



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE MUROS DE
MAMPOSTERÍA CONFINADA SUJETOS A CARGAS
LATERALES: EFECTO DE LA CARGA AXIAL”**

TESIS

PRESENTADA POR:

I.C. JOSÉ ALBERTO GAMBOA VILLEGAS

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

OPCIÓN ESTRUCTURAS

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2016

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 para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por el apoyo económico brindado para el desarrollo de este trabajo de investigación.

RESUMEN

El alto índice de crecimiento y desarrollo de las ciudades ha provocado un incremento en la población y la demanda de espacios para viviendas. El desarrollo de estructuras de mampostería confinada de mayor altura se presenta como una posible alternativa para la optimización de los espacios. Al aumentar la altura de los muros de las estructuras, se incrementa su relación de aspecto (altura entre longitud) favoreciendo el comportamiento dominado por flexión. El comportamiento a flexión se relaciona con una falla dúctil caracterizada por la fluencia del acero de refuerzo longitudinal en la zona de tensión y el posterior aplastamiento del concreto en la zona de compresión.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la carga axial en el comportamiento a flexión de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales. Se ensayaron tres muros a escala natural sujetos a combinaciones de carga axial constante y cargas laterales cíclicas reversibles en el plano. La variable de estudio fue el esfuerzo axial. Se consideraron esfuerzos axiales de 4.8 y 7.2 kg/cm². Se diseñaron y construyeron muros con relación de aspecto de 2.4 (M1 y M2) y 1.5 (M3). La altura de los muros fue constante e igual a 266 cm. Los muros se construyeron utilizando tabiques multiperforados de arcilla y mortero en proporciones por volumen 1:3 (cemento Portland: arena). Se obtuvieron curvas carga lateral – desplazamiento horizontal y la evolución del agrietamiento de los muros ensayados. Se analizaron los tres muros ensayados en este trabajo y tres tomados de la literatura. Se presentan las resistencias experimentales y analíticas de los muros. Se determinó la ductilidad de desplazamiento y la distorsión máxima. Se analizó la formación del agrietamiento vertical y diagonal. Se determinó la energía disipada equivalente y la degradación de rigidez de ciclo. Se propuso un modelo de histéresis.

Con base en los resultados experimentales y los análisis realizados, se concluyó que las resistencias a flexión experimentales de los muros se predicen adecuadamente utilizando la teoría de flexión. Para los muros con la misma relación de aspecto, al aumentar el esfuerzo axial, la resistencia a flexión incrementa. Para los muros con la misma relación de aspecto, al aumentar el esfuerzo axial, la ductilidad de desplazamiento y las distorsiones máximas disminuyen. Finalmente, el modelo de histéresis propuesto representa adecuadamente el comportamiento por flexión de los muros de mampostería confinada estudiados.

ABSTRACT

The high rate of growth and development of cities has caused an increase in the population and demand for housing spaces. The development of higher confined masonry structures is presented as a possible alternative for space optimization. As the height of the structures increase, the wall aspect ratio (height / length) also increase. This increase induces the flexural behavior of the walls. This behavior is characterized by yielding of steel reinforcement in the tension zone and subsequent crushing of concrete in the compression zone.

The objective of this research study was to evaluate the effect of axial load on the flexural behavior of confined masonry walls subjected to lateral loads. Three full-scale walls were tested under combinations of constant axial load and in plane reversed cyclic lateral loads. The variable studied was the axial stress. Axial stresses of 4.8 and 7.2 kg/cm² were considered. Walls with aspect ratio of 2.4 (M1 y M2) and 1.5 (M3) and with a height of 266 cm were considered. The walls were built using multi-hollow clay bricks and mortar with a proportion by volume of 1:3 (Portland cement: sand). Lateral load – horizontal displacement curves and cracking evolution were obtained from the confined masonry walls. Experimental and analytical strength of walls are presented. Displacement ductility and maximum distortion were determined. Formation of vertical and diagonal cracking were analyzed. Equivalent dissipated energy and cycle stiffness degradation were determined. Finally, a hysteretic model was proposed.

Based on the experimental results and subsequent analysis, it was concluded that the experimental flexural strength of the walls is well predicted using flexural theory. For walls with the same aspect ratio, as the axial stress increase, the flexural strength of walls also increase. The maximum displacement ductility of the walls varied between 6.06 and 14.31. The maximum distortions varied between 0.98% and 2.46%. For walls with the same aspect ratio, as the axial stress increase, the displacement ductility and maximum distortions also decrease. Finally, the proposed hysteretic model represents well the flexural behavior of confined masonry walls studied in this research.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Planteamiento del problema	1
1.2	Objetivo general	2
1.3	Objetivos específicos	2
1.4	Organización de la tesis	3
CAPÍTULO 2	REVISIÓN DE LA LITERATURA	4
2.1	Muros de mampostería confinada con comportamiento dominado por cortante	4
2.2	Muros de mampostería con comportamiento dominado por flexión.....	6
2.3	Comportamiento de muros de mampostería confinada	9
2.4	Conclusiones de la revisión de la literatura	11
CAPÍTULO 3	METODOLOGÍA	13
3.1	Selección de variables	13
3.2	Obtención de propiedades de materiales.....	13
3.3	Diseño de muros	14
3.4	Construcción de muros	17
3.5	Diseño del sistema de carga e instrumentación.....	20
3.6	Ensaye de muros	23
CAPÍTULO 4	RESULTADOS	25
4.1	Propiedades de materiales	25
4.2	Comportamiento de los muros	26
CAPÍTULO 5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	32
5.1	Resistencia experimental y analítica de los muros	32

5.2	Ductilidad de desplazamiento y distorsión máxima de los muros	34
5.3	Agrietamiento vertical y diagonal en muros	40
5.4	Energía disipada equivalente de los muros	42
5.5	Degradación de rigidez de ciclo de los muros.....	45
5.6	Modelo de histéresis	48
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES		64
BIBLIOGRAFÍA		66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Curvas de resistencia del muro M1	15
Figura 3.2 Curvas de resistencia del muro M2	16
Figura 3.3 Curvas de resistencia del muro M3	16
Figura 3.4 Geometría y carga axial de los muros	17
Figura 3.5 Anclaje del acero de refuerzo longitudinal de un castillo	18
Figura 3.6 Desplante del panel del muro hasta la mitad de la altura total	18
Figura 3.7 Habilitado y colocación de cimbra de castillos	19
Figura 3.8 Colocación de las piezas restantes para completar el panel	19
Figura 3.9 Vista de los muros previo a su ensaye	20
Figura 3.10 Sistema de carga lateral	21
Figura 3.11 Sistema de carga axial	21
Figura 3.12 Ubicación de potenciómetros de polea y potenciómetros lineales	23
Figura 3.13 Protocolo de carga de muros	24
Figura 4.1 Eventos observados en el muro M1	26
Figura 4.2 Eventos observados en el muro M2	27
Figura 4.3 Eventos observados en el muro M3	27
Figura 4.4 Pandeo del castillo del muro M1	28
Figura 4.5 Patrón de agrietamiento final del muro M1	28
Figura 4.6 Patrón de agrietamiento final del muro M2	29
Figura 4.7 Patrón de agrietamiento final del muro M3	29
Figura 4.8 Curva carga lateral - desplazamiento horizontal del muro M1	30
Figura 4.9 Curva carga lateral - desplazamiento horizontal del muro M2	30
Figura 4.10 Curva carga lateral - desplazamiento horizontal del muro M3	31

Figura 5.1 Curva carga lateral – desplazamiento horizontal del muro E1	35
Figura 5.2 Curva carga lateral – desplazamiento horizontal del muro E2	36
Figura 5.3 Curva carga lateral – desplazamiento horizontal del muro M3.....	36
Figura 5.4 Curva carga lateral – desplazamiento horizontal del muro E3	37
Figura 5.5 Curva carga lateral – desplazamiento horizontal del muro M1.....	37
Figura 5.6 Curva carga lateral – desplazamiento horizontal del muro M2.....	38
Figura 5.7 Patrones de agrietamiento asociados a Δ_{max}	39
Figura 5.8 Grietas verticales en muros.....	41
Figura 5.9 Sistema de fuerzas generado por la distribución no uniforme de deformaciones	41
Figura 5.10 Criterio para el cálculo de la EDE (NTCM, 2004).....	43
Figura 5.11 Curva EDE acumulada - distorsión	44
Figura 5.12 Curva EDE acumulada – ductilidad.....	44
Figura 5.13 Curva envolvente de muros con $H'/L=1.1$	45
Figura 5.14 Curvas envolventes de muros con $H'/L=1.5$	46
Figura 5.15 Curvas envolventes de muros con $H'/L=2.4$	46
Figura 5.16 Degradación de rigidez de ciclo - distorsión.....	47
Figura 5.17 Degradación de rigidez de ciclo vs Ductilidad	48
Figura 5.18 Modelo de histéresis de Takeda (CANNY, 1996).....	49
Figura 5.19 Curva de ajuste en muros con $H/L=1$	51
Figura 5.20 Curva de ajuste en muros con $H/L=1.5$	51
Figura 5.21 Curva de ajuste en muros con $H/L=2$	52
Figura 5.22 Rigidez elástica de descarga y rigidez de daño	53
Figura 5.23 Ajuste de la recta U-U' para el muro E1	54
Figura 5.24 Ajuste de la recta U-U' para el muro E2	55

Figura 5.25 Ajuste de la recta U-U' para el muro M3	55
Figura 5.26 Ajuste de la recta U-U' para el muro E3	56
Figura 5.27 Ajuste de la recta U-U' para el muro M1	56
Figura 5.28 Ajuste de la recta U-U' para el muro M2	57
Figura 5.29 Ajuste de la rigidez K_u para el muro E1	58
Figura 5.30 Ajuste de la rigidez K_u para el muro E2	59
Figura 5.31 Ajuste de la rigidez K_u para el muro M3.....	59
Figura 5.32 Ajuste de la rigidez K_u para el muro E3	60
Figura 5.33 Ajuste de la rigidez K_u para el muro M1.....	60
Figura 5.34 Ajuste de la rigidez K_u para el muro M2.....	61
Figura 5.35 Curva carga lateral - desplazamiento horizontal y modelo de histéresis del muro E1.....	62
Figura 5.36 Curva carga lateral - desplazamiento horizontal y modelo de histéresis del muro E2.....	62
Figura 5.37 Curva carga lateral - desplazamiento horizontal y modelo de histéresis del muro E3.....	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resistencia a compresión axial y módulo de elasticidad de la mampostería	25
Tabla 2 Resistencia a compresión axial del concreto de los castillos	25
Tabla 3 Características de los muros analizados	32
Tabla 4 Resistencias experimentales y analíticas de fluencia	33
Tabla 5 Resistencias a flección experimentales y analíticas	34
Tabla 6 Desplazamientos horizontales reducidos y máximos	38
Tabla 7 Ductilidad de desplazamiento de los muros	40
Tabla 8 Resistencia a cortante analítica y experimental	42
Tabla 9 Rigidez de fluencia	47
Tabla 10 Valores del parámetro α	50
Tabla 11 Valores del parámetro β	52
Tabla 12 Valores del parámetro γ	54
Tabla 13 Valores del parámetro Θ	58

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Los muros de mampostería son ampliamente utilizados para la construcción de viviendas. Los muros de mampostería se pueden clasificar en: no reforzados (MNR), reforzados (MR), diafragma (MD) y confinados (MMC). En el país se utiliza principalmente la mampostería confinada debido a su bajo costo y fácil proceso constructivo.

El alto índice de crecimiento y desarrollo de las ciudades ha provocado un incremento en la población y la demanda de espacios para viviendas. El desarrollo de estructuras de mampostería confinada de mayor altura se presenta como una posible alternativa para la optimización de los espacios. Al aumentar la altura de los muros se incrementa su relación de aspecto (altura entre longitud) favoreciendo el comportamiento dominado por flexión (Espinoza *et al.*, 2014). Por otro lado, en muros con baja relación de aspecto se favorece el comportamiento dominado por cortante. En estos muros se puede inducir el comportamiento a flexión si se reduce la cantidad de acero de refuerzo longitudinal de los castillos. La cantidad de acero resultante puede ser menor que la mínima recomendada en los reglamentos vigentes (Prieto, 2015).

El comportamiento a flexión se relaciona con una falla dúctil caracterizada por la fluencia del acero de refuerzo longitudinal, mientras que el comportamiento a cortante se relaciona con una falla frágil caracterizada por grietas diagonales en el panel de mampostería. El comportamiento a flexión es deseable y recomendado para el diseño de estructuras sujetas a cargas laterales cíclicas reversibles como son los sismos.

Existen numerosas investigaciones sobre el comportamiento de muros confinados sujetos a cargas laterales. La mayoría de las investigaciones se han enfocado a muros cuyo comportamiento está dominado por cortante. Entre las variables estudiadas se encuentran el tipo y distribución de acero de refuerzo longitudinal (Treviño *et al.*, 2004), la relación de aspecto (San Bartolomé, 1992; Fernández *et al.*, 2014; Pérez *et al.*, 2015), combinación de piezas de arcilla y piezas de concreto (Tena *et al.*, 2009), las

aberturas y el tipo de refuerzo en las aberturas (Flores et al., 2004), la interacción entre el momento y la fuerza cortante (Pérez et al., 2011), carga axial (Urzúa et al., 2001), entre otras. Por otro lado, existen investigaciones sobre el comportamiento de muros de mampostería cuyo comportamiento está dominado por flexión. Se encontró que solo existe un trabajo donde se estudiaron muros confinados. Los otros trabajos están enfocados, en su mayoría, al estudio de muros reforzados interiormente. Para el caso del trabajo sobre muros confinados, la variable estudiada fue la relación de aspecto (Prieto, 2015). Para el caso de muros reforzados interiormente, se estudiaron diferentes variables como son la cantidad y distribución del acero de refuerzo (Yoshimura et al., 2000; Shedid et al., 2008), el nivel de esfuerzo a compresión axial (Tanner et al., 2005; Shedid et al., 2008), la relación de aspecto (Tanner et al., 2005), adición de patines al muro (Sunley 2012), entre otras. Lo anterior muestra que es necesario realizar más estudios experimentales sobre el comportamiento a flexión de muros confinados sujetos a cargas laterales. Existen variables que todavía no han sido estudiadas como son la carga axial y la cantidad de acero de refuerzo longitudinal, entre otras.

1.2 Objetivo general

Evaluar el efecto de la carga axial en el comportamiento a flexión de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales.

1.3 Objetivos específicos

- Determinar experimentalmente el comportamiento a flexión de los muros sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles.
- Determinar la capacidad de distorsión, ductilidad de desplazamiento, cantidad de energía disipada y la degradación de rigidez de ciclo de los muros.
- Desarrollar un modelo de histéresis que represente el comportamiento dominado por flexión de los muros.

1.4 Organización de la tesis

En el Capítulo 1 se presenta el planteamiento del problema y objetivos del trabajo. En el Capítulo 2 se presenta la revisión de la literatura sobre estudios de muros mampostería confinada con comportamiento dominado por cortante y estudios de muros de mampostería con comportamiento dominado por flexión. Adicionalmente se presentan ecuaciones para determinar la resistencia de muros de mampostería. En el Capítulo 3 se presenta la metodología utilizada en el trabajo, compuesta por la selección de la variable de estudio, la obtención de las propiedades de los materiales, el diseño y construcción de los muros, el diseño del sistema de carga e instrumentación y el ensaye de los muros. En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de materiales y de los muros de mampostería. En el Capítulo 5 se presentan las resistencias experimentales y analíticas de los muros, se determina la ductilidad de desplazamiento y distorsión máxima, se discute la formación del agrietamiento vertical y diagonal, se determina la energía disipada equivalente, la degradación de rigidez de ciclo y se presenta el modelo de histéresis. En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo.

CAPÍTULO 2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

Se realizó una revisión de la literatura sobre el comportamiento de muros de mampostería sujetos a cargas laterales. Se consideraron muros con comportamiento dominado por cortante y por flexión. Se presentan ecuaciones para determinar la resistencia a flexión, al agrietamiento por flexión, cortante, flexo-cortante y deslizamiento en muros de mampostería.

2.1 Muros de mampostería confinada con comportamiento dominado por cortante

San Bartolomé *et al.* (1992) ensayaron un edificio de tres niveles en una mesa vibratoria. El edificio fue construido a escala 1:2.5. Las dimensiones en planta del edificio fueron 2.48 x 1.18 m. El edificio consistió de dos MMC paralelos por nivel, dos losas de entrepiso y una losa de azotea. El objetivo del estudio fue comparar experimentalmente y analíticamente el comportamiento sísmico del edificio. La mesa vibratoria fue programada para aplicar excitaciones en tres etapas. En la primera se aplicó una aceleración de 0.14 (g), en la segunda 0.52 (g) y en la tercera 0.85 (g). El edificio no presentó daño en la primera etapa de vibración. En la segunda, se presentó agrietamiento por flexión y fluencia del acero de refuerzo longitudinal de los castillos. En la tercera etapa se presentó agrietamiento diagonal en ambas direcciones y posteriormente se presentó la falla por cortante en los muros del primer nivel. Los autores concluyeron que los desplazamientos y periodos naturales de vibración obtenidos experimentalmente fueron similares a los obtenidos analíticamente. Otra conclusión fue que la falla por cortante puede presentarse en sismos de gran intensidad.

Treviño *et al.* (2004) ensayaron ocho muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Las dimensiones de los muros fueron de 2.50 m de altura y 2.43 m de longitud. Las variables de estudio fueron el tipo de acero de refuerzo longitudinal y la distribución de los estribos de los castillos. Se utilizaron dos tipos de acero: barras corrugadas y armazones electrosoldados. Se consideraron dos distribuciones de estribos: uniformemente espaciados y concentrados en los extremos.

El comportamiento de los muros fue dominado por cortante. Se presentaron grietas diagonales en ambos sentidos. Posteriormente se presentó el aplastamiento del panel de mampostería en la zona de compresión. Los autores concluyeron que las variables de estudio no influyeron significativamente en la resistencia a cortante de los muros.

Flores *et al.* (2004) ensayaron dos muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Las dimensiones de los muros fueron de 2.5 m de altura y 3 m de longitud. Los muros se construyeron con una abertura en el centro. Las dimensiones de las aberturas fueron de 1.0 x 0.85 m. La variable de estudio fue el confinamiento en la abertura. Un muro fue construido sin elementos confinantes alrededor de su abertura. En el otro se confinó la abertura con castillos y cadenas de concreto reforzado. El comportamiento de los muros fue dominado por cortante. Se presentaron grietas diagonales en ambas direcciones en cada segmento del panel. Los autores concluyeron que ambos muros se agrietaron al mismo nivel de carga lateral. El muro con elementos confinantes en la abertura presentó una mayor capacidad de deformación.

Tena *et al.* (2009) ensayaron cuatro muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Las variables de estudio fueron el tipo de mortero de las juntas y el arreglo utilizado para la combinación de piezas. Las dimensiones de los muros fueron 2.3 m de longitud y 2.3 m de altura. El comportamiento de los muros fue dominado por cortante. Se presentó agrietamiento diagonal en el panel en ambas direcciones. Los autores concluyeron que la resistencia a cortante del muro con piezas combinadas fue menor que la del muro construido con un solo tipo de pieza. El tipo de mortero no afectó la resistencia a cortante de los muros.

Pérez *et al.* (2011) ensayaron dos muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. La variable de estudio fue la interacción momento-cortante. Un muro se ensayó aplicando un momento flexionante en el extremo superior y el otro se ensayó sin el momento flexionante. El comportamiento de los muros fue dominado por cortante. Se presentó agrietamiento diagonal en el panel en ambos sentidos y aplastamiento de los castillos en la zona de compresión. Los autores concluyeron que la presencia del momento flexionante en la parte superior del muro

reduce la resistencia al agrietamiento. La resistencia a cortante no depende la variable de estudio.

Fernández *et al.* (2014) ensayaron cuatro muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Las variables de estudio fueron la relación de aspecto y el esfuerzo axial. Se consideraron relaciones de aspecto de 1.17 y 1.82, y esfuerzos axiales de 3.72 y 5.59 kg/cm². La altura de los muros se mantuvo constante de 266 cm. El comportamiento de los muros fue dominado por cortante. Se presentaron grietas diagonales en ambas direcciones. Los autores concluyen que la resistencia a cortante de los muros de mampostería confinada es función de su relación de aspecto.

Pérez *et al.* (2015) ensayaron siete muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. La variable de estudio fue la relación de aspecto (de 0.3 a 2.2). La altura de los muros se mantuvo constante de 2.5 m. El comportamiento de los muros fue dominado por cortante. Se presentaron grietas diagonales en ambas direcciones. Los autores concluyeron que al incrementar la relación de aspecto, la resistencia a cortante en los muros disminuye. La deformación lateral de falla de los muros incrementa al incrementar la relación de aspecto.

2.2 Muros de mampostería con comportamiento dominado por flexión

Yoshimura *et al.* (2000) ensayaron 9 muros de mampostería reforzada sujetos a cargas cíclicas reversibles. Los muros se construyeron a escala 1:2. Las variables de estudio fueron la cantidad y distribución del acero de refuerzo vertical y horizontal y el esfuerzo axial. La longitud de los muros fue de 1.8 m y su altura de 1.5 m. Se aplicó carga lateral a una altura de 1.67 m. Se aplicaron esfuerzos axiales de 1.8, 0.84 y -0.11 MPa. El comportamiento de los muros fue dominado por flexión. Los autores concluyeron que al incrementar la cantidad de acero refuerzo vertical y horizontal aumenta la resistencia a flexión. Al incrementar el esfuerzo axial, la resistencia aumenta y disminuye la ductilidad de desplazamiento. La resistencia a flexión de los

muros puede determinarse con la teoría existente para muros de mampostería reforzada.

Tanner *et al.* (2005) ensayaron 8 muros de CCA sujetos a cargas cíclicas reversibles. Las variables de estudio fueron la relación de aspecto, el esfuerzo axial y el tipo de pieza. 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. Los muros fueron contruidos 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 autores concluyeron que el comportamiento de los muros fue dominado por flexión. El comportamiento 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.

Shedid *et al.* (2008) ensayaron seis muros de mampostería reforzada sujetos a cargas laterales cíclicas reversibles. Las variables de estudio fueron la cantidad de acero de refuerzo vertical, la distribución del refuerzo vertical y el esfuerzo axial. La longitud de los muros fue 1.8 m y su altura de 3.6 m. El comportamiento de los muros fue dominado por flexión. El comportamiento se caracterizó por la aparición de grietas horizontales que iniciaban en los extremos de los muros, la fluencia del acero de refuerzo en la zona de tensión y aplastamiento de la mampostería en la zona de compresión. Los autores concluyeron que al incrementar la cantidad acero de refuerzo vertical, incrementa la resistencia a flexión y se reduce la ductilidad de desplazamiento. Al incrementar el esfuerzo axial, incrementa la resistencia a flexión y se reduce la ductilidad de desplazamiento.

