



---

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“COMPORTAMIENTO FUERA DEL PLANO DE MUROS  
DE MAMPOSTERÍA CONFINADA CON RELACIÓN DE  
ASPECTO MAYOR QUE UNO”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR**

**I.C. JUAN CACEP RODRÍGUEZ**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**OPCIÓN ESTRUCTURAS**

**MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO**

**2019**

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) por la beca otorgada para realizar mis estudios de posgrado.

## RESUMEN

En México, los muros de mampostería confinada (MMC) son el sistema estructural más utilizado para la construcción de viviendas, oficinas y escuelas, entre otros. Lo anterior se debe a su bajo costo y facilidad constructiva. En años recientes se ha estudiado el comportamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Las variables que controlan el comportamiento fuera del plano de estos muros son: las condiciones de apoyo, la relación de aspecto, la relación de esbeltez, la rigidez en el plano del marco de elementos confinantes (catillos y cadena superior), el esfuerzo axial, la presencia de aberturas y el tipo de bloque. En todos los estudios anteriores se consideraron exclusivamente muros con relaciones de aspecto menores o iguales que uno.

En este trabajo se evaluó el comportamiento fuera del plano de cuatro muros confinados sujetos a cargas uniformes incrementales. Las variables de estudio fueron la relación de aspecto y el esfuerzo axial. Las dimensiones de los muros fueron de 193 cm x 271 cm x 15 cm (longitud x altura x espesor) para el primero y el segundo, y de 133 cm x 271 cm x 15 cm (longitud x altura x espesor) para el tercero y el cuarto. Las relaciones de aspecto fueron de 1.40 para los dos primeros muros y de 2 para los otros dos. La relación de esbeltez fue de 18. La sección transversal de los castillos y la cadena superior fue de 15 cm x 15 cm (base x altura). La resistencia a compresión promedio del concreto fue de 274.62 kg/cm<sup>2</sup>. Se utilizaron bloques huecos de concreto de tres celdas con dimensiones nominales de 15 cm x 20 cm x 40 cm (espesor x altura x longitud). Se empleó mortero en las juntas con proporciones por volumen 1:2:7 (Cemento: cal: arena). La resistencia a compresión promedio de la mampostería sobre el área total fue de 33.63 kg/cm<sup>2</sup>. El primer y el tercer muro se ensayaron con un esfuerzo axial nulo. El segundo y el cuarto muro se ensayaron con un esfuerzo axial de 3.33 kg/cm<sup>2</sup>.

Se observó que, el patrón de agrietamiento final de los muros fue en general similar. Para muros con el mismo esfuerzo axial, conforme la relación de aspecto aumentó, la resistencia fuera del plano aumentó y su capacidad de deformación fuera del

plano disminuyó. Para muros con la misma relación de aspecto, conforme el esfuerzo axial aumentó, la resistencia fuera del plano aumentó y su capacidad de deformación fuera del plano disminuyó. Para los muros con el mismo esfuerzo axial, conforme la relación de aspecto aumentó, los desplazamientos horizontales y verticales en el plano disminuyeron. Para muros con la misma relación de aspecto, conforme el esfuerzo axial aumentó, los desplazamientos horizontales y verticales en el plano aumentaron. La falla de los muros se atribuyó al aplastamiento de la mampostería.

## ABSTRACT

Confined masonry walls are the most used structural system in Mexico for the construction of homes, offices and schools, among others. The above is due to its low cost and constructive ease. In recent years, the behavior of confined masonry walls subjected to out of plane loads has been studied. The variables that control the out-of-plane behavior of walls are: the wall boundary conditions, the wall aspect ratio, the wall slenderness ratio, the stiffness of the confining elements, the wall axial stress, the wall openings and the block type. In all those studies, it has been considered only wall aspect ratios less or equal than one.

In this research study, the out-of-plane behavior of four confined masonry walls subject to incremental uniform loads was evaluated. The study variables were the wall aspect ratio and the wall axial stress. The dimensions of the walls were 193 cm x 271 cm x 15 cm (length x height x thickness) for the first and second, and 133 cm x 271 cm x 15 cm (length x height x thickness) for the third and the fourth. The wall aspect ratios were 1.40 for the first two walls and 2 for the other two. The wall slenderness ratio was 18. The cross section of the castles and the upper chain was 15 cm x 15 cm (base x height). The concrete average compressive strength was 274.62 kg/cm<sup>2</sup>. The walls were built with hollow concrete blocks with nominal dimensions of 15 cm x 20 cm x 40 cm (thickness x height x length) were used. Mortar was used in the joints with proportions by volume 1: 2: 7 (Cement: lime: sand). The masonry average compressive strength was 33.63 kg/cm<sup>2</sup>. The first and third walls were tested without axial stress. The second and fourth walls were tested with an axial stress of 3.33 kg/cm<sup>2</sup>.

It was observed that the walls final cracking pattern was generally similar. For walls with the same axial stress, as the wall aspect ratio increased, the out-of-plane strength increased and its out-of-plane deformation capacity decreased. For walls with the same aspect ratio, as the wall axial stress increased, the out-of-plane strength increased and its out-of-plane deformation capacity decreased. For the walls with the same axial stress, as the wall aspect ratio increased, the horizontal

and vertical in-plane displacements decreased. For walls with the same aspect ratio, as the axial stress increased, the horizontal and vertical in-plane displacements increased. The walls failure was attributed to the masonry crushing.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	III
ABSTRACT .....	V
INDICE.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	XII
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Generalidades .....	1
1.2. Objetivo.....	2
1.3. Alcance .....	2
1.4. Organización de la tesis.....	2
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>4</b>
2.1. Comportamiento experimental fuera del plano de muros de mampostería confinada .....	4
2.2. Métodos analíticos para determinar la resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada .....	8
2.3. Conclusiones de la revisión de la literatura.....	11
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>13</b>
3.1. Obtención de propiedades de materiales .....	13
3.2. Diseño de muros.....	17
3.3. Construcción de muros .....	22
3.4. Diseño del sistema de carga e instrumentación de muros.....	26
3.4.1. Sistema de carga fuera del plano.....	26
3.4.2. Sistema de carga axial .....	27



3.5. Instrumentación .....	29
3.6. Ensaye de muros .....	30
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>32</b>
4.1. Propiedades de materiales .....	32
4.2. Ensaye de muros de mampostería .....	34
4.2.1. Comportamiento del muro M-1.4-0 .....	34
4.2.2. Comportamiento del muro M-1.4-3.33 .....	38
4.2.3. Comportamiento del muro M-2.0-0 .....	42
4.2.4. Comportamiento del muro M-2.0-3.33 .....	45
<b>5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
5.1. Patrón de agrietamiento.....	49
5.2. Resistencia fuera del plano.....	50
5.3. Desplazamientos horizontales fuera del plano .....	54
5.4. Desplazamientos horizontales en el plano.....	55
5.5. Resistencias fuera del plano experimentales y analíticas.....	57
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>59</b>
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
APÉNDICE A .....	64
APÉNDICE B .....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Ensaye a compresión de un bloque. ....	13
Figura 3.2: Ensaye a compresión del mortero. ....	14
Figura 3.3: Ensaye de un cilindro de concreto. ....	14
Figura 3.4: Ensaye a tensión del acero de refuerzo. ....	15
Figura 3.5: a) Cabeceado de las pilas con azufre. b) Colocación de placa metálica para distribución de carga en las pilas. c) Instrumentación de las pilas. ....	16
Figura 3.6: Sistema de carga utilizado para el ensaye de pilas. ....	16
Figura 3.7: Consideraciones para el modelado del marco de elementos confinantes de los muros. ....	19
Figura 3.8: Dimensiones y esfuerzos axiales finales de los muros propuestos. ....	21
Figura 3.9: a) Nivelación de la superficie de construcción mediante cama de arena. b) Habilitado del acero de refuerzo de la cimentación. c) Habilitado de la cimbra de la cimentación. d) Colocación del concreto de la cimentación. ....	23
Figura 3.10: a) Colocación de bloques hasta la séptima hilada. b) Habilitado de la cimbra para la parte inferior de castillos. c) Colocación del concreto en los castillos hasta la altura de la sexta hilada de bloques. d) Colocación de bloques hasta la décimo primera hilada. ....	24
Figura 3.11: a) Colocación del concreto en los castillos hasta la altura de la décimo primera hilada de bloques. b) Habilitado de la cimbra de la cadena superior Habilitado de la cimbra de la cimentación. c) Muros de mampostería confinada al concluir la etapa de construcción. ....	25
Figura 3.12: Sistema de carga fuera del plano. ....	26
Figura 3.13: Ubicación de las bolsas de aire en los muros de mampostería confinada. ....	27
Figura 3.14: Sistema de inflado de las bolsas de aire. ....	27
Figura 3.15: Sistema de carga axial. ....	28
Figura 3.16: Conexión hidráulica del sistema de carga axial. ....	28

Figura 3.17: Distribución de los potenciómetros lineales y celdas de carga en los muros de mampostería confinada. ....	29
Figura 4.1: Patrón de agrietamiento del muro M-1.4-0. ....	35
Figura 4.2: Patrón de agrietamiento final del muro M-1.4-0. ....	36
Figura 4.3: Curva carga-desplazamiento horizontal fuera del plano del muro M-1.4-0. ....	36
Figura 4.4: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo izquierdo) del muro M-1.4-0. ....	37
Figura 4.5: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo derecho) del muro M-1.4-0. ....	37
Figura 4.6: Curva carga desplazamiento vertical en el plano (cadena superior) del muro M-1.4-0. ....	38
Figura 4.7: Patrón de agrietamiento del muro M-1.4-3.33. ....	39
Figura 4.8: Patrón de agrietamiento final del muro M-1.4-3.33. ....	40
Figura 4.9: Curva carga-desplazamiento horizontal fuera del plano del muro M-1.4-3.33. ....	40
Figura 4.10: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo izquierdo) del muro M-1.4-3.33. ....	41
Figura 4.11: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo derecho) del muro M-1.4-3.33. ....	41
Figura 4.12: Patrón de agrietamiento del muro M-2.0-0. ....	42
Figura 4.13: Patrón de agrietamiento final del muro M-2.0-0. ....	43
Figura 4.14: Curva carga-desplazamiento horizontal fuera el plano del muro M-2.0-0. ....	43
Figura 4.15: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo izquierdo) del muro M-2.0-0. ....	44
Figura 4.16: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo derecho) del muro M-2.0-0. ....	44

