$V_{fcCCA} = 0.82 \left(\frac{S_x \left(f_r + \frac{P}{L_t} \right)}{H - \frac{L}{2}} \right) \quad (5.4)$$

En la Tabla 5.6 se compara la resistencia a flexo-cortante experimental con la analítica obtenida de la ecuación (5.4), donde se observa que el promedio de la relación entre la resistencia a flexo-cortante analítica y experimental es igual a 1

Tabla 5.6 Resistencia a flexo-corante experimental y analítica (ecuación (5.4))

Muro	V_{fc} (kg)	Altura Grieta (H_{fc})	f_r	V_{fc(L/2)} (kg)	$\frac{V_{fc(L/2)}}{V_{fc}}$
Mc2	8836	0.50L	1.00	10644	1.20
Mc3	5177	0.50L	1.00	4727	0.91
Mc4	3479	0.50L	1.00	2597	0.75
Mf1	2970	0.50L	1.00	3501	1.18
Mf2	4100	0.50L	1.00	4073	0.99
Mf3	4965	0.50L	1.00	4926	0.99
				Promedio	1.00
				CV	0.17

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados experimentales de muros confinados de CCA ensayados en este trabajo, así como en el trabajo de Chim (2017) y de Ricalde (2017), se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

-) La resistencia a cortante de los muros depende de su relación de aspecto. Conforme esta relación aumenta, la resistencia a cortante disminuye.
-) Se proponen tres ecuaciones para determinar la resistencia a cortante de los muros. La primera se basa en un criterio de esfuerzos principales y las otras dos en un criterio de Mohr-Coulomb. Se consideró en las ecuaciones que la relación entre la resistencia a cortante y la relación de aspecto es lineal.
-) Se propone una ecuación para determinar la resistencia a flexo-cortante de los muros. Se asumió que el agrietamiento por flexo-cortante se forma a una altura igual a $L/2$. Se utiliza la sección transformada a concreto y se asume que el término C_v es igual a cero debido a que la parte diagonal de la grieta por flexo-cortante se formó al mismo tiempo que la parte horizontal.
-) En la construcción de los muros se utilizaron bloques sólidos de CCA clase 4. Se recomienda estudiar muros con otras clases de CCA.
-) Los muros con comportamiento por cortante se ensayaron con un esfuerzo axial similar. Se recomienda realizar más ensayos, considerando diferentes niveles de esfuerzos axiales.

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. ASTM - American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Precast Autoclaved Aerated Concrete (PAAC) Wall Construction Units, ASTM C 1386 (2007), West Conshohocken, PA, 2007.
3. ASTM - American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Autoclaved Aerated Concrete (AAC), ASTM C 1693 (2011)
4. ASTM - American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Splitting Tensile Strength of Masonry Units, ASTM C 1006 (2001), West Conshohocken, PA, 2001.
5. ASTM - American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages, ASTM E 519(2002), West Conshohocken, PA, 2002.
6. Bose, S., Rai DC. (2014) Behavior of AAC infilled RC frame under lateral loading. In Proceedings of the 10th National Conference in Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska, July 21-25.
7. 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.
8. 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.
9. Hernández M., García L. (2015). Block Celular AAC4 y AAC6. México, D. F: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. (Informe Técnico No. 222/223)