Sunley *et al.* (2012) ensayó dos muros de concreto reforzado sujetos a cargas cíclicas reversibles. Los muros se construyeron a escala 1:3. Un muro tuvo una sección transversal rectangular y el otro una sección tipo "I". Se determinaron las resistencias con las ecuaciones de diseño establecidas en el ACI, AIJ y Eurocódigo. El comportamiento de los muros fue dominado por flexión. El comportamiento se caracterizó por la aparición de grietas horizontales y grietas diagonales en las esquinas

inferiores de los muros, posteriormente se presentó la fluencia del acero de refuerzo en las zonas de tensión. Los autores concluyeron que la resistencia a flexión del muro con sección transversal rectangular puede determinarse correctamente con las ecuaciones de diseño establecidas en el ACI, AIJ y Eurocódigo. Por otro lado, los códigos de diseño subestiman la resistencia a flexión del muro con sección transversal tipo "I".

Espinosa *et al.* (2014) evaluaron la viabilidad de construir edificios altos de mampostería confinada en zonas sísmicas. Por tal motivo, diseñaron un edificio de 10 niveles ubicado en la Zona de Transición de la Ciudad de México. Las dimensiones en planta del edificio fueron de 52.76 x 19.64 metros. La altura total del edificio fue de 30 m. Se consideraron muros con longitudes de 2.27 m y 5.12 m en la dirección larga y muros con una longitud de 9.27 m en la dirección corta. Para evaluar su comportamiento, el edificio fue sujeto a análisis dinámicos no lineales bajo diferentes sismos. Los análisis se realizaron exclusivamente en la dirección larga del edificio. Los autores mencionan que a medida que se incrementa la altura de los edificios se incrementa la relación de aspecto de los muros y se favorece su comportamiento dominado por flexión. Para el desarrollo de modelos analíticos que representen el comportamiento dominado por flexión de muros de mampostería confinada es necesario determinar: la naturaleza de las curvas de histéresis, capacidad de deformación, disipación de energía y características de la degradación de resistencia y rigidez del elemento. Con base en los análisis realizados se concluye que, bajo ciertas consideraciones, el comportamiento de edificios altos de mampostería confinada puede estar dominado por flexión.

Prieto (2015) ensayó tres muros de mampostería confinada sujetos a cargas cíclicas reversibles. La variable de estudio fue la relación de aspecto. Se consideraron muros con relación de aspecto de 2.4, 1.5 y 1.1. La altura de los muros fue de 2.91 m y su espesor de 0.115 m. La sección transversal de los castillos fue de 0.115 m x 0.115 m. Se consideró una barra de acero de diámetro nominal 3/8" como refuerzo longitudinal en los castillos. La cantidad de acero de refuerzo longitudinal considerada fue menor a los requisitos mínimos establecidos en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería de Distrito Federal (NTCM,

GDF, 2004) para mampostería confinada. Se consideraron tabiques multiperforados de arcilla extruida de 115 mm de espesor, 200 mm de altura y 325 mm longitud como tipo de pieza. Se consideró una cantidad nula de acero de refuerzo transversal. El comportamiento de los muros fue dominado por flexión. Dicho comportamiento se caracterizó por la aparición de una grieta horizontal en la base del muro, grietas horizontales en los castillos, fluencia del acero de refuerzo y el aplastamiento del concreto de los castillos. Se concluye que al aumentar la relación de aspecto, la resistencia a flexión disminuye y la capacidad de desplazamiento máximo aumenta. La resistencia de los muros se mantuvo estable hasta ductilidades de desplazamiento comprendidas entre 7.9 y 11.8. La ductilidad de desplazamiento promedio fue de 10.

2.3 Comportamiento de muros de mampostería confinada

El comportamiento a flexión de un muro de mampostería confinada se caracteriza por la fluencia del acero de refuerzo en la zona de tensión y el posterior aplastamiento del concreto en la zona de compresión. La resistencia a flexión de un muro de mampostería confinada se puede determinar mediante las hipótesis fundamentales de flexión (NTCM, GDF, 2004). Si se asume que el eje neutro se encuentra dentro de la sección transversal de uno de sus castillos y se considera un bloque rectangular equivalente para los esfuerzos de compresión, la resistencia a flexión se puede determinar con la ecuación (2.1).

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

Donde c es el eje neutro, β_1 es igual a 0.85, L la longitud del muro, C es la resultante del bloque de compresión, T es la tensión en el acero de refuerzo longitudinal y r es el recubrimiento del acero de refuerzo longitudinal. Los valores de C y T se calculan con las ecuaciones (2.2) y (2.3), respectivamente.

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

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

Donde f'_c es la resistencia a compresión axial del concreto, t es el espesor del muro, A_s es el área de acero de refuerzo longitudinal y f_s es el esfuerzo de fluencia del acero

de refuerzo longitudinal calculado con el modelo constitutivo desarrollado por Rodríguez y Botero (1996).

La carga axial aplicada en la sección transversal se calcula con la ecuación (2.4):

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

Para un muro en volado con carga lateral y carga axial en su extremo, la carga lateral asociada a la resistencia a flexión del muro se puede determinar con la ecuación (2.5):

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

Donde M_n es la resistencia a flexión y H la altura del muro.

Por otro lado, la fuerza lateral que produce el primer agrietamiento por flexión en la base del muro se puede determinar con la ecuación (2.6) (Klingner *et al.*, 2000):

$$V_{cr} = \frac{\left(\frac{I}{L/2}\right) * \left(f_t + \frac{P}{A_t}\right)}{H} \quad (2.6)$$

Donde I es el momento de inercia de la sección transversal del muro, f_t es la resistencia a tensión por flexión perpendicular a las juntas horizontales de la mampostería.

El comportamiento a cortante se caracteriza por la aparición de grietas diagonales en el panel de mampostería. La resistencia a cortante, asociada a la aparición del primer agrietamiento diagonal, se puede determinar con la ecuación (2.7) (Sosa, 2013):

$$V_c = 0.46 * v_m * \alpha * A_t + 0.3 * P \quad (2.7)$$

Donde v_m es la resistencia a compresión diagonal (resistencia a cortante) de la mampostería, α es el inverso de la relación de aspecto (H/L), A_t el área de la sección transversal del muro y P la carga axial.

El comportamiento a flexo-cortante se caracteriza por la aparición de una grieta horizontal en el extremo del muro a una altura igual a la longitud media del muro, la cual posteriormente se propaga en una grieta diagonal. La resistencia a flexo-cortante se puede determinar con la ecuación (2.8) (Klingner *et al.*, 2000):

$$V_{fc} = \frac{s[f_t + P/A_t]}{H - L/2} + C_v \quad (2.8)$$

Donde S es el módulo de sección, f_t la resistencia a tensión del concreto, A_t el área de la sección transversal del muro y P la carga axial. La constante C_v representa la fuerza adicional necesaria para la formación de la grieta diagonal. La fuerza adicional C_v se calcula con la ecuación (2.9):

$$C_v = 0.1 * f_t * d' * t \quad (2.9)$$

Donde d' es el peralte efectivo del muro.

El comportamiento por deslizamiento se caracteriza por un movimiento de cuerpo rígido del muro. La resistencia al deslizamiento determina con la ecuación (2.10) (Drysdale y Hamid, 2008):

$$V_d = \mu * P \quad (2.10)$$

Donde μ es el coeficiente de fricción y P es la carga axial. Para este trabajo el valor de μ se considera igual a uno (NTCM, GDF, 2004).

2.4 Conclusiones de la revisión de la literatura

Con base en la revisión anterior se encontró que al incrementar la altura en un edificio de mampostería, se incrementa la relación de aspecto de los muros y se favorece su comportamiento dominado por flexión. Para el desarrollo de modelos analíticos que representen el comportamiento a flexión de muros de mampostería confinada es necesario determinar: curvas de histéresis, capacidad de deformación, disipación de energía y características de la degradación de resistencia y rigidez.

La mayoría de los estudios sobre muros de mampostería confinada se han enfocado al comportamiento dominado por cortante. Las variables estudiadas han sido el tipo de acero de refuerzo longitudinal, la relación de aspecto, combinación de piezas de arcilla y piezas de concreto, las aberturas, la carga axial y la interacción entre el momento flexionante y la fuerza cortante. Por otro lado se encontró que existe un solo estudio sobre el comportamiento a flexión de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales. La variable de estudio fue la relación de aspecto. En dicho estudio se comprobó que es posible obtener un comportamiento dominado por flexión si se considera una cantidad de acero de refuerzo longitudinal menor a la mínima establecida en las NTCM para mampostería confinada. El comportamiento a flexión

se caracterizó por la fluencia del acero de refuerzo longitudinal. Se observaron ciclos de carga sin pérdida de resistencia hasta una ductilidad de desplazamiento promedio de 10. Los otros trabajos relacionados con el comportamiento dominado por flexión están enfocados, en su mayoría, al estudio de muros reforzados interiormente. Las variables estudiadas fueron la cantidad y distribución del acero de refuerzo, el nivel de esfuerzo a compresión axial, la relación de aspecto y adición de patines al muro, entre otras.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

Las actividades realizadas en este trabajo para el desarrollo experimental son las siguientes:

- Selección de variables.
- Obtención de propiedades de materiales.
- Diseño de muros.
- Construcción de muros.
- Diseño del sistema de carga e instrumentación.
- Ensaye de muros.

3.1 Selección de variables

Para esta investigación la variable de estudio fue la carga axial, representada como esfuerzo axial. Los esfuerzos axiales se determinaron a partir de un análisis de cargas para muros interiores en edificios destinados para vivienda. Se analizaron edificios de cuatro y seis niveles. Los esfuerzos axiales resultantes fueron 4.8 y 7.2 kg/cm² para cuatro y seis niveles, respectivamente.

3.2 Obtención de propiedades de materiales

Se determinaron las siguientes propiedades de materiales:

- Resistencia a compresión axial y módulo de elasticidad de la mampostería.
Se ensayaron cuatro pilas consistentes de tres piezas y dos juntas de mortero. Se utilizaron tabiques multiperforados de arcilla extruida de 115 mm de espesor, 200 mm de altura y 325 mm de longitud. El esfuerzo axial de compresión se calculó sobre el área gruesa de la sección transversal de la pila.
- Resistencia a compresión axial del concreto. Se obtuvieron seis muestras cilíndricas del concreto utilizado en los castillos de cada muro. Los cilindros tuvieron 150 mm de diámetro aproximadamente.

- Resistencia de fluencia del acero de refuerzo. Debido a que en este trabajo se utilizó el mismo acero de refuerzo que en el trabajo de Prieto (2015), se consideró el mismo esfuerzo de fluencia experimental de $4,545 \text{ kg/cm}^2$.

Las normas que se utilizaron son las siguientes:

- Norma Mexicana NMX-C-464-ONNCCE-2010 “Industria de la construcción – Mampostería- Determinación de la resistencia a compresión axial y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o concreto- Método de prueba”.
- Norma Mexicana NMX-C-083-ONNCCE-2002 “Industria de la construcción – Concreto- Determinación de la resistencia a compresión de cilindros de concreto- Método de prueba”.
- Norma Mexicana NMX-C-407-ONNCCE-2002 “Industria de la construcción – Acero- Varilla corrugada de acero proveniente de lingote y palanquilla para refuerzo de concreto- Especificaciones y métodos de prueba”.

3.3 Diseño de muros

El diseño de los muros constó de dos etapas. La primera fue la definición de parámetros de diseño. La segunda fue un proceso iterativo, en el cual se seleccionó la longitud del muro hasta validar la falla por flexión.

Se seleccionaron los siguientes parámetros de diseño:

- Altura (H) constante igual a 266 cm.
- Espesor constante igual a 11.5 cm.
- Esfuerzos axiales de 4.8 y 7.2 kg/cm^2 .
- Tabiques multiperforados de arcilla extruida.
- Mortero 1:3 en proporciones por volumen (cemento: arena).
- Acero de refuerzo longitudinal en castillos consistente en una barra de diámetro nominal $3/8$ ”, con esfuerzo de fluencia de $4,450 \text{ kg/cm}^2$.
- Cantidad de acero de refuerzo transversal nula.
- Castillos con una sección transversal de $11.5 \times 11.5 \text{ cm}$.
- Resistencia a compresión axial del concreto de los elementos confinantes (castillos y cadenas) igual a 200 kg/cm^2 .

- Resistencia a tensión por flexión perpendicular a las juntas horizontales de la mampostería igual a 4.42 kg/cm^2 (valor promedio) (Ojeda, 2014)

Se consideraron tres muros a escala natural denominados M1 a M3. Se propusieron longitudes de muros de 122 cm y 188 cm. Dichas longitudes son las mismas que se utilizaron en el trabajo de Prieto (2015). Lo anterior permitió conjuntar sus resultados con los de este trabajo. Para el muro de 122 cm se consideraron esfuerzos axiales de 4.8 kg/cm^2 y 7.2 kg/cm^2 . Para el muro con una longitud de 188 cm se consideró un esfuerzo axial de 4.8 kg/cm^2 . Con dichas longitudes y esfuerzos se determinó la resistencia de los muros en función del esfuerzo axial. La resistencia a flexión, al agrietamiento por flexión, a cortante, a flexo-cortante y al deslizamiento se determinaron con las ecuaciones 2.1, 2.6, 2.7, 2.8 y 2.10, respectivamente. En la Figura 3.1, Figura 3.2 y Figura 3.3 se presentan las curvas de resistencia para los muro M1, M2 y M3, respectivamente.

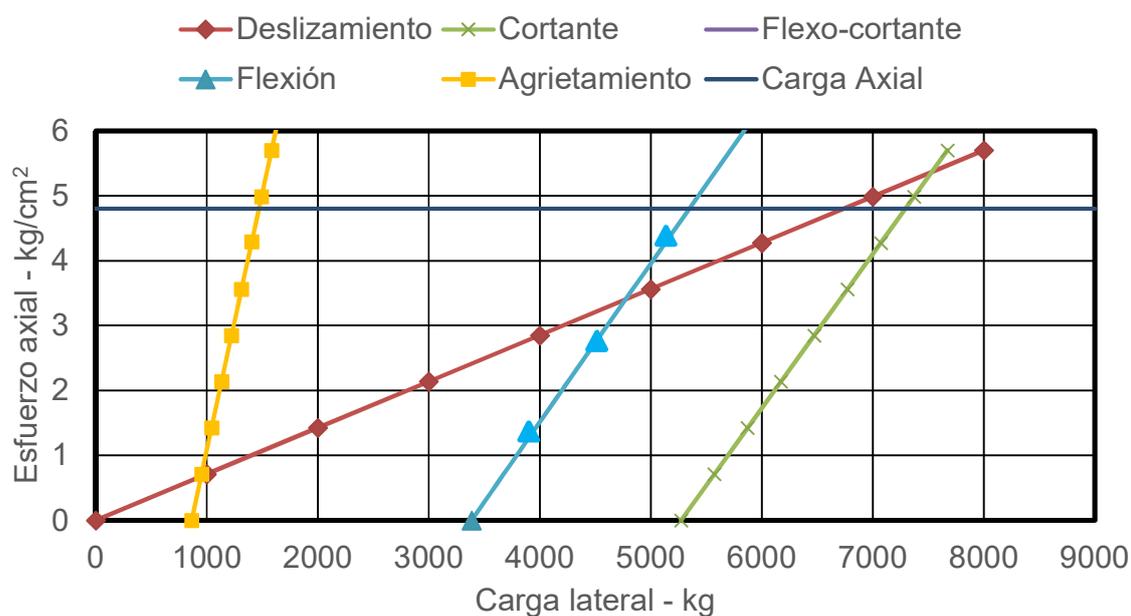


Figura 3.1 Curvas de resistencia del muro M1

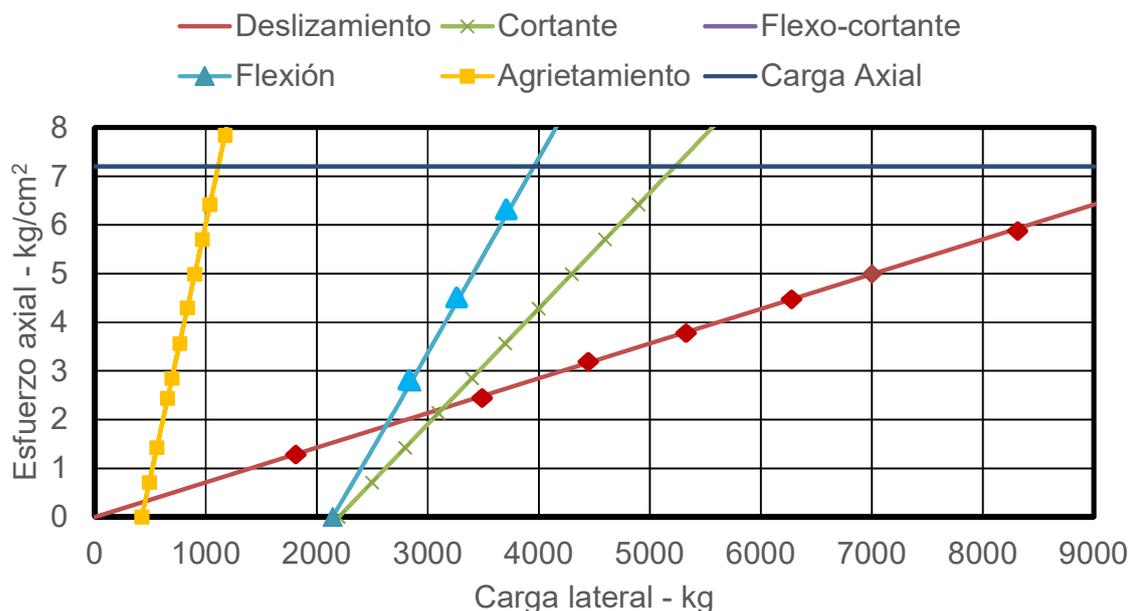


Figura 3.2 Curvas de resistencia del muro M2

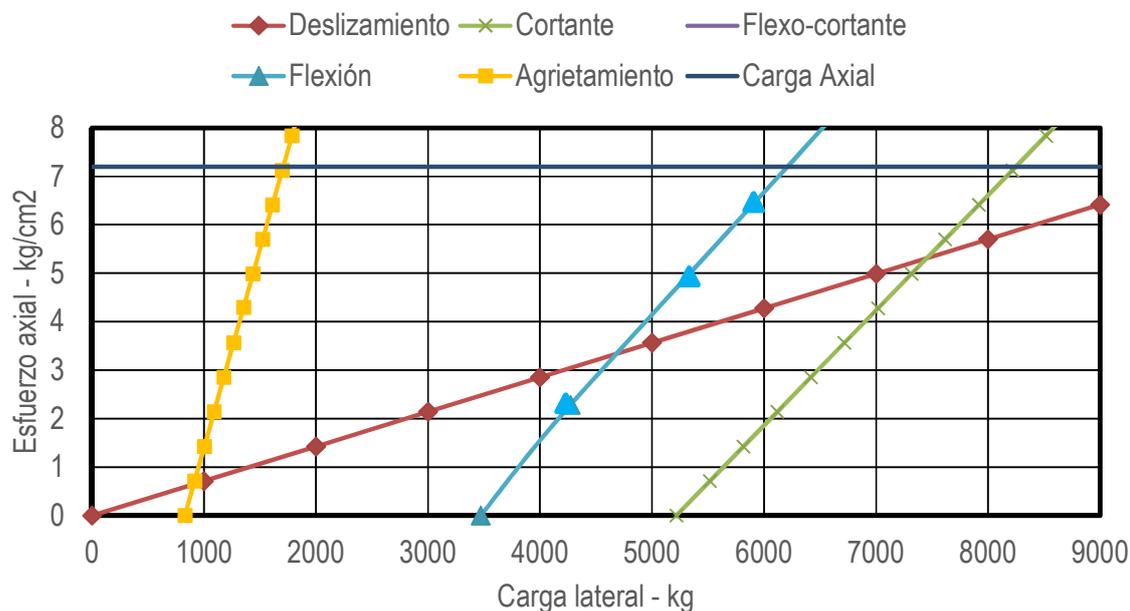


Figura 3.3 Curvas de resistencia del muro M3

En la Figura 3.1, Figura 3.2 y Figura 3.3 se observa que con las longitudes propuestas y con los esfuerzos axiales seleccionados de 4.8 y 7.2 kg/cm², se alcanza primero la falla por flexión. Los esfuerzos axiales anteriores se representan con líneas

horizontales en las figuras. En la Figura 3.4 se presenta la geometría y carga axial de los muros.

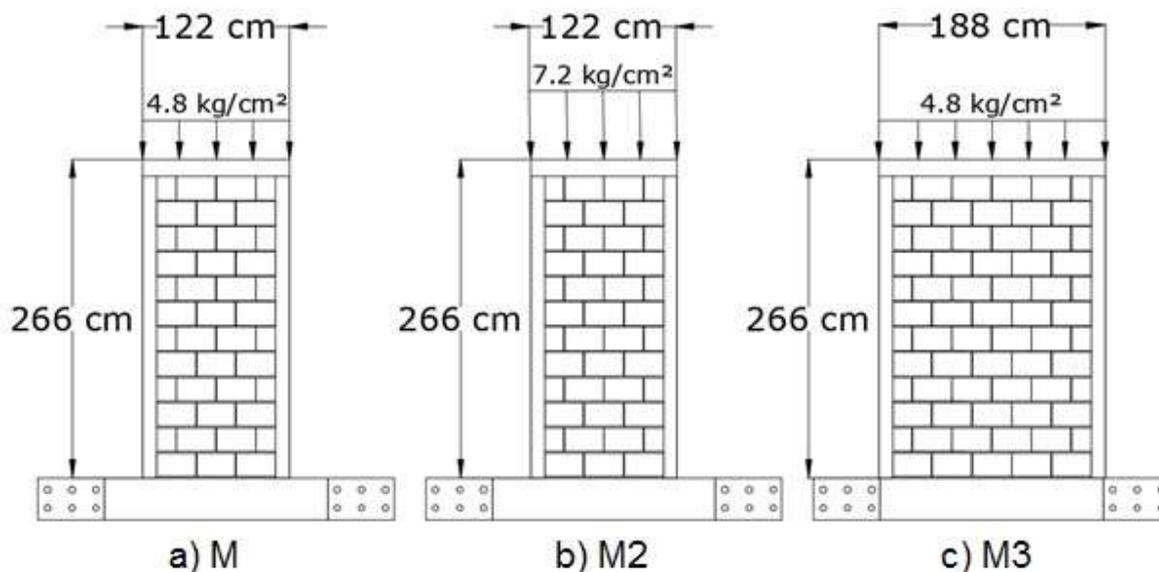


Figura 3.4 Geometría y carga axial de los muros

3.4 Construcción de muros

Los muros fueron contruidos a plomo y nivel por un trabajador experimentado. El procedimiento de construcción se describe a continuación: (1) Se utilizaron cimentaciones existentes para el desplante del muro. Se realizó el anclaje del acero de refuerzo longitudinal de los castillos (Figura 3.5). (2) Se realizó el desplante del panel del muro hasta la mitad de la altura total (Figura 3.6), (3) se habilitó y colocó la cimbra de los castillos para la colocación de concreto (Figura 3.7). (4) Se colocaron las piezas restantes para completar el panel (Figura 3.8). (5) Se habilitó y colocó el acero de refuerzo de la cadena superior. (6) Se habilitó y colocó la cimbra de los castillos para la colocación de concreto y finalmente (7) se habilitó y colocó la cimbra de la cadena superior para la posterior colocación de concreto. En la Figura 3.9 se presenta una vista de los muros previo a su ensaye.