Figura 4.17: Curva carga desplazamiento vertical en el plano (cadena superior) del muro M-2.0-0.....	45
Figura 4.18: Patrón de agrietamiento del muro M-2.0-3.33.....	46
Figura 4.19: Patrón de agrietamiento final del muro M-2.0-3.33. ....	47
Figura 4.20: Curva carga-desplazamiento horizontal fuera del plano del muro M-2.0-3.33. ....	47
Figura 4.21: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo izquierdo) del muro M-2.0-3.33.....	48
Figura 4.22: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo derecho) del muro M-2.0-3.33.....	48
Figura 5.1: Patrón de agrietamiento final de los muros. ....	50
Figura 5.2: Curva carga-desplazamiento horizontal fuera del plano de los muros ensayados.....	50
Figura 5.3: Marcos de elementos confinantes (castillos y cadena superior) de los muros M-2.0-0 y M-1.4-0.....	51
Figura 5.4: Corte longitudinal de los muros M-1.4-0 y M-2.0-0, y las vistas de sus segmentos horizontales, dado un desplazamiento horizontal fuera del plano ( $\delta_{fp}$ ). ....	52
Figura 5.5: Comparación de los los desplazamientos horizontales en el plano como cuerpo rígido ( $\delta_p$ ) de los segmentos A y B de los muros M-1.4-0 y M-2.0-0, respectivamente, dado un desplazamiento fuera del plano ( $\delta_{fp}$ ). ....	53
Figura 5.6: Desplazamientos promedio horizontales en el plano de los castillos y desplazamientos promedio verticales en el plano de la cadena superior de los muros ensayados, correspondientes a un desplazamiento horizontal fuera del plano de 0.58 cm, asociado a la resistencia fuera del plano del muro M-2.0-3.33.....	55
Figura A.1: Curva granulométrica de la arena.....	64
Figura A.2: Vistas de las dimensiones de los bloques .....	65
Figura A.3: Cubo de mortero .....	67
Figura B.1: Pérdida de dimensiones por inflado de las bolsas de aire .....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Resistencias fuera del plano, fuerzas en el plano y tipos de falla controlada por el panel de los muros obtenidas con el MPB.....	18
Tabla 3.2: Resumen de cantidades de acero de refuerzo longitudinal y transversal utilizado en los elementos confinantes.....	20
Tabla 3.3: Descripción de la instrumentación utilizada en los muros. ....	30
Tabla 4.1: Resistencia a compresión de los bloques. ....	32
Tabla 4.2: Resistencia a compresión del mortero. ....	32
Tabla 4.3: Resistencia a compresión promedio del concreto. ....	33
Tabla 4.4: Resistencia a la fluencia del acero de refuerzo longitudinal. ....	33
Tabla 4.5: Resistencia a compresión y módulo de elasticidad de la mampostería sobre área total. ....	34
Tabla 5.1: Resistencias máximas fuera del plano y tipo de falla experimentales y analíticas de los muros ensayados.. ....	57
Tabla A.1: Granulometría de la arena. ....	64
Tabla A.2: Dimensiones de los bloques. ....	65
Tabla A.3: Resistencia a compresión de los bloques .....	66
Tabla A.4: Dimensiones y resistencia a compresión de los cubos de mortero .....	66
Tabla A.5: Dimensiones y resistencia a compresión de los cilindros de concreto del muro M-1.4-0.....	67
Tabla A.6: Dimensiones y resistencia a compresión de los cilindros de concreto del muro M-1.4-3.33.....	68
Tabla A.7: Dimensiones y resistencia a compresión de los cilindros de concreto del muro M-2.0-0.....	68
Tabla A.8: Dimensiones y resistencia a compresión de los cilindros de concreto del muro M-2.0-3.33.....	69

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Generalidades

En México, los muros de mampostería confinada (MMC) son el sistema estructural más utilizado para la construcción de viviendas, oficinas y escuelas, entre otros. Lo anterior se debe a su bajo costo y facilidad constructiva. Los muros confinados pueden estar sometidos a diferentes acciones durante su vida útil. Entre las acciones accidentales se encuentra el viento, que puede ejercer cargas perpendiculares al plano de los muros, es decir, cargas fuera de su plano.

Existen en la literatura estudios experimentales sobre el comportamiento fuera del plano de muros confinados. De estos estudios se concluye que las principales variables que influyen en el comportamiento fuera del plano son: las condiciones de apoyo (Varela et. al. 2011), la relación de aspecto (altura sobre longitud del muro) (Varela et. al. 2012a), la relación de esbeltez (altura sobre espesor del muro) (Varela et. al. 2012a), la rigidez en el plano del marco de elementos confinantes (castillos y cadena superior) (Varela et. al. 2012a), el esfuerzo axial (Varela et. al. 2012b), aberturas en los muros (Varela et. al. 2015), y el tipo de bloque (Moreno et. al. 2015a). En los estudios anteriores se consideraron exclusivamente muros con relaciones de aspecto menores o iguales que uno.

Por otro lado, existe un procedimiento para el diseño fuera del plano de muros confinados (Moreno et al., 2015b). En este procedimiento se asume que los muros están divididos en un panel de mampostería y un marco de elementos confinantes (castillos y cadena superior). La resistencia fuera del plano de los muros puede atribuirse a la falla del panel o del marco. La primera se calcula utilizando el método del puntal bidireccional (MPB) (Moreno et al., 2015a). En este método iterativo, la resistencia fuera del plano se determina asumiendo la formación de un mecanismo de arco en dos direcciones ortogonales en el panel de mampostería. Para efectos prácticos, la resistencia fuera del plano controlada por el panel se puede determinar mediante tablas (Moreno et al. 2015b) y ecuaciones de diseño (Rodríguez, 2018).

Dichas tablas y ecuaciones son válidas exclusivamente para muros confinados con relación de aspecto menor o igual que uno.

Se observa que los estudios previos sobre el comportamiento fuera del plano de muros confinados están limitados a relaciones de aspecto menores o iguales que uno. Por tanto, es necesario realizar nuevos estudios experimentales considerando muros confinados con relaciones de aspecto mayores que uno. Este tipo de muros se encuentra comúnmente en las estructuras de mampostería. El estudio de dichos muros es importante para evitar su falla y la posible pérdida de vidas humanas durante acciones eólicas extremas. Los resultados de este estudio pueden servir para establecer recomendaciones de diseño que puedan ser incluidas en un futuro en la reglamentación vigente.

## **1.2. Objetivo**

Evaluar el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada con relaciones de aspecto mayores que uno.

## **1.3. Alcance**

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación cuyo objetivo es establecer ecuaciones de diseño para determinar la resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada con relaciones de aspecto mayores que uno. Este trabajo está limitado al ensayo en el laboratorio de cuatro muros a escala natural.

## **1.4. Organización de la tesis**

En el Capítulo 1 se incluyen las generalidades, el objetivo y el alcance de la tesis. En el Capítulo 2 se presenta la revisión de la literatura sobre el comportamiento experimental de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano y sobre los métodos analíticos para determinar su resistencia fuera del plano. En el Capítulo 3 se presenta la metodología, la cual incluye: obtención de propiedades de materiales, diseño de muros, construcción de muros, diseño del sistema de carga e

instrumentación, y ensaye de muros. En el Capítulo 4 se presentan las propiedades de los materiales y los resultados de los ensayos de los muros de mampostería confinada. En el Capítulo 5 se presenta una discusión sobre los resultados del ensaye de los muros de mampostería confinada. En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones de la tesis. En el apéndice A se presentan los detalles de la obtención de las propiedades de los materiales. En el apéndice B se presenta el cálculo del factor de corrección por área efectiva de los muros.



## **2. ANTECEDENTES**

Se realizó una revisión de la literatura sobre muros confinados sujetos a cargas fuera del plano. Dicha revisión se dividió en dos partes: la primera se enfocó en el comportamiento experimental y la segunda en los métodos analíticos para determinar la resistencia fuera del plano de los muros.

### **2.1. Comportamiento experimental fuera del plano de muros de mampostería confinada**

Varela et al. (2011) estudiaron el comportamiento fuera del plano de seis muros confinados sujetos a cargas uniformes incrementales. La variable de estudio fue las condiciones de apoyo de los muros. Se consideraron apoyos en tres y cuatro bordes perimetrales. Las dimensiones de los muros fueron de 360 cm x 176 cm x 15 cm (longitud x altura x espesor). La relación de aspecto fue de 0.5 y la relación de esbeltez de 11.73. La sección transversal de los castillos y la cadena superior fue de 15 cm x 15 cm (base x altura). La resistencia a compresión promedio del concreto fue de 190 kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia a compresión promedio de la mampostería sobre el área total fue de 30.6 kg/cm. Los muros se ensayaron con un esfuerzo axial nulo. Se observó que para ambas condiciones de apoyo el patrón de agrietamiento final y la resistencia fuera del plano de los muros fueron similares. La falla de los muros se atribuyó a la inestabilidad de los segmentos.

