



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

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

**“FLEXIÓN EN MUROS CONFINADOS DE
CONCRETO CELULAR DE AUTOCLAVE: EFECTO
DE LA CARGA AXIAL”**

TESIS

**PRESENTADO POR:
I.C. JOSÉ LUIS RICALDE JIMÉNEZ**

**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 evaluar el comportamiento a flexión en el plano de muros confinados de CCA sujetos a cargas laterales. La variable de estudio fue el esfuerzo axial de compresión de los muros. Se consideraron esfuerzos de compresión axial de 2.4, 4.8 y 7.2 kg/cm². Se diseñaron y ensayaron tres muros confinados de CCA a escala natural. El espesor, longitud y altura fueron constantes de 15, 122 y 280 cm, respectivamente. Se obtuvieron los patrones de agrietamiento y las curvas de carga lateral-desplazamiento horizontal de los muros ensayados. Se describe el comportamiento de los muros. Se presenta la comparación entre las resistencia experimental y analítica. Se determinó la ductilidad, la distorsión máxima, la degradación de rigidez y energía disipada de los muros. Se seleccionó un modelo de histéresis para representar el comportamiento de los muros y se calibraron sus parámetros.

Con base en los resultados experimentales y los análisis realizados, se concluyó que la resistencia a flexión se predice bien utilizando las hipótesis de flexión. Al incrementar el esfuerzo axial de compresión la resistencia a flexión aumenta y la ductilidad de desplazamiento disminuye. Las distorsiones máximas de los muros

fueron similares. El modelo de histéresis seleccionado para este trabajo representa adecuadamente el comportamiento de los muros estudiados.

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 units 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 republic.

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 consider explicit requirements for the design of AAC confined walls.

The objective of this research work was to assess the in plane flexural behavior of AAC confined walls subjected to lateral loads. The study variable was the axial compressive stress. Axial compressive stresses of 2.4, 4.8 y 7.2 kg/cm² were considered. Three full scale AAC confined walls were designed and tested. The thickness, length and height were constant and equal to 15, 122 and 280 cm respectively. Cracking patterns and lateral load-displacement curves were obtained for each wall. Walls behavior is described. Comparison between experimental and analytical strengths is presented. Displacement ductility, maximum drift, stiffness degradation and dissipated energy were obtained for each wall. An hysterical model was selected to represent the behavior of the walls.

Based on the experimental results and the analysis carried out, it was concluded that the flexural strength of the walls is well predicted using the flexural theory. As the axial compressive stress increases, the flexural strength of the walls increases and the displacement ductility decreases. The maximum drifts of the walls were similar. The hysterical model selected represents well the behavior of the studied walls in this research.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Generalidades | 1 |
| 1.2. Objetivo general | 3 |
| 1.3. Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.4. Alcance de la tesis | 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 | 14 |
| 2.4. Reglamentaciones existentes..... | 15 |
| 2.5. Conclusiones de revisión de literatura..... | 15 |
| CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA..... | 17 |
| 3.1. Descripción general..... | 17 |
| 3.2. Determinación de las propiedades de los materiales | 17 |
| 3.3. Selección de variable de estudio..... | 20 |
| 3.4. Diseño de los muros confinados | 20 |
| 3.5. Construcción de muros..... | 24 |
| 3.6. Diseño del sistema de carga e instrumentación | 27 |
| 3.7. Ensaye de muros | 29 |
| 3.8. Desarrollo de modelo de histéresis | 30 |
| CAPÍTULO 4. RESULTADOS | 34 |
| 4.1. Propiedades de los materiales | 34 |
| 4.2. Ensaye de muros | 37 |

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 46 |
| 5.1. Comportamiento de muros..... | 46 |
| 5.2. Resistencia, ductilidad de desplazamiento y distorsión máxima de los muros | 46 |
| 5.3. Degradación de rigidez de ciclo de los muros..... | 49 |
| 5.4. Energía disipada..... | 50 |
| 5.5. Modelo de histéresis..... | 51 |
| CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES..... | 59 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 61 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Muro confinado sujeto a carga axial y lateral | 5 |
| Figura 2.2 Falla por flexión en muro | 6 |
| Figura 2.3 Grieta de cortante en un muro confinado | 7 |
| Figura 2.4 Grieta de flexo-cortante en un muro confinado | 8 |
| Figura 2.5 Desplazamiento como cuerpo rígido de un muro confinado | 9 |
| Figura 3.1 Vista del ensaye a compresión axial de un cubo de CCA | 17 |
| Figura 3.2 Vista del ensaye a tensión de un bloque de CCA | 18 |
| 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 | 19 |
| Figura 3.5 Esquema de ensaye a compresión diagonal de un murete..... | 21 |
| Figura 3.6 esquema de ensaye a tensión de bloque de CCA | 21 |
| Figura 3.7 Hipótesis empleada para obtener la relación entre v_m y f_{tCCA} | 22 |
| Figura 3.8 Curvas de resistencia de los muros Mf1 a Mf3 | 24 |
| Figura 3.9 Geometría de muros Mf1 a Mf3..... | 24 |
| Figura 3.10 Base del muro | 25 |
| Figura 3.11 Esquema del área cubierta con cinta adhesiva | 25 |
| Figura 3.12 Primera hilada de bloques de CCA | 26 |
| Figura 3.13 Muro construido hasta la mitad de su altura..... | 26 |
| Figura 3.14 Vista de un muro terminado | 27 |
| Figura 3.15 Esquema general del sistema de carga lateral | 28 |
| Figura 3.16 Esquema general del sistema de carga axial..... | 28 |
| Figura 3.17 Esquema general del sistema de instrumentación | 29 |
| Figura 3.18 Protocolo de carga (NTCM, 2004)..... | 30 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.19 Modelo de histéresis de Takeda | 31 |
| Figura 3.20 Representación del estrangulamiento en el modelo de histéresis | 33 |
| Figura 4.1 Fallas observadas en cubos de CCA | 35 |
| Figura 4.2 Falla típica observada en los bloques de CCA..... | 36 |
| Figura 4.3 Grieta horizontal en muro Mf1 | 37 |
| Figura 4.4 Grietas por flexo-cortante Mf1 | 38 |
| Figura 4.5 Grietas diagonales en muro Mf1 | 38 |
| Figura 4.6 Patrón de agrietamiento final del muro Mf1 | 38 |
| Figura 4.7 Curva carga lateral-desplazamiento del muro Mf1 | 39 |
| Figura 4.8 Grietas horizontales en muro Mf2 | 40 |
| Figura 4.9 Grietas por flexo-cortante Mf2..... | 41 |
| Figura 4.10 Grietas diagonales en muro Mf2 | 41 |
| Figura 4.11 Patrón de agrietamiento final del muro Mf2..... | 41 |
| Figura 4.12 Curva carga lateral vs desplazamiento del muro Mf2..... | 42 |
| Figura 4.13 Grietas horizontales en muro Mf3 | 43 |
| Figura 4.14 Grietas por flexo-cortante y diagonal en muro Mf3..... | 44 |
| Figura 4.15 Grietas diagonales en muro Mf3 | 44 |
| Figura 4.16 Patrón de agrietamiento final del muro Mf3..... | 44 |
| Figura 4.17 Curva carga lateral-desplazamiento del muro Mf3..... | 45 |
| Figura 5.1 Envolventes de la parte ascendente de la curva carga-desplazamiento de los muros..... | 47 |
| Figura 5.2 Curvas envolventes de los muros en función de la ductilidad de desplazamiento | 48 |
| Figura 5.3 Curva degradación de rigidez-ductilidad de desplazamiento | 50 |
| Figura 5.4 Curva energía disipada acumulada-ductilidad | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.5 Ajuste lineal utilizado para determinar γ | 52 |
| Figura 5.6 Ajuste de K_u del muro Mf1 | 53 |
| Figura 5.7 Ajuste de K_u del muro Mf2..... | 54 |
| Figura 5.8 Ajuste de K_u del muro Mf3..... | 54 |
| Figura 5.9 Ajuste de la recta U-U' del muro Mf1..... | 55 |
| Figura 5.10 Ajuste de la recta U-U' del muro Mf2..... | 56 |
| Figura 5.11 Ajuste de la recta U-U' del muro Mf3..... | 56 |
| Figura 5.12 Modelo de histéresis muro Mf1 | 57 |
| Figura 5.13 Modelo de histéresis muro Mf2 | 58 |
| Figura 5.14 Modelo de histéresis muro Mf3 | 58 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 4.1 Contenido de humedad del CCA..... | 34 |
| Tabla 4.2 Resistencia a compresión axial del CCA..... | 34 |
| Tabla 4.3 Resistencia a tensión del CCA | 35 |
| Tabla 4.4 Resistencia a compresión axial del concreto de muros Mf1, Mf2 y Mf3 | 36 |
| Tabla 4.5 Resistencia de fluencia del acero de refuerzo..... | 36 |
| Tabla 4.6 Resumen de cargas y desplazamientos registrados para cada evento durante el ensaye del muro Mf1 | 39 |
| Tabla 4.7 Resumen de cargas y desplazamientos registrados para cada evento durante el ensaye del muro Mf2 | 42 |
| Tabla 4.8 Resumen de cargas y desplazamientos registrados para cada evento durante el ensaye del muro Mf3..... | 45 |
| Tabla 5.1 Resistencias de a flexión experimental promedio y analítica de muros Mf1 a Mf3 | 47 |
| Tabla 5.2 Ductilidad de desplazamiento y distorsión máxima de los muros..... | 49 |
| Tabla 5.3 Rigidez de fluencia experimental de muros Mf1, Mf2 y Mf3 | 49 |
| Tabla 5.4 Valores de α determinados..... | 51 |
| Tabla 5.5 Valores de γ determinados..... | 52 |
| Tabla 5.6 Valores de Φ determinados..... | 53 |
| Tabla 5.7 Valores de δ determinados..... | 55 |

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 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 (dadas 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. En el primer caso, 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 segundo caso, 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

Evaluar el comportamiento por flexión de muros confinados de CCA sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles, considerando distintos valores de esfuerzo axial de compresión de los muros.

1.3. Objetivos específicos

- Ensayar muros confinados de CCA con comportamiento dominado por flexión.
- Determinar la resistencia a flexión, ductilidad de desplazamiento, distorsión, degradación de rigidez y energía disipada de los muros confinados de CCA ensayados.
- Desarrollar un modelo de histéresis que represente el comportamiento por flexión de los muros confinados de CCA ensayados.

1.4. Alcance de la tesis

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

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:

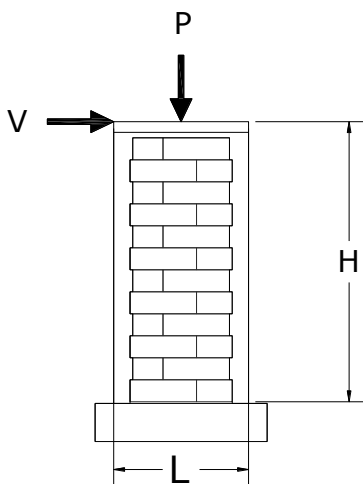


Figura 2.1 Muro confinado sujeto a carga axial y lateral

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). La resistencia a flexión se puede determinar con base en las hipótesis de la teoría de flexión (cinemática, constitutiva y equilibrio).

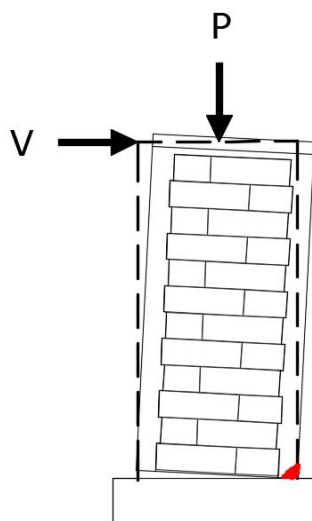


Figura 2.2 Falla por flexión en muro

Si se supone 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_{fa}) del muro puede determinarse con la ecuación (2.1).

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

Donde:

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

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

$$P = C - T \quad (2.44)$$

En las ecuaciones anteriores, β_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).

$$V_{fa} = M_{fa} / H \quad (5)$$

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.

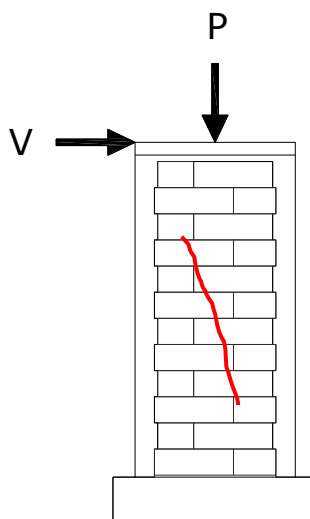


Figura 2.3 Grieta de cortante en un muro confinado

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 $2.4 \cdot \sqrt{f_{CCA}}$ (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).

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

En la ecuación anterior, v_m es el valor medio de la resistencia a compresión diagonal de la mampostería y α 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).

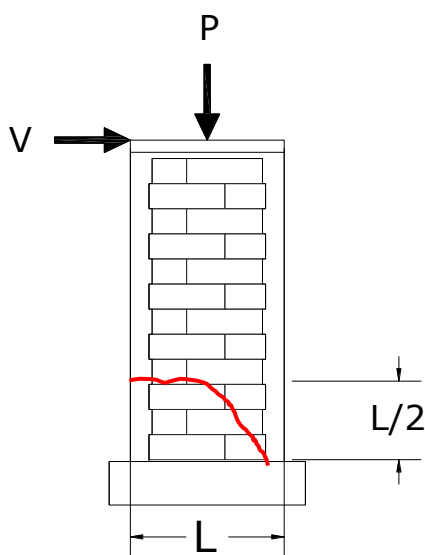


Figura 2.4 Grieta de flexo-cortante en un muro confinado

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 alejada en compresión.

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

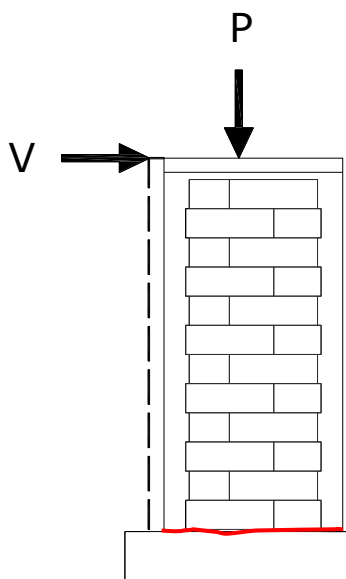


Figura 2.5 Desplazamiento como cuerpo rígido de un muro confinado

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

$$V_d = \mu P \quad (2.12)$$

Para el caso de una grieta horizontal en la base, μ es el coeficiente de fricción entre el CCA y el concreto de 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 de 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 de 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 permita captar 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 sólidos 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 sólidos 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 dalas 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 dalas intermedias previene la ocurrencia y propagación de las grietas por lo que su carga de agrietamiento incrementa con el número dalas. La ductilidad se mejora si se incrementa la altura de las dalas 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 solidos 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 contruidos 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 contruidos 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). 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 dadas 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 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. (7) Desarrollo de modelo de histéresis. 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 confirmar que el contenido de humedad se encuentre entre el 5 y 15 % especificado en la norma, se utilizaron tres cubos con dimensiones nominales de 10 cm por lado. Para determinar la resistencia a compresión axial, 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-C083-ONNCCE-2002. Se elaboraron tres cilindros con dimensiones nominales de 15 x 30cm (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-C407-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.