Figura 3.5 Anclaje del acero de refuerzo longitudinal de un castillo



Figura 3.6 Desplante del panel del muro hasta la mitad de la altura total



Figura 3.7 Habilitado y colocación de cimbra de castillos



Figura 3.8 Colocación de las piezas restantes para completar el panel

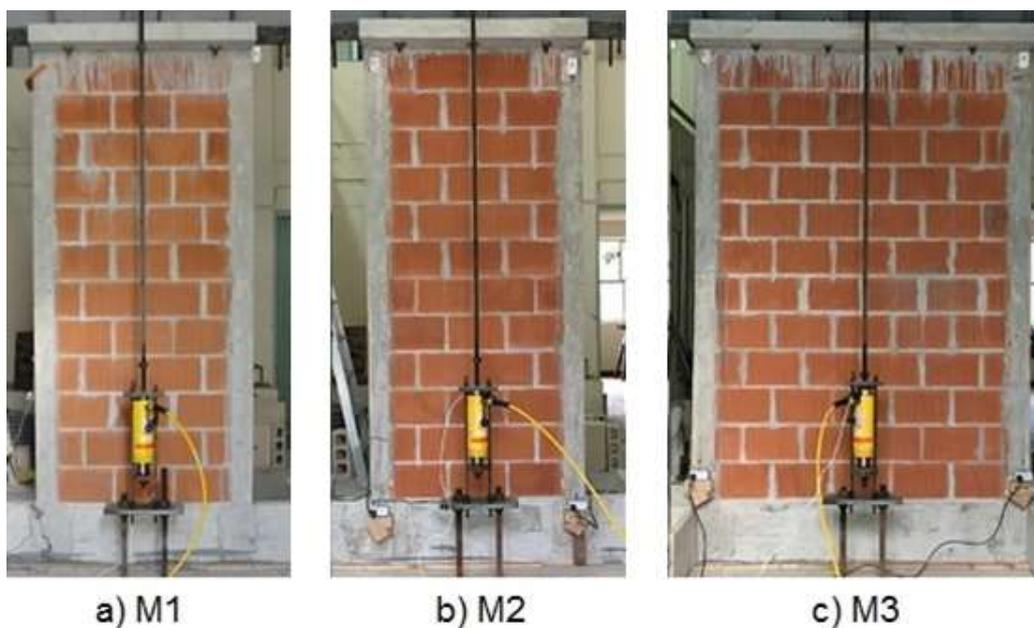


Figura 3.9 Vista de los muros previo a su ensaye

3.5 Diseño del sistema de carga e instrumentación

El sistema de carga se dividió en dos partes: un sistema de carga lateral y uno de carga axial. El sistema de carga lateral consistió de dos marcos de reacción de acero conectados en paralelo, una viga de carga lateral de acero y un actuador hidráulico. Se utilizó un actuador de doble vía, marca Miller Parker, modelo HV284B2B con una capacidad de 28 Ton (Figura 3.10). El sistema de carga axial consistió de una viga balancín de acero, una viga de repartición de carga axial de acero, dos tensores de acero y un actuador hidráulico. Se utilizó un actuador de la marca Enerpac, modelo RCH-306 con capacidad máxima de 33 Ton (Figura 3.11). La carga se mantuvo constante mediante un servo control mecánico de la marca MTS con capacidad de 210 kg/cm².

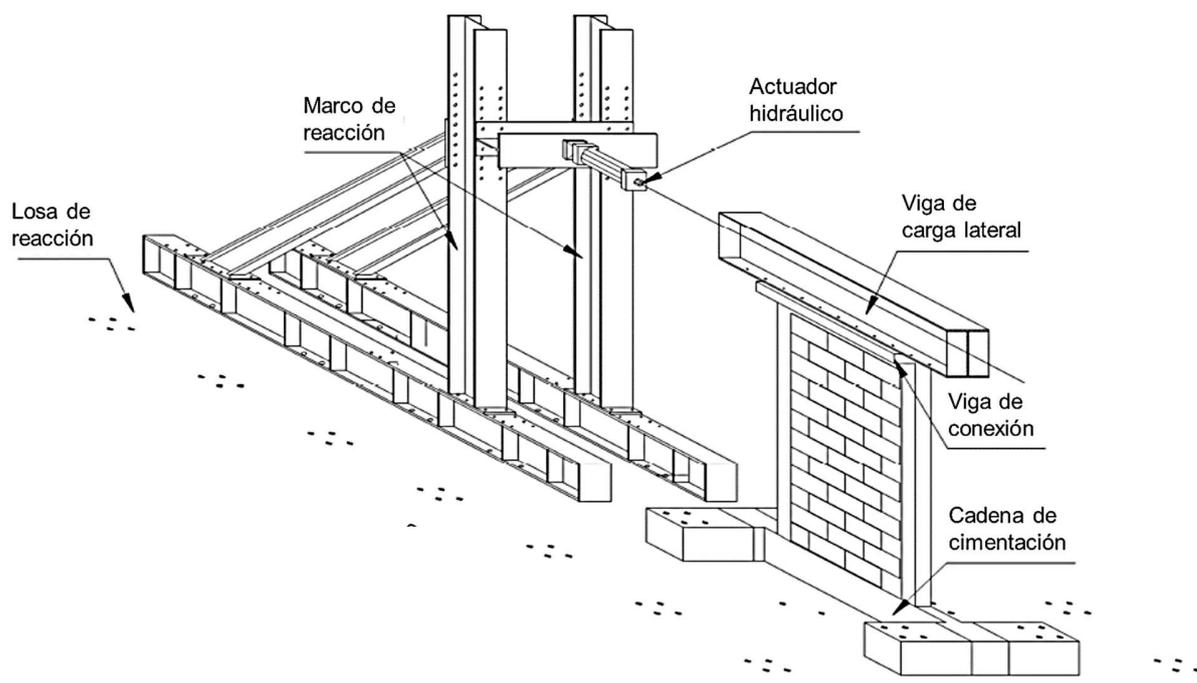


Figura 3.10 Sistema de carga lateral

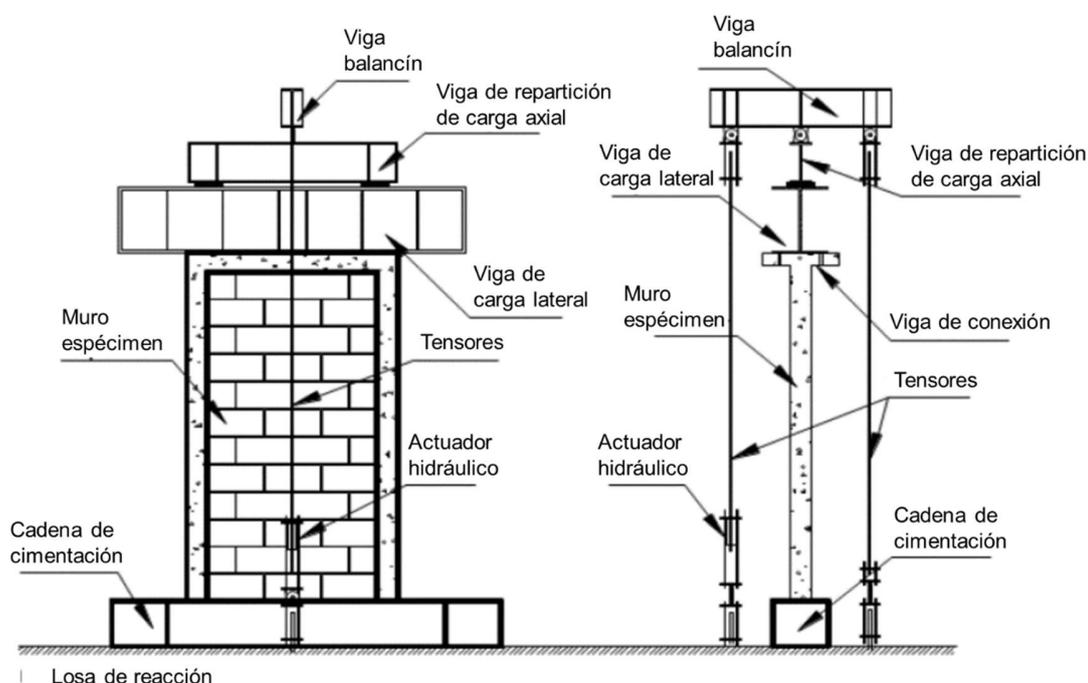


Figura 3.11 Sistema de carga axial

Se midieron los desplazamientos horizontales a la altura de aplicación de la carga lateral (PP1 y PP2). Se utilizaron potenciómetros de polea marca Unimeasure de 381 mm. Se midió el desplazamiento lateral al centro de la cadena superior (PP3). Se utilizó un potenciómetro de polea marca Unimeasure de 381 mm. Se midió el acortamiento vertical de los castillos (PP4 y PP5). Se utilizaron potenciómetros de polea de la marca Unimeasure de 12.7 cm. Se midieron los desplazamientos verticales (PL1 y PL2) y el desplazamiento horizontal de la cimentación (PL3). Se utilizaron potenciómetros lineales marca ETI de 25 mm. Se midió el desplazamiento horizontal relativo entre la viga de carga lateral y la cadena superior del muro (PL4). Se utilizó un potenciómetro lineal marca ETI de 25 mm. Para medir la carga axial se utilizaron celdas de carga tipo dona marca Futek con capacidad de 25 Ton. Estas celdas se colocaron en los extremos inferiores de los tensores. Para medir la carga lateral se utilizó una celda tipo pasador marca Strainert con capacidad de 45 Ton. Esta celda se colocó en el extremo móvil del actuador hidráulico de carga lateral. Se utilizaron transductores de presión para medir la presión aplicada a los actuadores hidráulicos. Para el actuador hidráulico de carga lateral se utilizaron transductores de presión marca Honeywell con capacidad de 70 kg/cm². Para el actuador hidráulico de carga axial se utilizó un transductor de presión marca Honeywell con capacidad de 350 kg/cm². En la Figura 3.12 se presenta una vista general con las ubicaciones de los potenciómetros de polea y potenciómetros lineales. Para la adquisición de datos se utilizó el siguiente equipo:

- Chasis SCXI-1000.
- Bloques terminales SCXI-1314.
- Módulos SCXI-1520.
- Tarjeta DAQCard-6024E.
- Computadora portátil.

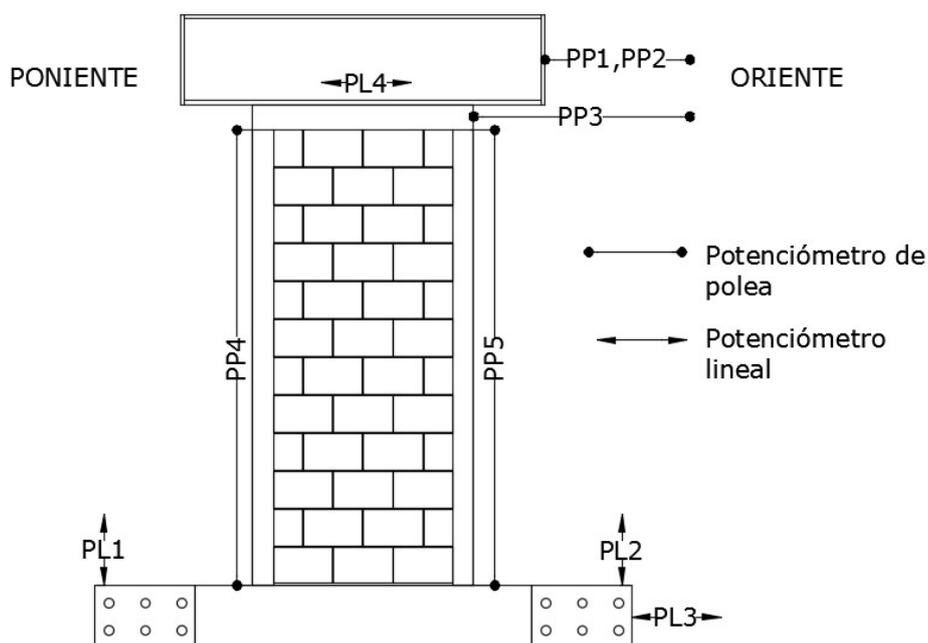


Figura 3.12 Ubicación de potenciómetros de polea y potenciómetros lineales

3.6 Ensayo de muros

El ensayo de los muros se realizó bajo esfuerzo axial constante y carga lateral cíclica reversible hasta la falla. Se consideró como referencia el protocolo de carga de muros de mampostería establecido en las NTCM (Figura 3.13). El primer semiciclo de carga estuvo orientado hacia el oriente, como se indica en la Figura 3.13. Los ciclos tienen dos tipos de control, por carga y por distorsión. La carga 3 indicada en el eje vertical de la Figura 3.13 corresponde a la asociada a la fluencia del acero de refuerzo longitudinal, calculada analíticamente. Los ciclos posteriores a la carga 3 corresponden a ciclos controlados por incrementos de distorsión en intervalos de 0.002.

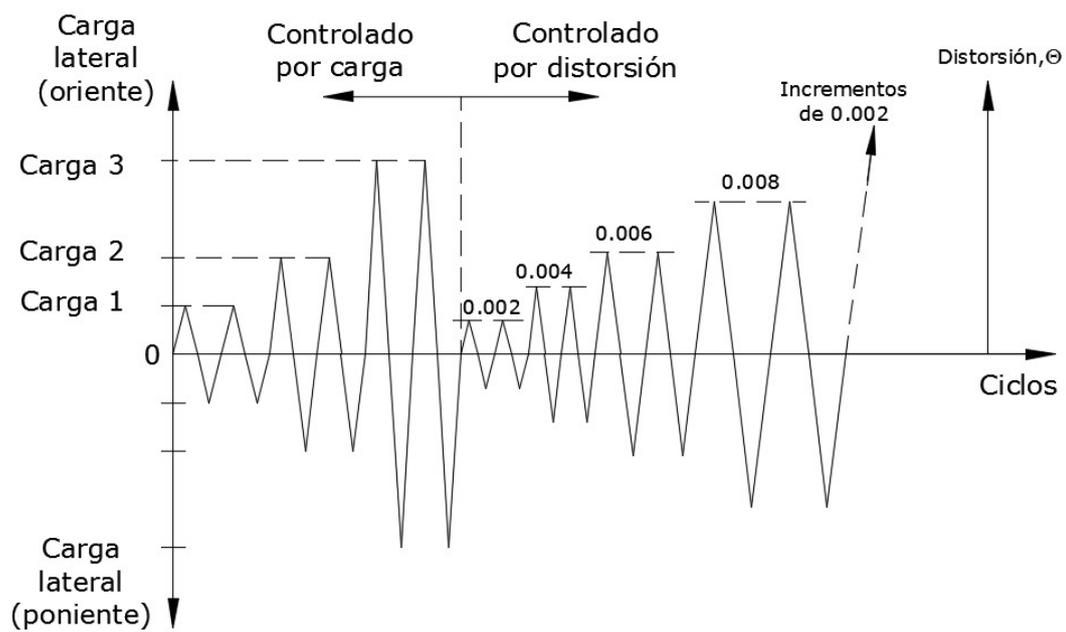


Figura 3.13 Protocolo de carga de muros

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

Se presentan las propiedades de los materiales y los resultados del ensaye de los muros de mampostería confinada.

4.1 Propiedades de materiales

En la Tabla 4.1 se presentan las resistencias a compresión axial (f_m) y el módulo de elasticidad (E_m) de la mampostería con sus correspondientes promedios y coeficientes de variación (CV). En la Tabla 4.2 se presentan las resistencias a compresión axial promedio (f'_c) del concreto con su correspondiente coeficiente de variación.

Tabla 4.1 Resistencia a compresión axial y módulo de elasticidad de la mampostería

Pila	f_m (kg/cm²)	E_m (kg/cm²)
1	94.99	51,219
2	96.17	51,963
3	87.43	60,517
4	91.90	43,402
Promedio	92.62	51,775
CV (%)	3.64	11.7

Tabla 4.2 Resistencia a compresión axial del concreto de los castillos

Muro	f'_c (kg/cm²)	CV (%)
M1	226	1.82
M2	216.5	0.21
M3	204	2.68

4.2 Comportamiento de los muros

El comportamiento de los MMC fue en general similar. Durante los ensayos se observaron los siguientes eventos. (1) Formación de una grieta horizontal entre la base del muro y la primera hilada de tabiques (Figura 4.1a, Figura 4.2a y Figura 4.3a). (2) Formación de grietas horizontales en la parte inferior de los castillos del muro (Figura 4.1b, Figura 4.2b y Figura 4.3b). (3) Fluencia del acero de refuerzo longitudinal. (4) Formación de nuevas grietas horizontales en los castillos y grietas horizontales en el panel del muro (Figura 4.1c, Figura 4.2c y Figura 4.3c). (5) Formación de una grieta vertical aproximadamente a 15 cm del paño interior del castillo (Figura 4.1d, Figura 4.2d y Figura 4.3d). (6) Formación de una o dos grietas diagonales en el panel del muro. Las grietas diagonales se unieron a las verticales (Figura 4.1e, Figura 4.2e y Figura 4.3e). (7) Para el caso del muro M1, se observó el pandeo fuera del plano del castillo en la zona de compresión (Figura 4.4). En la Figura 4.5, Figura 4.6 y Figura 4.7 se presentan los patrones finales de agrietamiento de los muros. En la Figura 4.8, Figura 4.9 y Figura 4.10 se presentan las curvas carga lateral - desplazamiento horizontal obtenidas del ensaye de los muros. Dichos desplazamiento corresponden a los promedios obtenidos con los potenciómetros PP1 y PP2.