Varela et al. (2012a) estudiaron el comportamiento fuera del plano de seis muros confinados sujetos a cargas uniformes incrementales. Las variables de estudio fueron la relación de aspecto, la relación de esbeltez y la rigidez en el plano del marco de elementos confinantes (castillos y cadena superior) de los muros. Las dimensiones de los muros fueron de 367 cm x 272 cm x 15 cm, 377 cm x 288 cm x 15 cm, 377 cm x 288 cm x 12 cm, 295 cm x 272 cm x 15 cm, 295 cm x 272 cm x 12 cm y 285 cm x 272 cm x 15 cm (longitud x altura x espesor). Las relaciones de aspecto fueron de 0.74, 0.76, 0.76, 0.92, 0.92 y 0.95, respectivamente. Las relaciones de esbeltez fueron de 18.13, 19.20, 24, 18.13, 22.67 y 18.13,

respectivamente. Las secciones transversales de los castillos fueron de 15 cm x 20 cm, 15 cm x 25 cm, 12 cm x 25 cm, 15 cm x 25 cm, 12 cm x 25 cm y 15 cm x 20 cm (base x altura), respectivamente. Las secciones transversales de las cadenas superiores fueron de 15 cm x 20 cm, 15 cm x 40 cm, 12 cm x 40 cm, 15 cm x 25 cm, 12 cm x 25 cm y 15 cm x 20 cm (base x altura), respectivamente. La resistencia a compresión promedio del concreto fue de 180 kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia a compresión promedio de la mampostería sobre el área total fue de 29 kg/cm<sup>2</sup> para los bloques de 15 cm de espesor y de 25 kg/cm<sup>2</sup> para los de 12 cm. Los muros se ensayaron con un esfuerzo axial nulo. Se observó que el patrón de agrietamiento de los muros depende de la relación de aspecto. Para muros con similar relación de esbeltez y sección transversal de castillos y cadena superior, conforme la relación de aspecto aumenta, la resistencia fuera del plano aumenta. Para muros con similar relación de aspecto y sección transversal de castillos y cadena superior, conforme la relación de esbeltez aumenta, la resistencia fuera del plano disminuye. Para muros con similar relación de aspecto y relación de esbeltez, conforme la rigidez en el plano del marco de elementos confinantes (castillos y cadena superior) aumenta, la resistencia fuera del plano aumenta. Se observaron dos tipos de falla en los muros, la inestabilidad de los segmentos y el aplastamiento de la mampostería.

Varela et al. (2012b) estudiaron el comportamiento fuera del plano de tres muros confinados sujetos a cargas uniformes incrementales. La variable de estudio fue el esfuerzo axial. Las dimensiones de los muros fueron de 370 cm x 270 cm x 15 cm (longitud x altura x espesor). La relación de aspecto fue de 0.73 y la relación de esbeltez de 18. La sección transversal de los castillos y la cadena superior fue de 15 cm x 20 cm (base x altura). La resistencia a compresión promedio del concreto fue de 150.82 kg/cm<sup>2</sup> para el primer muro, 221.69 kg/cm<sup>2</sup> para el segundo muro y 238 kg/cm<sup>2</sup> para el tercer muro. La resistencia a compresión promedio de la mampostería sobre el área total fue de 28.96 kg/cm<sup>2</sup>, 26.92 kg/cm<sup>2</sup> y 26.92 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. Los muros se ensayaron con esfuerzos axiales de 0 kg/cm<sup>2</sup>, 0.67 kg/cm<sup>2</sup> y 2 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. Se observó que para muros con diferente

esfuerzo axial el patrón de agrietamiento final fue similar. Conforme el esfuerzo axial aumenta, la resistencia fuera del plano aumenta. La falla del muro sin esfuerzo axial se atribuyó a la inestabilidad de los segmentos. La falla de los muros con esfuerzo axial se atribuyó al aplastamiento de la mampostería.

Varela et al. (2015) estudiaron el comportamiento fuera del plano de cuatro muros confinados con aberturas sujetos a cargas uniformes incrementales. Las variables de estudio fueron el tipo de abertura y el tipo de castillo intermedio de los muros. Las dimensiones de los muros fueron de 357 cm x 271 cm x 15 cm (longitud x altura x espesor). La relación de aspecto fue de 0.76 y la relación de esbeltez fue de 18. Se consideró un muro sin aberturas, dos muros con aberturas tipo puerta y un muro con abertura tipo ventana. Las dimensiones de las puertas fueron de 108 cm x 230 cm (longitud x altura). La dimensión de la ventana fue de 108 cm x 90 cm (longitud x altura). Las puertas y la ventana se localizaron en el lado izquierdo, por tanto, los muros con aberturas tuvieron una parte sólida de 204 cm x 230 cm (longitud x altura). Las secciones transversales de los castillos y la cadena superior fueron de 15 cm x 15 cm y 15 cm x 17 cm (base x altura), respectivamente. Se consideró un castillo intermedio interno para el primero de los muros con abertura tipo puerta y un castillo intermedio externo para los demás muros con aberturas. La sección transversal del castillo intermedio interno fue de 10 cm x 10 cm (base x altura). La sección transversal del castillo intermedio externo fue de 15 cm x 15 cm (base x altura). La resistencia a compresión promedio del concreto fue de 242 kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia a compresión promedio de la mampostería sobre el área total fue de 31.7 kg/cm<sup>2</sup>. Los muros se ensayaron con un esfuerzo axial nulo. Se observó que los muros con aberturas tuvieron un patrón de agrietamiento final similar. Lo anterior se debió a que la parte sólida (efectiva) de dichos muros tuvo la misma relación de aspecto. La resistencia fuera del plano de los muros con aberturas fue mayor que la del muro sin aberturas. Esto se debió a que los castillos intermedios aumentaron la rigidez en el plano del marco de elementos confinantes y disminuyeron la relación de aspecto efectiva de los muros con aberturas. La resistencia fuera del plano del muro con abertura tipo puerta y castillo intermedio externo fue similar a la del muro con abertura tipo ventana. Esto

se debió a que la parte sólida de ambos muros, así como la rigidez en el plano de sus marcos de elementos confinantes (castillos y cadena superior) fue similar. La resistencia fuera del plano del muro con abertura tipo puerta y castillo intermedio externo fue mayor que la del muro con abertura tipo puerta y castillo intermedio interno. Esto se debió a que la rigidez en el plano del castillo intermedio del primero fue mayor que la del segundo. La falla del muro sin aberturas se atribuyó a la inestabilidad los segmentos. La falla de los muros con aberturas se atribuyó al aplastamiento de la mampostería.

Moreno et al. (2015a) estudiaron el comportamiento fuera del plano de ocho muros confinados sujetos a cargas uniformes incrementales. Las variables de estudio fueron la relación de aspecto del muro y el tipo bloque de mampostería. Las dimensiones de los muros fueron de 377 cm x 276 cm x 12 cm, 295 cm x 276 cm x 12 cm, 377 cm x 276 cm x 12 cm, 295 cm x 276 cm x 12 cm, 377 cm x 276 cm x 12 cm, 295 cm x 276 cm x 12 cm, 377 cm x 276 cm x 12 cm (longitud x altura x espesor). Las relaciones de aspecto fueron de 0.73, 0.94, 0.73, 0.94, 0.73, 0.94, 0.73 y 0.94, respectivamente. La relación de esbeltez fue de 23. La sección transversal de los castillos y la cadena superior fue de 12 x 25 (cm x cm) (base x altura). Se consideraron bloques huecos de concreto de dos celdas (BHC2) para el primer y el segundo muro, tabiques huecos de arcilla (BHA1) para el tercer y el cuarto muro, tabiques huecos de arcilla (BHA2) para el quinto y el sexto muro, y tabiques sólidos de arcilla (BSA) para el séptimo y el octavo muro. Las dimensiones nominales de los bloques fueron de 12 cm x 20 cm x 40 cm, 12 cm x 20 cm x 32 cm, 12 cm x 12 cm x 25 cm y 12 cm x 5 cm x 23 cm (espesor x altura x longitud), respectivamente. La resistencia a compresión promedio del concreto fue 253.43 kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia a compresión promedio de la mampostería sobre el área total fue de 37.93 kg/cm<sup>2</sup> para los muros con BHC2, de 66.07 kg/cm<sup>2</sup> para los muros con BHA1, de 62.91 kg/cm<sup>2</sup> para los muros con BHA2 y de 42.31 kg/cm<sup>2</sup> para los muros con BSA. Los muros se ensayaron con un esfuerzo axial de 0.85 kg/cm<sup>2</sup>. Se observó que el patrón de agrietamiento final de los muros fue similar. Para un mismo tipo de bloque, la resistencia fuera del plano de los muros con relación de aspecto de 0.94 fue mayor que la de los muros con relación de aspecto de 0.73.

Para una misma relación de aspecto, la resistencia fuera del plano de los muros con panel de mampostería conformado por BHA1 fue mayor que la de los muros con panel de mampostería conformado por BHA2, BSA y BHC2, respectivamente. Lo anterior se debió a que conforme aumenta la resistencia a compresión de la mampostería, la resistencia fuera del plano aumenta. La falla del muro con el panel de mampostería conformado por BSA y una relación de aspecto de 0.73 se atribuyó a la inestabilidad de los segmentos. La falla de los demás muros se atribuyó al aplastamiento de la mampostería.

G.Cantón (2016) estudió el comportamiento fuera del plano de dos muros confinados sujetos a cargas uniformes incrementales. La variable de estudio fue la relación de aspecto. Las dimensiones de los muros fueron de 357 cm x 271 cm x 15 cm y 275 cm x 271 cm x 15 cm (longitud x altura x espesor). Las relaciones de aspecto fueron de 0.76 y 0.98. La relación de esbeltez fue de 18. La sección transversal de los castillos y la cadena superior fue de 15 cm x 15 cm (largo x ancho). La resistencia a compresión promedio del concreto fue de 275.28 kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia a compresión promedio de la mampostería sobre área total fue de 30.6 kg/cm<sup>2</sup>. Los muros se ensayaron con un esfuerzo axial nulo. Se observó que para ambos muros el patrón de agrietamiento final fue similar. La resistencia fuera del plano del muro con relación de aspecto de 0.98 fue mayor que la del muro con relación de aspecto de 0.76. La falla del muro con relación de aspecto de 0.76 se atribuyó a la inestabilidad de los segmentos. La falla del muro con relación de aspecto de 0.98 se atribuyó al aplastamiento de la mampostería.