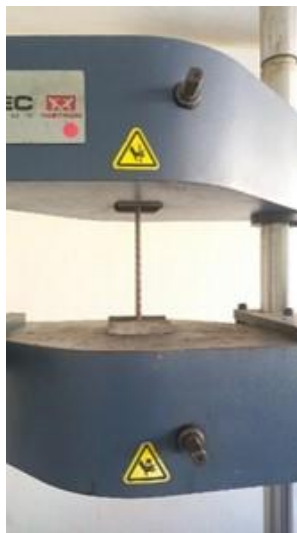


Figura 3.4 Vista del ensaye a tensión de una barra de acero

3.3. Selección de variable de estudio

La variable de estudio fue el esfuerzo axial de compresión (σ). Los esfuerzos seleccionados fueron 2.40, 4.80 y 7.20 kg/cm². Estos esfuerzos se obtuvieron con base en un análisis de cargas gravitacionales en edificios habitacionales construidos con muros y losas de CCA de 2, 3 y 5 niveles, respectivamente.

3.4. Diseño de los muros confinados

Se consideran tres 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 (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).

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

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

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

La relación entre v_m y f_{tCCA} se determinó como sigue: por un lado, v_m se determina del ensayo de muretes (Figura 3.5).

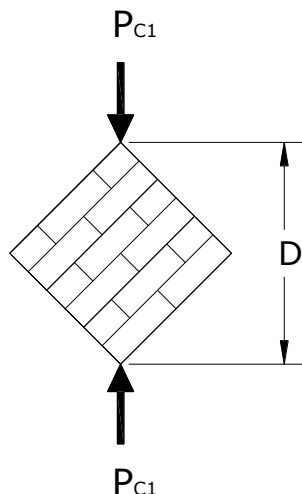


Figura 3.5 Esquema de ensaye a compresión diagonal de un murete

v_m está asociada al esfuerzo promedio sobre el área transversal de la diagonal del murete, ecuación (3.4).

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

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).

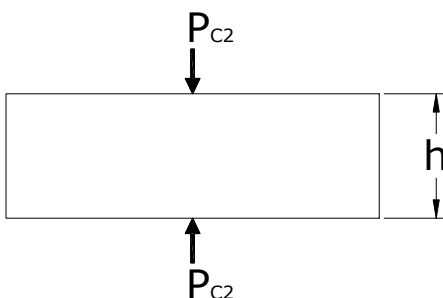


Figura 3.6 esquema de ensaye a tensión de bloque de CCA

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).

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

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 11), y que D y h son de la misma longitud, se obtiene la ecuación (3.6).

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

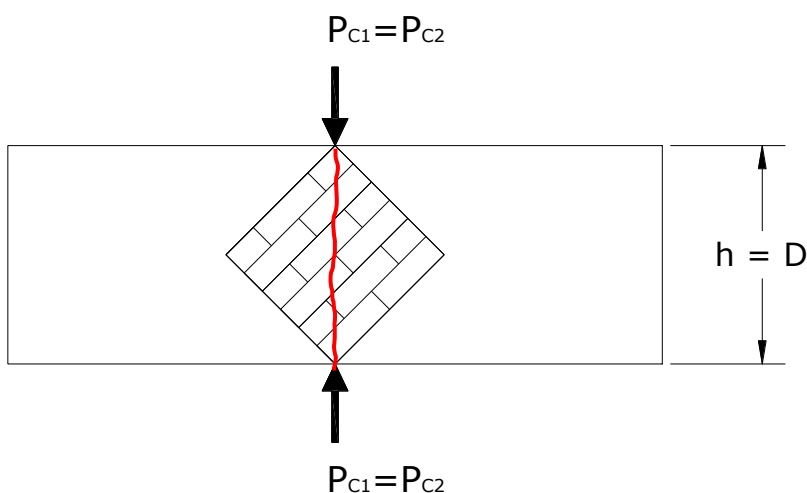


Figura 3.7 Hipótesis empleada para obtener la relación entre v_m y f_{tCCA}

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/cm². 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/cm². La relación entre los promedios de v_m y f_{tCCA} fue igual a $\frac{\pi}{2}$.

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).

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

Para determinar la resistencia al deslizamiento se utilizó 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 (Mf1 a Mf3) se utilizaron los siguientes parámetros:

- Altura del muro al punto de aplicación de la carga lateral (H) de 280 cm
- Longitud del muro (L) de 124 cm
- Espesor del muro (t) de 15 cm
- Sección transversal de castillos y dalas de 15 cm x 15 cm
- Resistencia a compresión axial promedio del CCA (f_{CCA}) de 44.13kg/cm²
- Resistencia a tensión promedio del CCA (f_{iCCA}) de 3.88 kg/cm²
- Resistencia a compresión axial de diseño del concreto (f'_c) para castillos y dalas de 175 kg/cm²
- Acero de refuerzo longitudinal del castillo: una barra de 3/8" de diámetro con esfuerzo nominal de fluencia nominal (f_y) de 4200 kg/cm²
- Esfuerzos de compresión axial de 2.40, 4.80 y 7.20 kg/cm²

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 (σ). En la Figura 3.8 se presentan las curvas resistencia-esfuerzo axial de compresión obtenidas para los muros. En dicha figura se representan con líneas horizontales los esfuerzos axiales de 2.40, 4.80 y 7.20 kg/cm². En la Figura 3.9 se presenta la geometría de los muros.

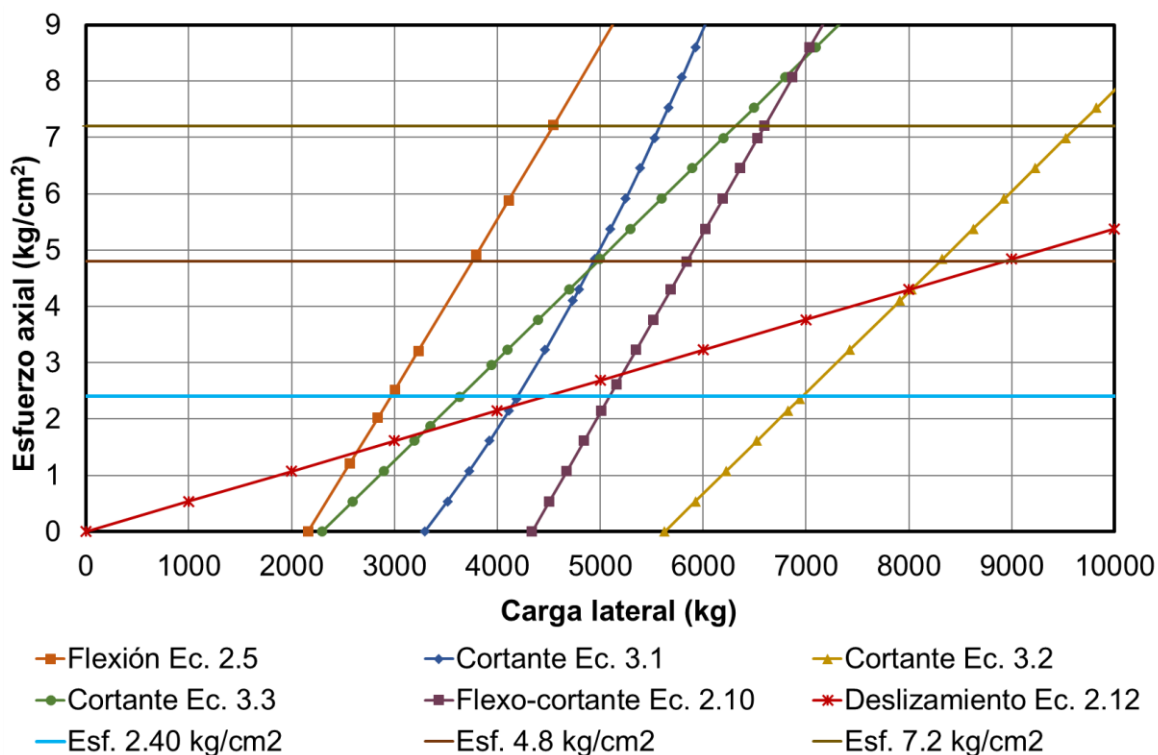


Figura 3.8 Curvas de resistencia de los muros Mf1 a Mf3

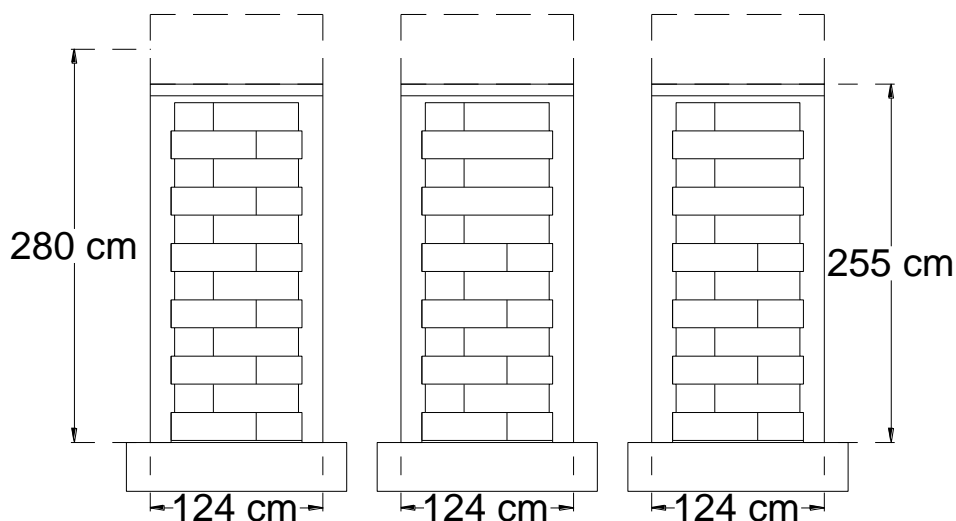


Figura 3.9 Geometría de muros Mf1 a Mf3

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 3.10). Pevio a la colocación de la primera hilada de bloques de CCA, se colocó cinta

adhesiva sobre la base. Se cubrió un ancho de 8 cm y un largo igual a la longitud del panel de mampostería (Figura 3.11). El propósito de la cinta fue reducir la resistencia al agrietamiento por flexión del muro. Posteriormente, se colocó la primera hilada de bloques utilizando dos tipos de mortero. En la junta horizontal se utilizó 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 dala superior del muro. En la Figura 3.14 se presenta una vista de un muro terminado.



Figura 3.10 Base del muro

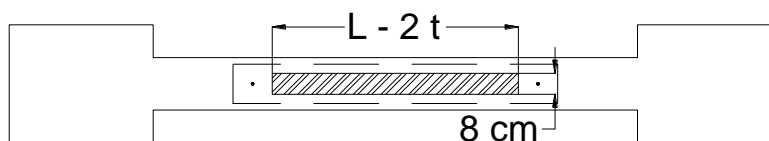


Figura 3.11 Esquema del área cubierta con cinta adhesiva



Figura 3.12 Primera hilada de bloques de CCA



Figura 3.13 Muro construido hasta la mitad de su altura



Figura 3.14 Vista de un muro terminado

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 en 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 3.15).

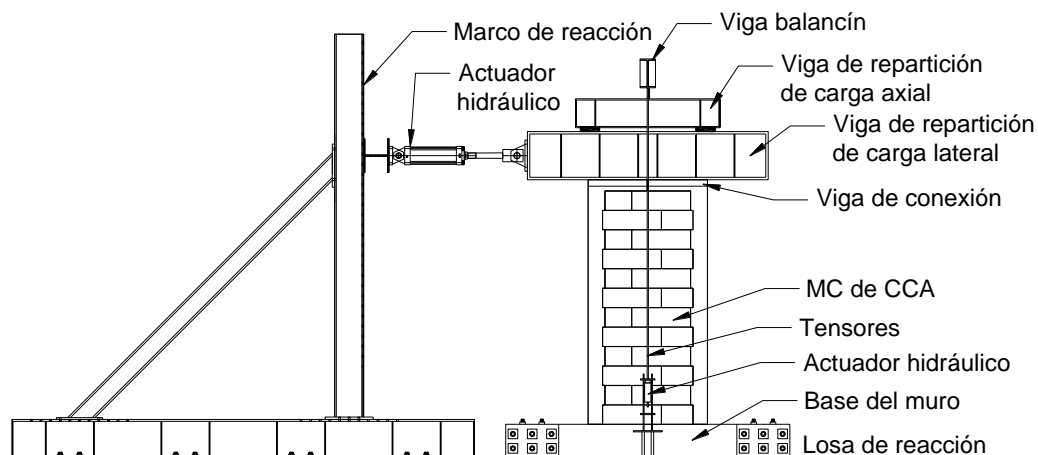


Figura 3.15 Esquema general del sistema de carga lateral

El sistema de carga axial consistió en una viga balancín de acero, una viga de repartición de carga axial de acero, dos tensores de acero y un actuador hidráulico con capacidad de 33 ton (Figura 3.16). Para mantener constante la carga axial se utilizó un servo control mecánico.

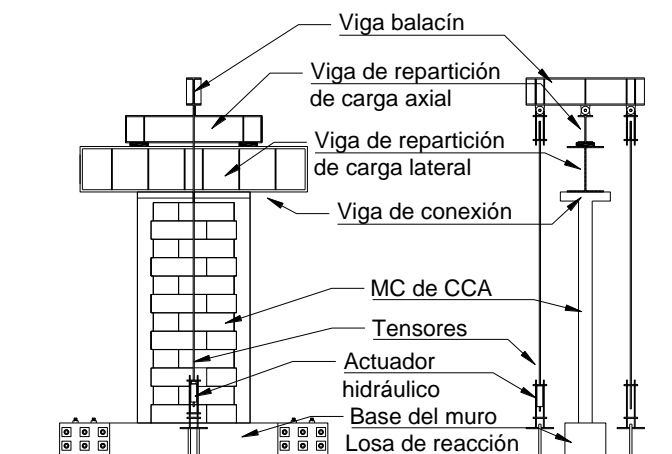


Figura 3.16 Esquema general del sistema de carga axial

Los desplazamientos horizontales del muro se midieron utilizando potenciómetros de polea (PP) de 13 y 38 cm de carrera. Se colocaron dos en el punto de aplicación de carga (PP1 y PP2) y uno al centro de la dala 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). Los desplazamientos relativos se midieron utilizando potenciómetros lineales de vástago (PL) de 1.5 cm. Se colocaron cinco:

uno entre la viga de carga y la dala superior del muro (PL1), otro entre el muro y la base del muro (PL3), y tres entre la base de muro y la losa de reacción (PL2, PL4, PL5). Las deformaciones unitarias en el acero de refuerzo de los castillos se midieron utilizando galgas extensométricas. Se colocaron dos en cada barra de refuerzo las cuales estuvieron ubicadas a 3 y 8 cm de la base del muro. La carga axial aplicada al muro se midió utilizando celdas de carga tipo dona (CCD) con capacidad de 22.7 ton. Se colocaron dos celdas de carga tipo dona, 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 3.17 se presenta el esquema general de instrumentación.