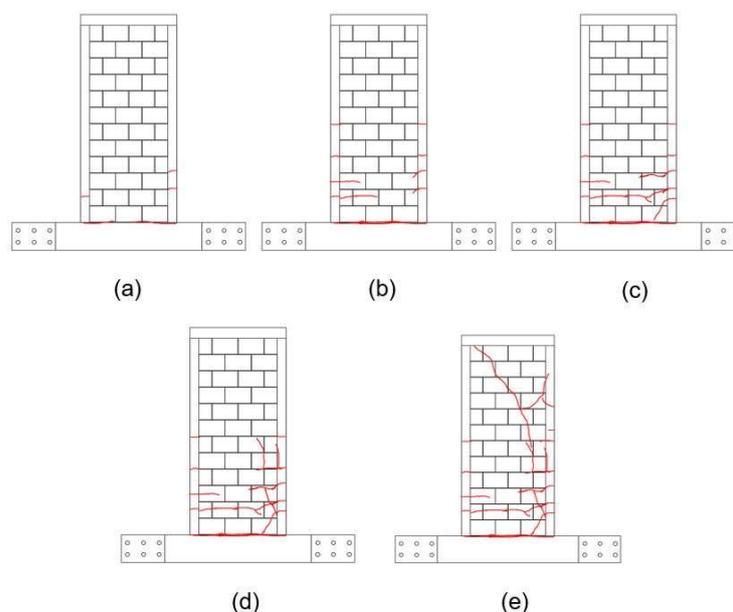


Figura 4.1 Eventos observados en el muro M1

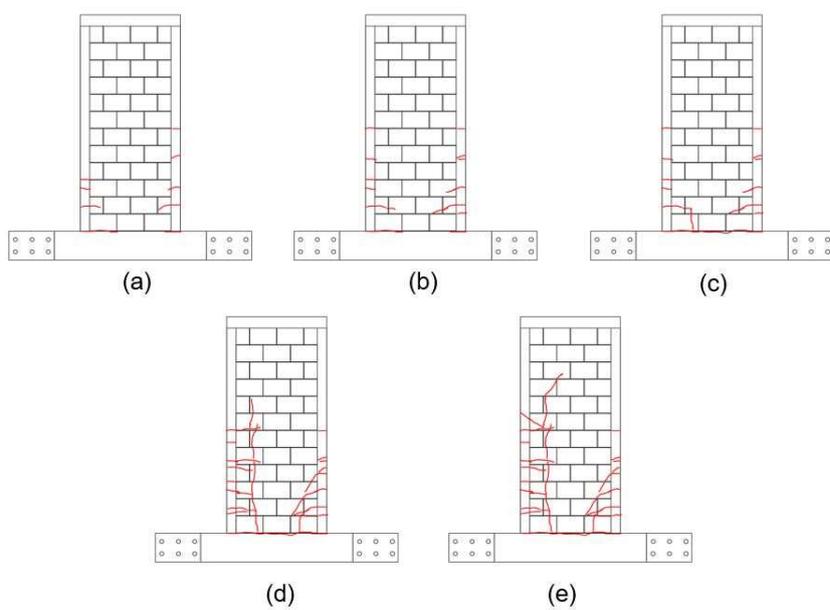


Figura 4.2 Eventos observados en el muro M2

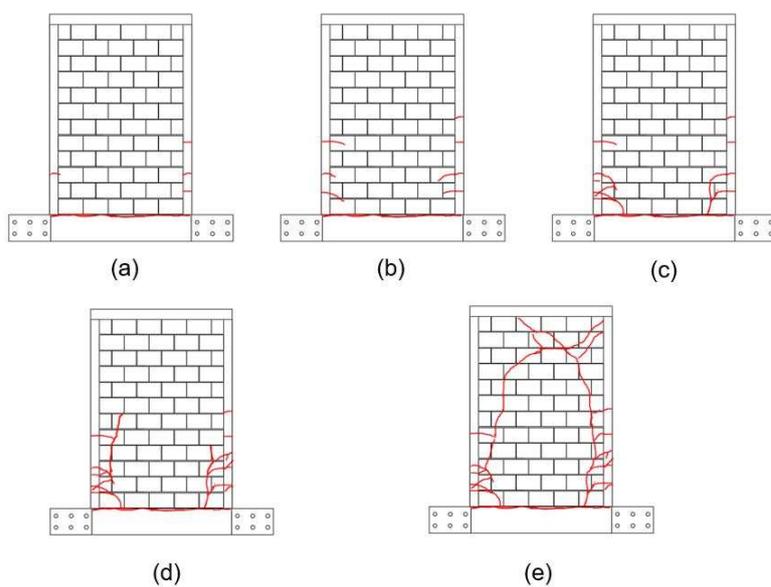


Figura 4.3 Eventos observados en el muro M3



Figura 4.4 Pandeo del castillo del muro M1



Figura 4.5 Patrón de agrietamiento final del muro M1



Figura 4.6 Patrón de agrietamiento final del muro M2



Figura 4.7 Patrón de agrietamiento final del muro M3

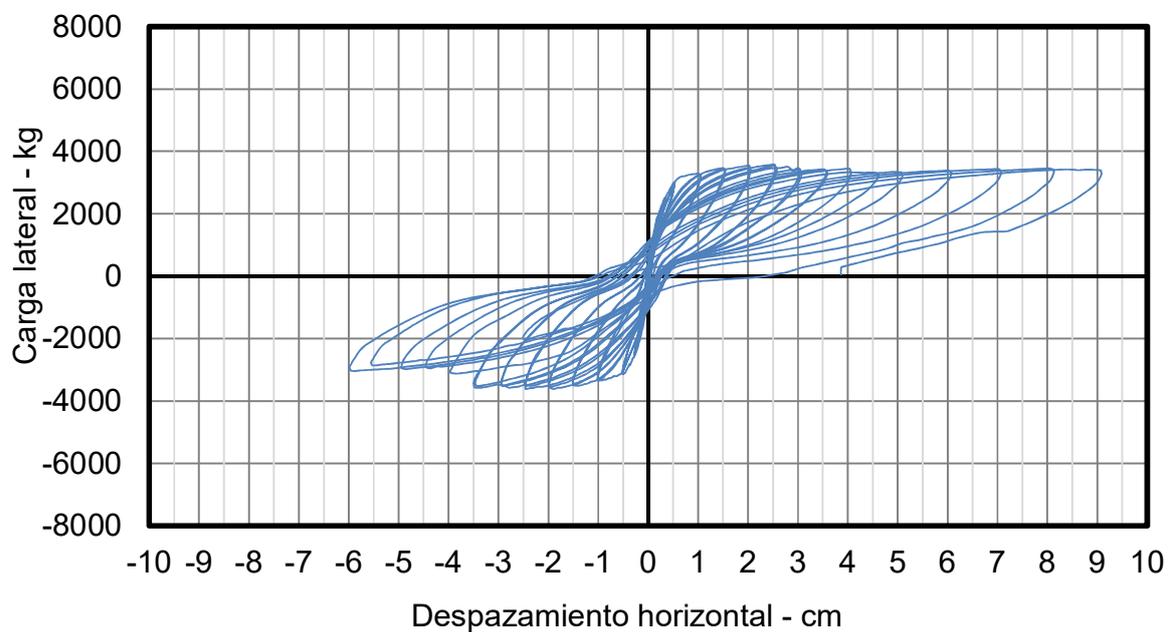


Figura 4.8 Curva carga lateral - desplazamiento horizontal del muro M1

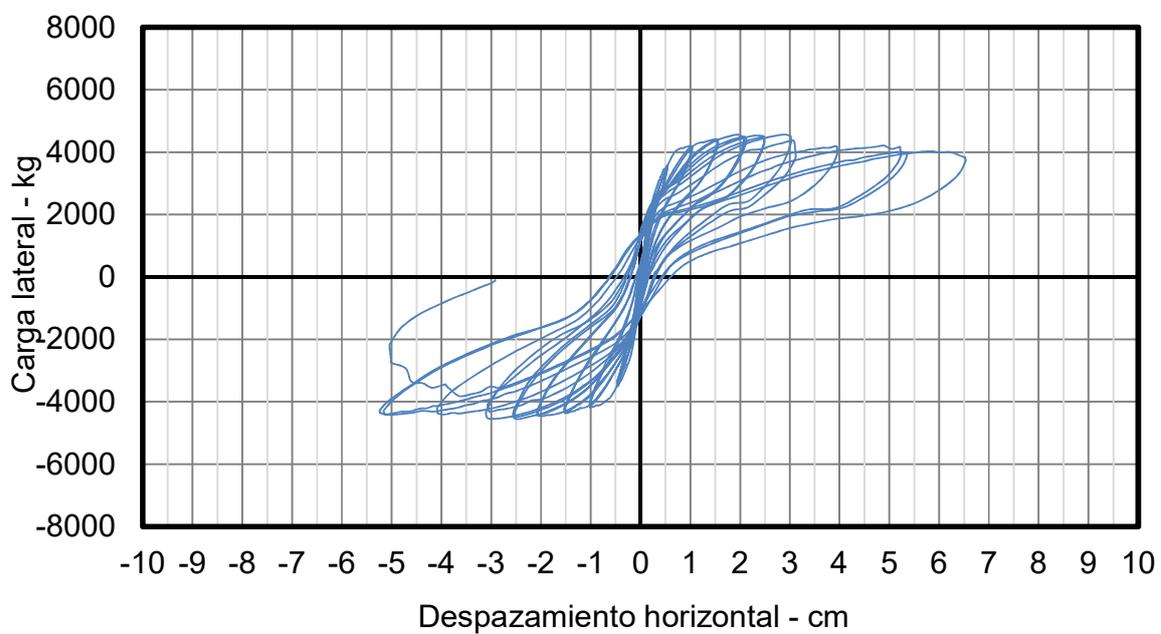


Figura 4.9 Curva carga lateral - desplazamiento horizontal del muro M2

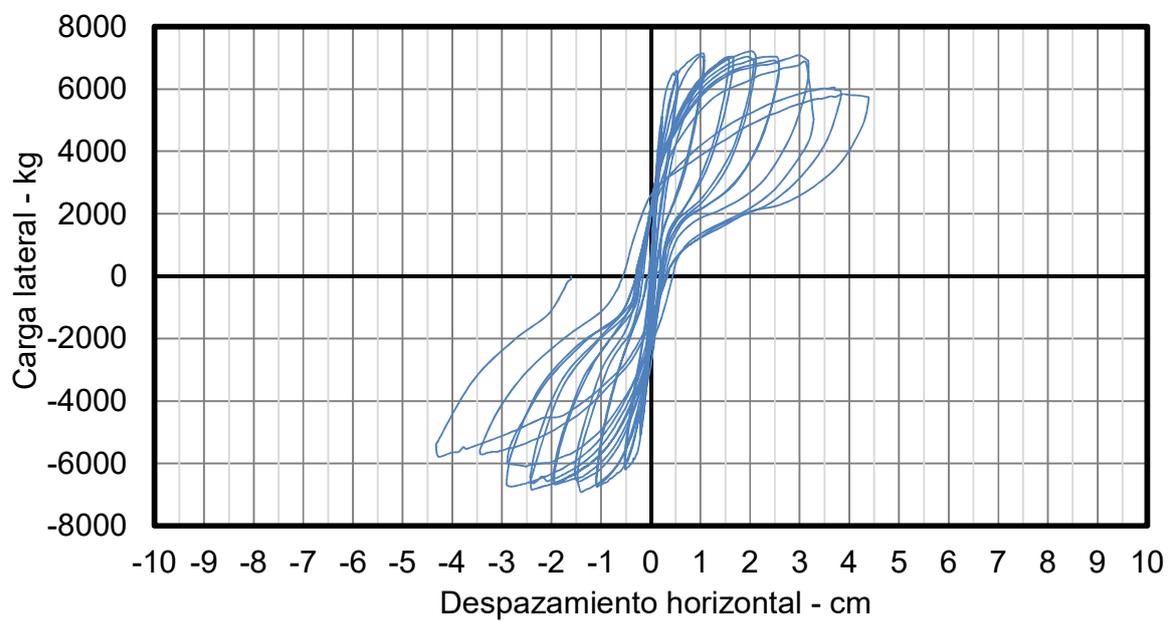


Figura 4.10 Curva carga lateral - desplazamiento horizontal del muro M3

CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta la discusión de resultados. Se presentan las resistencias experimentales y analíticas de los muros, se determina la ductilidad de desplazamiento y distorsión máxima, se discute sobre la formación del agrietamiento vertical y diagonal, se determina la energía disipada equivalente, la degradación de rigidez de ciclo y se presenta un modelo de histéresis.

5.1 Resistencia experimental y analítica de los muros

En la Tabla 5.1 se presenta las características de los muros analizados en este trabajo. Los muros E1 a E3 corresponden a los ensayados por Prieto (2015). El muro E2 presentó un agrietamiento horizontal en su base previo a su ensaye. Este agrietamiento se generó, por accidente, durante la conexión del actuador hidráulico al muro. En la Tabla 5.1, H' es la altura de aplicación de la carga lateral de los muros, σ es el esfuerzo axial de compresión y ρ es la cuantía de acero de refuerzo longitudinal de un castillo. Los muros se ordenan en la Tabla 5.1 de forma ascendente con respecto a la relación de aspecto (H'/L).

Tabla 5.1 Características de los muros analizados

Muro	L (m)	H' (m)	H'/L	σ (kg/cm ²)	ρ (%)
E1	2.54	2.91	1.1	2.4	0.024
E2	1.88	2.91	1.5	2.4	0.033
M3	1.88	2.91	1.5	4.8	0.033
E3	1.22	2.91	2.4	2.4	0.051
M1	1.22	2.91	2.4	4.8	0.051
M2	1.22	2.91	2.4	7.2	0.051

En la Tabla 5.2 se presentan las resistencias analíticas (V_{ya}) y experimentales (V_{ye}) de fluencia de los muros. Las resistencias analíticas se determinaron con un proceso iterativo utilizando las ecuaciones (2.1) a (2.5). En dicho proceso se consideró una deformación unitaria de fluencia del acero de refuerzo longitudinal de 0.0021. La resistencia experimental de fluencia de cada muro se determinó utilizando los promedios de las lecturas de las galgas extensométricas. En la Tabla 5.2 se observa que la variación entre la resistencia analítica y la experimental no fue mayor que el 7%, a excepción del muro E2, la cual fue del 32%.

Tabla 5.2 Resistencias experimentales y analíticas de fluencia

Muro	V_{ya} (ton)	V_{ye} (ton)	V_{ya}/V_{ye} (%)
E1	6.68	6.23	1.07
E2	4.19	3.17	1.32
M3	5.55	5.44	1.02
E3	2.29	2.25	1.02
M1	2.87	3.02	0.95
M2	3.69	3.53	1.05

En la Tabla 5.3 se presentan las resistencias a flexión analíticas y experimentales de los muros. Las resistencias analíticas (V_{fa}) se determinaron con un proceso iterativo utilizando las ecuaciones (2.1) a (2.5). En dicho proceso se consideró una deformación unitaria máxima del concreto de 0.003. En la Tabla 5 se presentan tres resistencias a flexión experimentales para cada muro, una para la dirección de carga oriente ($+V_{fe}$), una para la poniente ($-V_{fe}$) y el promedio de las anteriores (V_{fep}). Las resistencias experimentales corresponden a las cargas laterales máximas observadas en cada dirección de ensayo. En la Tabla 5.3 se observa que la relación entre la resistencia a flexión analítica y experimental no fue mayor al 6%. Se observa también, que para

muros con la misma relación de aspecto (E3, M1 y M2), al aumentar el esfuerzo axial, la resistencia a flexión incrementa.

Tabla 5.3 Resistencias a flexión experimentales y analíticas

Muro	+V_{fe} (ton-m)	-V_{fe} (ton-m)	V_{fep} (ton-m)	V_{fa} (ton-m)	V_{fa}/V_{fep} (%)
E1	8.23	8.42	8.33	8.33	1.00
E2	5.40	5.23	5.32	5.55	1.04
M3	7.21	6.91	7.06	7.00	0.99
E3	2.82	2.74	2.78	2.94	1.06
M1	3.58	3.62	3.60	3.65	1.01
M2	4.56	4.56	4.56	4.45	0.98

5.2 Ductilidad de desplazamiento y distorsión máxima de los muros

Para definir la ductilidad de desplazamiento y distorsión máxima, se determinó un desplazamiento horizontal máximo (Δ_{max}) para cada muro. En cada dirección de carga se definió un desplazamiento horizontal reducido con base en los siguientes criterios: (1) una pérdida en la resistencia a flexión (PR) de los muros del 10% y (2) la formación del primer agrietamiento diagonal (PAD). El desplazamiento horizontal máximo de cada muro se definió como el menor de los desplazamientos horizontales reducidos. En la Figura 5.1 a la Figura 5.6 se presentan las curvas carga lateral - desplazamiento horizontal de los muros, indicando con un marcador cuadrado el desplazamiento asociado a una pérdida del 10% de la resistencia a flexión, y con uno triangular, el asociado a la aparición del primer agrietamiento diagonal. En dichas figuras se observa que para los muros E1, M3, E3, M1 y M2, el desplazamiento horizontal máximo estuvo limitado por la formación el primer agrietamiento diagonal, mientras

que para el muro E2, estuvo limitado por la pérdida de resistencia a flexión. En la Tabla 5.4 se resumen los desplazamientos horizontales reducidos y los desplazamientos horizontales máximos de los muros. En dicha tabla se observa que, para los muros con la misma relación de aspecto, al incrementar el esfuerzo axial, el desplazamiento horizontal máximo disminuye. En la Figura 5.7 se presentan los patrones de agrietamiento asociados a los desplazamientos horizontales máximos de los muros.