## **2.2. Métodos analíticos para determinar la resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada**

Moreno et al. (2015a) desarrollaron un método para determinar la resistencia fuera del plano de muros confinados sujetos a cargas uniformes incrementales, denominado método del puntal bidireccional (MPB). En este método se asume que la falla del panel de mampostería puede atribuirse a la inestabilidad de los segmentos y al aplastamiento de la mampostería. En este método iterativo se consideran las

siguientes variables: la relación de aspecto, la relación de esbeltez, la rigidez en el plano del marco de elementos confinantes (castillos y cadena superior), el esfuerzo axial y la resistencia a compresión de la mampostería. La resistencia fuera del plano se define por la formación de un mecanismo de arco en dos direcciones ortogonales. Dado un patrón de agrietamiento, el muro se divide en segmentos. El muro se subdivide en franjas verticales y horizontales. Debido a la rotación de los segmentos del muro, se generan puntales de compresión en cada una de las franjas. Las componentes en el plano de dichos puntales son las fuerzas en el plano. Estas fuerzas se calculan considerando el desplazamiento como cuerpo rígido de los segmentos de los muros, el acortamiento de la mampostería y la torsión en el marco de elementos confinantes (castillos y cadena superior). La resistencia fuera del plano está dada por la sumatoria de las componentes fuera del plano de los puntales de compresión.

Varela et al. (2015) compararon las resistencias analíticas fuera del plano de muros confinados sujetos a cargas uniformes incrementales, obtenidas mediante diferentes métodos con sus respectivas resistencias experimentales. Se consideraron los resultados experimentales de cuatro muros confinados. Se consideraron muros con diferente relación de aspecto efectiva y rigidez en el plano del marco de elementos confinantes. La relación de aspecto efectiva estuvo comprendida entre 0.76 y 1. La relación de esbeltez fue de 18. La resistencia a compresión promedio del concreto fue de  $242 \text{ kg/cm}^2$ . La resistencia a compresión promedio de la mampostería sobre el área total fue de  $31.7 \text{ kg/cm}^2$ . Los muros se ensayaron con un esfuerzo axial nulo. Se determinó la resistencia analítica fuera del plano utilizando los métodos del puntal de compresión, líneas de fluencia y puntal bidireccional. Con base en la comparación de los resultados experimentales y analíticos, se concluyó que, con el MPB se predice mejor la resistencia fuera del plano de los muros y el tipo de falla controlada por el panel de mampostería.

Moreno et al. (2015b) compararon las resistencias analíticas fuera del plano de muros confinados sujetos a cargas uniformes incrementales, obtenidas mediante el MPB con sus respectivas resistencias experimentales. Se consideraron los

resultados experimentales de dieciocho muros confinados. Se consideraron muros con diferente relación de aspecto, relación de esbeltez, rigidez en el plano del marco de elementos confinantes (castillos y cadena superior), esfuerzo axial y tipo de bloque. La relación de aspecto estuvo comprendida entre 0.73 y 1. La relación de esbeltez estuvo comprendida entre 19 y 25. La resistencia a compresión promedio del concreto estuvo comprendida entre  $177.33 \text{ kg/cm}^2$  y  $264.42 \text{ kg/cm}^2$ . La resistencia a compresión promedio de la mampostería sobre el área total estuvo comprendida entre  $24.98 \text{ kg/cm}^2$  y  $66.10 \text{ kg/cm}^2$ . El esfuerzo axial estuvo comprendido entre  $0 \text{ kg/cm}^2$  y  $2 \text{ kg/cm}^2$ . Con base en la comparación de los resultados experimentales y analíticos, se concluyó que, con el MPB se predice satisfactoriamente la resistencia fuera del plano de los muros y el tipo de falla controlada por el panel de mampostería. La relación promedio entre las resistencias analíticas y experimentales fue de 0.97 con un coeficiente de variación de 10%.

Moreno et al. (2015b) desarrollaron un procedimiento para determinar la resistencia fuera del plano de muros confinados sujetos a cargas uniformes. Este procedimiento se basa en determinar la resistencia fuera del plano controlada por el panel de mampostería del muro y por la falla de sus elementos confinantes (castillos y cadena superior). La primera se determina mediante tablas de diseño desarrolladas utilizando el MPB. La segunda se determina mediante un análisis estructural del marco de elementos confinantes (castillos y cadena superior), donde se consideran fuerzas en el plano, momentos torsionantes y fuerzas fuera del plano. La resistencia fuera del plano de los muros se define por la menor de las dos anteriores. En este procedimiento se consideran las siguientes variables: la relación de aspecto, la relación de esbeltez, la rigidez en el plano del marco de elementos confinantes (castillos y cadena superior), el esfuerzo axial y la resistencia a compresión de la mampostería. Para el caso de la relación de aspecto se consideran valores entre 0.5 y 1. Para el caso de la relación de esbeltez se consideran valores entre 10 y 25. Para el caso de la resistencia a compresión promedio de la mampostería sobre el área neta se consideran valores entre  $20 \text{ kg/cm}^2$  y  $60 \text{ kg/cm}^2$ . Para el caso del esfuerzo axial se consideran valores entre  $0 \text{ kg/cm}^2$  y  $3 \text{ kg/cm}^2$ .

Rodríguez (2018) desarrolló ecuaciones de diseño para determinar la resistencia fuera del plano de muros confinados sujetos a cargas uniformes incrementales. Adicionalmente, dicho autor propuso ecuaciones de diseño para determinar las correspondientes fuerzas en el plano que se transfieren al marco de elementos confinantes. En este procedimiento se asume que la falla del panel de mampostería de los muros puede atribuirse a la inestabilidad de los segmentos o al aplastamiento de la mampostería. Las variables consideradas fueron: la relación de aspecto, la relación de esbeltez, la rigidez en el plano del marco de elementos confinantes (castillos y cadena superior), el esfuerzo axial y la resistencia a compresión de la mampostería. La relación de aspecto se consideró entre 0.5 y 1. La relación de esbeltez se consideró entre 10 y 25. La resistencia a compresión promedio de la mampostería sobre el área neta se consideró entre 20 kg/cm<sup>2</sup> y 100 kg/cm<sup>2</sup>. El esfuerzo axial se consideró entre 0 kg/cm<sup>2</sup> y 4 kg/cm<sup>2</sup>. Con estos parámetros se determinó la resistencia fuera del plano y las fuerzas en el plano de 3440 muros utilizando el MPB. Con los resultados obtenidos, se estableció la forma de las ecuaciones, las cuales se validaron con resultados experimentales de 20 muros confinados. La relación promedio entre las resistencias analíticas calculadas con las ecuaciones y las resistencias experimentales fue de 1.05 con un coeficiente de variación de 16.29%. Se concluyó que la resistencia fuera del plano para muros confinados se predice satisfactoriamente con dichas ecuaciones.

### **2.3. Conclusiones de la revisión de la literatura**

Con base en la revisión de la literatura se concluye que las principales variables que influyen en la resistencia fuera del plano de muros confinados son: la relación de aspecto, la relación de esbeltez, la rigidez en el plano del marco de elementos confinantes, el esfuerzo axial, las aberturas y la resistencia a compresión de la mampostería dada por el tipo de bloque. La resistencia fuera del plano aumenta conforme la relación de aspecto (Varela et al., 2012a), la rigidez en el plano del marco de elementos confinantes (Varela et al., 2012a), el esfuerzo axial (Varela et al., 2012b) y la resistencia a compresión de la mampostería (Moreno et al. 2015a) aumentan. La resistencia fuera del plano aumenta conforme



la relación de esbeltez (Varela et al., 2012a) disminuye. Se observa que se pueden presentar dos tipos de falla de los muros confinados: la falla controlada por el panel de mampostería y la falla controlada por el marco de elementos confinantes (castillos y cadena superior). La primera puede atribuirse a la inestabilidad de los segmentos del muro o al aplastamiento de la mampostería. Los estudios experimentales mencionados anteriormente se realizaron utilizando exclusivamente muros confinados con relaciones de aspecto menores o iguales que uno.

Con respecto a los métodos analíticos se concluye que, con el método del puntal bidireccional (Moreno, 2015a) se predice satisfactoriamente la resistencia fuera del plano de muros confinados, así como el tipo de falla controlada por el panel de mampostería. Se desarrolló un procedimiento para el diseño fuera del plano de muros confinados controlado por la falla del panel de mampostería y la falla del marco de elementos confinantes (Moreno et al., 2015b). Adicionalmente, se desarrollaron tablas (Moreno et al. 2015b) y ecuaciones de diseño para determinar la resistencia fuera del plano de muros confinados (Rodríguez, 2018). El procedimiento, las tablas y las ecuaciones son válidas para muros confinados con relaciones de aspecto menores o iguales que uno.

### 3. METODOLOGÍA

La metodología empleada para la realización de esta tesis consistió en: (1) obtención de propiedades de materiales, (2) diseño de muros, (3) construcción de muros, (4) diseño del sistema de carga e instrumentación de muros y (5) ensaye de muros.

#### 3.1. Obtención de propiedades de materiales

Se determinaron las propiedades mecánicas de los materiales mediante el muestreo y ensayos de laboratorio de acuerdo con la normatividad vigente correspondiente. Se determinaron propiedades para los bloques huecos de concreto, el mortero de las juntas, el concreto, el acero de refuerzo y la mampostería.

La resistencia a compresión de los bloques se determinó con base en la norma NMX-C-036-ONNCE-2013. Se tomó una muestra de 5 bloques del lote utilizado para la construcción de los muros. Las dimensiones de los bloques se determinaron de acuerdo con la norma NMX-C-038-ONNCE-2013. El ensaye de los bloques se realizó en una máquina universal marca SATEC con capacidad de 60 Ton. En la Figura 3.1 se presenta el ensaye a compresión de un bloque.



*Figura 3.1: Ensaye a compresión de un bloque.*

La resistencia a compresión del mortero se determinó con base en la norma NMX-C061-ONNCCE-2015. Se prepararon 6 cubos de mortero de 5 cm de lado. Se utilizó la proporción por volumen del mortero especificada para la construcción de los muros. El ensaye de los cubos se realizó en la máquina universal marca SATEC descrita anteriormente. En la Figura 3.2 se presenta el ensaye de un cubo de mortero.