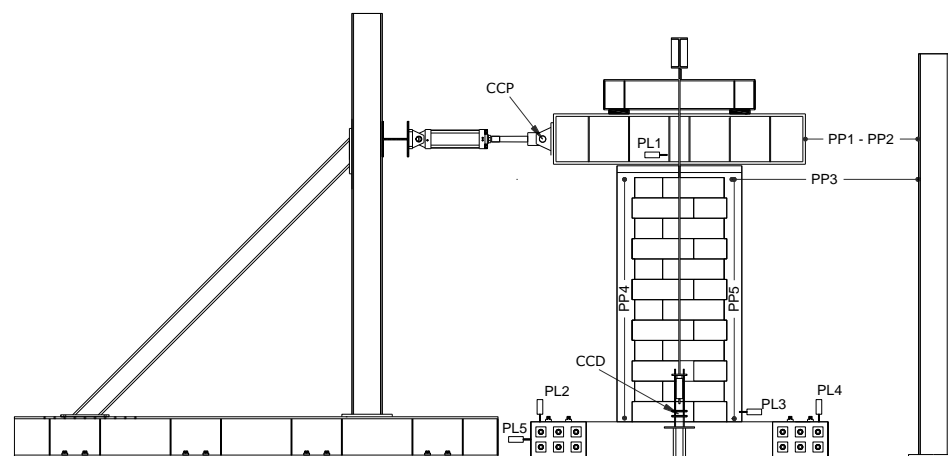
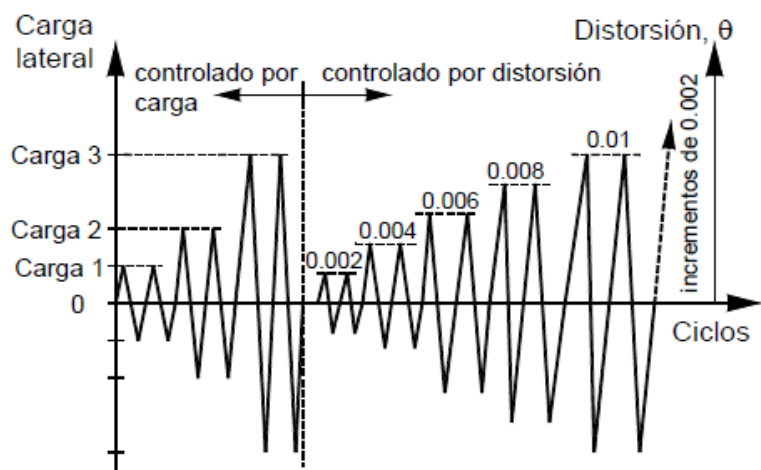


Figura 3.17 Esquema general del sistema de instrumentación

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 21) (NTCM, 2004). Los primeros seis ciclos tuvieron un control por carga y los posteriores por distorsión. En la Figura 3.18, la carga 3

corresponde a la carga de fluencia del acero de refuerzo en los castillos. 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 3.18 Protocolo de carga (NTCM, 2004)

3.8. Desarrollo de modelo de histéresis

Para representar el comportamiento no lineal de los muros estudiados se seleccionó el modelo de histéresis CANNY CA7 (CANNY 1999). Dicho modelo está definido por siete parámetros de histéresis. Dos para definir la rigidez a la descarga (δ , Φ), tres para la degradación de resistencia (λ_e , λ_u , λ_3) y dos para el estrangulamiento de la curva de histéresis (ϵ , λ_s). Para representar la parte ascendente del modelo se utilizó una curva bilineal. Definida por la rigidez inicial (K_y) y la rigidez posterior a la fluencia (K_{py}) (Figura 3.19).

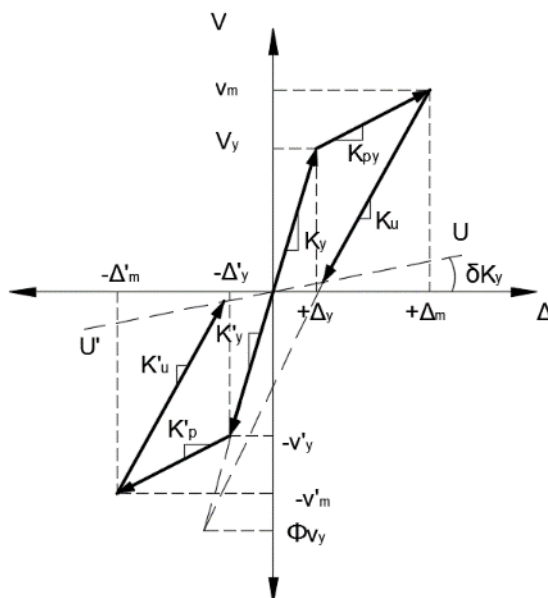


Figura 3.19 Modelo de histéresis de Takeda

La rigidez inicial se definió utilizando la rigidez secante al punto de fluencia (ecuación (20)).

$$K_y = \left(\frac{H^3}{3 E_{CCA} \alpha I} + \frac{c_k H}{G_{CCA} \alpha A} \right)^{-1} \quad (20)$$

En la ecuación anterior E_{CCA} es el módulo de elasticidad del CCA, I es la inercia de la sección transversal del muro transformada a CCA, G_{CCA} es el módulo de cortante del CCA, A es el área de la sección transversal del muro transformada a CCA, c_k es el coeficiente de cortante (ecuación 21) y α es el factor para ajustar la rigidez analítica.

$$C_k = \frac{A}{L t} \quad (21)$$

La rigidez posterior a la fluencia (K_{py}) se determinó con la ecuación (22).

$$K_{py} = \gamma K_y \quad (22)$$

En la ecuación anterior γ es el factor que relaciona la rigidez inicial con la posterior a la fluencia. Dicho factor se determinó mediante un ajuste lineal por mínimos cuadrados para los puntos máximos de los ciclos impares posteriores al punto de fluencia.

La parte descendente del modelo se definió con la rigidez elástica de descarga (K_u) y una recta U-U' cuya pendiente (K_{uu}) está asociada al daño en el muro. La rigidez de descarga se determinó con la ecuación (23).

$$K_u = \frac{\Phi V_c + V_m}{\Phi \frac{V_c}{K_{ce}} + \Delta_m} \quad (23)$$

En la ecuación anterior V_m es la carga máxima del ciclo, Δ_m es desplazamiento horizontal correspondiente a dicha carga y Φ es el parámetro de ajuste para definir la rigidez en la descarga. La pendiente de la recta U-U' se determinó con la ecuación (24).

$$K_{uu} = \delta K_y \quad (24)$$

En la ecuación anterior δ es un parámetro de ajuste para definir la pendiente de la recta (U-U'). El estrangulamiento de los ciclos de carga causados por el abrir y cerrar de grietas fueron simulados dirigiendo la recarga iniciada en la recta U-U' hacia un punto objetivo definido por la intersección de una fuerza V_e con el desplazamiento Δ_m , hasta alcanzar un desplazamiento Δ_e (Figura 3.20). El desplazamiento Δ_e y la fuerza V_e se determinaron con las ecuaciones (25) y (26), respectivamente.

$$\Delta_e = \varepsilon \Delta_u \quad (25)$$

$$V_e = \lambda_s (V_m - \delta K_y \Delta_m) + \delta K_y \Delta_m \quad (26)$$

En las ecuaciones anteriores, Δ_u es el desplazamiento residual de la descarga elástica. λ_s y ε son parámetros que definen el estrangulamiento en el modelo de histéresis.

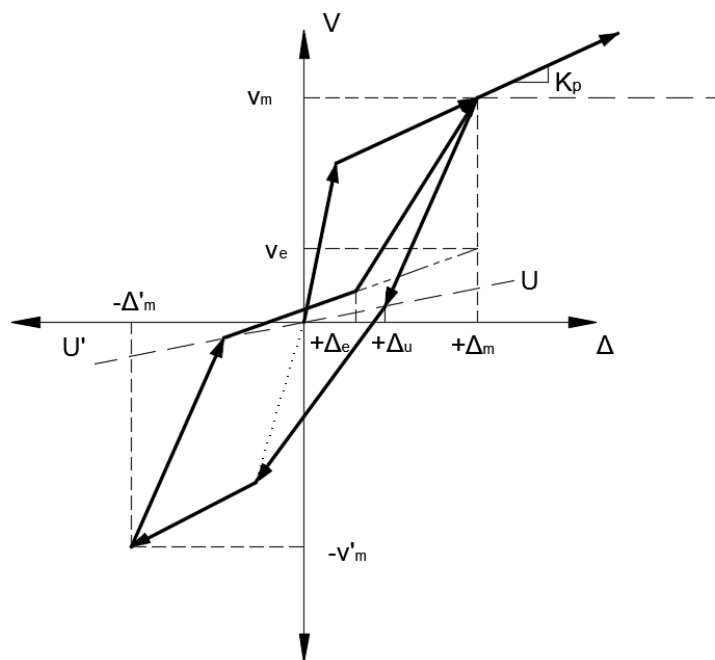


Figura 3.20 Representación del estrangulamiento en el modelo de histéresis

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. Propiedades 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 presenta 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 |

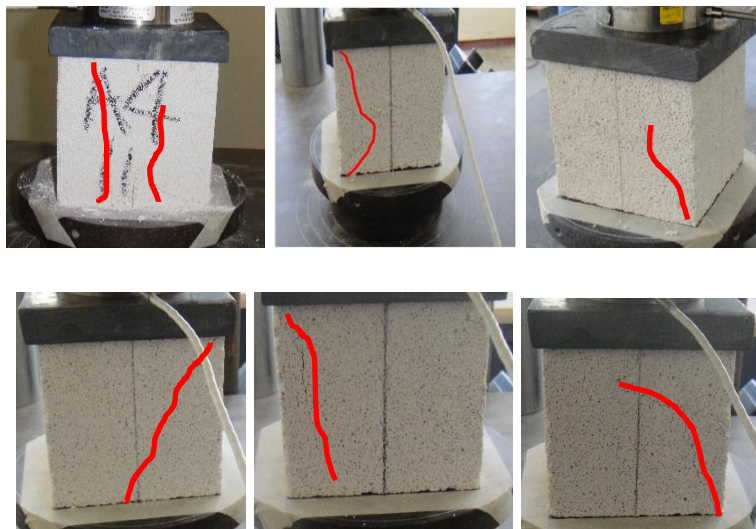


Figura 4.1 Fallas observadas en cubos de CCA

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 los bloques de CCA

En la Tabla 4.4 se presenta la resistencia compresión axial del concreto de los castillos de los muros Mf1, Mf2 y Mf3. Las resistencias promedio fueron de 172, 169 y 187 kg/cm² con CV de 0.03, 0.05 y 0.03, respectivamente.

Tabla 4.4 Resistencia a compresión axial del concreto de muros Mf1, Mf2 y Mf3

| Cilindro | f' _c (kg/cm ²) | | |
|-----------------|--|------|------|
| | Mf1 | Mf2 | Mf2 |
| C1 | 171 | 173 | 186 |
| C2 | 178 | 174 | 193 |
| C3 | 168 | 160 | 182 |
| Promedio | 172 | 169 | 187 |
| CV | 0.03 | 0.05 | 0.03 |

En la Tabla 4.5 se presenta la resistencia de fluencia del acero de refuerzo. La resistencia promedio fue de 4545 kg/cm² 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 Mf1 se aplicaron 16 ciclos de carga lateral. El esfuerzo axial de compresión aplicado durante el ensaye fue de 2.56 kg/cm^2 . El primer evento observado fue la formación de una grieta horizontal entre la base del muro y la primera hilada de bloques de CCA (Figura 4.3). Posteriormente se registró la fluencia del acero de refuerzo de los castillos. Se observó la formación de grietas por flexo-cortante. La parte diagonal se formó al mismo tiempo que la horizontal a una altura de 110 cm desde la base (Figura 4.4). El agrietamiento diagonal se formó al mismo tiempo que el agrietamiento horizontal. Se formaron grietas diagonales en la parte superior e inferior del muro (Figura 4.5). El ensaye se detuvo cuando se observó una degradación de la resistencia a flexión mayor al 20%. El patrón de agrietamiento final se presenta en la Figura 4.6. Las grietas en negro corresponden a los ciclos de carga positivos y las grietas en roja a los ciclos negativos. La curva carga lateral-desplazamiento del muro Mf1 se presenta en la Figura 4.7. La carga se refiere a la carga lateral aplicada en el muro y el desplazamiento al medido en el punto de aplicación de dicha carga (PP1 y PP2).