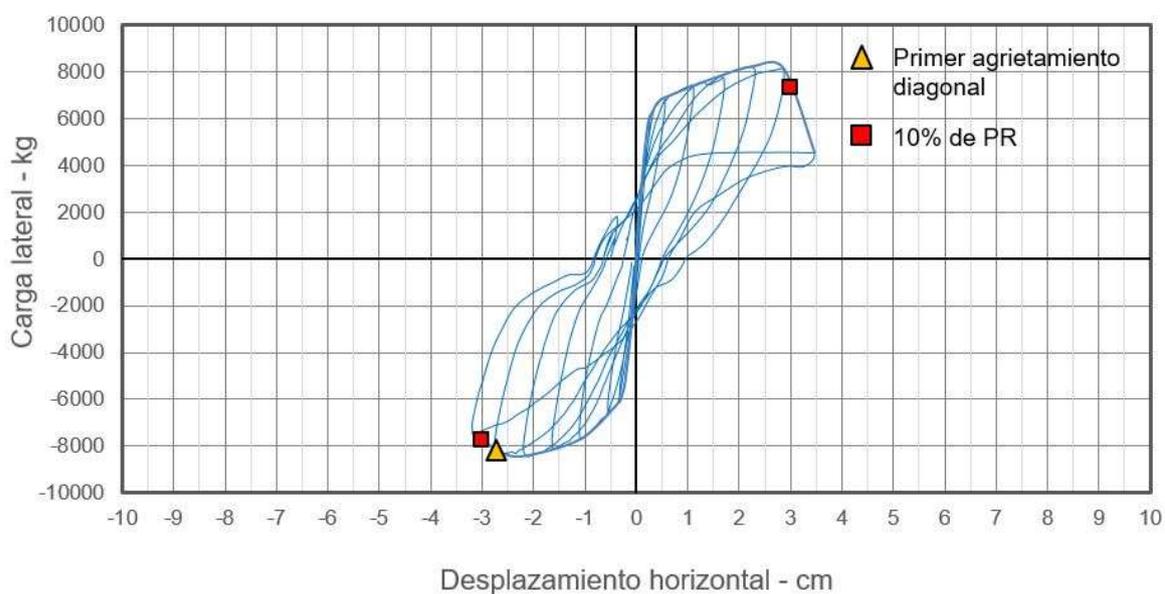


Figura 5.1 Curva carga lateral – desplazamiento horizontal del muro E1

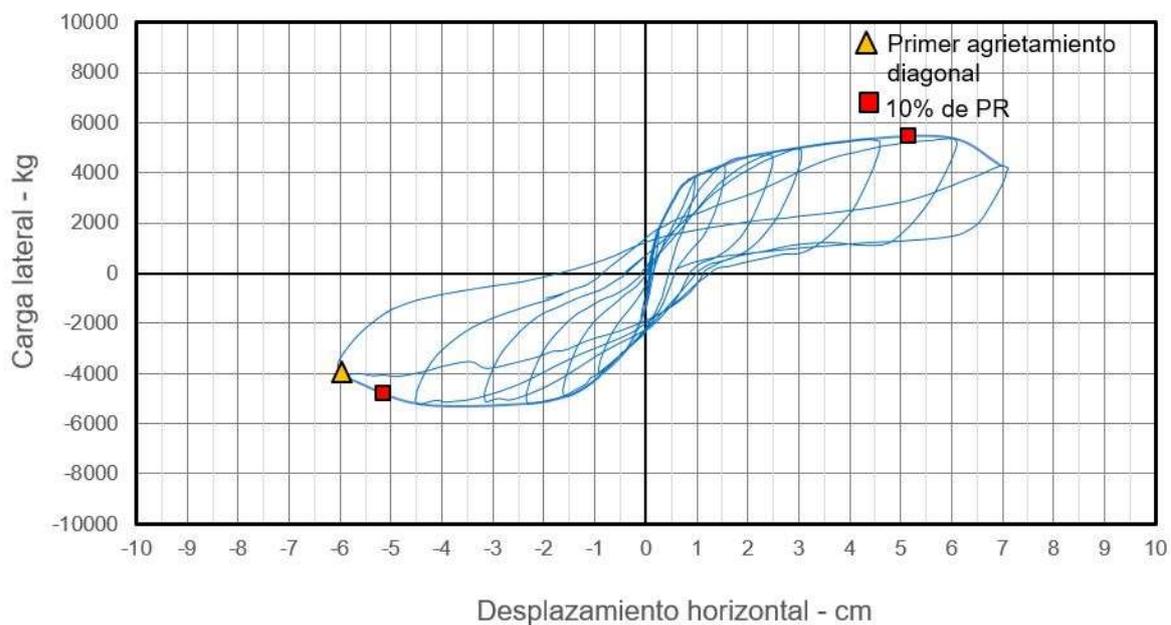


Figura 5.2 Curva carga lateral – desplazamiento horizontal del muro E2

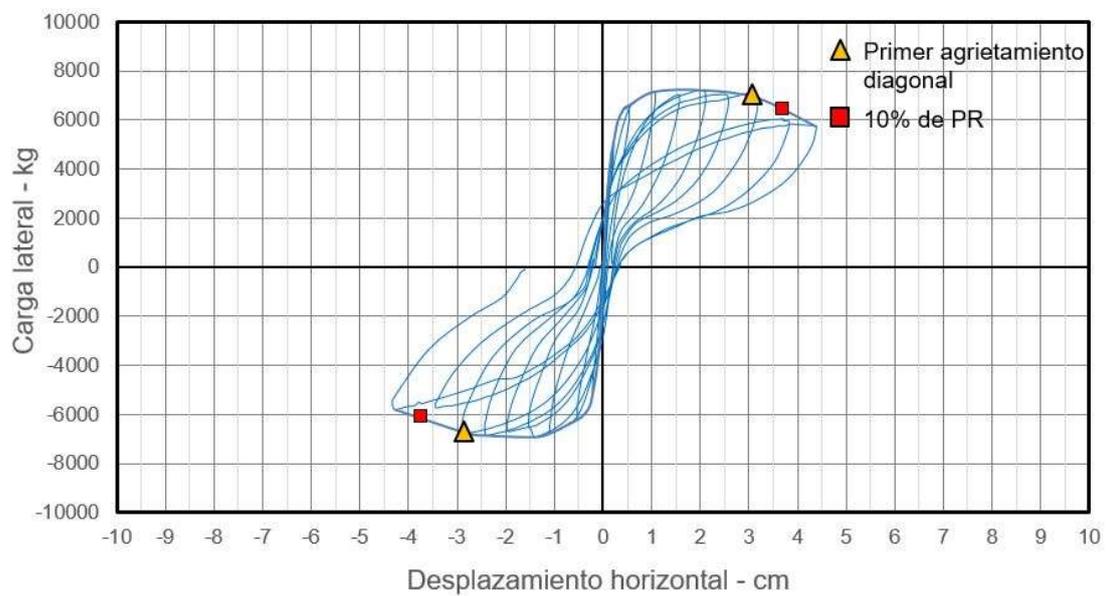


Figura 5.3 Curva carga lateral – desplazamiento horizontal del muro M3

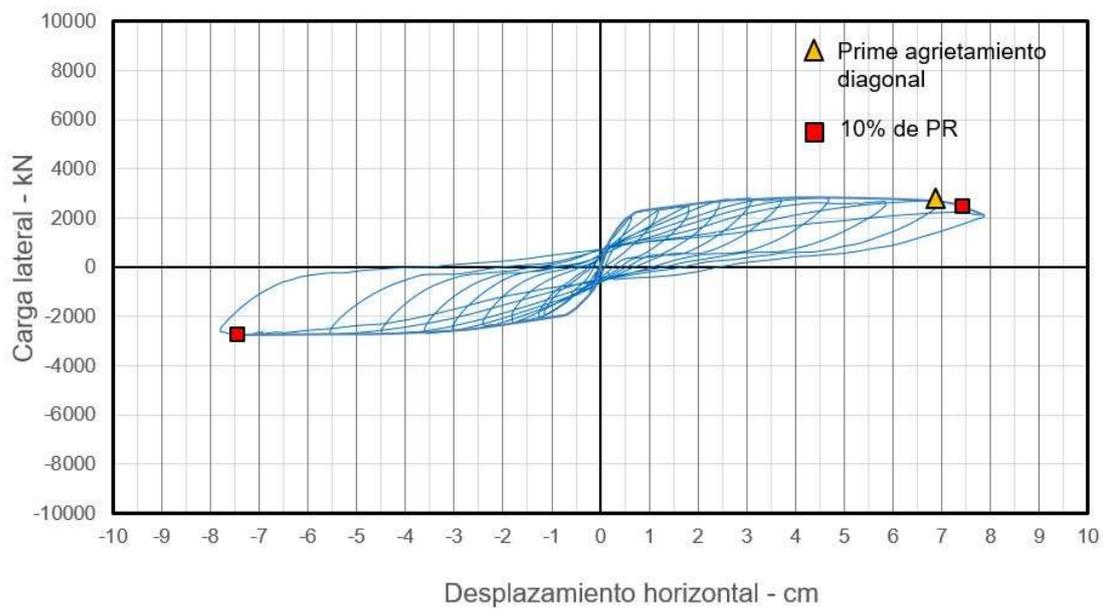


Figura 5.4 Curva carga lateral – desplazamiento horizontal del muro E3

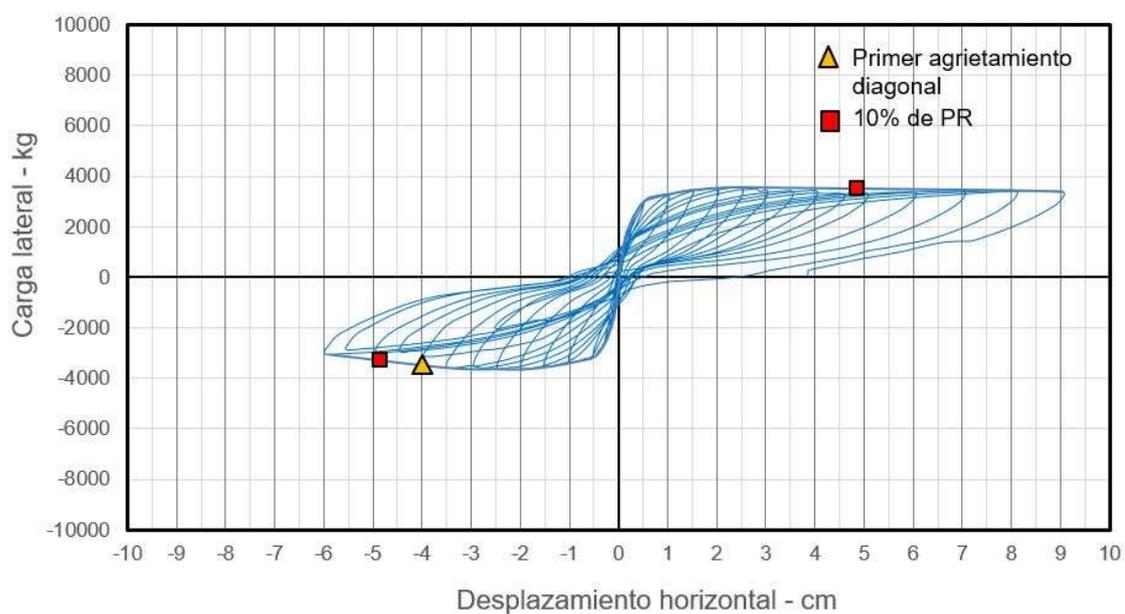


Figura 5.5 Curva carga lateral – desplazamiento horizontal del muro M1

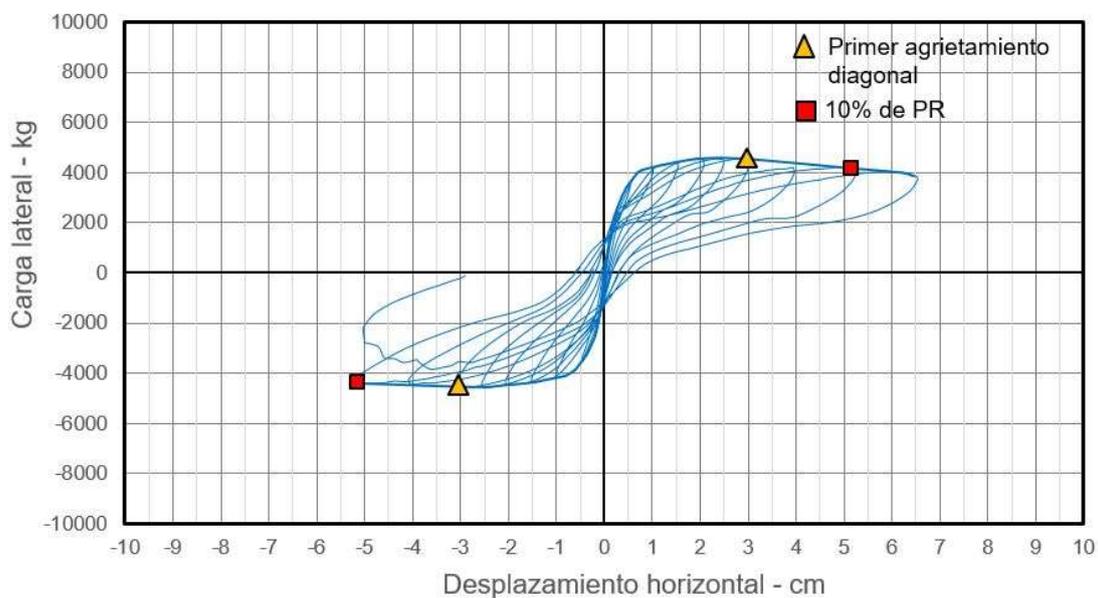


Figura 5.6 Curva carga lateral – desplazamiento horizontal del muro M2

Tabla 5.4 Desplazamientos horizontales reducidos y máximos

Muro	10% de PR (cm)		PAD (cm)		Δ_{max} (cm)
E1	-3.00	3.00	-2.80	---	2.80
E2	-5.15	5.15	-6.09	---	5.15
M3	-3.72	3.72	-3.04	3.17	3.04
E3	-7.44	7.44	---	7.00	7.00
M1	-4.86	4.86	-4.00	---	4.00
M2	-5.15	5.15	-3.19	3.03	3.03

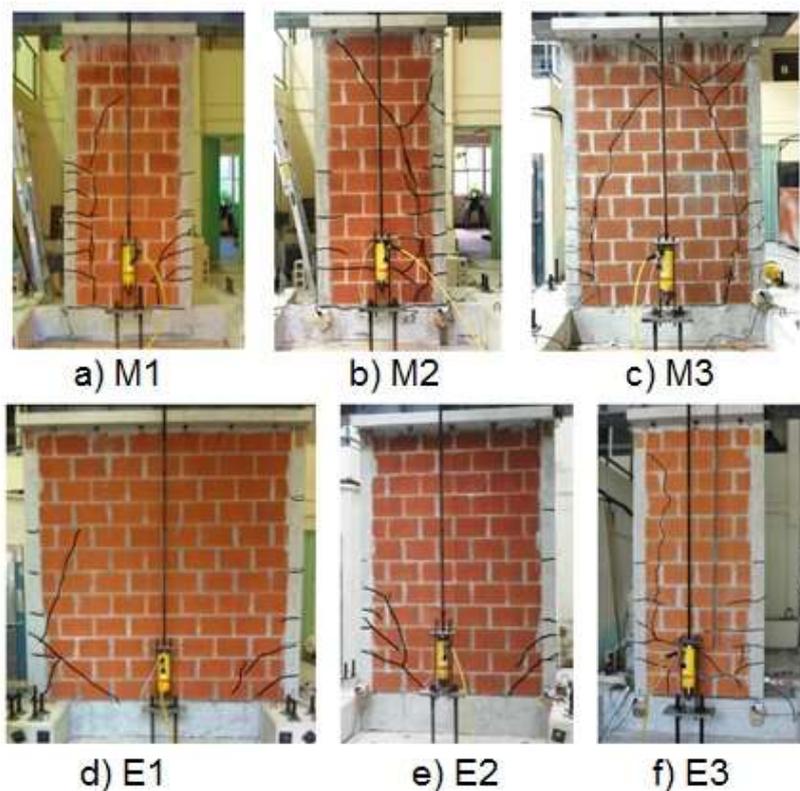


Figura 5.7 Patrones de agrietamiento asociados a Δ_{max}

En la Tabla 5.5 se presentan las ductilidades de desplazamiento (μ_{Δ}) y las distorsiones máximas (δ_{max}) de los muros. La ductilidad se definió como el desplazamiento horizontal máximo (Δ_{max}) dividido entre el desplazamiento horizontal de fluencia (Δ_y). Este último se determinó utilizando los promedios de las lecturas de las galgas extensométricas. La distorsión máxima se determinó dividiendo el desplazamiento horizontal máximo (Δ_{max}) entre la altura de aplicación de carga lateral (H'). En la Tabla 5.5 se observa que, para los muros con la misma relación de aspecto (E3, M1 y M2), al incrementar el esfuerzo axial, se disminuye la ductilidad de desplazamiento y la distorsión máxima.

Tabla 5.5 Ductilidad de desplazamiento de los muros

Muro	H'/L	σ (kg/cm ²)	H' (cm)	Δ_{max} (cm)	Δ_y (cm)	$\mu\Delta$	δ_{max} (%)
E1	1.1	2.50	291	2.80	0.30	9.33	0.98
E2	1.5	2.54		5.15	0.36	14.31	1.81
M3	1.5	4.66		3.04	0.24	12.66	1.07
E3	2.4	2.53		7.00	0.79	8.86	2.46
M1	2.4	4.57		4.00	0.52	7.69	1.40
M2	2.4	7.92		3.03	0.50	6.06	1.06

En las NTCM se establecen distorsiones para la cual los muros de mampostería deben mantener su capacidad de carga. Para muros de piezas huecas y sólidas la distorsiones son de 0.4% y 0.6%, respectivamente. Dichas distorsiones están asociadas a muros con falla a cortante. En la Tabla 5.5 se observa que las distorsiones máximas de los muros con comportamiento dominado por flexión son mayores a las establecidas en las NTCM para piezas huecas y sólidas.

5.3 Agrietamiento vertical y diagonal en muros

En la mayoría de los muros ensayados se observaron grietas verticales aproximadamente a 15 cm del paño interior de los castillos. Para los muros M1, M2, E2 y E3 se formó una grieta vertical mientras que para el muro M3 se formaron dos (Figura 5.8). No se observaron grietas verticales en el muro E1. La formación del agrietamiento vertical se atribuye a la distribución no uniforme de deformaciones en la dirección vertical del muro debidas al esfuerzo axial. En la Figura 5.9 se presenta el sistema de fuerzas que se generan debido a la distribución no uniforme de deformaciones (Raygoza, 2012). Esta distribución está asociada a las diferencias en los módulos de elasticidad del concreto y la mampostería. Las deformaciones en los castillos de concreto son menores a las deformaciones al centro del panel del muro. Por otro lado, debido a la práctica constructiva de mampostería confinada de la región,

el concreto de los castillos se coloca posterior a la construcción del panel. Lo anterior fuerza a que los tabiques ligados al castillo se deformen menos que la parte central del panel.

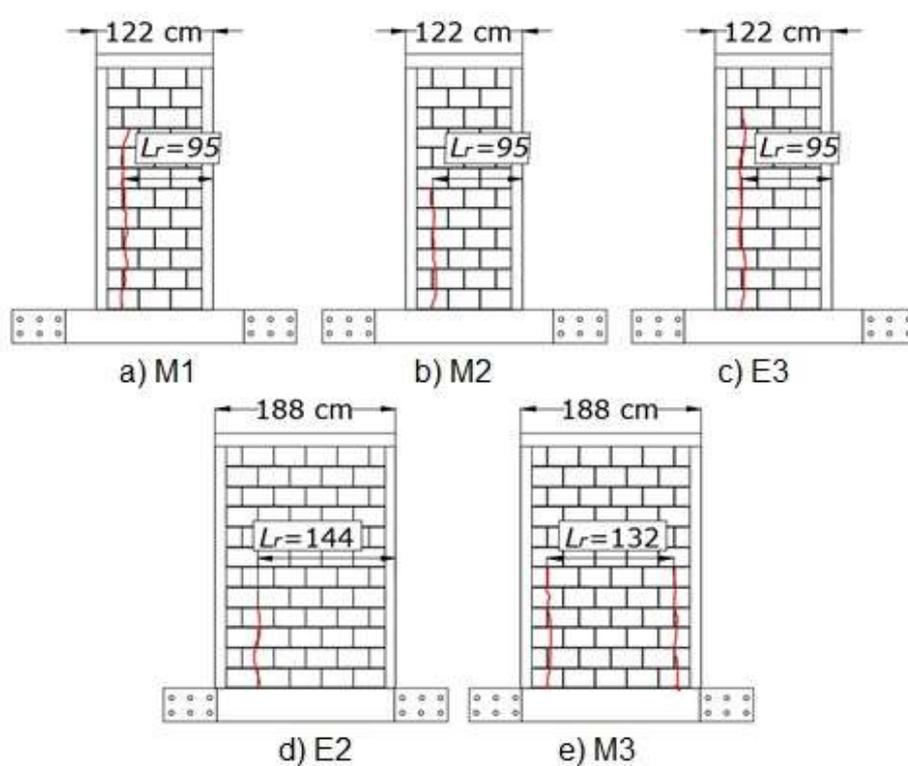


Figura 5.8 Grietas verticales en muros

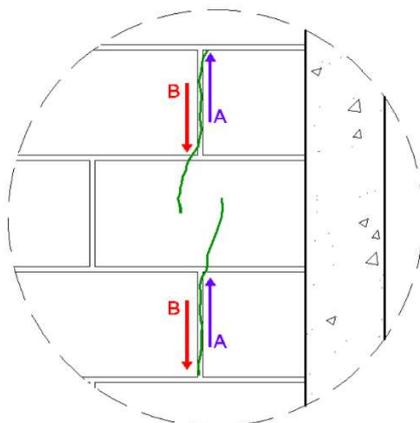


Figura 5.9 Sistema de fuerzas generado por la distribución no uniforme de deformaciones

El agrietamiento vertical provocó una división entre el panel del muro y los castillos (Figura 5.8). Para los muros M1, M2, E2 y E3 la grieta vertical dividió al muro en dos segmentos, mientras que para el muro M3 las grietas verticales lo dividieron en tres segmentos. En la Figura 5.8 se indica la longitud reducida del muro (L_r) posterior al agrietamiento vertical. Se determinó la resistencia a cortante analítica (V_{cra}) utilizando la ecuación (2.7) junto con la longitud reducida de los muros. Dicha resistencia se comparó con la resistencia a cortante experimental asociada a la formación del primer agrietamiento diagonal (V_{cr}) (Tabla 5.6). Se observa que la relación entre las resistencias analíticas y experimentales no es mayor al 5%. Se concluye que el agrietamiento vertical propició la formación del posterior agrietamiento diagonal.

Tabla 5.6 Resistencia a cortante analítica y experimental

Muro	L (cm)	L_r (cm)	V_{cra} (kg)	V_{cr} (kg)	V_{cra}/V_{cr}
E2	188	144	5,605	5,376	1.04
M3	188	132	6,492	6,598	0.98
E3	122	95	2,550	2,645	0.96
M1	122	95	3,410	3,540	0.96
M2	122	95	4,815	4,565	1.05

5.4 Energía disipada equivalente de los muros

Se determinó la energía disipada equivalente (EDE) de los muros con base en el criterio establecido en las NTCM. La EDE se calculó dividiendo el área contenida en la curva de histéresis de un ciclo n , entre el área circunscrita por el paralelogramo definido por la rigidez del primer ciclo y la carga máxima del ciclo n (Figura 5.10). Se consideraron los ciclos de carga limitados hasta el desplazamiento horizontal máximo (Δ_{max}).

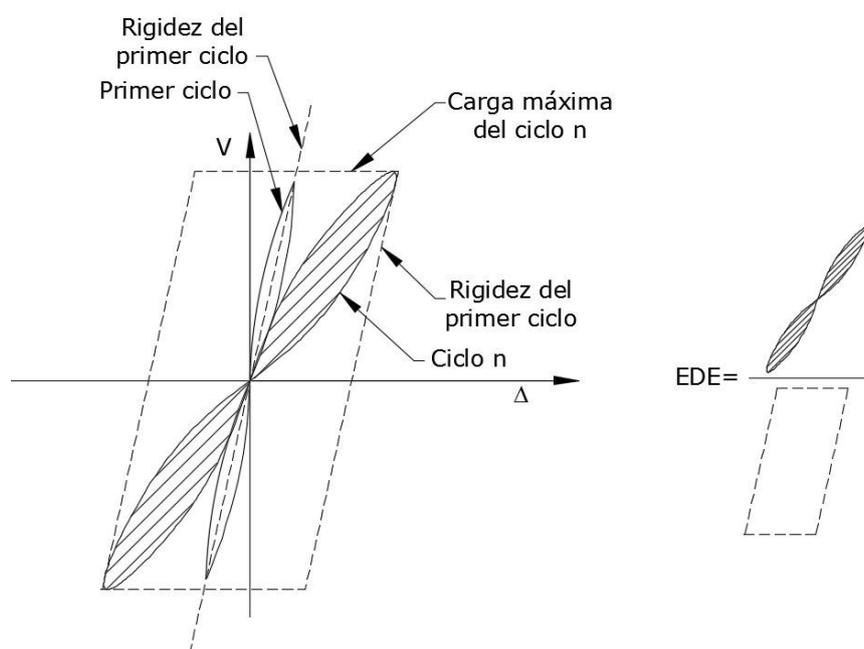


Figura 5.10 Criterio para el cálculo de la EDE (NTCM, 2004)

En la Figura 5.11 y Figura 5.12 se presentan las curvas de EDE acumulada - distorsión y la curva EDE acumulada - ductilidad de desplazamiento, respectivamente. En la Figura 5.11 se observa que, para los muros con la misma relación de aspecto (E3, M1 y M2), la EDE es similar. En la Figura 5.12 se observa que en muros con la misma relación de aspecto (E3, M1 y M2), al incrementar el esfuerzo axial, la EDE disminuye.

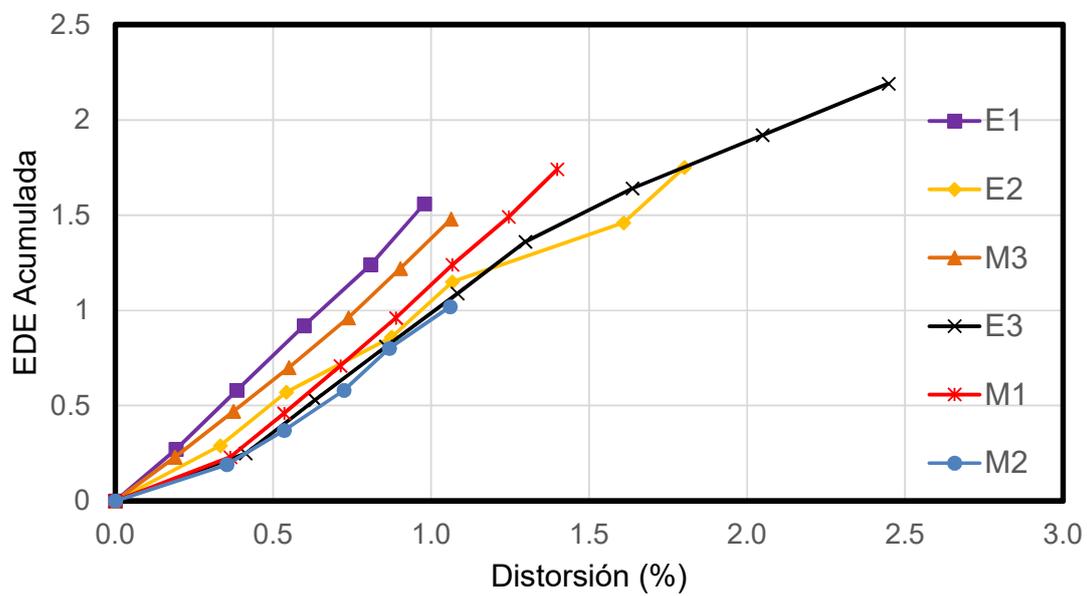


Figura 5.11 Curva EDE acumulada - distorsión

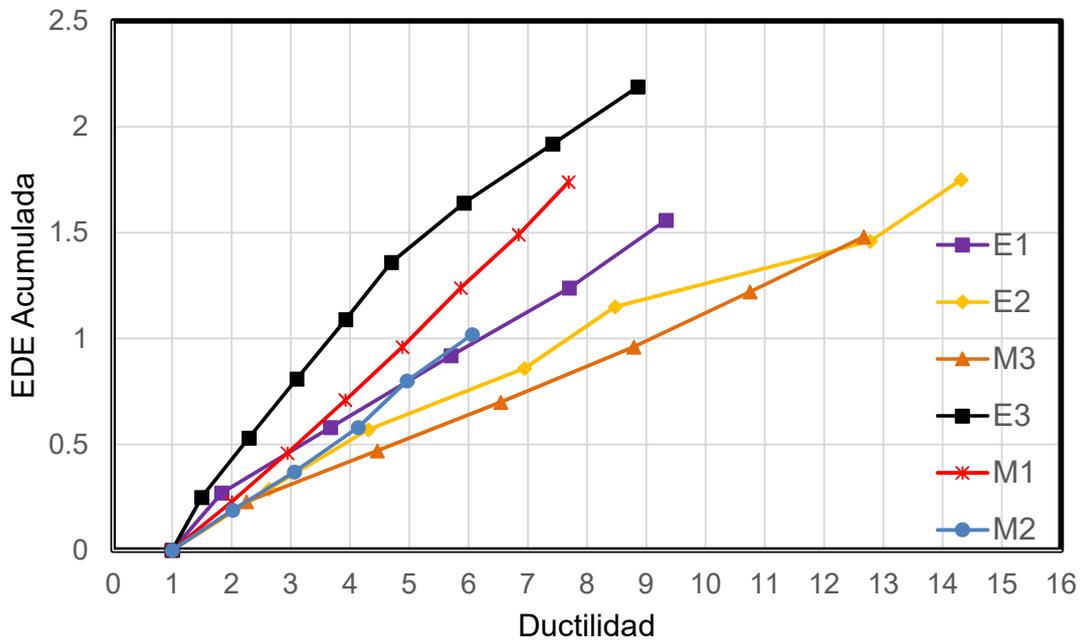


Figura 5.12 Curva EDE acumulada – ductilidad

5.5 Degradación de rigidez de ciclo 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 (K_{ye}). La rigidez de ciclo se definió como la rigidez secante al punto de interés sobre la curva envolvente. Se determinaron curvas envolventes de la parte ascendente de las curvas carga lateral – desplazamiento horizontal. Se consideraron los ciclos de carga en sentido oriente y poniente. No se consideraron las repeticiones de ciclos de carga. En la Figura 5.13, Figura 5.14 y Figura 5.15 se presentan las curvas envolventes de los muros.