*Figura 3.2: Ensayo a compresión del mortero.*

La resistencia a compresión del concreto se determinó con base en la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014. Se prepararon 8 cilindros de concreto de 15 cm x 30 cm (diámetro x altura) para cada muro, 2 para cada castillo, 2 para la cadena superior y 2 para la cimentación. El ensaye de los cilindros se realizó en la máquina universal marca SATEC con capacidad de 60 Ton. En la Figura 3.3 se presenta el ensaye de un cilindro de concreto.



*Figura 3.3: Ensayo de un cilindro de concreto.*

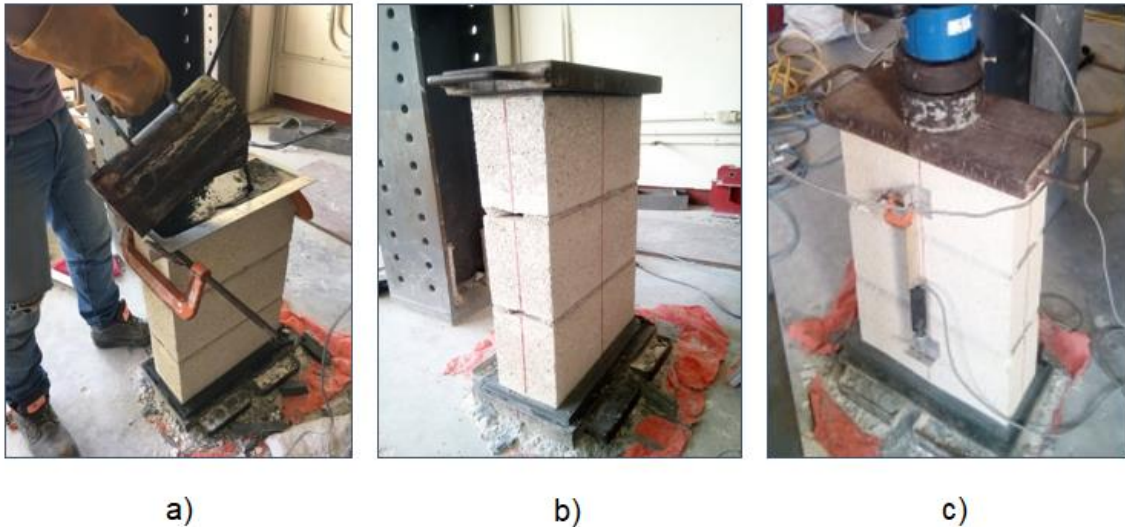
La resistencia a tensión del acero de refuerzo longitudinal de los castillos y la cadena superior de los muros se determinó con base en la norma NMX-C-407-ONNCCE-2001. Se consideró una muestra de 2 barras con una longitud de 60 cm y un diámetro de 0.95 cm cada una. El ensaye de las barras se realizó en la máquina universal marca SATEC con capacidad de 60 Ton. En la Figura 3.4 se presenta el ensaye a tensión del acero de refuerzo.



*Figura 3.4: Ensayo a tensión del acero de refuerzo.*

La resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de la mampostería se determinaron con base en la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010. Se construyeron 6 pilas de tres bloques y dos juntas de mortero. Los bloques se colocaron uno sobre otro. Las dimensiones de las pilas fueron de 14.5 cm x 60.8 cm x 39.5 cm (espesor x altura x longitud). Se utilizó mortero en proporciones por volumen 1:2:7 (cemento Portland: cal: arena). El mortero se colocó únicamente en las paredes de las celdas paralelas a la longitud de las piezas. En la Figura 3.5 se presentan vistas de la preparación de las pilas para el ensaye. La carga en las pilas se aplicó utilizando un actuador hidráulico marca Enerpac con capacidad de 100 Ton. El actuador se fijó a un marco de reacción metálico anclado a una losa de reacción. La carga se midió utilizando una celda de carga marca Controls con capacidad de 100 Ton. La deformación axial de las pilas se midió utilizando potenciómetros lineales marca ETI con capacidad de 12 mm. Los potenciómetros se colocaron a

los costados de cada pila y se mantuvieron en su lugar durante toda la prueba. En la Figura 3.6 se presenta el sistema de carga utilizado para el ensaye de las pilas



*Figura 3.5: a) Cabeceado de las pilas con azufre. b) Colocación de placa metálica para distribución de carga en las pilas. c) Instrumentación de las pilas.*



*Figura 3.6: Sistema de carga utilizado para el ensaye de pilas.*

### 3.2. Diseño de muros

Se consideraron 4 muros confinados a escala natural. Las variables de estudio fueron la relación de aspecto y el esfuerzo axial de los muros. Los muros se diseñaron para inducir la falla del panel de mampostería. El diseño consistió en dos etapas: (1) propuesta de parámetros y (2) proceso iterativo para determinar el diseño final.

Los parámetros propuestos para el diseño de los muros confinados fueron:

- Altura: 271 cm.
- Longitudes: 193 cm y 133 cm.
- Espesor: 15 cm.
- Relaciones de aspecto: 1.4 y 2.
- Esfuerzos axiales: 0 kg/cm<sup>2</sup> y 3.33 kg/cm<sup>2</sup>.
- Sección transversal de los castillos y la cadena superior: 15 cm x 15 cm (base x altura).
- Sección transversal de la cimentación: 15 cm x 25 cm (base x altura).
- Mortero: 1:2:7 en proporciones por volumen (cemento Portland: cal: arena).
- Espesor promedio de la junta: 1 cm.
- Piezas: Bloques huecos de concreto de tres celdas con dimensiones nominales de 15 cm x 20 cm x 40 cm (espesor x altura x longitud).
- Resistencia a compresión del concreto ( $f'_c$ ): 250 kg/cm<sup>2</sup>.
- Módulo de elasticidad del concreto ( $E_c$ ): 177656.75 kg/cm<sup>2</sup> (Ecuación 3.1) (Rosado, 2014).
- Resistencia a compresión del bloque sobre área total ( $f_p$ ): 54 kg/cm<sup>2</sup>.
- Resistencia a compresión de la mampostería sobre el área total de los bloques ( $f_{mt}$ ): 28.48 kg/cm<sup>2</sup> ( $f_{mt} = 3.875\sqrt{f_{pt}}$  Ecuación 3.2).

• M  
ó  
d  
u  
l  
o

Las Ecuaciones Ecuación 3.2 y Ecuación 3.3 fueron ajustadas por Navarrete (2009), con base en los trabajos de Gonzáles (2006) y Marín (2008).

$$E_c = 11236\sqrt{f'_c} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$f_{mt} = 3.875\sqrt{f_{pt}} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$E_m = 8300\sqrt{f_{mt}} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Los muros con relación de aspecto de 1.4 y esfuerzos axiales nulo y de 3.33 kg/cm<sup>2</sup> se denominaron M-1.4-0 y M-1.4-3.33, respectivamente. Los muros con relación de aspecto de 2 y esfuerzos axiales nulo y de 3.33 kg/cm<sup>2</sup> se denominaron M-2.0-0 y M-2.0-3.33, respectivamente.

El proceso iterativo para el diseño de los muros fue el siguiente:

1. Con los parámetros propuestos se determinó la resistencia fuera del plano (W), las fuerzas en el plano (FP) y el tipo de falla controlada por el panel de los muros (TF) mediante el MPB modificado (Tabla 3.1) (Freyre, 2019).

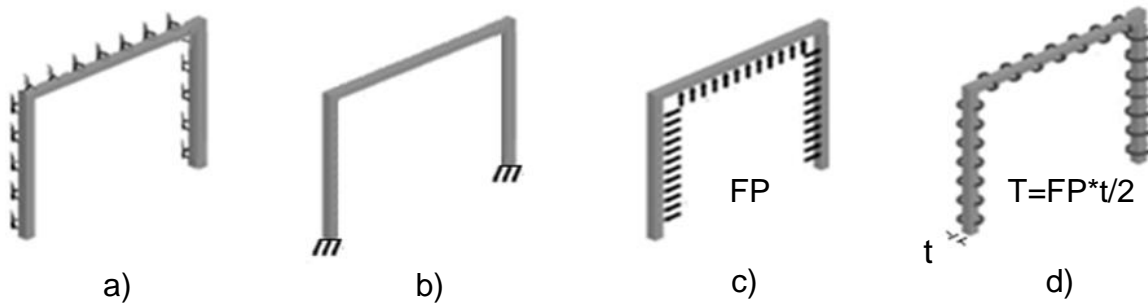
*Tabla 3.1: Resistencias fuera del plano, fuerzas en el plano y tipos de falla controlada por el panel de los muros obtenidas con el MPB.*

Muro	W <sub>MPB</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	FP <sub>MPB</sub> (kg/cm)	TP <sub>MPB</sub>
M-1.4-0	1890.57	14.95	AM
M-1.4-3.33	2074.47	12.62	AM
M-2.0-0	3154.68	10.41	AM
M-2.0-3.33	3335.10	9.12	AM

AM: Aplastamiento de la mampostería.

2. Se realizó un análisis estructural elástico lineal del marco de elementos confinantes (castillos y cadena superior). Los apoyos perimetrales fuera del plano del marco se asumieron como tipo simples (Figura 3.7.a). Los apoyos en los extremos inferiores de los castillos se asumieron como tipo empotrados (Figura 3.7.b). Las fuerzas en el plano (FP) se aplicaron sobre el marco, al centro y a lo largo de los castillos y la cadena superior (Figura 3.7.c). Se consideró una

distribución uniforme de las fuerzas en el plano. La torsión (T) en los elementos confinantes se calculó como el producto de las fuerzas en el plano por una excentricidad igual a la mitad del espesor del muro ( $t/2$ ) (Figura 3.7.d). Se determinó la distribución de momentos flexionantes, fuerzas cortantes y momentos torsionantes del marco de los elementos confinantes.