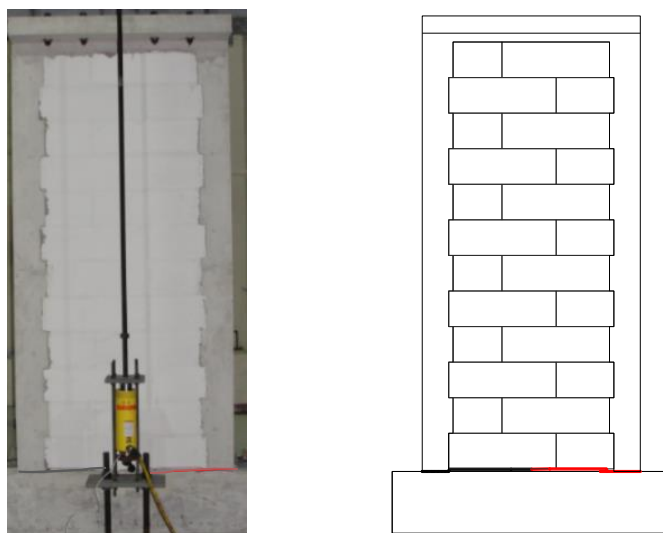


Figura 4.3 Grieta horizontal en muro Mf1

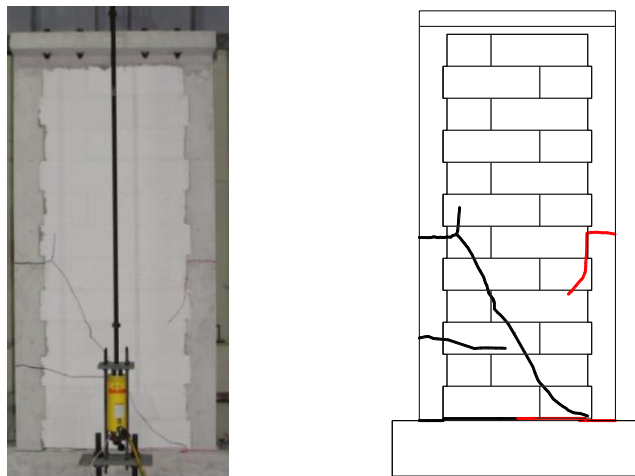


Figura 4.4 Grietas por flexo-cortante Mf1

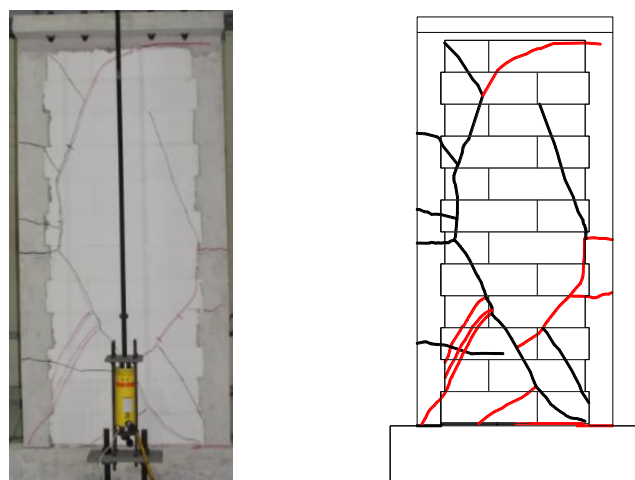


Figura 4.5 Grietas diagonales en muro Mf1

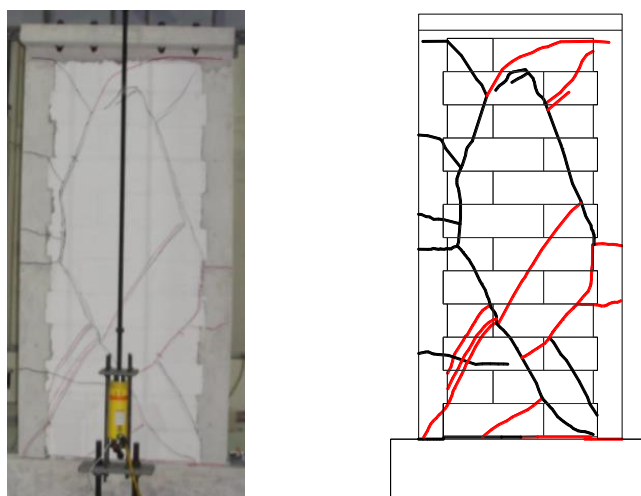


Figura 4.6 Patrón de agrietamiento final del muro Mf1

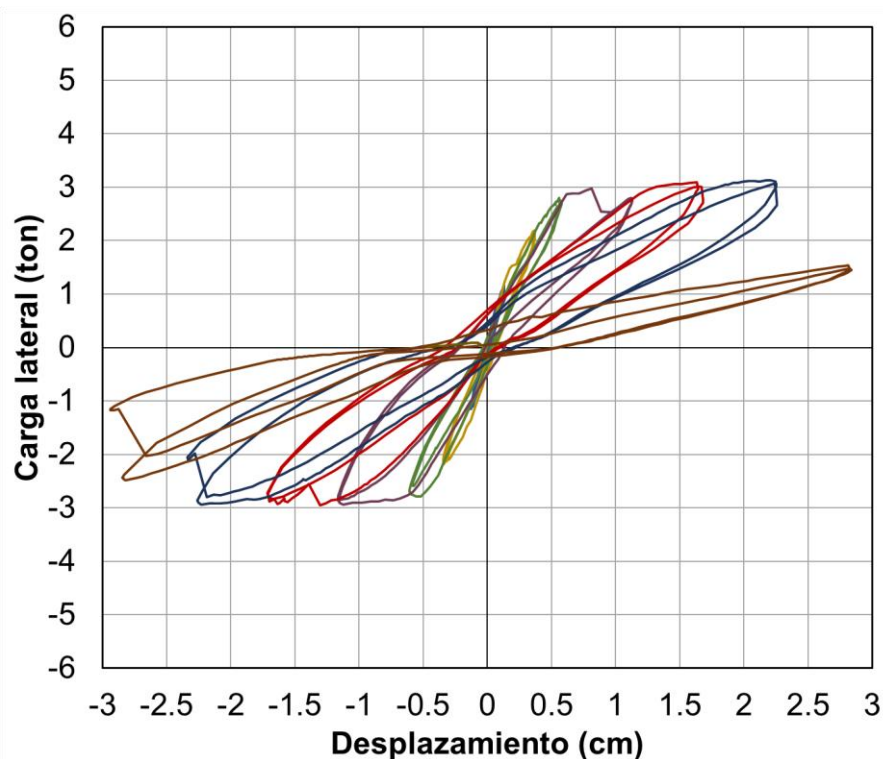


Figura 4.7 Curva carga lateral-desplazamiento del muro Mf1

En la Tabla 4.6 se presentan las cargas de fluencia, agrietamiento por flexo-cortante, máxima y última, con sus respectivos desplazamientos observados durante el ensaye. Para las cargas y desplazamientos de fluencia se consideraron los promedios de las lecturas de las galgas.

Tabla 4.6 Resumen de cargas y desplazamientos registrados para cada evento durante el ensaye del muro Mf1

| Evento | Sentido | Ciclo | Carga (ton) | Desplazamiento (cm) |
|----------------|----------|-------|-------------|---------------------|
| Fluencia | Positivo | 7 | 2.43 | 0.44 |
| | Negativo | 7 | -2.39 | -0.38 |
| Flexo-cortante | Positivo | 9 | 2.97 | 0.81 |
| | Negativo | 9 | -2.94 | -1.13 |
| Carga Máxima | Positivo | 13 | 3.13 | 2.17 |
| | Negativo | 13 | -2.94 | -2.23 |
| Carga última | Positivo | 16 | 1.46 | 2.83 |
| | Negativo | 16 | -1.18 | -2.93 |

En el ensaye del muro Mf2 se aplicaron 14 ciclos de carga lateral. El esfuerzo axial de compresión aplicado durante el ensaye fue de 4.66 kg/cm^2 . El primer evento observado fue la formación de una grieta horizontal entre la base del muro y la primera hilada de bloques de CCA (Figura 4.8) y una grieta horizontal en el castillo izquierdo a una altura de 54 cm. Posteriormente se registró la fluencia del acero de refuerzo de los castillos. Se observó la formación de grietas por flexo-cortante. La parte diagonal se formó al mismo tiempo que la horizontal a una altura de 130 cm desde la base del muro (Figura 4.9). Se formaron grietas diagonales en la parte superior e inferior del muro (Figura 4.10). El ensaye se detuvo cuando se observó una degradación de la resistencia a flexión mayor al 20%. El patrón de agrietamiento final se presenta en la Figura 4.11. La curva carga lateral-desplazamiento del muro Mf2 se presenta en la Figura 4.12.

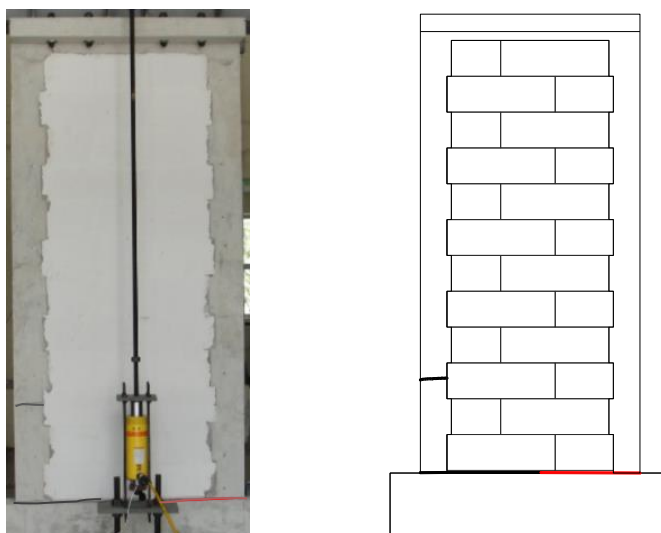


Figura 4.8 Grietas horizontales en muro Mf2

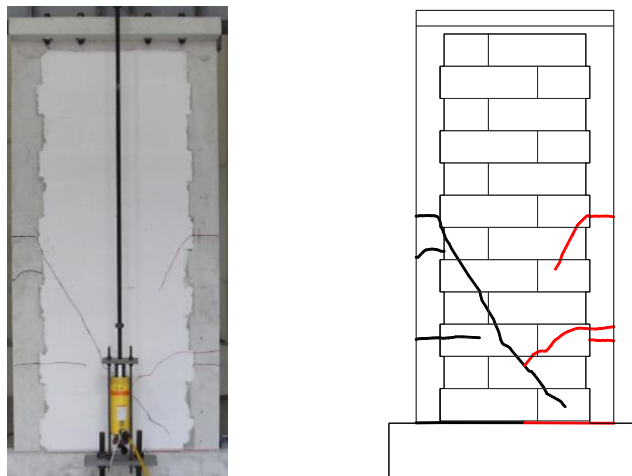


Figura 4.9 Grietas por flexo-cortante Mf2

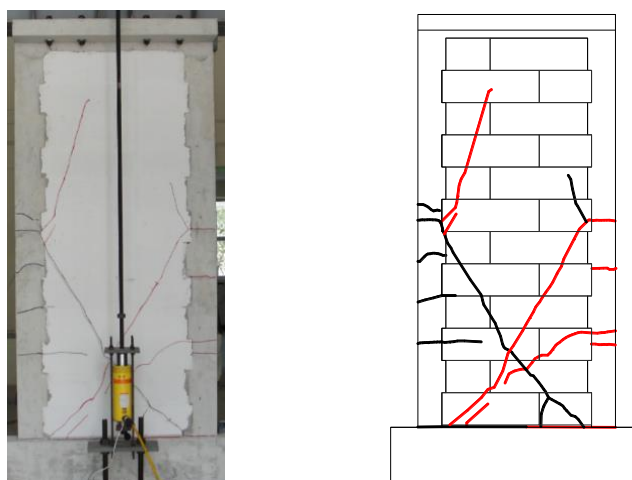


Figura 4.10 Grietas diagonales en muro Mf2

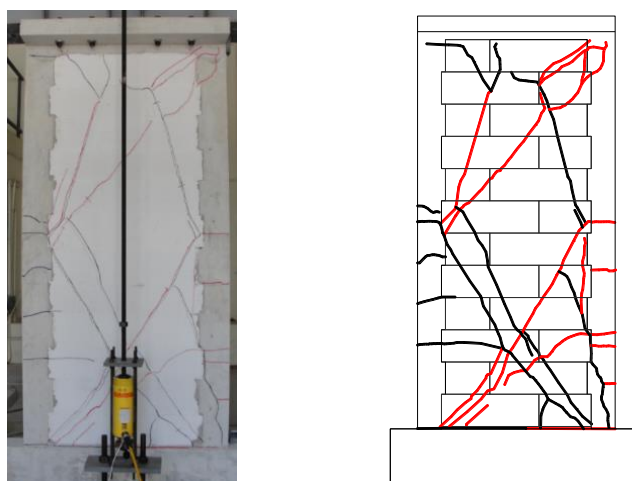


Figura 4.11 Patrón de agrietamiento final del muro Mf2

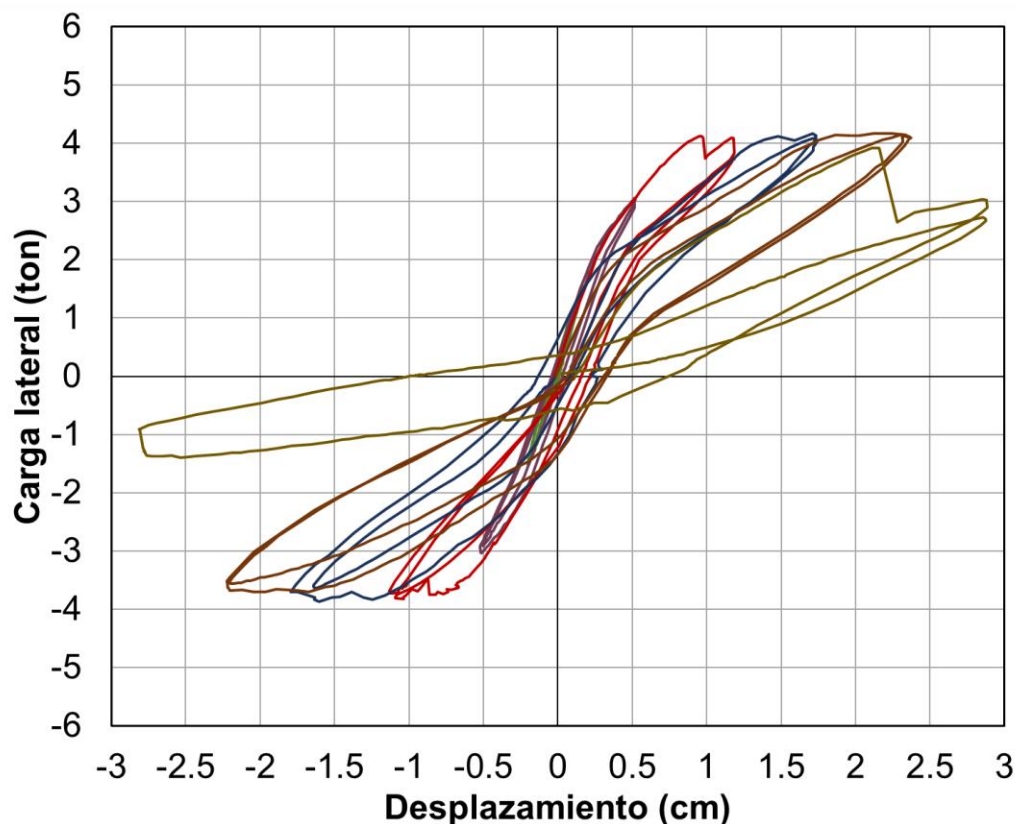


Figura 4.12 Curva carga lateral vs desplazamiento del muro Mf2

En la Tabla 4.7 se presentan las cargas de fluencia, agrietamiento por flexo-cortante, y carga máxima, con sus respectivos desplazamientos observados durante el ensaye

Tabla 4.7 Resumen de cargas y desplazamientos registrados para cada evento durante el ensaye del muro Mf2

| Evento | Sentido | Ciclo | Carga (ton) | Desplazamiento (cm) |
|-----------------------|----------------|--------------|--------------------|----------------------------|
| Fluencia | Positivo | 7 | 3.34 | 0.61 |
| | Negativo | 7 | -3.08 | -0.47 |
| Flexo-cortante | Positivo | 7 | 4.10 | 0.98 |
| | Negativo | 7 | -3.75 | -0.86 |
| Carga Máxima | Positivo | 9 | 4.17 | 1.71 |
| | Negativo | 9 | -3.87 | -1.60 |
| Carga última | Positivo | 14 | 2.68 | 2.88 |
| | Negativo | 13 | -0.91 | -2.81 |

En el ensayo del muro Mf3 se aplicaron 13 ciclos de carga lateral. El esfuerzo axial de compresión aplicado durante el ensayo fue de 7.43 kg/cm^2 . El primer evento observado fue la formación de una grieta horizontal entre la base del muro y la primera hilada de bloques de CCA (Figura 4.13). Posteriormente se registró la fluencia del acero de refuerzo de los castillos. Se observó la formación de una grieta por flexo-cortante y una grieta diagonal: La parte diagonal de la se formó al mismo tiempo que la horizontal se formó a una altura de 1.30 m desde la base del muro. Posterior a la formación de la grieta por flexo-cortante se formó una grieta diagonal en el panel del muro (Figura 4.14). Se formaron grietas diagonales en la parte superior e inferior del muro (Figura 4.15). El patrón de agrietamiento final se presenta en la Figura 4.16. Durante los últimos ciclos de carga se observó la formación de grietas verticales en la junta entre el castillo y el panel de mampostería. El ensayo se detuvo cuando se observó una degradación de la resistencia a flexión mayor al 20%. La curva carga lateral-desplazamiento del muro Mf3 se presenta en la Figura 4.17.