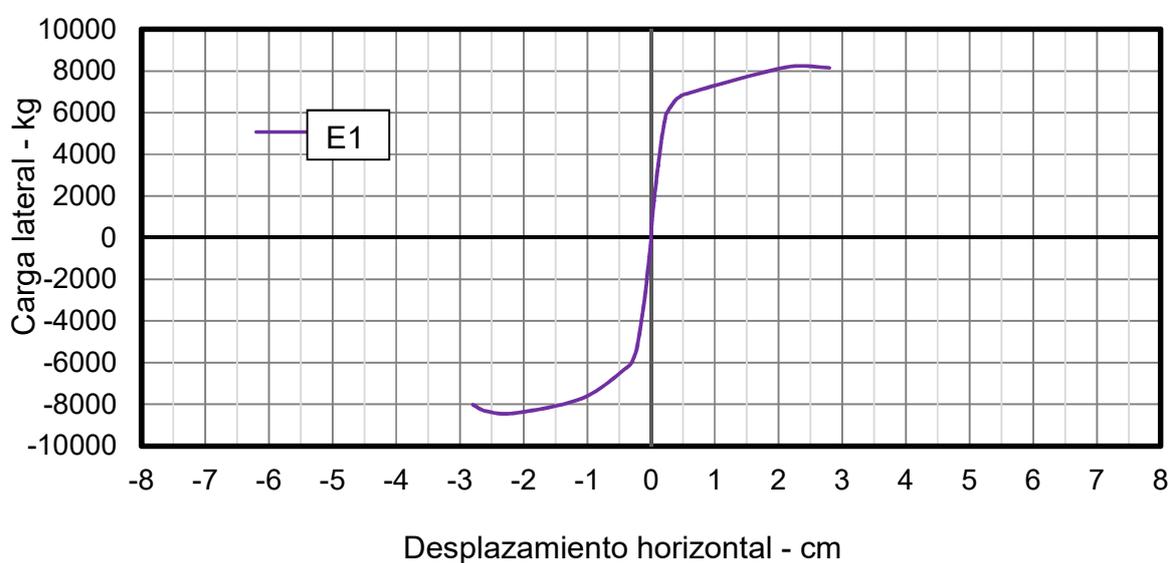


Figura 5.13 Curva envolvente de muros con $H'/L=1.1$

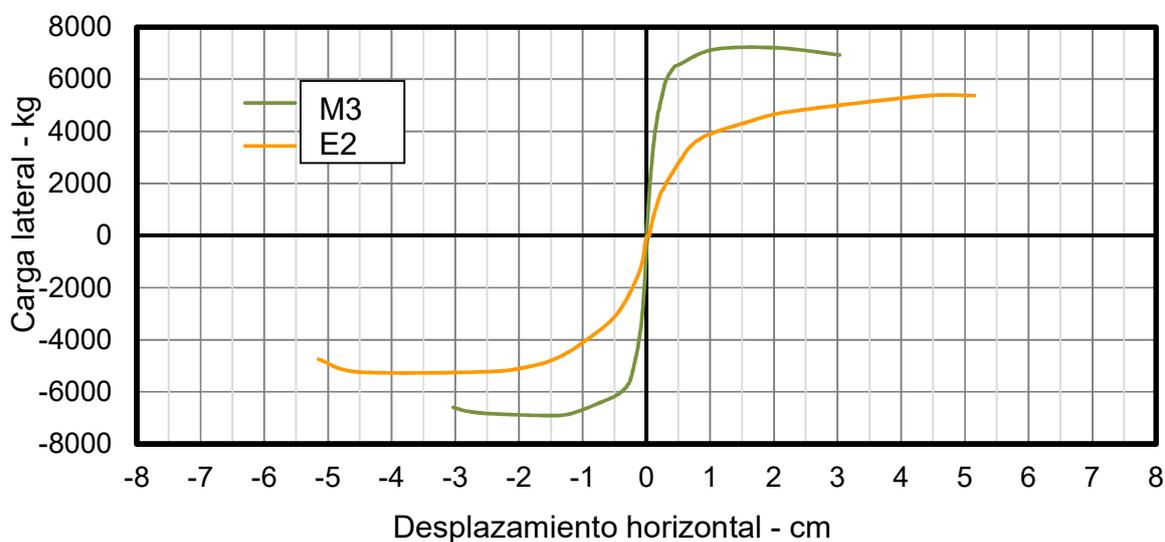


Figura 5.14 Curvas envolventes de muros con $H'/L=1.5$

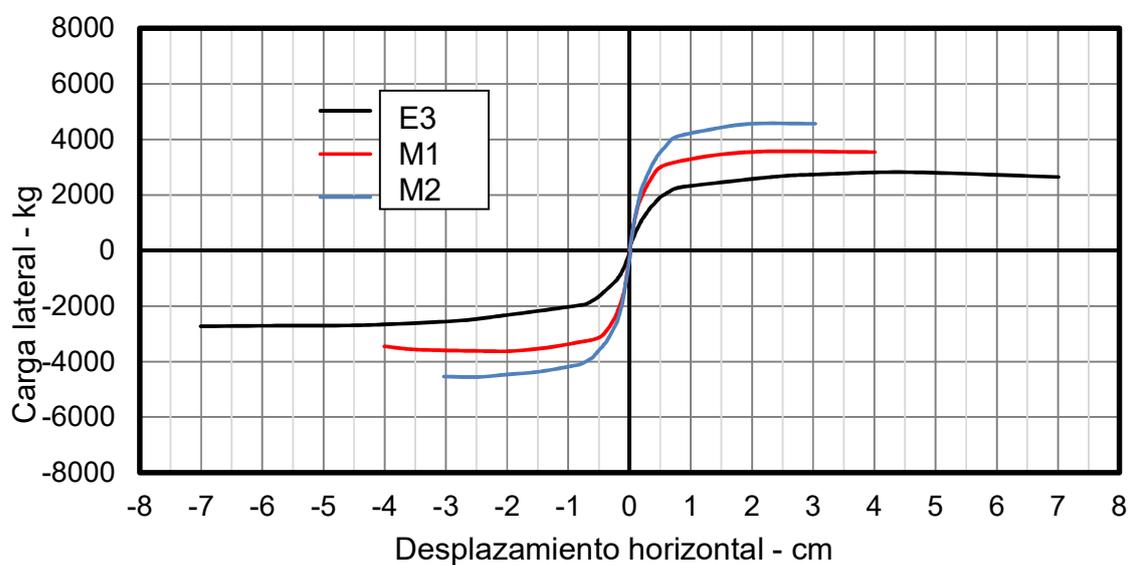


Figura 5.15 Curvas envolventes de muros con $H'/L=2.4$

La rigidez de fluencia experimental de los muros se definió como la rigidez secante al punto de fluencia (Tabla 5.7). En la Figura 5.16 y Figura 5.17 se presenta la curva de degradación de rigidez de ciclo – distorsión y la curva degradación de rigidez de ciclo

– ductilidad, respectivamente. En la Figura 5.16 se observa que, para los muros con la misma relación de aspecto (M3 y E2; M1, M2 y E3), al aumentar el esfuerzo axial, la degradación de la rigidez de ciclo es menor. En la Figura 5.17 se observa que, para una misma ductilidad de desplazamiento, la degradación de rigidez de ciclo es similar para todos los muros.

Tabla 5.7 Rigidez de fluencia

Muro	K_{ye} (kg/cm)
E1	20,767
E2	8,806
M3	22,654
E3	2,848
M1	5,800
M2	7050

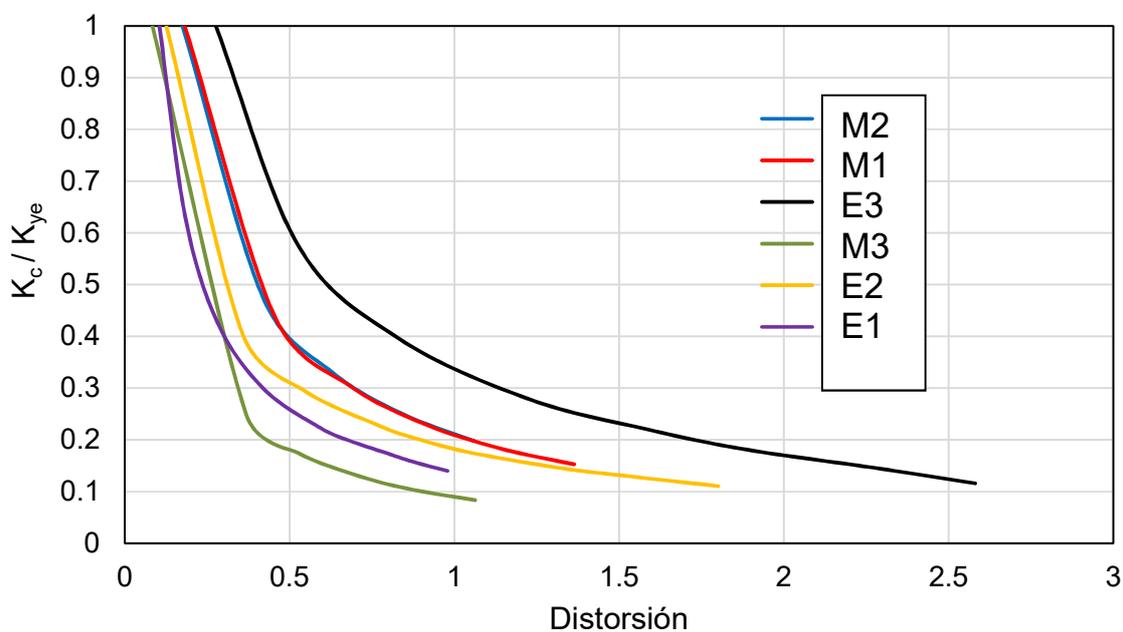


Figura 5.16 Degradación de rigidez de ciclo - distorsión

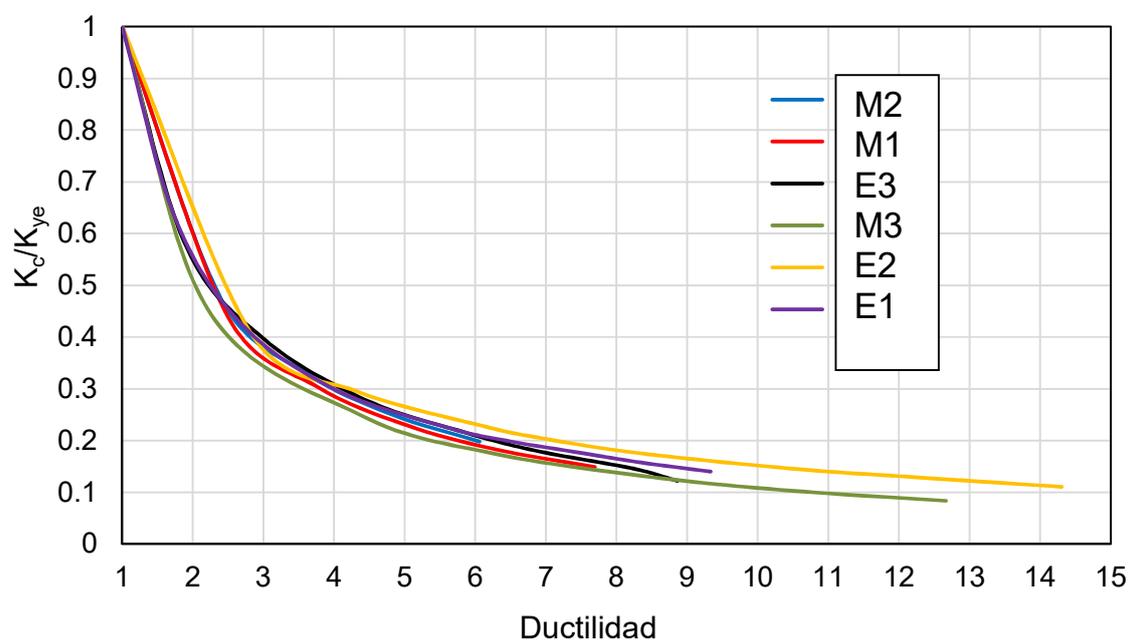


Figura 5.17 Degradación de rigidez de ciclo vs Ductilidad

5.6 Modelo de histéresis

Para representar el comportamiento de los muros se desarrolló un modelo de histéresis. Se consideró como referencia el modelo de histéresis de Takeda (CANNY, 1996) (Figura 5.18). La curva bilineal ascendente se define por una rigidez inicial (K_y) y una rigidez posterior a la fluencia (K_{py}). La curva descendente se define por una rigidez de descarga (K_u) y una recta U-U'.

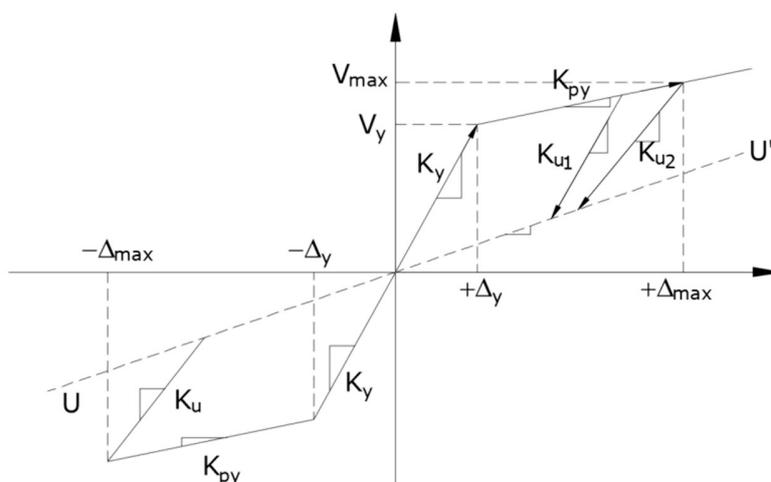


Figura 5.18 Modelo de histéresis de Takeda (CANNY, 1996)

La rigidez inicial (K_y) se definió como la rigidez secante al punto de fluencia (ecuación 5.1).

$$K_y = \left(\frac{V_y H^3}{3(\alpha) E_m I_g} + \frac{1.2 V H}{G_m A} \right)^{-1} \quad (5.1)$$

En donde V_y es la resistencia de fluencia, E_m es el módulo de elasticidad de la mampostería, I_g la inercia gruesa de la sección transversal, G_m el módulo de cortante de la mampostería, H la altura del muro, A el área transversal del muro y α el parámetro de ajuste. Para cada muro, se determinó un valor de α de tal manera que la rigidez inicial (K_y) sea igual a la rigidez experimental de fluencia (K_{ye}). En la Tabla 5.8 se presentan los valores del parámetro α . En la Tabla 5.8 se observa que para los muros con esfuerzo axial similar (E1, E2 y E3), el valor del parámetro α fue similar (entre 0.18 y 0.19). Para los muros con la misma relación de aspecto, al aumentar el esfuerzo axial, el valor del parámetro α incrementa.

Tabla 5.8 Valores del parámetro α

Muro	α
E1	0.19
E2	0.18
M3	0.57
E3	0.19
M1	0.42
M2	0.53

La rigidez posfluencia (K_{py}) se definió con la ecuación (5.2).

$$K_{py} = \beta K_y \quad (5.2)$$

Donde K_y es la rigidez inicial y β es el parámetro de ajuste. Para cada envolvente, se realizó un ajuste lineal por mínimos cuadrados para los puntos posteriores al punto de fluencia. Dichos ajustes pasan por el punto de fluencia. En la Figura 5.19, Figura 5.20 y Figura 5.21 se presentan los ajustes con una línea punteada. Las pendientes de las rectas de los ajustes se definieron como la rigidez posfluencia experimental (K_{pe}). Para cada muro, se determinó un valor de β , de tal manera que la rigidez pos fluencia (K_{py}) sea igual a la rigidez posfluencia experimental (K_{pe}). En la Tabla 5.9 se presentan los valores del parámetro β . En dicha tabla se observa que los valores del parámetro β varían en un rango de 3.73 a 9.11 %. El valor promedio fue de 5.32%.

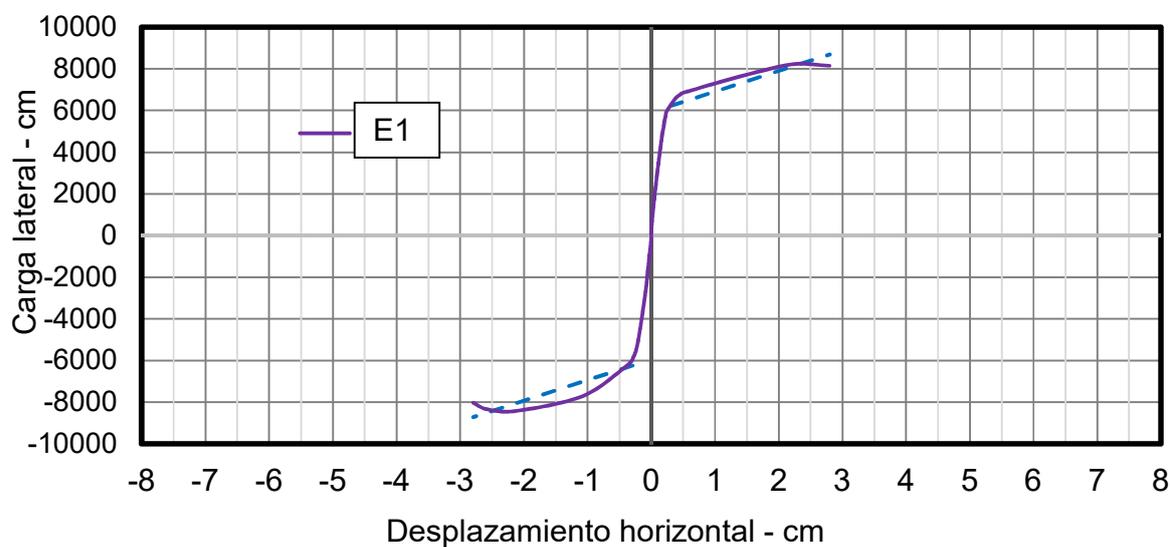


Figura 5.19 Curva de ajuste en muros con $H/L=1$

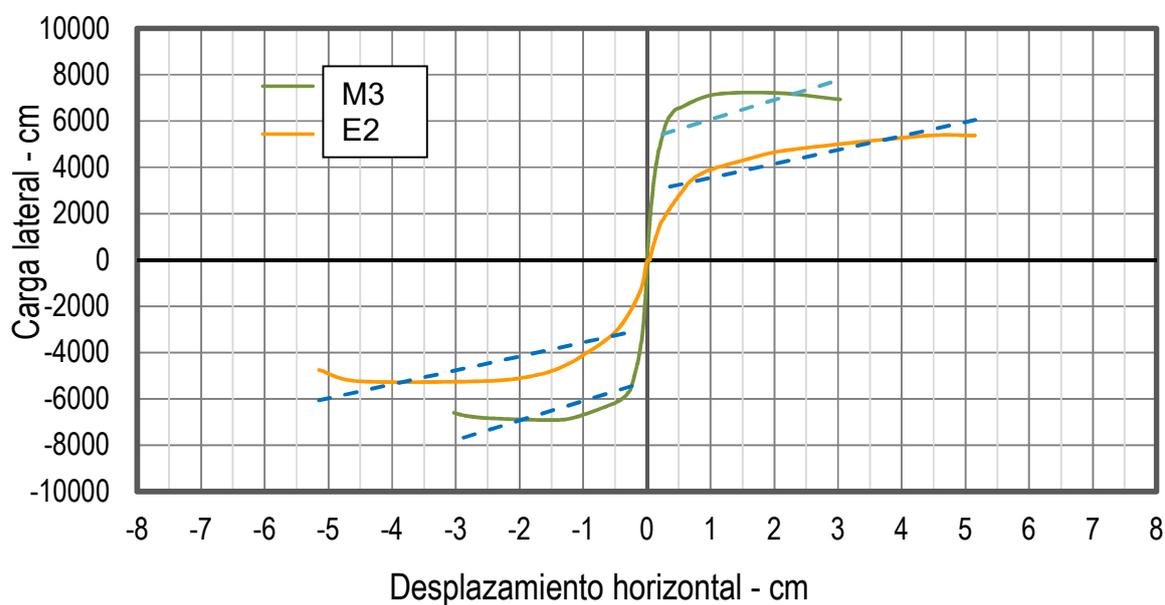


Figura 5.20 Curva de ajuste en muros con $H/L=1.5$

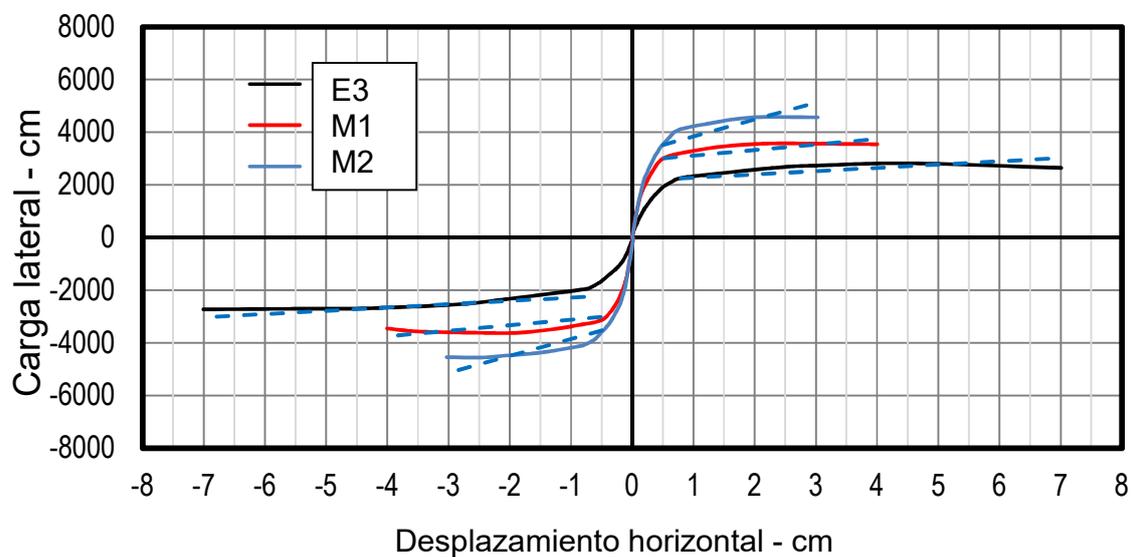


Figura 5.21 Curva de ajuste en muros con $H/L=2$

Tabla 5.9 Valores del parámetro β

Muro	K_y (kg/cm)	K_{py} (kg/cm)	β (%)
E1	20,767	989	4.76
E2	8,806	602	6.84
M3	22,654	844	3.73
E3	2,848	125	4.39
M1	5,800	210	3.08
M2	7,050	642	9.11
		Promedio	5.32
		CV	42.38

En las curvas carga lateral – desplazamiento horizontal de los muros (Figura 5.1 a la Figura 5.6), se observó que la parte correspondiente a la descarga se compone por dos pendientes. La primera pendiente se relaciona con la rigidez elástica de descarga y la segunda con la rigidez asociada al daño en el muro (Figura 5.22). Se ajustó una recta U-U' para limitar la rigidez de daño. La pendiente de dicha recta se definió con la rigidez (K_{uu}) (ecuación (5.3)).

$$K_{uu} = \gamma K_y \quad (5.3)$$

Donde γ es el parámetro de ajuste. En la Tabla 5.10 se presentan los valores del parámetro γ . En la Tabla 5.10 se observa para muros con misma relación de aspecto, al aumentar el esfuerzo axial, el valor del parámetro γ incrementa. En la Figura 5.23 a la Figura 5.28 se presenta el ajuste de la recta U-U' con una línea punteada.