*Figura 3.7: Consideraciones para el modelado del marco de elementos confinantes de los muros.*

3. Se determinó la cantidad de acero de refuerzo del marco de elementos confinantes, de tal manera que el momento flexionante resistente, el cortante resistente y el momento torsionante resistente fueron mayores que sus correspondientes demandas. El refuerzo longitudinal resultante consistió en 4 barras de acero corrugado de 1.27 cm de diámetro (#4) para los muros M-1.4-0 y M- 1.4- 3.33, y en 4 barras de acero corrugado de 0.95 cm de diámetro (#3) para los muros M-2.0-0 y M-2.0-3.33. El refuerzo transversal consistió en estribos de alambón de 0.6 cm de diámetro (#2) con una separación variable. Los esfuerzos de fluencia del acero de refuerzo longitudinal y transversal fueron de 4200 kg/cm<sup>2</sup> y 2320 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. En la Tabla 3.2 se presenta el resumen de la cantidad de acero de refuerzo longitudinal y transversal utilizado en los elementos confinantes de los muros.



*Tabla 3.2: Resumen de cantidades de acero de refuerzo longitudinal y transversal utilizado en los elementos confinantes.*

Muro	Castillos		Cadena superior	
	Sección Transversal	Acero de refuerzo	Sección Transversal	Acero de refuerzo
M-1.4-0	15 cm x 15 cm	2 barras #4 en ambos lechos E#2 @ 7 cm (0-21 cm) E#2 @ 15 cm (21-66 cm) E#2 @ 20 cm (66-165 cm) E#2 @ 15 cm (165-210 cm) E#2 @ 7 cm (210-231 cm)	15 cm x 15 cm	2 barras #3 en ambos lechos E#2 @ 20 cm
M-1.4-3.33	15 cm x 15 cm	2 barras #4 en ambos lechos E#2 @ 5 cm (0-25 cm) E#2 @ 15 cm (25-85 cm) E#2 @ 20 cm (85-146 cm) E#2 @ 15 cm (146-206 cm) E#2 @ 5 cm (206-231 cm)	15 cm x 15 cm	2 barras #3 en ambos lechos E#2 @ 20 cm
M-2.0-0	15 cm x 15 cm	2 barras #3 en ambos lechos E#2 @ 10 cm (0-30 cm) E#2 @ 15 cm (30-75 cm) E#2 @ 20 cm (75-156 cm) E#2 @ 15 cm (156-201 cm) E#2 @ 10 cm (201-231 cm)	15 cm x 15 cm	2 barras #3 en ambos lechos E#2 @ 20 cm
M-2.0-3.33	15 cm x 15 cm	2 barras #3 en ambos lechos E#2 @ 10 cm (0-30 cm) E#2 @ 15 cm (30-75 cm) E#2 @ 20 cm (75-156 cm) E#2 @ 15 cm (156-201 cm) E#2 @ 10 cm (201-231 cm)	15 cm x 15 cm	2 barras #3 en ambos lechos E#2 @ 20 cm

En la Figura 3.8 se presentan las dimensiones y los esfuerzos axiales finales de los muros.

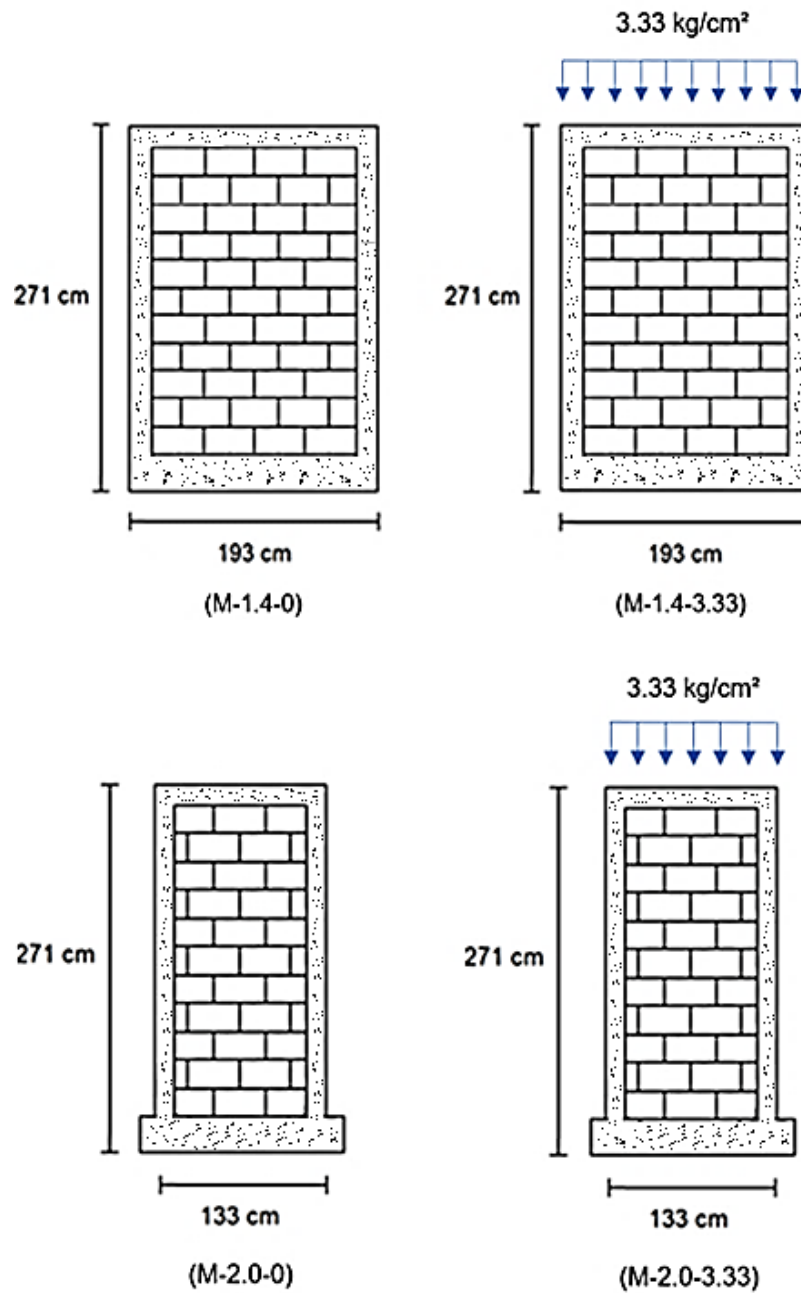


Figura 3.8: Dimensiones y esfuerzos axiales finales de los muros propuestos.

### 3.3. Construcción de muros

La construcción de los muros se realizó por un trabajador experimentado. Se utilizaron las prácticas constructivas típicas de la región. El procedimiento constructivo empleado se describe a continuación:

1. Se niveló la superficie de construcción mediante una cama de arena (Figura 3.9.a).
2. Se habilitó el acero de refuerzo de la cimentación (Figura 3.9.b).
3. Se habilitó la cimbra de la cimentación (Figura 3.9.c).
4. Se colocó el concreto de la cimentación (Figura 3.9.d).
5. Se colocaron los bloques huecos de concreto hasta la séptima hilada (Figura 3.10.a).
6. Se habilitó la cimbra de la parte inferior de los castillos (Figura 3.10.b).
7. Se colocó el concreto de los castillos hasta la altura de la sexta hilada de bloques (Figura 3.10.c).
8. Se colocaron los bloques huecos de concreto hasta la décimo primera hilada (Figura 3.10.d).
9. Se habilitó el acero de refuerzo de los castillos y de la cadena superior.
10. Se habilitó la cimbra de la parte superior de los castillos.
11. Se colocó el concreto de la parte superior de los castillos hasta la altura de la décimo primera hilada de bloques (Figura 3.11.a).
12. Se habilitó la cimbra de la cadena superior (Figura 3.11.b).
13. Se colocó el concreto de la cadena superior.



a)



b)



c)



d)

*Figura 3.9: a) Nivelación de la superficie de construcción mediante cama de arena. b) Habilitado del acero de refuerzo de la cimentación. c) Habilitado de la cimbra de la cimentación. d) Colocación del concreto de la cimentación.*



a)



b)



c)



d)

*Figura 3.10: a) Colocación de bloques hasta la séptima hilada. b) Habilitado de la cimbra para la parte inferior de castillos. c) Colocación del concreto en los castillos hasta la altura de la sexta hilada de bloques. d) Colocación de bloques hasta la décimo primera hilada.*



a)



b)



c)

*Figura 3.11: a) Colocación del concreto en los castillos hasta la altura de la décimo primera hilada de bloques. b) Habilitado de la cimbra de la cadena superior Habilitado de la cimbra de la cimentación. c) Muros de mampostería confinada al concluir la etapa de construcción.*

### 3.4. Diseño del sistema de carga e instrumentación de muros

El sistema de carga consistió en dos partes: un sistema de carga fuera del plano y un sistema de carga axial.

#### 3.4.1. Sistema de carga fuera del plano

El sistema de carga fuera del plano (Figura 3.12) consistió en un muro de reacción, un sistema de apoyos y un sistema de bolsas de aire.

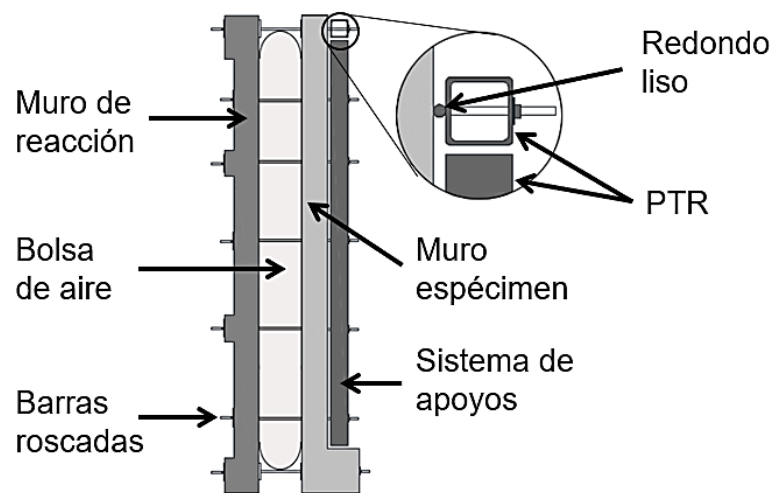


Figura 3.12: Sistema de carga fuera del plano.