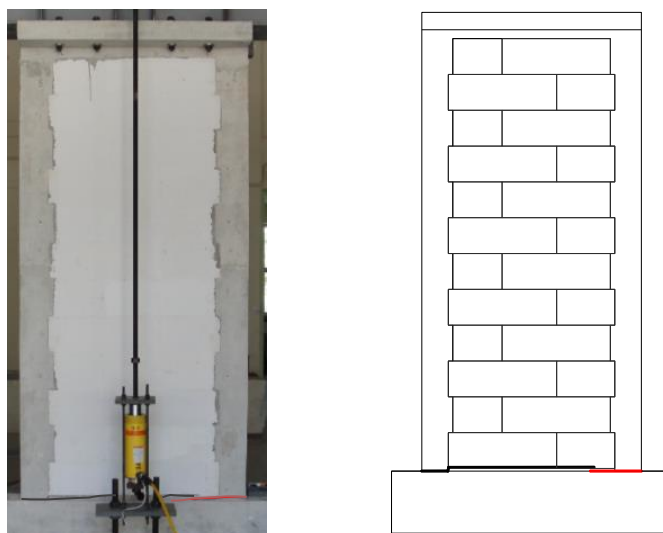


Figura 4.13 Grietas horizontales en muro Mf3

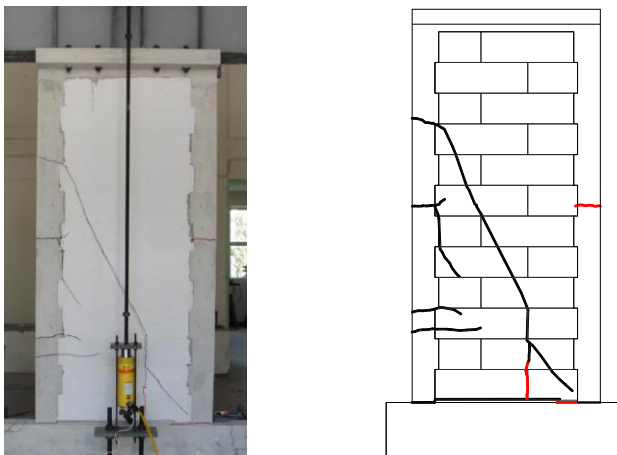


Figura 4.14 Grietas por flexo-cortante y diagonal en muro Mf3

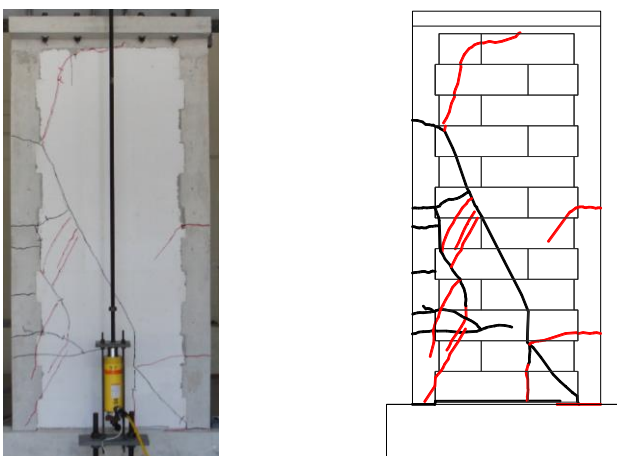


Figura 4.15 Grietas diagonales en muro Mf3

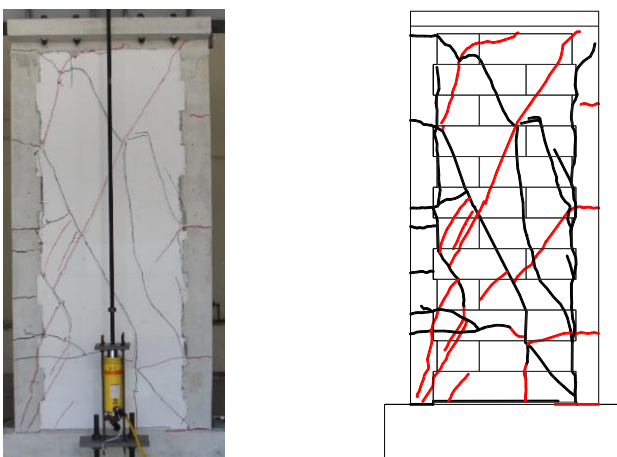


Figura 4.16 Patrón de agrietamiento final del muro Mf3

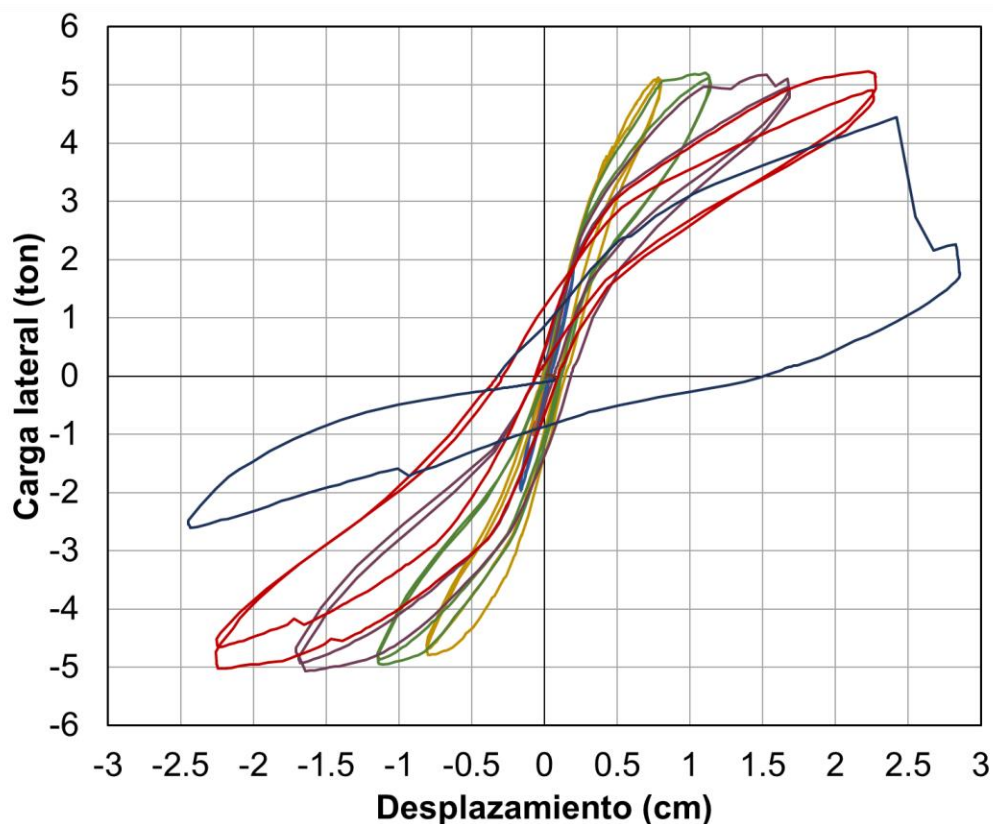


Figura 4.17 Curva carga lateral-desplazamiento del muro Mf3

En la Tabla 4.8 se presentan las cargas de fluencia, agrietamiento por flexo-cortante, agrietamiento diagonal y carga máxima, con sus respectivos desplazamientos observados durante el ensaye

Tabla 4.8 Resumen de cargas y desplazamientos registrados para cada evento durante el ensaye del muro Mf3

| Evento | Sentido | Ciclo | Carga (ton) | Desplazamiento (cm) |
|------------------------|----------|-------|-------------|---------------------|
| Fluencia | Positivo | 5 | 4.80 | 0.66 |
| | Negativo | 5 | -4.41 | -0.53 |
| Flexo-cortante | Positivo | 9 | 4.97 | 1.14 |
| Grieta diagonal | Positivo | 9 | 5.18 | 1.53 |
| Carga Máxima | Positivo | 11 | 5.23 | 2.23 |
| | Negativo | 9 | -5.07 | -1.64 |
| Carga última | Positivo | 13 | 1.75 | 2.85 |
| | Negativo | 13 | -2.51 | -2.45 |

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Comportamiento de muros

El comportamiento de los muros fue en general similar. Los principales eventos observados fueron: grietas horizontales en la base, fluencia del acero de refuerzo de los castillos, grietas por flexo-cortante y grietas diagonales. Posterior a la fluencia del acero de refuerzo de los castillos, se observó el agrietamiento por flexo-cortante. La parte horizontal de la grieta se formó en la junta constructiva de los castillos. La parte diagonal se formó a partir de la junta vertical entre el concreto y el panel de CCA (Figura 28, Figura 33, Figura 38). La grieta horizontal se formó en la junta constructiva debido a que la resistencia a tensión por flexión del concreto (f_r) fue menor que la esperada para un concreto monolítico (Mousa 2015). El agrietamiento por flexo-cortante redujo la resistencia a cortante de los muros y propició la formación de grietas diagonales en el panel de CCA. El daño debido a dicho agrietamiento limitó la capacidad de deformación de los muros. En los reglamentos de mampostería actuales (NTCM y ACI 530-13) no se considera la resistencia a flexo-cortante como un estado límite de falla, sin embargo, para los muros estudiados se debe considerar debido a que modificó su comportamiento de flexión a cortante.

5.2. Resistencia, ductilidad de desplazamiento y distorsión máxima de los muros

En la Figura 5.1 se presentan las envolventes de la parte ascendente de las curvas carga-desplazamiento de los muros. Se consideraron únicamente los ciclos de carga impares y los desplazamientos horizontales antes de la pérdida de resistencia. En la Figura 42 se observa que al incrementar el esfuerzo axial de compresión (σ) la resistencia a flexión aumenta. La relación entre la resistencia a flexión experimental (M_{fe}) del muro Mf2 y Mf3 con respecto al muro Mf1 fueron de 1.32 y 1.70, respectivamente. En la Figura 42 se observa que el desplazamiento horizontal máximo ($\Delta_{m\acute{a}x}$) fue similar para los muros. Lo anterior se debe a la presencia de los agrietamientos por flexo-cortante y diagonales discutidos anteriormente.

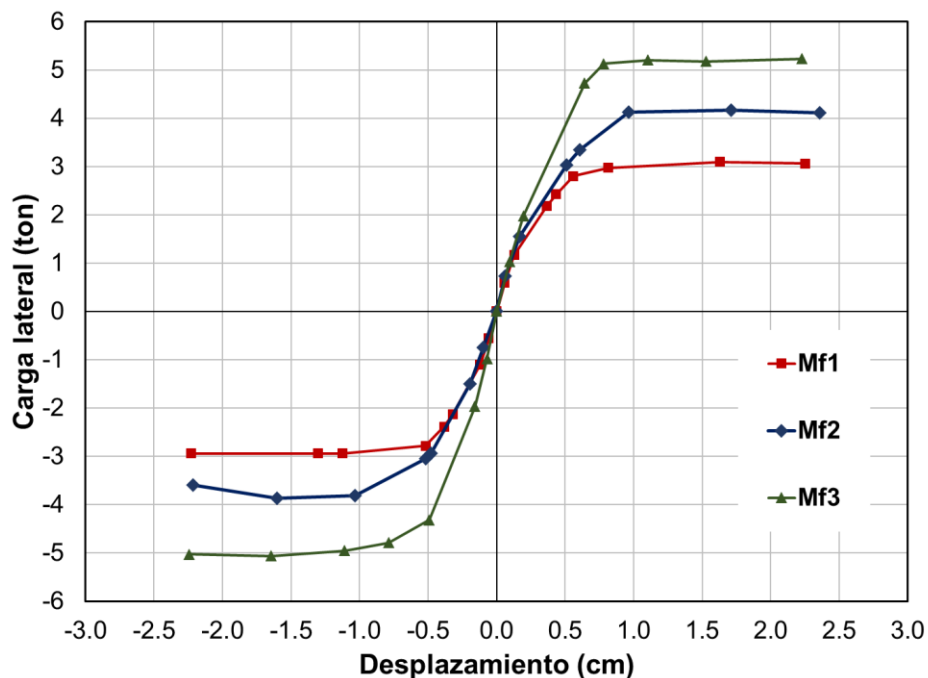


Figura 5.1 Envoltentes de la parte ascendente de la curva carga-desplazamiento de los muros

En la Tabla 5.1 se presenta la resistencia a flexión experimental promedio (M_{fe}) de los muros y sus correspondientes resistencias analíticas (M_{fa}) (ecuación 5). En la tabla se observa que la relación entre la resistencia analítica y experimental de cada muro no fue mayor que el 5%, por tanto, la resistencia se predijo bien con las hipótesis de flexión presentadas anteriormente.