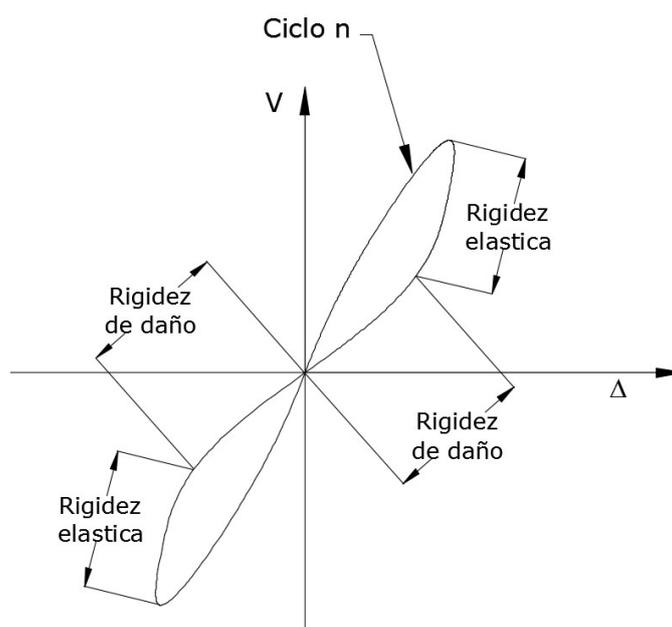


Figura 5.22 Rigidez elástica de descarga y rigidez de daño

Tabla 5.10 Valores del parámetro γ

Muro	γ (%)
E1	5
E2	5
M3	7
E3	5
M1	10
M2	15

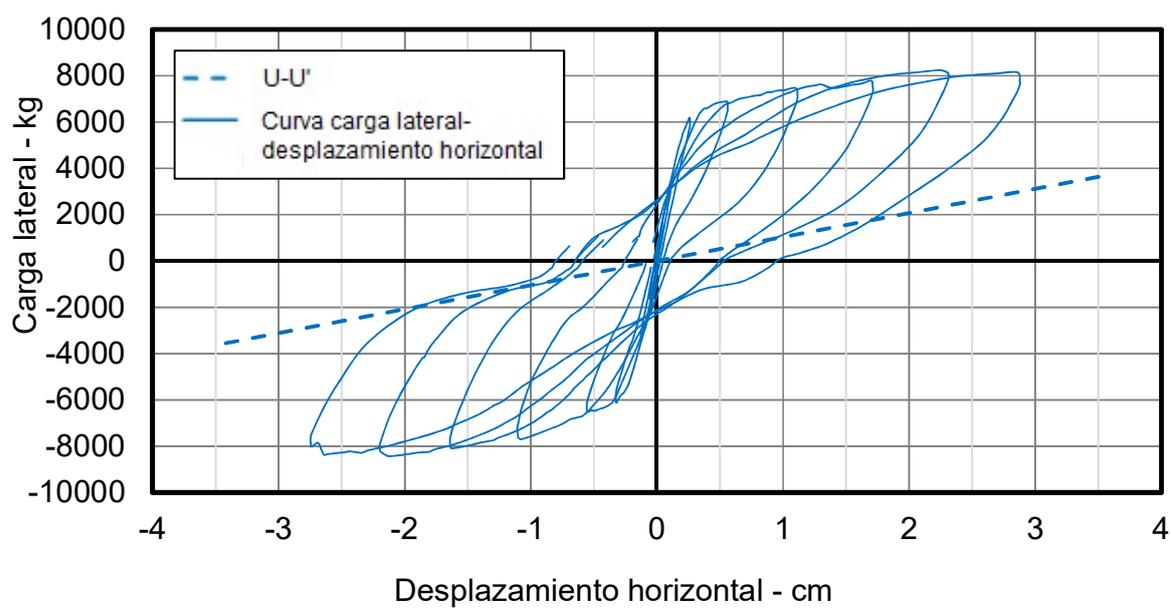


Figura 5.23 Ajuste de la recta U-U' para el muro E1

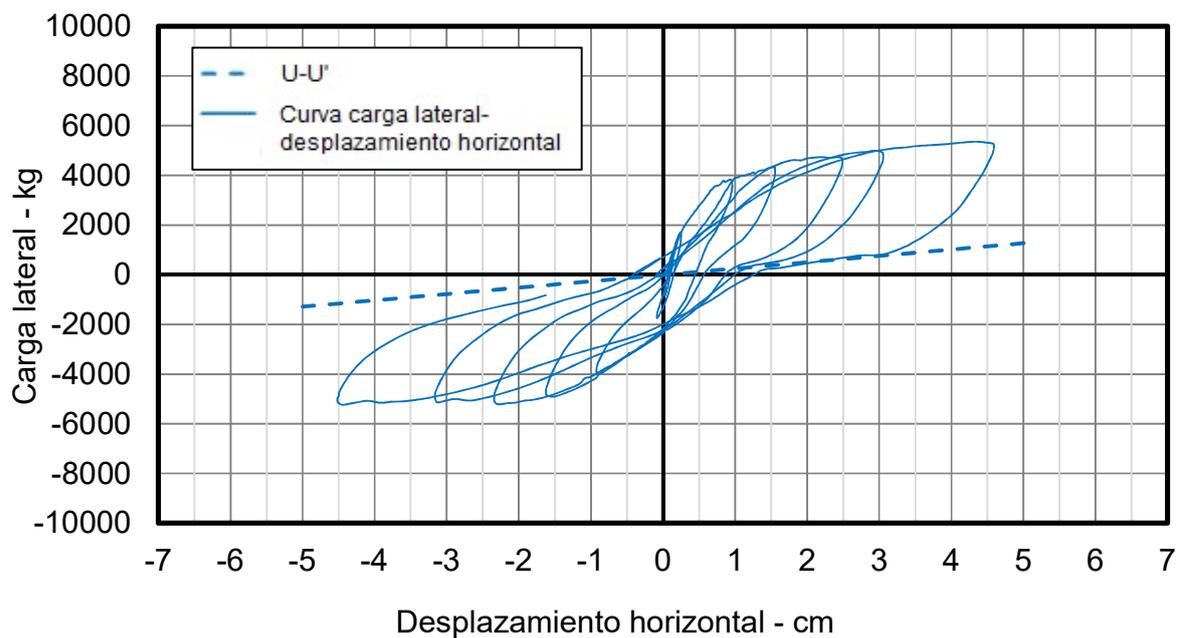


Figura 5.24 Ajuste de la recta U-U' para el muro E2

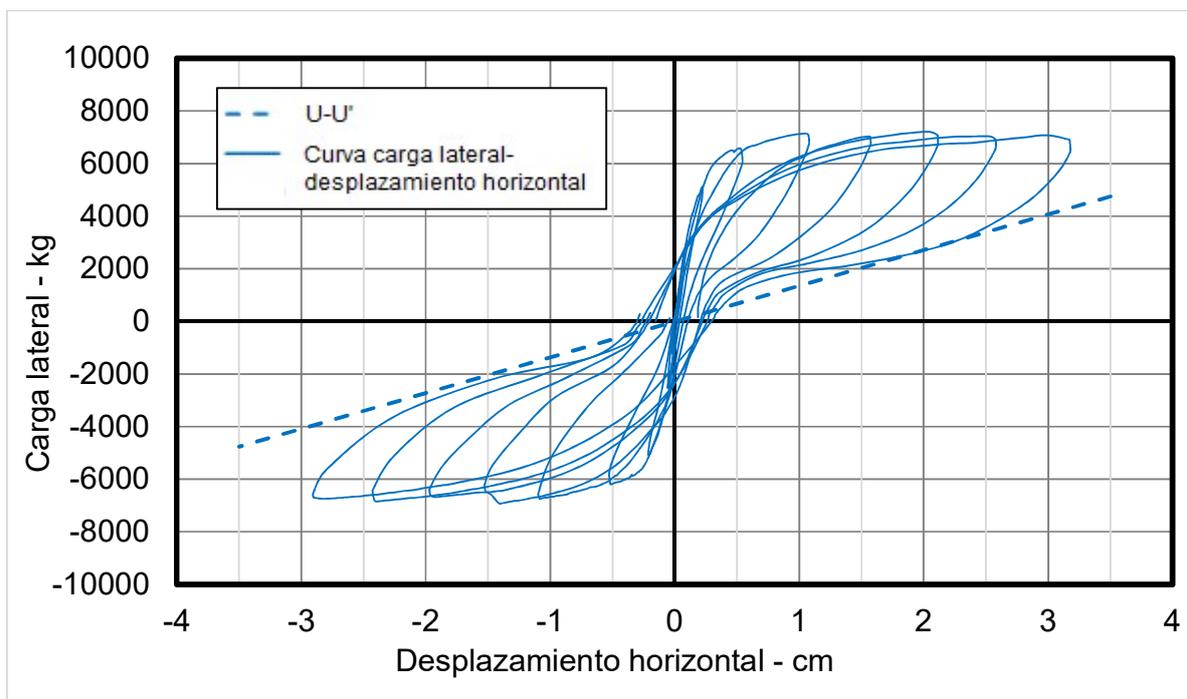


Figura 5.25 Ajuste de la recta U-U' para el muro M3

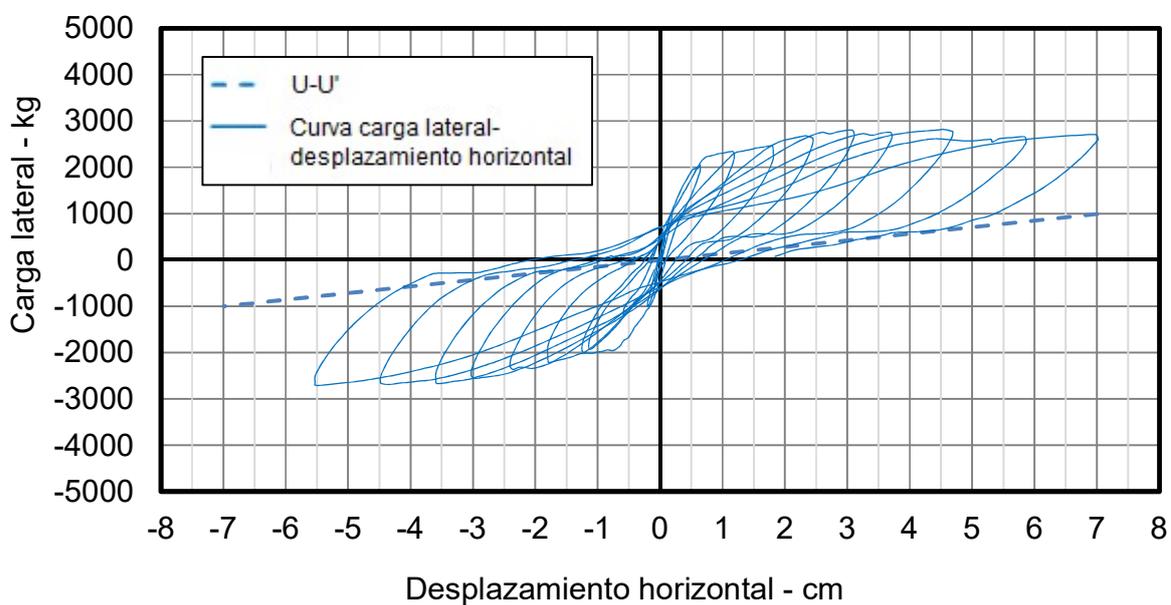


Figura 5.26 Ajuste de la recta U-U' para el muro E3

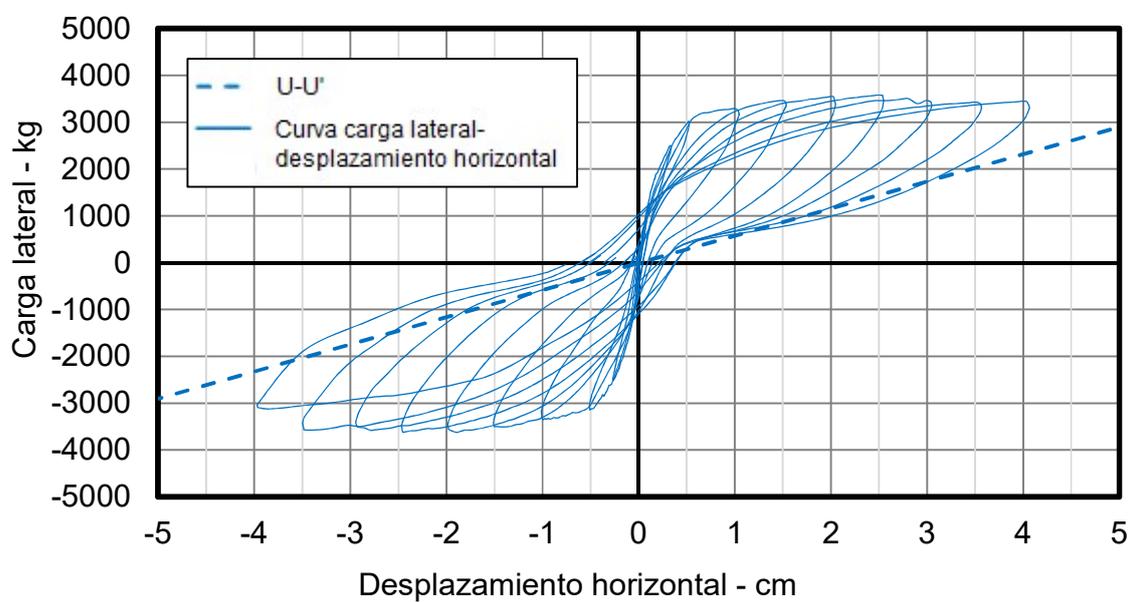


Figura 5.27 Ajuste de la recta U-U' para el muro M1

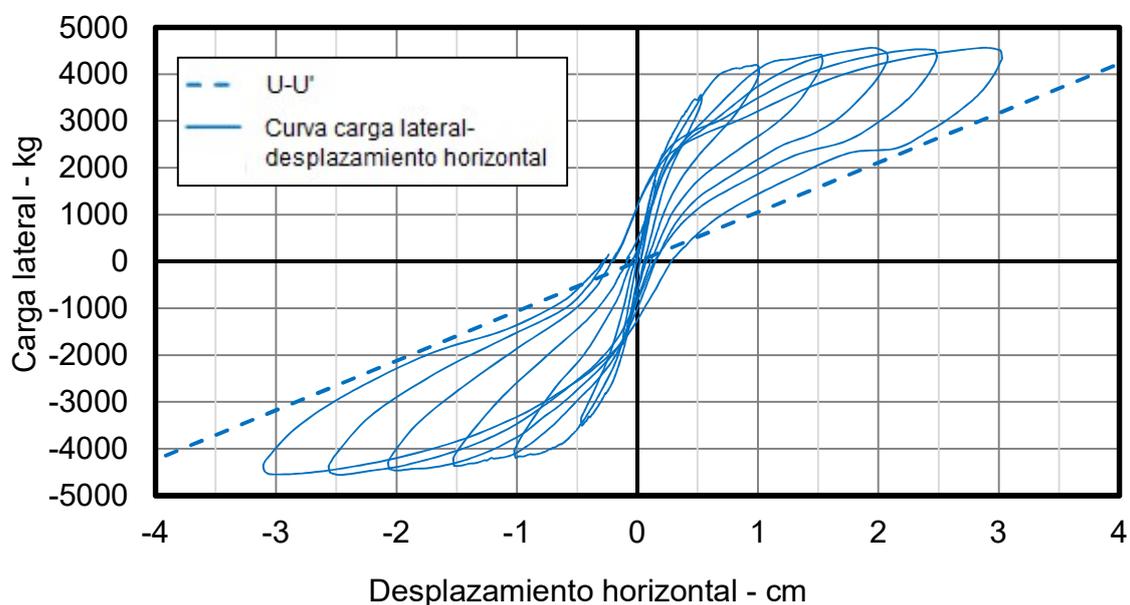


Figura 5.28 Ajuste de la recta U-U' para el muro M2

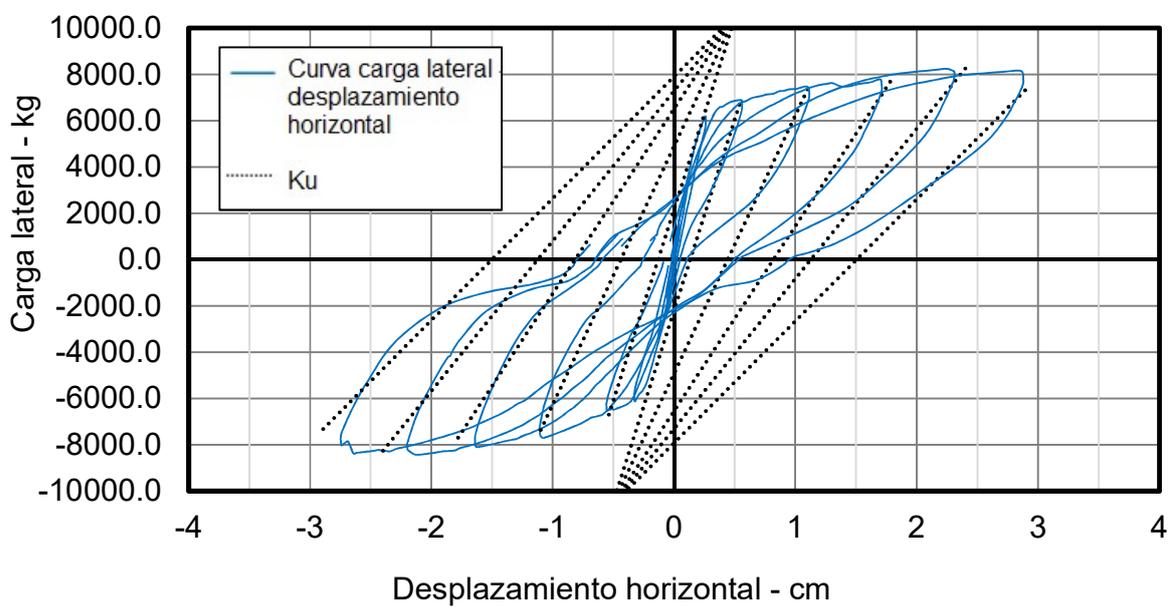
La rigidez de descarga (K_u) se utilizó para ajustar la parte correspondiente a la rigidez de descarga elástica (ecuación (5.4)).

$$K_u = \frac{\Theta V_y + V_m}{\Theta V_y / K_{ye} + d_m} \quad (5.4)$$

Donde V_m es la resistencia al instante de la descarga, d_m es desplazamiento horizontal al instante de la descarga y Θ el parámetro de ajuste. En la Tabla 5.11 se presentan los valores del parámetro Θ . En la Tabla 5.11 se observa que en general, los valores del parámetro Θ son similares. El promedio fue de 1.5. En la Figura 5.29 a la Figura 5.34 se presentan los ajustes de la rigidez K_u representados con líneas punteadas.

Tabla 5.11 Valores del parámetro Θ .