Las dimensiones del muro de reacción fueron de 358 cm x 273 cm x 15 cm (longitud x altura x espesor). El muro fue diseñado para evitar su falla durante los ensayos. El sistema de apoyos de los muros consistió en tubulares de acero (PTR 10 cm x 10 cm x 0.3 cm) (Figura 3.12). A cada tubular se le colocó a lo largo de su longitud una barra redonda de acero de 1.9 cm de diámetro. El muro espécimen y el muro de reacción se conectaron mediante barras roscadas de 1.27 cm de diámetro. La cimentación de los muros especímenes se ancló a la losa de reacción mediante barras roscadas de acero de alta resistencia (Grado B7) de 3.8 cm de diámetro. Las dimensiones de las bolsas de aire fueron de 120 cm x 300 cm (ancho x largo). Las bolsas se colocaron entre el muro espécimen y el muro de reacción. La separación entre ambos muros fue de 30 cm. Para el

caso de los muros M-1.4-0 y M-1.4-3.33 se utilizaron dos bolsas de aire (B1 y B2) y para los otros dos muros una bolsa (B1) (Figura 3.13). Las bolsas de aire se inflaron utilizando un compresor de aire (Figura 3.14). Para los muros M-1.4-0 y M-1.4-3.33 las bolsas de aire se inflaron simultáneamente.

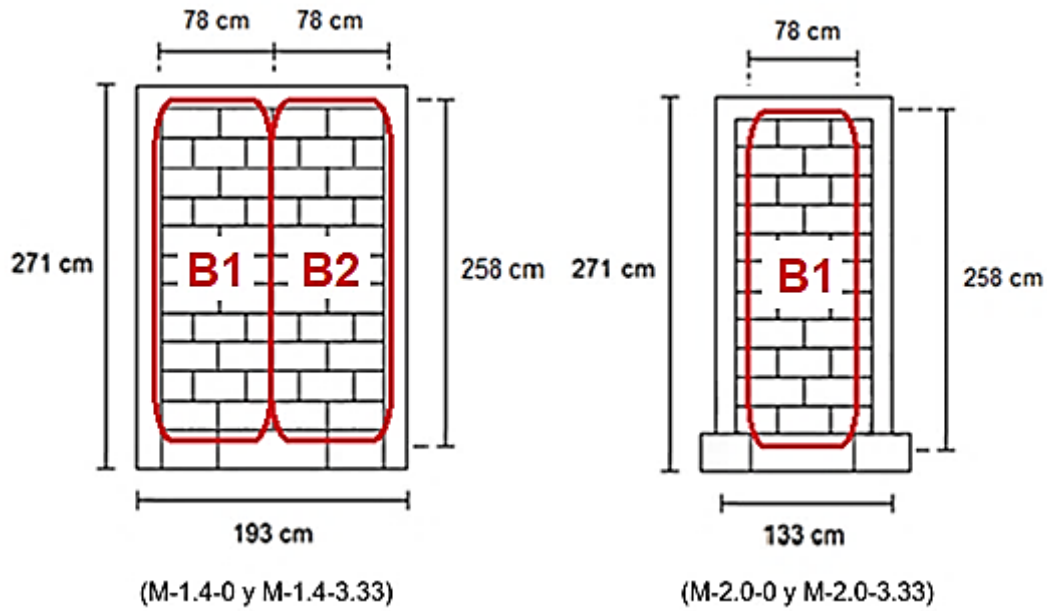


Figura 3.13: Ubicación de las bolsas de aire en los muros de mampostería confinada.

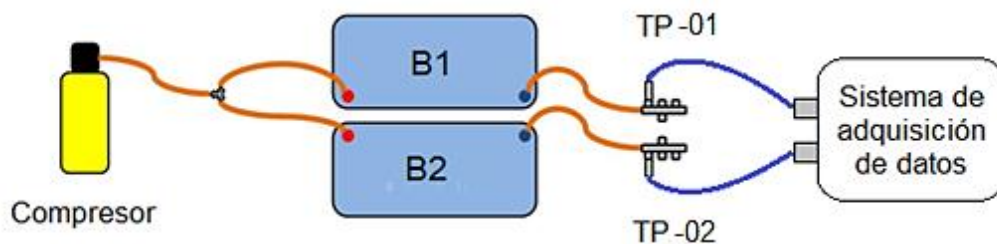


Figura 3.14: Sistema de inflado de las bolsas de aire.

### 3.4.2. Sistema de carga axial

El sistema de carga axial (Figura 3.15) consistió en dos sistemas tipo balancín. Cada sistema consistió en una viga de distribución de carga, una viga balancín, dos sensores y un actuador hidráulico. La conexión entre los elementos del sistema de carga axial se realizó mediante articulaciones y cajas de conexión. Se aplicó una



carga vertical en uno de los tensores mediante el actuador hidráulico. Por equilibrio se generó otra carga vertical en el segundo tensor. La carga axial sobre el muro fue la suma de las cargas verticales en los tensores. Las vigas balancín transmitieron la carga vertical de los tensores a las vigas de distribución de carga. Estas últimas distribuyeron la carga en cuatro puntos sobre el muro. La presión en los actuadores se mantuvo constante durante el ensaye mediante un controlador de presión hidráulico (Figura 3.16). Dicho controlador se conectó a una bomba hidráulica.

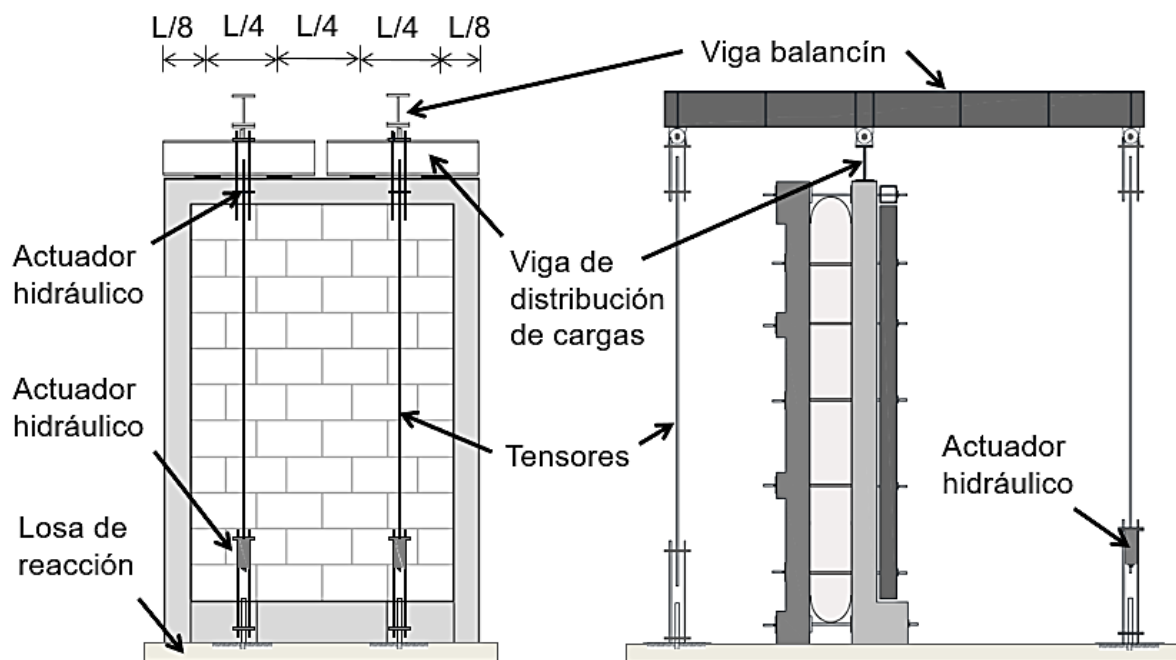


Figura 3.15: Sistema de carga axial.

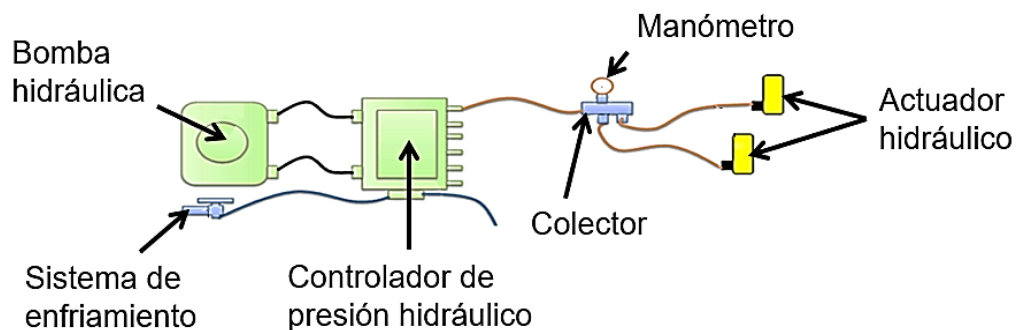


Figura 3.16: Conexión hidráulica del sistema de carga axial.

### 3.5. Instrumentación

La instrumentación de los muros consistió en potenciómetros lineales (PL) marca ETI, transductores de presión (TP) marca Sensotec y celdas de carga (CC) marca Futek. Los datos se registraron mediante un sistema de adquisición de datos marca National Instruments. En la Figura 3.17 se presenta la distribución de los potenciómetros lineales y las celdas de carga en los muros de mampostería confinada. En la Tabla 3.3 se presenta la descripción de la instrumentación utilizada en los muros.