Tabla 5.1 Resistencias de a flexión experimental promedio y analítica de muros Mf1 a Mf3

| Muro | σ (kg/cm ²) | M_{fe} (kg-m) | M_{fa} (kg-m) | $\frac{M_{fa}}{M_{fep}}$ |
|------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| Mf1 | 2.56 | 850080 | 890400 | 1.05 |
| Mf2 | 4.66 | 1125740 | 1099000 | 0.98 |
| Mf3 | 7.43 | 1441440 | 1366960 | 0.95 |

En la Figura 5.2 se presentan las envolventes de los muros en función de la ductilidad de desplazamiento. La ductilidad se determinó como el desplazamiento horizontal máximo ($\Delta_{m\acute{a}x}$) entre el desplazamiento de fluencia (Δ_y). El desplazamiento de fluencia se determinó con el promedio de las lecturas de las galgas extensométricas. En la Figura 5.2 se observa que al incrementar el esfuerzo axial de compresión la ductilidad de desplazamiento disminuye. Esto se debe a que, como se esperaba, los desplazamientos de fluencia incrementaron conforme el esfuerzo axial de compresión aumentó. La relación entre la ductilidad de desplazamiento (μ) del muro Mf2 y Mf3 con respecto al muro Mf1 fueron de 0.83 y 0.69, respectivamente.

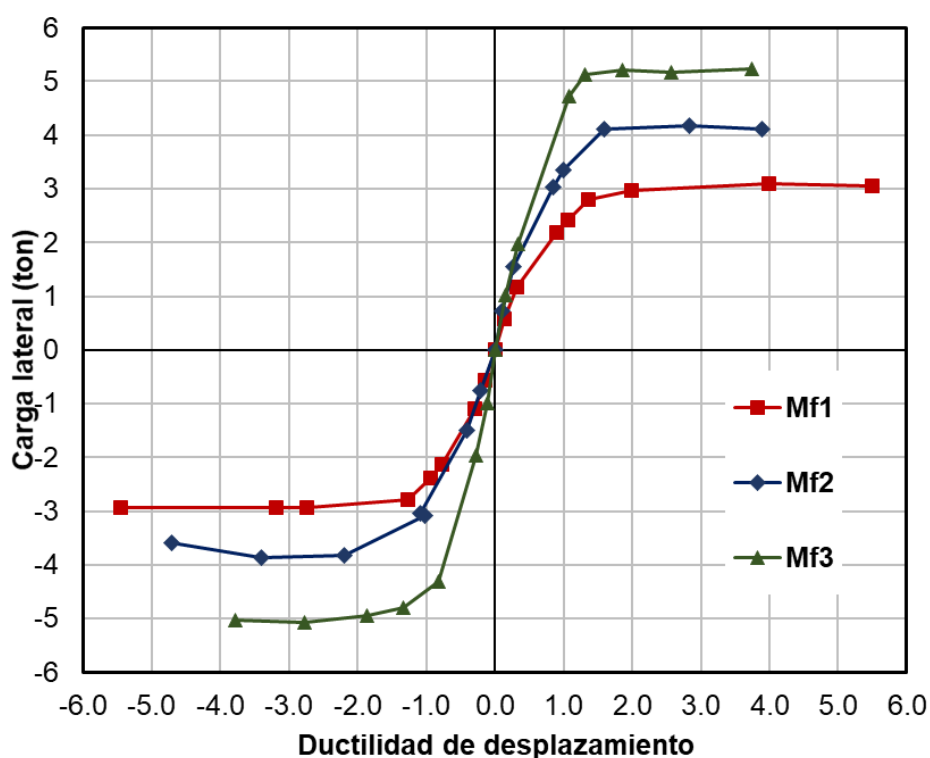


Figura 5.2 Curvas envolventes de los muros en función de la ductilidad de desplazamiento

En la Tabla 5.2 se presenta la ductilidad de desplazamiento (μ) y la distorsión máxima ($\theta_{m\acute{a}x}$) de los muros. En dicha tabla se observa que las ductilidades de desplazamiento estuvieron entre 3.75 y 5.5. Para muros reforzados interiormente de CCA con comportamiento dominado por flexión se obtuvieron ductilidades de desplazamiento entre 2.6 y 6 (Varela 2006). Estas ductilidades son similares a las

obtenidas en este trabajo aun cuando la capacidad de deformación de los muros confinados de CCA estuvo limitada por los agrietamientos por flexo-cortante y cortante. En la Tabla 5.2 se observa que la distorsión máxima de los muros fue similar. Se esperaba que al incrementar el esfuerzo axial de compresión las distorsiones máximas disminuyeran, sin embargo, los agrietamientos mencionados anteriormente no lo permitieron.

Tabla 5.2 Ductilidad de desplazamiento y distorsión máxima de los muros

| Muro | σ (kg/cm²) | Δ_y (cm) | $\Delta_{m\acute{a}x}$ (cm) | μ | $\theta_{m\acute{a}x}$ (%) |
|-------------|--|---------------------------------------|---|-------------------------|--|
| Mf1 | 2.56 | 0.41 | 2.25 | 5.49 | 0.80% |
| Mf2 | 4.66 | 0.52 | 2.36 | 4.54 | 0.84% |
| Mf3 | 7.43 | 0.59 | 2.23 | 3.78 | 0.80% |

5.3. Degradación de rigidez de ciclo de los muros

En la Tabla 5.3 se presenta la rigidez de fluencia experimental (K_{ye}) de los muros. Ésta se definió como la rigidez secante al punto de fluencia del acero de refuerzo. En la Tabla 5.3 se observa, como se esperaba, que al incrementar el esfuerzo axial de compresión la rigidez de fluencia experimental incrementa.

Tabla 5.3 Rigidez de fluencia experimental de muros Mf1, Mf2 y Mf3

| Muro | σ (kg/cm²) | K_{ye} (kg/cm) |
|-------------|--|--|
| Mf1 | 2.56 | 5879.89 |
| Mf2 | 4.66 | 6137.16 |
| Mf3 | 7.43 | 7611.73 |

En la Figura 5.3 se presenta la degradación de rigidez de ciclo- ductilidad de desplazamiento de los muros. La degradación de rigidez de ciclo se definió como la relación de la rigidez de ciclo (K_c) entre la rigidez de fluencia experimental. La rigidez de ciclo se definió como la rigidez secante a un punto de interés de la curva

envolvente. En la Figura 5.3 se observa que los muros tuvieron una degradación de rigidez similar, la variación máxima fue menor al 20%.

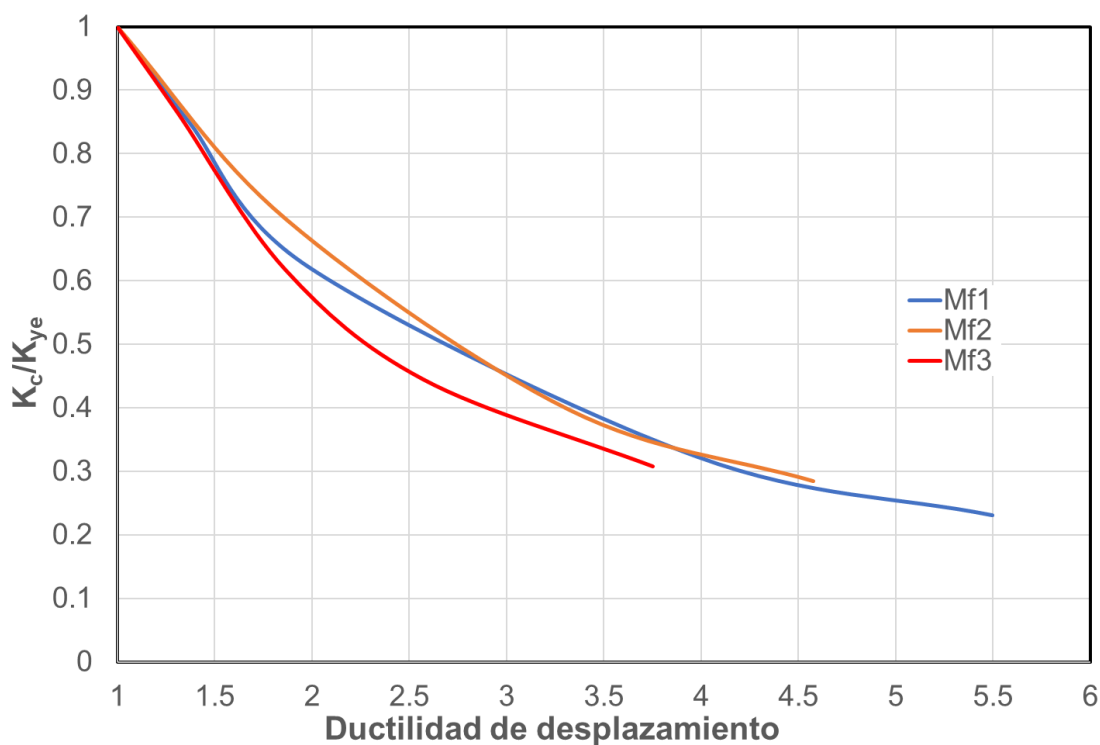


Figura 5.3 Curva degradación de rigidez-ductilidad de desplazamiento

5.4. Energía disipada

En la Figura 5.4 se presentan las curvas energía disipada acumulada-ductilidad de desplazamiento de los muros. La energía disipada acumulada se definió como la sumatoria del área contenida por la curva de histéresis de los ciclos de carga lateral. Se consideraron los ciclos impares hasta el ciclo del desplazamiento horizontal máximo. En la Figura 5.4 se observa que para la misma ductilidad al incrementar el esfuerzo axial de compresión la energía disipada acumulada aumenta. Esto se debe a que al incrementar el esfuerzo axial de compresión la resistencia aumenta, por tanto, el área de las curvas de histéresis es mayor.

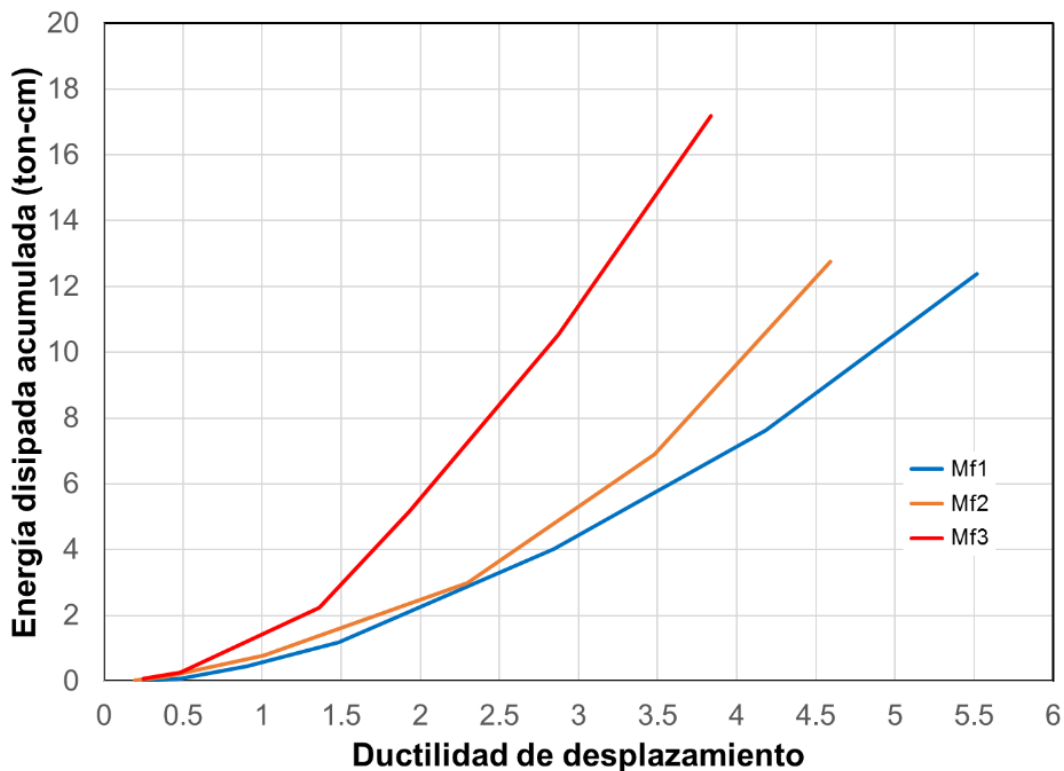


Figura 5.4 Curva energía disipada acumulada-ductilidad

5.5. Modelo de histéresis

En la Tabla 5.4 se presenta para cada muro los valores de α determinados. En la tabla se observa que α varió entre 0.29 y 0.37. En la Tabla 5.4 se observa que al incrementar el esfuerzo axial α incrementa.

Tabla 5.4 Valores de α determinados

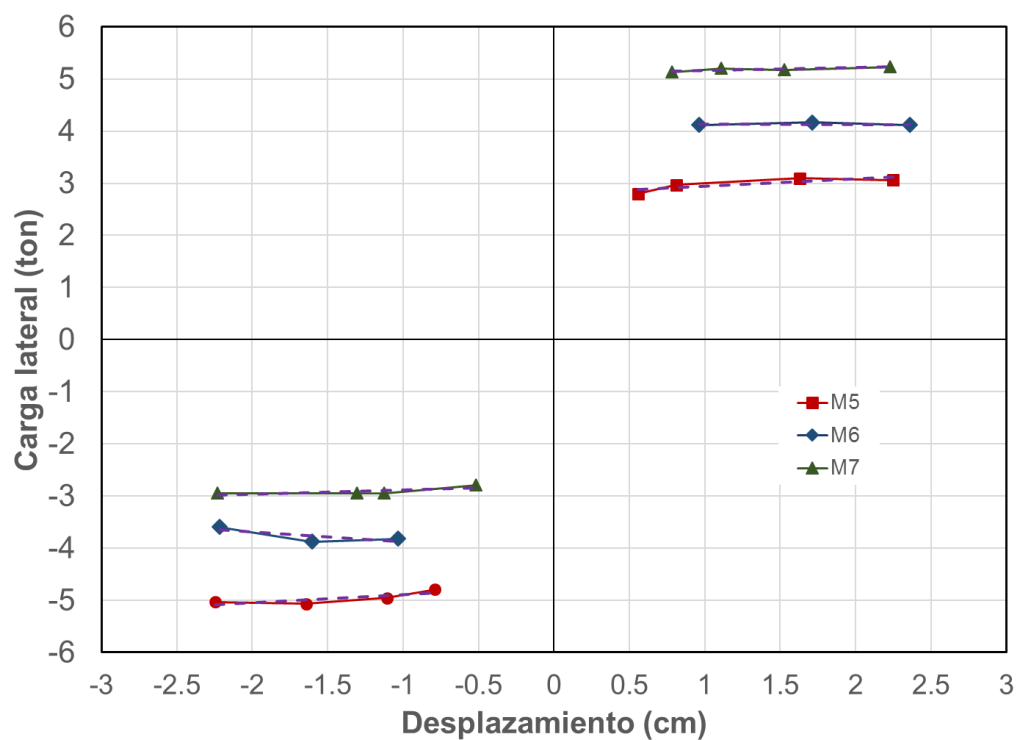
| Muro | α |
|------|----------|
| Mf1 | 0.29 |
| Mf2 | 0.31 |
| Mf3 | 0.37 |

En la Tabla 5.5 se presentan los valores del factor γ y determinados para los sentidos positivo (γ) y negativo (γ'). En la tabla se observa que γ varió entre 0 y 2.38%.