Muro	Θ
E1	1.7
E2	1.6
M3	1.6
E3	1.4
M1	1.4
M2	1.4
Promedio	1.5
CV (%)	8.76

Figura 5.29 Ajuste de la rigidez K_u para el muro E1

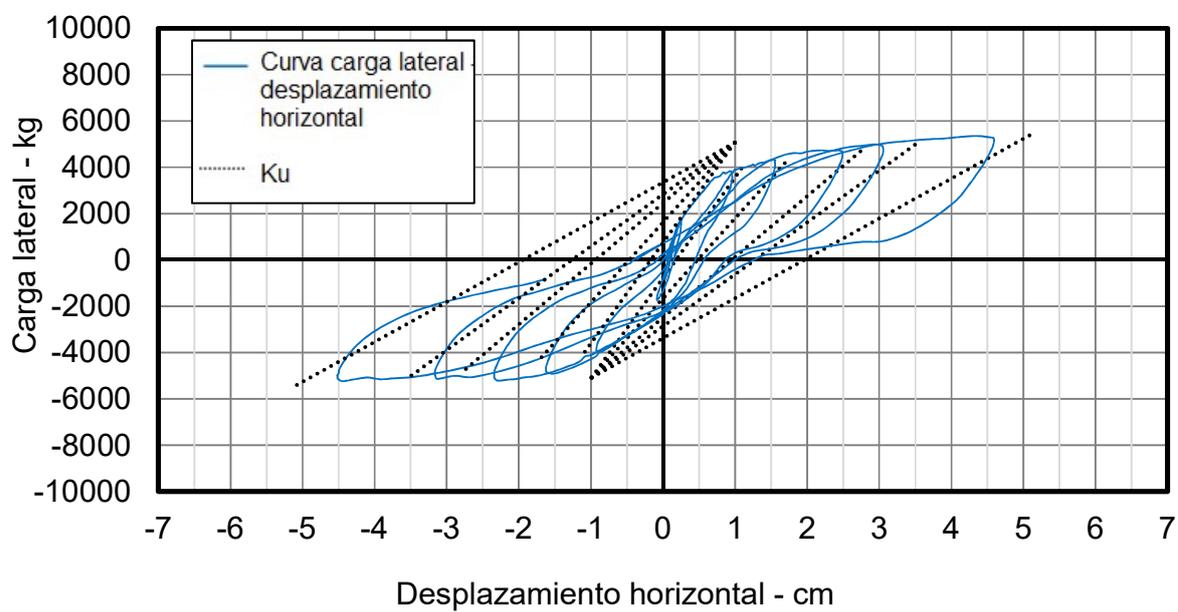


Figura 5.30 Ajuste de la rigidez K_u para el muro E2

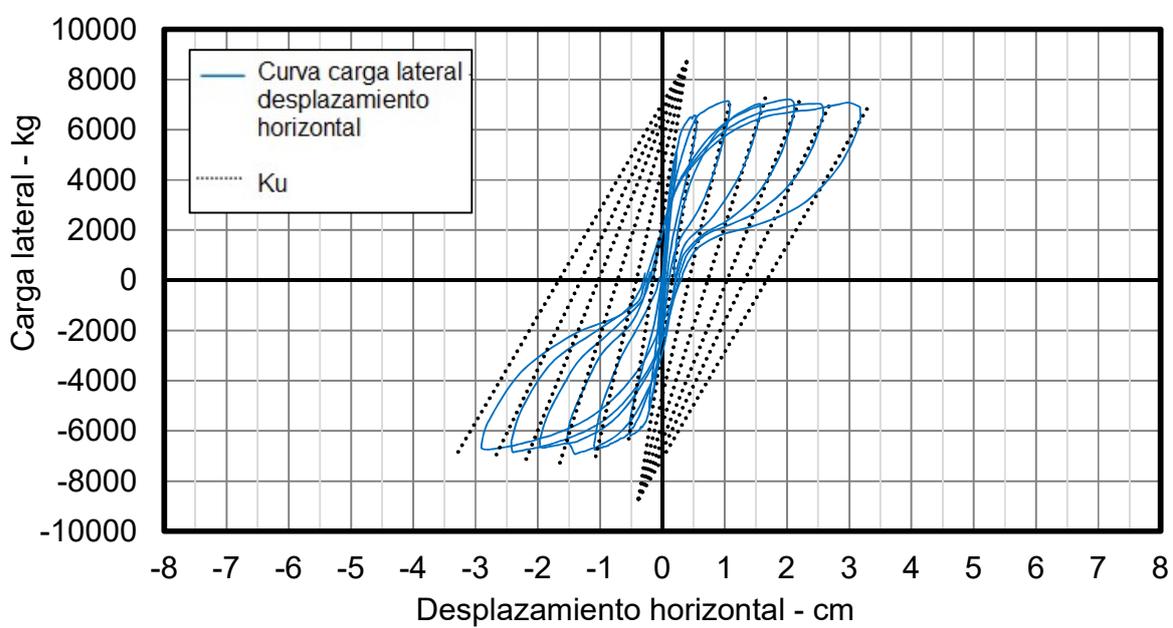


Figura 5.31 Ajuste de la rigidez K_u para el muro M3

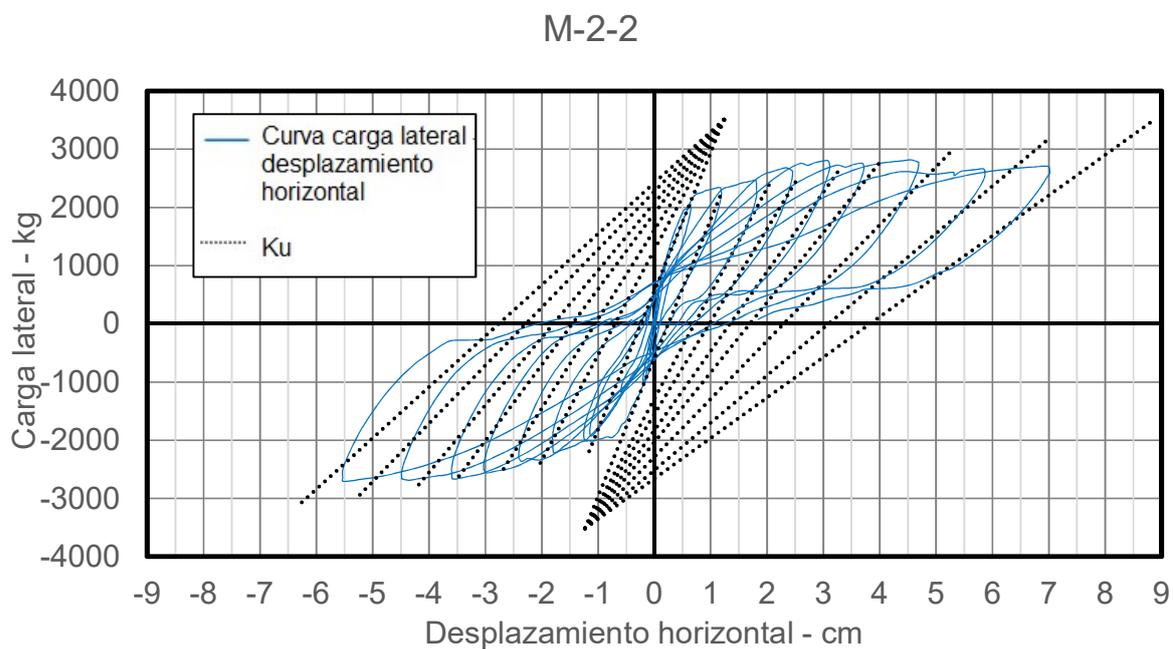


Figura 5.32 Ajuste de la rigidez K_u para el muro E3

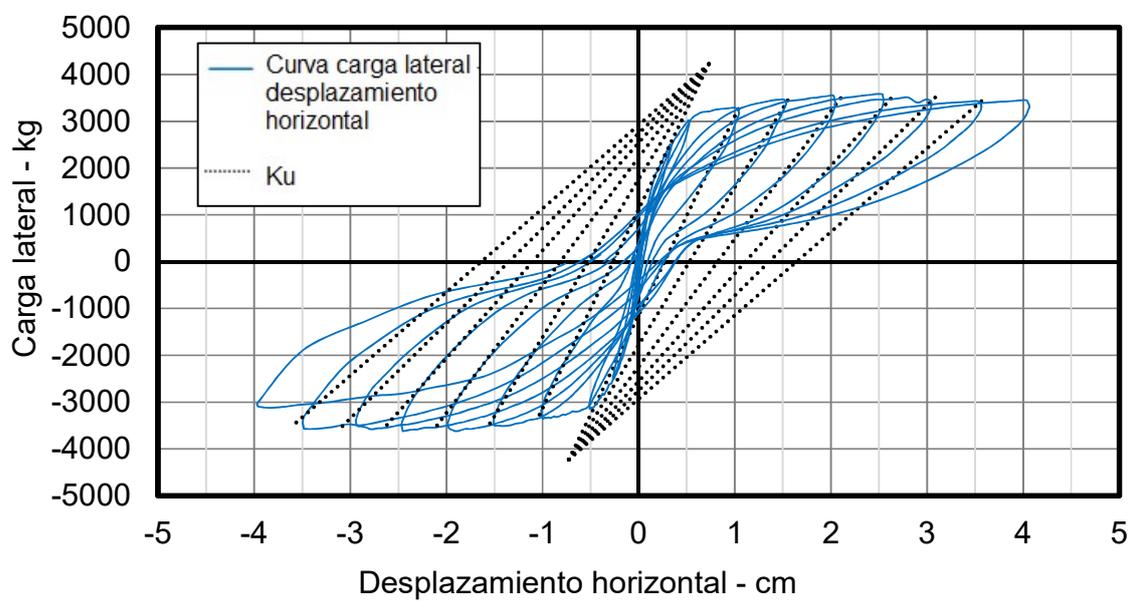


Figura 5.33 Ajuste de la rigidez K_u para el muro M1

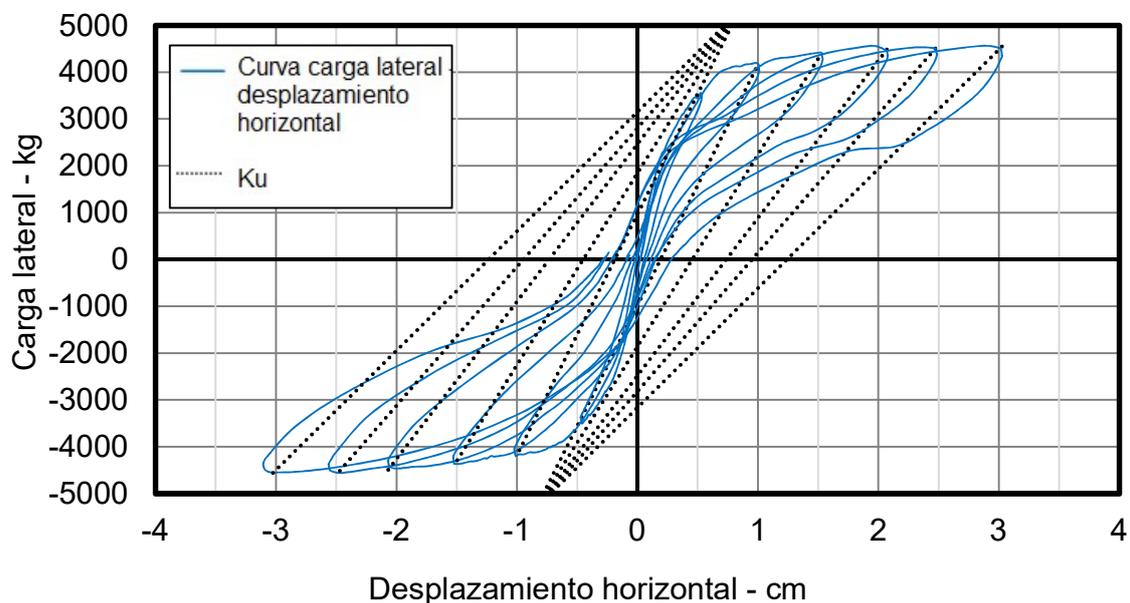


Figura 5.34 Ajuste de la rigidez K_u para el muro M2

Con base en los análisis anteriores, se propone un modelo de histéresis para los muros con el mismo esfuerzo axial (E1, E2 y E3). Se utilizaron los valores promedio de los parámetros de ajuste para dichos muros ($\alpha=0.19$, $\beta=5.33\%$, $\gamma=5\%$ y $\Theta=1.56$). En la Figura 5.35 a la Figura 5.37 se presentan las curvas carga lateral - desplazamiento horizontal experimentales y las correspondientes analíticas obtenidas con los parámetros promedio. En dichas figuras se observa que el modelo de histéresis propuesto representa adecuadamente el comportamiento de los muros.

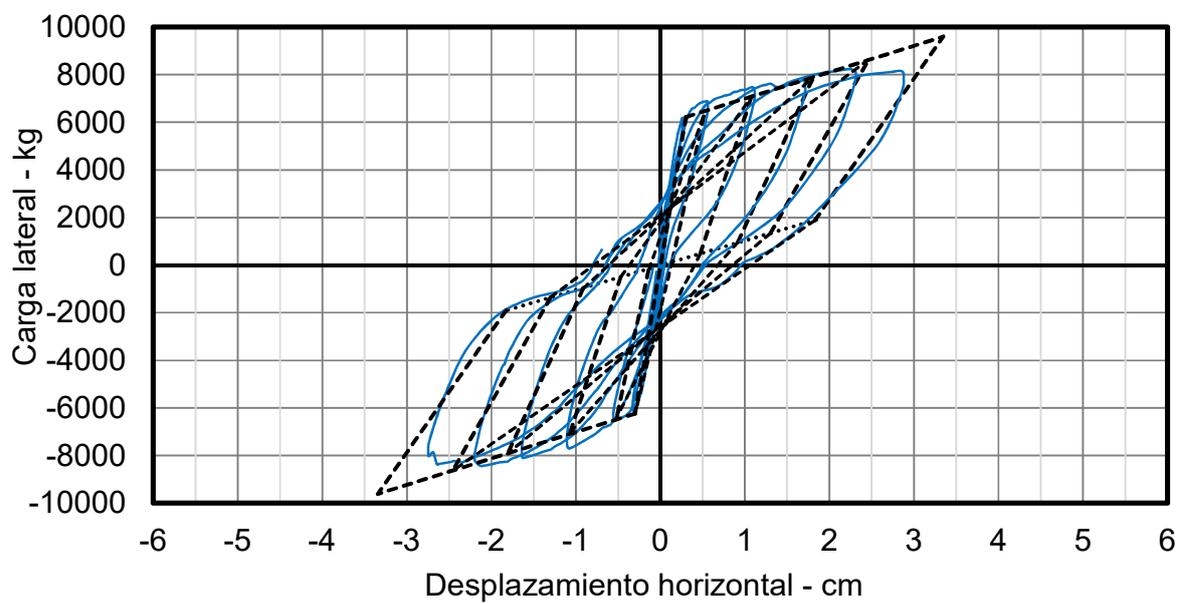


Figura 5.35 Curva carga lateral - desplazamiento horizontal y modelo de histéresis del muro E1

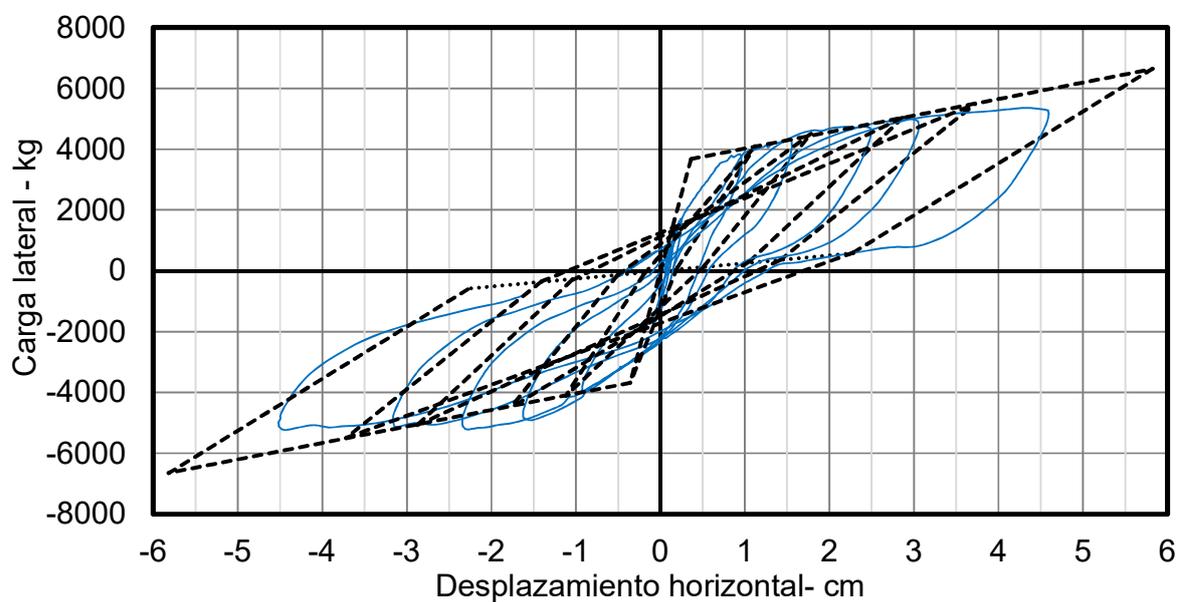


Figura 5.36 Curva carga lateral - desplazamiento horizontal y modelo de histéresis del muro E2

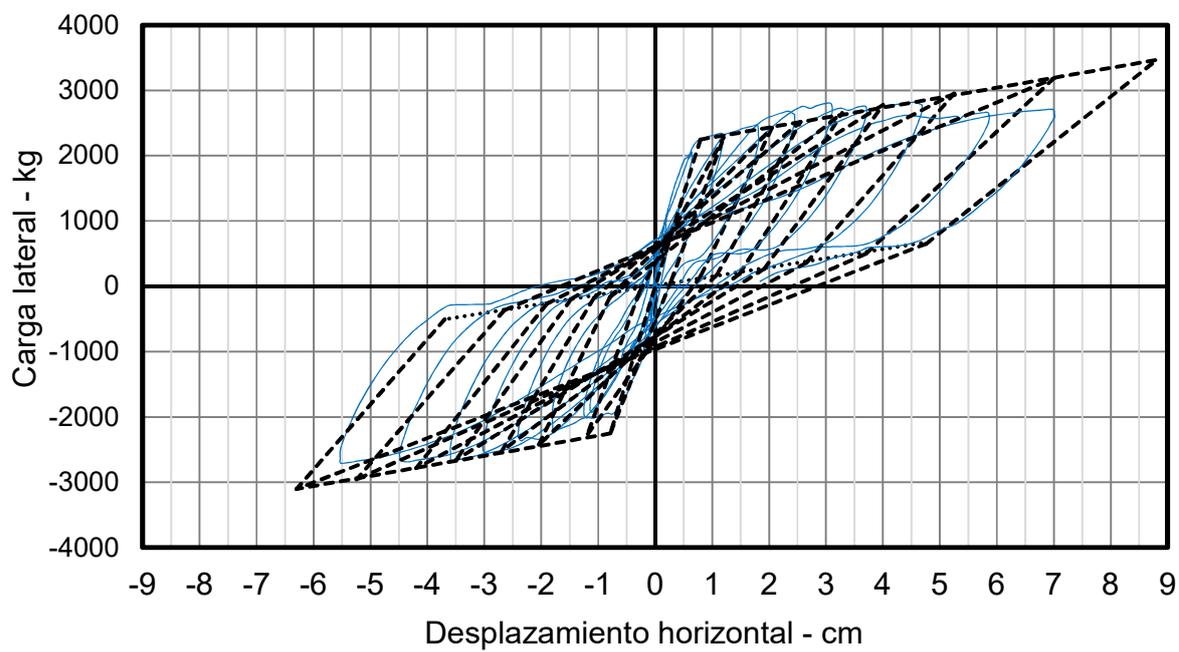


Figura 5.37 Curva carga lateral - desplazamiento horizontal y modelo de histéresis del muro E3

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

En esta investigación se evaluó el comportamiento a flexión de muros de mampostería confinada. La variable estudiada fue el esfuerzo axial. Se analizaron los resultados experimentales de seis muros escala natural, tres ensayados en este trabajo y tres tomados de la literatura. Con base en los análisis realizados, se presentan las siguientes conclusiones:

1. El comportamiento de los muros fue dominado por flexión. La evolución del agrietamiento de los muros fue el siguiente: (1) formación de una grieta horizontal en la base del muro, (2) formación de grietas horizontales en la parte inferior de los castillos, (3) formación de grietas verticales aproximadamente a 15 cm del paño interior del castillo, (4) formación de nuevas grietas horizontales en los castillos y extensión de grietas existentes, y (5) formación de una o dos grietas diagonales en el panel.
2. Las resistencias a flexión experimentales de los muros se predicen adecuadamente utilizando las hipótesis fundamentales de flexión. Para los muros con la misma relación de aspecto, al aumentar el esfuerzo axial, la resistencia a flexión incrementa. Las ductilidades de desplazamiento máximas de los muros variaron entre 6.06 y 14.31. Las distorsiones máximas variaron entre 0.98% y 2.46%. Para muros con la misma relación de aspecto, al aumentar el esfuerzo axial, la ductilidad de desplazamiento y la distorsión máxima disminuyen. Las distorsiones máximas son mayores que las establecidas en las NTCM para muros confinados.
3. El agrietamiento vertical propició la formación del agrietamiento diagonal. El agrietamiento vertical reduce la longitud del muro y por tanto su resistencia a cortante. Dicha resistencia se puede determinar con la ecuación 2.7 y utilizando la longitud reducida del muro.
4. Para los muros con la misma relación de aspecto y una distorsión determinada, la energía disipada equivalente (EDE) es similar. Para muros con la misma relación de aspecto (E3, M1 y M2), y una ductilidad de desplazamiento determinada, al aumentar el esfuerzo axial, la energía disipada equivalente (EDE) disminuye.

5. Para los muros con la misma relación de aspecto y una distorsión determinada, al aumentar el esfuerzo axial, la degradación de la rigidez de ciclo es menor. Para una ductilidad de desplazamiento determinada, la degradación de rigidez de ciclo es similar para todos los muros.
6. Para definir el modelo de histéresis, se calibraron los parámetros α , β , Θ y γ . Se observó que:
 - Para los muros con esfuerzo axial similar (E1, E2 y E3), el valor del parámetro α fue similar (entre 0.18 y 0.19). Para los muros con la misma relación de aspecto, al aumentar el esfuerzo axial, el valor del parámetro α incrementa.
 - El parámetro β varía entre 3.73 a 9.11 %. El promedio fue de 5.32%.
 - Para muros con la misma relación de aspecto, al aumentar el esfuerzo axial, el valor del parámetro γ incrementa.
 - Los valores del parámetro Θ son similares y varían entre 1.4 y 1.7. El promedio fue de 1.5.

BIBLIOGRAFÍA

1. CANNY (1996). 3-Dimensional Nonlinear Static / Dynamic Structural Analysis Computer Program. Technical Manual.
2. Drysdale G.R., Hamid A.H. (2008). Masonry Structures, Behavior and Design. 3° edición, The Masonry Society, Boulder Colorado, E.U.A.
3. Espinoza E., Terán A., Zúñiga O., Jean R., (2014). Consideraciones para el diseño sísmico de edificios altos de mampostería confinada ubicados en zonas sísmicas. Revista de Ingeniería Sísmica No. 90, 88-109.
4. Fernández Baqueiro L. E., Sosa Moreno M. I. y Varela Rivera J. L. (2014). Resistencia en el plano de muros de mampostería confinada: efecto de la relación de aspecto. Memorias del XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, 13-15 de noviembre, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
5. Flores L. E., Mendoza J. A., Reyes C. (2004). Ensaye 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.
6. NTCM - Gobierno del Distrito Federal (2004), Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, “Gaceta Oficial del Distrito Federal”, México.
7. NTCS - Gobierno del Distrito Federal (2004), Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo, “Gaceta Oficial del Distrito Federal”, México.
8. Ojeda M. (2014). Resistencia a compresión axial y a tensión por flexión de la mampostería de piezas multiperforadas de arcilla extruida de 12 cm de espesor. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
9. ONNCCE – Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2010). Industria de la construcción– Mampostería-Determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o concreto-Métodos de ensaye,

- NMX-C-464-ONNCCE-2010, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
10. ONNCCE – Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2002). “Industria de la construcción - Concreto-Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto - Método de prueba”, NMX-C-083-ONNCCE-2002, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
 11. ONNCCE – Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. S. C. (2001). “Industria de la construcción – Varilla corrugada de acero proveniente de lingote y palanquilla para refuerzo de concreto - Especificaciones y métodos de prueba”, NMX-C-407-ONNCCE-2001, Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México.
 12. Pérez Gavilán J. J., Flores L. E., Alcocer S. M. (2015). An experimental study of confined masonry walls with varying aspect ratio. “Earthquake Spectra”, EERI, 31(2), 945-968.
 13. Pérez Gavilán J.J., Manzano A. (2011). Interacción Momento Cortante en Muros de Mampostería Confinada: Estudio Piloto. Instituto de Ingeniería de la UNAM.
 14. Prieto A. (2015). Comportamiento a flexión de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales: efecto de la relación de aspecto. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
 15. Raygoza E. (2012). Muros de mampostería confinada de bloques huecos de concreto de 15 cm, con relación de aspecto mayor a uno, sujetos a cargas laterales. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
 16. Rodríguez M.y Botero J. (1996). Aspectos del comportamiento sísmico de estructuras considerando las propiedades mecánicas de aceros de refuerzo producidos en México. “Publicación Series Instituto de Ingeniería–UNAM”, 575.
 17. San Bartolomé, A., Quiun, D. y Torrealva, D. (1992). Seismic behaviour of a three-story scale confined masonry Structure. Tenth world Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, Países Bajos.

18. Shedid M. T., Drysdale R. G., El-Dakhakhni W. W. (2008). Behavior of fully grouted reinforced concrete masonry shear walls failing in flexure: Experimental results. "Journal of structural engineering", ASCE, 134(11), 1754-1767.
19. Sosa M. (2013). Muros de mampostería confinada de bloques huecos de concreto, sujetos a cargas laterales en su plano. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
20. Sunley, S. (2012). Experimental study of flexural behavior of reinforced concrete walls. "Bulletin of the international institute of seismology and earthquake engineering", 46, 67-72.
21. Tanner Jennifer E., Varela Jorge L., Klinger Richard E. (2005 a) 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.
22. Tena A., Juárez A., Salinas V. H. (2009). Cyclic behavior of combined and confined masonry walls. "Engineering structures", ELSEVIER, 31(1), 240-259.
23. Treviño E.L., Alcocer S.M., Flores L.E. (2004). Investigación experimental del comportamiento de muros de Mampostería confinada de bloques de concreto sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles Reforzados con acero de grados 60 y 42. En Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural.
24. Yoshimura K., Kikuchi K., Kuroki M., Liu L., 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 12 World Conference on Earthquake Engineering", Auckland, New Zealand, Paper (No. 984).