10. Mandirola Martina, Penna Andrea, Rota Maria, Magenes Guido (2012) Experimental Assessment of the Shear Response of Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Masonry with Flat Truss Bed-Join Reinforcement. In Proceedings of the 15th International Brick and Block Masonry Conference, Florianopolis, Brasil, June 03-06.
11. Meli, R., Brzev, S., Astroza, M., Boen, T., Crisafulli, F., Dai, J., Farsi, M., Hart, T., Mebarki, A., Moghadam, A.S., Wuiun, D., Tomazevic, M., and Yamin, L. (2011). Seismic design guide for low-rise confined masonry buildings. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland CA.
12. Mousa Magda I. (2015). Factors Affecting Bond between Repairing Concrete and Concrete Substrate. International Journal of Engineering and Innovative Technology, Volume 4, Issue 11, 47-56, May.
13. NTCM - Gobierno del Distrito Federal (2004), Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, "Gaceta Oficial del Distrito Federal", México.
14. 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.
15. ONNCCE - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C. (2001), "Industria de la construcción –Acero-Varilla corrugada de acero proveniente de lingote y palanquilla para refuerzo de concreto- Especificaciones y métodos de prueba", NMXC- 407-ONNCCE-2001, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
16. 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-2002, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
17. 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.
18. Pérez Gavilán J. J., Manzano A., Bravo G. R. (2011). Interacción Momento Cortante en Muros de Mampostería Confinada: Un Estudio Piloto. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
 19. 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.
 20. Quiroz, L., Maruyama, Y., and Zavala, C. 2014. Cyclic behavior of Peruvian confined masonry walls and calibration of numerical model using genetic algorithms. ELSEVIER Journal of Engineering Structures, 75: 561-576
 21. Ravichandran Shiv Shanker, Richard E: Klingner (2012) Behavior of Steel Moment Frames with Autoclaved Aerated Concrete Infills. ACI Structural Journal, Volume 109, Issue 1, 83-90, January
 22. 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.
 23. 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.
 24. RILEM 1993: Autoclaved Aerated Concrete: Properties, Testing and Design, RILEM Recommended Practice, RILEM Technical Committees 78- MCA and 51-ALC, E & FN Spon, London
 25. 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.
 26. San Bartolomé, A., and Quiun, D. 2010. Diseño sísmico de edificaciones de albañilería confinada. Revista Ciencia, 13(2):161-185.

27. 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.
28. Solís E. (2014). Rehabilitación y reforzamiento de muros de mampostería confinada con relación de aspecto mayor a uno, sujetos a cargas en el plano. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
29. 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.
30. Tanner 2003: Tanner, J. E., Design Provisions for Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Structural Systems. Ph.D. dissertation, Dept. of Civil Engineering, The University of Texas at Austin, May 2003.
31. Tanner Jennifer E., Varela Jorge L., Klinger Richard E. (2005 b) 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.
32. Tanner Jennifer E., Varela Jorge L., Klinger Richard E., Brightman Matthew J. (2005 a) Seismic Testing of Autoclaved Aerated Concrete Shearwalls: A Comprehensive Review. ACI Structural Journal, Volume 102, Issue 3, 374-382, May 1.
33. 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.
34. Tomazevic Miha, Gams Matija (2012) Shaking table study and modelling of seismic behavior of confined AAC masonry buildings. Bull Earthquake Eng. Volume 10, 863-893.
35. 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. In Proceedings of the XIV National Congress of Structural

- Engineering, Acapulco, Mexico, 29 Oct - 1 Nov 2004. Mexican Society of Structural Engineering, Mexico D.F.
36. Urzúa Pineda, D.A. Padilla Mora R. Loza Jaramillo R. (2001). Influencia de la Carga Vertical en la Resistencia sísmica de muros de mampostería confinada con materiales típicos de Guadalajara, Memorias del XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Mexico, 31 Oct - 3 Nov 2001. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, México D.F.
37. 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.
38. Ventura I. (2015). Resistencia a cortante de muros especiales de mampostería confinada. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
39. Xella Mexicana. Disponible en <http://www.hebel.mx> Recuperado el 18 de abril de 2017
40. Yoshimura, K., Kikuchi, K., Kuroky, M., Liu, L., and Ma, L. 2000. Effect of wall reinforcements, applied lateral forces and vertical axial loads on seismic behavior of confined concrete masonry walls. In Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering, Auckland, New Zealand, 30 Jan - 4 Feb 2000; International Association for Earthquake Engineering, Tokyo Japan. Paper No. 984.
41. Yu Jinghai, Cao Jianfeg, Fei Tianhui (2013) Experimental Study on Improving Seismic Behavior of Load-Bearing Masonry Wall Made of Autoclaved Aerated Concrete. Transaction of Tianjin University, Volume 19, Issue 6, 419-424, December.