Tabla 5.5 Valores de γ determinados

| Muro | γ (%) | γ' (%) |
|------|-----------------|------------------|
| Mf1 | 2.38 | 1.36 |
| Mf2 | 0.00 | 0.00 |
| Mf3 | 0.71 | 2.03 |

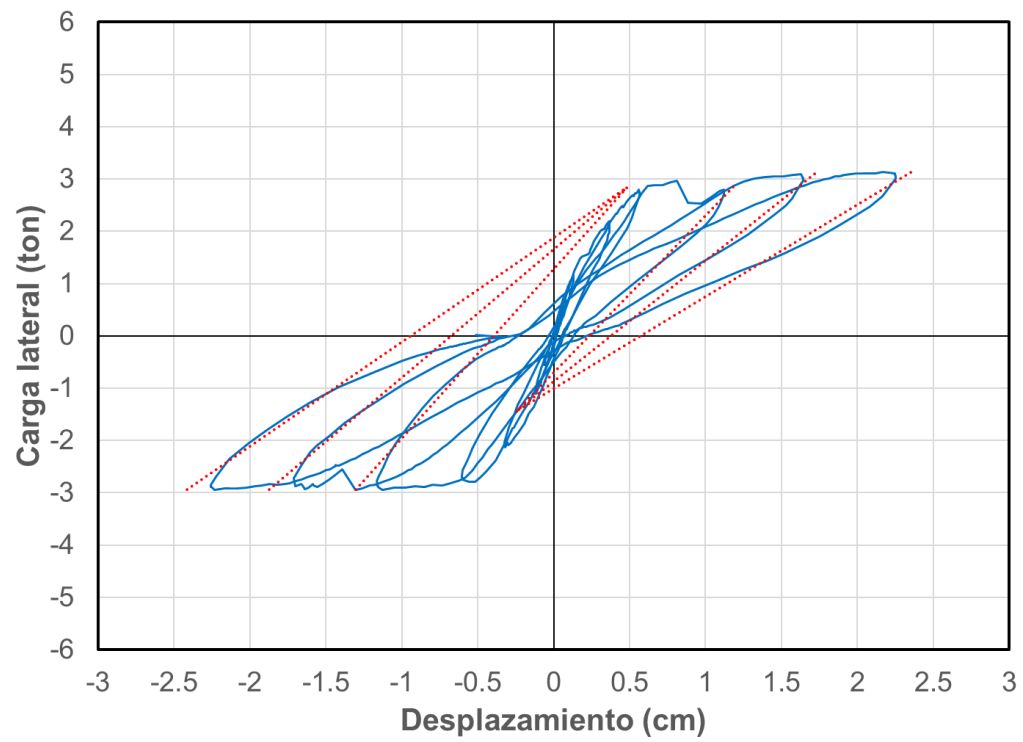
En la Figura 5.5 se presentan con línea punteada los ajustes realizados para determinar γ .

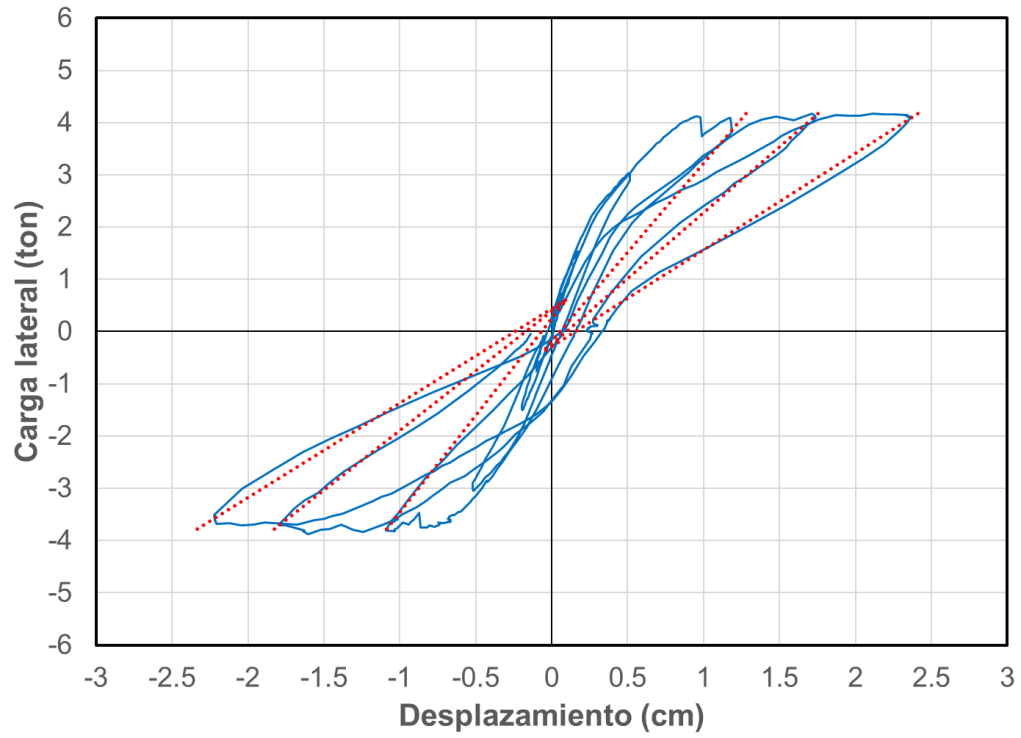
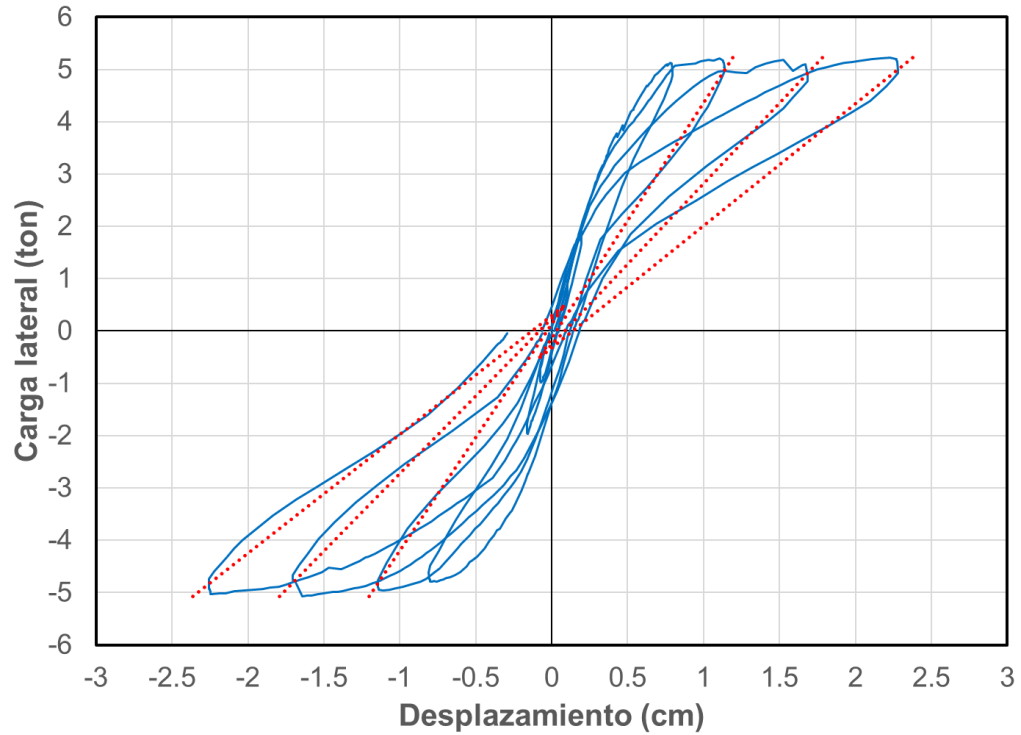
Figura 5.5 Ajuste lineal utilizado para determinar γ

En la Tabla 5.6 se presentan los valores del parámetro Φ determinados para los sentidos positivo (Φ) y negativo (Φ'). En la tabla se observa que Φ varió entre 1 y 0.1. En la Figura 5.6, Figura 5.7 y Figura 5.8 se presenta con línea punteada el ajuste de K_u para cada muro.

Tabla 5.6 Valores de Φ determinados

| Muro | Φ | Φ' |
|------|--------|---------|
| Mf1 | 0.50 | 1.00 |
| Mf2 | 0.10 | 0.16 |
| Mf3 | 0.10 | 0.10 |

Figura 5.6 Ajuste de K_u del muro Mf1

Figura 5.7 Ajuste de K_u del muro Mf2Figura 5.8 Ajuste de K_u del muro Mf3

En la Tabla 5.7 se presentan los valores del parámetro δ determinados para el sentido positivo (δ) y sentido negativo (δ'). En la tabla se observa que δ varió entre 0.1 y 0.25. Al incrementar el esfuerzo axial de compresión δ incrementa. En la Figura 5.9, Figura 5.10 y Figura 5.11 se presenta con línea punteada el ajuste de la recta U-U' para cada muro.

Tabla 5.7 Valores de δ determinados

| Muro | δ | δ' |
|------|----------|-----------|
| Mf1 | 0.15 | 0.10 |
| Mf2 | 0.25 | 0.25 |
| Mf3 | 0.25 | 0.25 |

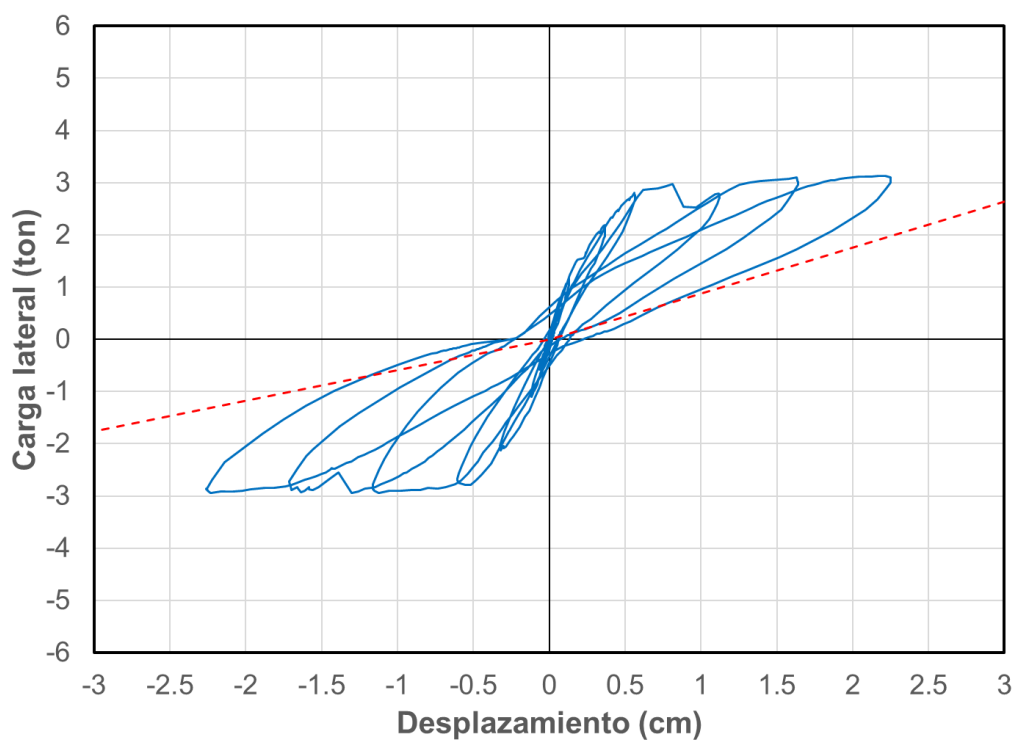


Figura 5.9 Ajuste de la recta U-U' del muro Mf1

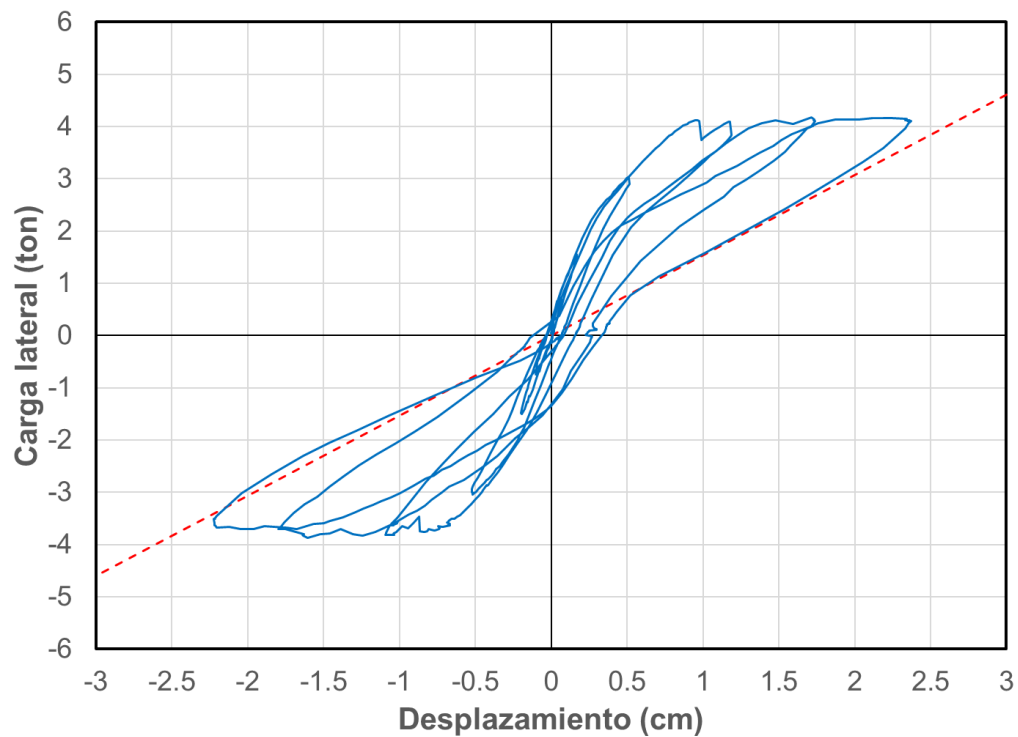


Figura 5.10 Ajuste de la recta U-U' del muro Mf2

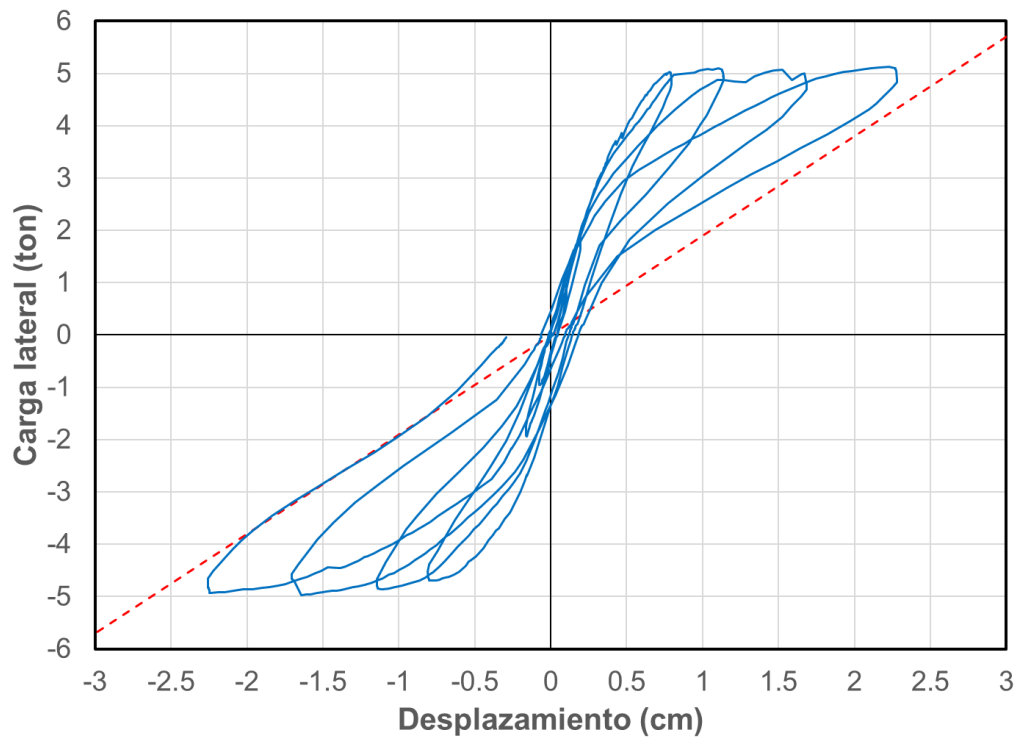


Figura 5.11 Ajuste de la recta U-U' del muro Mf3

Con base en las curvas carga-desplazamiento (Figura 4.7, Figura 4.12 y Figura 4.17) se determinó el mejor ajuste de los parámetros λ_s y ε para los muros estudiados. Los valores de estos parámetros fueron iguales a uno en todos los casos.

En la Figura 5.12, Figura 5.13 y Figura 5.14 se presentan los modelos de histéresis obtenidos con los parámetros mencionados anteriormente

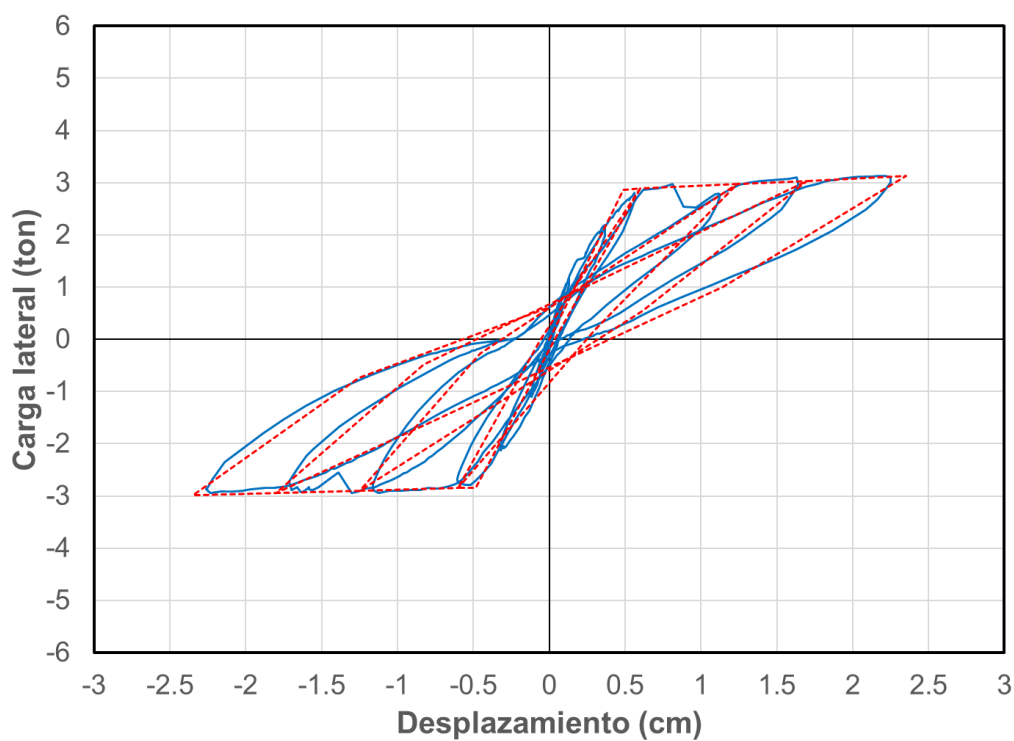


Figura 5.12 Modelo de histéresis muro Mf1

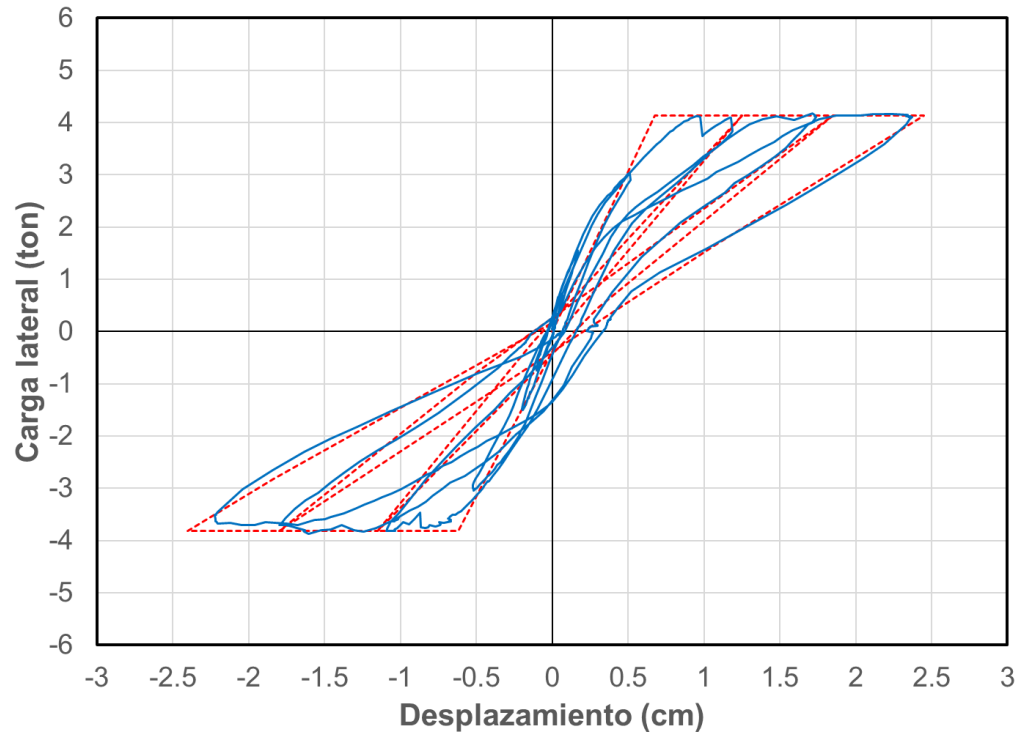


Figura 5.13 Modelo de histéresis muro Mf2

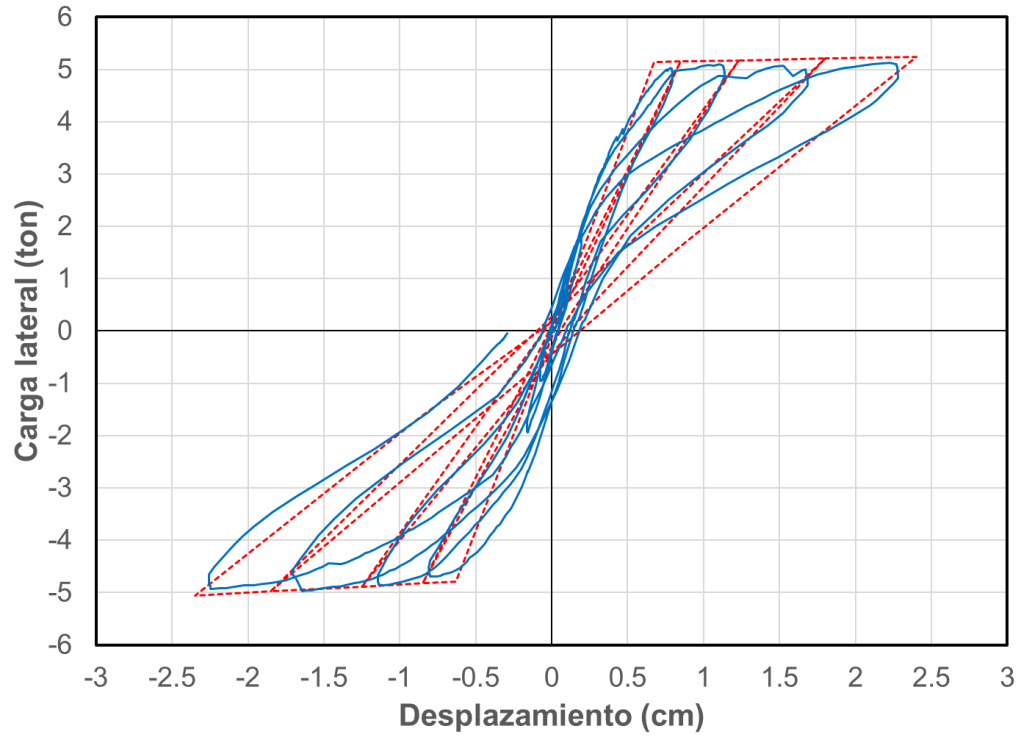


Figura 5.14 Modelo de histéresis muro Mf3

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el comportamiento a flexión de tres muros confinados de CCA. La variable estudiada fue el esfuerzo axial de compresión. Con base en los análisis realizados se presentan las siguientes conclusiones:

- Se observó la formación de grietas por flexo-cortante en los muros Mf1 a Mf3 en la junta constructiva de los castillos. El agrietamiento por flexo-cortante redujo la resistencia a cortante de los muros y propició la formación de grietas diagonales. Adicionalmente, el daño debido a dicho agrietamiento limitó la capacidad de deformación de los muros. Se recomienda considerar resistencia al flexo-cortante como un estado limite debido a que modificó el comportamiento de los muros estudiados.
- Al incrementar el esfuerzo axial de compresión la resistencia a flexión aumenta. La relación entre la resistencia a flexión experimental del muro Mf2 y Mf3 con respecto al muro Mf1 fueron de 1.23 y 1.54, respectivamente. La relación entre la resistencia analítica y experimental de cada muro no fue mayor que el 5%, por tanto, la resistencia se predijo bien con las hipótesis de flexión presentadas en este trabajo.
- Al incrementar el esfuerzo axial de compresión la ductilidad de desplazamiento disminuye. Esto se debe a que, al incrementar el esfuerzo axial de compresión los desplazamientos de fluencia aumentan.
- Los muros tuvieron ductilidades de desplazamiento entre 3.75 y 5.50. Estas ductilidades son similares a las obtenidas por otro autor en muros reforzados interiormente de CCA (entre 2.6 y 6).
- Las distorsiones máximas de los muros fueron similares. Se esperaba que al incrementar el esfuerzo axial de compresión las distorsiones máximas disminuyeran. Sin embargo, los agrietamientos por flexo-cortante y diagonales no lo permitieron.
- Se observó que para un mismo nivel de ductilidad los muros tuvieron una degradación de rigidez similar, la variación máxima fue menor al 20%.

- Se observa que para un mismo nivel de ductilidad al incrementar el esfuerzo axial la energía disipada acumulada aumenta. Esto se debe a que al incrementar el esfuerzo axial de compresión, la resistencia de los muros aumenta, por lo que el área de las curvas de histéresis es mayor.
- De la calibración de los factores α y γ , y los parámetros δ , Φ , λ_s y ϵ para el modelo de histéresis, se observó que:
 - El factor α varió entre 0.29 y 0.37. Al incrementar el esfuerzo axial α incrementa.
 - El factor γ varió entre 0 y 2.38%.
 - El parámetro δ varió entre 0.1 y 0.25. Al incrementar el esfuerzo axial de compresión δ incrementa.
 - El parámetro Φ varió entre 0.1 y 1.
 - Los parámetros λ_s y ϵ fueron iguales a 1 para todos los muros
- El modelo de histéresis seleccionado para este trabajo representa adecuadamente el comportamiento de los muros estudiados.

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, Standard Specification for Precast Autoclaved Aerated Concrete (PAAC) Wall Construction Units, ASTM C 1386 (2007), West Conshohocken, PA, 2007.
5. ASTM - American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Autoclaved Aerated Concrete (AAC), ASTM C 1693 (2011)
6. ASTM - American Society for Testing and Materials, Standard Specification for Splitting Tensile Strength of Masonry Units, ASTM C 1006 (2001), West Conshohocken, PA, 2001.
7. 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.
8. 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.
9. CANNY (1996). 3-Dimensional Nonlinear Static / Dynamic Structural Analysis Computer Program. Technical Manual.
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. 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.
12. Gamboa J. (2015). Comportamiento a flexión de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales: Efecto de la carga axial. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
13. 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)
14. 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.
15. 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.
16. Moreno Eric I. Solís Romel G., Varela Jorge L., Gómez Marco A. (2016). Resistencia a tensión del concreto elaborado con agregado calizo de alta absorción. Concreto y Cemento. Investigación y desarrollo, Volumen 8, No.1, 35-45, Julio.
17. 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.
18. NTCM - Gobierno del Distrito Federal (2004), Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, "Gaceta Oficial del Distrito Federal", México.

19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. Prieto A. (2015). "Comportamiento a flexión de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales: Efecto de la relación de aspecto". Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.

26. 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
27. 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
28. 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.
29. RILEM 1993: Autoclaved Aerated Concrete: Properties, Testing and Design, RILEM Recommended Practice, RILEM Technical Committees 78- MCA and 51-ALC, E & FN Spon, London
30. 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.
31. San Bartolomé, A., and Quiun, D. 2010. Diseño sísmico de edificaciones de albañilería confinada. Revista Ciencia, 13(2):161-185.
32. 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, Paises Bajos.
33. 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.
34. 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.

35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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. Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Acapulco, Mexico, 29 Oct - 1 Nov 2004. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, México D.F.
41. 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.
42. 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.

43. 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.
44. Xella Mexicana. Disponible en <http://www.hebel.mx> Recuperado el 18 de abril de 2017
45. 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.
46. 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.