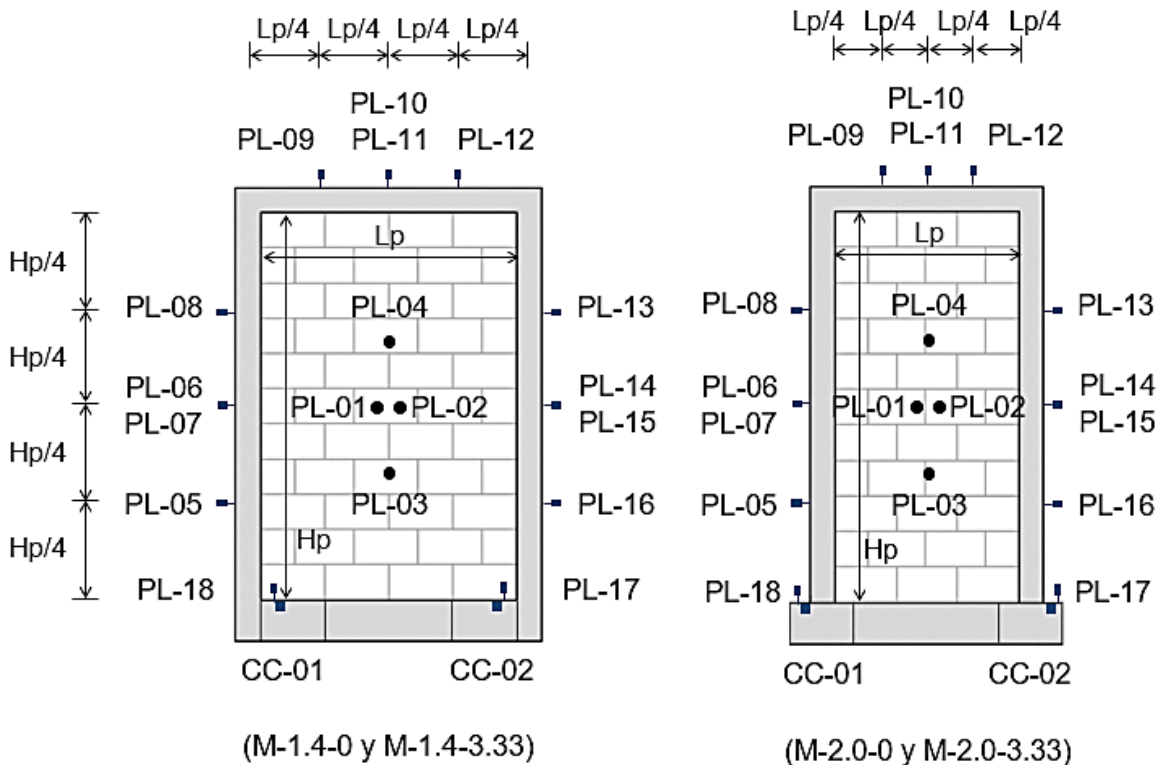


Figura 3.17: Distribución de los potenciómetros lineales y celdas de carga en los muros de mampostería confinada.

Tabla 3.3: Descripción de la instrumentación utilizada en los muros.

Instrumento	Ubicación	Capacidad
PL-01	Panel zona izquierda	10 cm
PL-02	Panel zona derecha	10 cm
PL-03	Panel zona inferior	10 cm
PL-04	Panel zona superior	10 cm
PL-05	Castillo izquierdo zona inferior	10 cm
PL-06	Castillo izquierdo zona central delantera	10 cm
PL-07	Castillo izquierdo zona central posterior	10 cm
PL-08	Castillo izquierdo zona superior	2.5 cm
PL-09	Cadena superior zona izquierda	2.5 cm
PL-10	Cadena superior zona central delantera	2.5 cm
PL-11	Cadena superior zona central posterior	2.5 cm
PL-12	Cadena superior zona derecha	2.5 cm
PL-13	Castillo derecho zona superior	2.5 cm
PL-14	Castillo derecho zona central delantera	2.5 cm
PL-15	Castillo derecho zona central posterior	2.5 cm
PL-16	Castillo Derecho zona inferior	2.5 cm
PL-17	Cimentación zona derecha	2.5 cm
TP-01	Bolsa de aire B1.	0.36 kg/cm <sup>2</sup>
TP-02	Bolsa de aire B2	1.06 kg/cm <sup>2</sup>
CC-01	Barra de anclaje extremo izquierdo	22.7 ton
CC-02	Barra de anclaje extremo derecho	22.7 ton
CC-03	Tensor delantero izquierdo	4.5 ton
CC-04	Tensor delantero derecho	4.5 ton

### 3.6. Ensayo de muros

Los muros se ensayaron bajo cargas fuera del plano monotónicas incrementales hasta alcanzar la falla. Para los muros M-1.4-3.33 y M-2.0-3.33 primero se aplicó la carga axial. Esta carga se calculó a partir del esfuerzo axial, la longitud y el espesor de los muros. Posteriormente, se inició el inflado de las bolsas de aire hasta una carga aproximada de 20 kg/m<sup>2</sup>. En este punto se verificó que la presión de las bolsas de aire fuera similar. Después se incrementó gradualmente la carga y se monitoreó el avance del agrietamiento de los muros. La prueba se detuvo

ocasionalmente con el propósito de marcar en los muros la aparición y el avance del agrietamiento.

## 4. RESULTADOS

En este Capítulo se presentan las propiedades de los materiales y los resultados de los ensayos de los muros.

### 4.1. Propiedades de materiales

En la Tabla 4.1 se presenta la resistencia a compresión de los bloques. La resistencia a compresión promedio de los bloques sobre área total ( $f_{pt}$ ) fue de 54.58 kg/cm<sup>2</sup> con un coeficiente de variación (CV) de 6.17%.

*Tabla 4.1: Resistencia a compresión de los bloques.*

Bloque	$f_{pt}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1	52.24
2	57.80
3	61.92
4	46.46
5	54.47
<b>Promedio</b>	54.58
<b>CV.</b>	6.17%

En la Tabla 4.2 se presenta la resistencia a compresión del mortero ( $f_j$ ). La resistencia a compresión promedio fue de 29.22 kg/cm<sup>2</sup> con un coeficiente de variación de 2.03%.

*Tabla 4.2: Resistencia a compresión del mortero.*

Cubo	$f_j$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1	29.09
2	28.59
3	29.47
4	29.96
5	28.80
6	29.43
<b>Promedio</b>	29.22
<b>CV.</b>	2.03%

En la Tabla 4.3 se presenta la resistencia a compresión promedio del concreto ( $f_c$ ) obtenido para cada muro junto con su correspondiente coeficiente de variación. La resistencia a compresión varió entre 271.40 kg/cm<sup>2</sup> y 277.23 kg/cm<sup>2</sup> con un valor promedio de 274.62 kg/cm<sup>2</sup>. Los coeficientes de variación estuvieron entre 4.60% y 6.09%, respectivamente.

*Tabla 4.3: Resistencia a compresión promedio del concreto.*

<b>Muro</b>	<b><math>f_c</math> (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>CV</b>
M-1.4-0	272.96	4.94%
M-1.4-3.33	276.88	5.01%
M-2.0-0	271.40	6.09%
M-2.0-3.33	277.23	4.60%
<b>Promedio.</b>	274.62	

En la Tabla 4.4 se presenta la resistencia a la fluencia del acero de refuerzo longitudinal ( $f_y$ ). La resistencia a tensión promedio fue de 4342.81 kg/cm<sup>2</sup> con un coeficiente de variación de 1.49%.

*Tabla 4.4: Resistencia a la fluencia del acero de refuerzo longitudinal.*

<b>Barra</b>	<b><math>f_y</math> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
1	4297.20
2	4388.42
<b>Promedio</b>	4342.81
<b>CV.</b>	1.49%

En la Tabla 4.5 se presenta la resistencia a compresión ( $f_m$ ) y el módulo de elasticidad ( $E_m$ ) de la mampostería sobre el área total. La resistencia a compresión promedio fue de 33.63 kg/cm<sup>2</sup> con un coeficiente de variación de 6.07%. El módulo de elasticidad promedio fue de 35633.67 kg/cm<sup>2</sup> con un coeficiente de variación de 5.49%.

*Tabla 4.5: Resistencia a compresión y módulo de elasticidad de la mampostería sobre área total.*

PILA	$f_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1	32.06	36306.22
2	35.94	33654.85
3	32.89	36939.93
Promedio	33.63	35633.67
CV.	6.08%	5.49%

## 4.2. Ensaye de muros de mampostería

Las cargas fuera del plano reportadas para los muros M-1.4-0 y M-1.4-3.33 corresponden al promedio de las lecturas de los transductores TP-01 y TP-02 (Figura 3.14). Las cargas reportadas para los otros dos muros corresponden a las lecturas del transductor TP-02 (Figura 3.14), ya que en estos casos se utilizó sólo una bolsa de aire. Las cargas fuera del plano fueron corregidas utilizando un factor de área efectiva de los muros (Apéndice B).

### 4.2.1. Comportamiento del muro M-1.4-0

El primer evento observado en el muro M-1.4-0 fue la aparición de una grieta vertical localizada a 75 cm del extremo del castillo derecho. La grieta vertical se propagó de la cuarta a la octava hilada de bloques (Figura 4.1.a). Al incrementarse la carga se observó la aparición de una segunda grieta vertical a 75 cm del extremo del castillo izquierdo. Dicha grieta se presentó en la séptima hilada de bloques. Se observó también la propagación en forma diagonal de la primera grieta vertical hacia los extremos del castillo derecho (Figura 4.1.b). Posteriormente, se observó la aparición de una grieta horizontal entre la séptima y la octava hilada de bloques. Se observó también la propagación en forma diagonal de la segunda grieta vertical hacia el extremo superior del castillo izquierdo (Figura 4.1.c). Finalmente, se observó la aparición de una segunda grieta horizontal entre la quinta y sexta hilada de bloques y la propagación de las grietas diagonales hasta los extremos de los castillos (Figura 4.1.d). En la Figura 4.2 se presenta el patrón de agrietamiento final del muro. La falla del muro se atribuyó al aplastamiento de la mampostería.

En la Figura 4.3 se presenta la curva carga-desplazamiento horizontal fuera del plano del muro M-1.4-0. Los desplazamientos horizontales fuera del plano reportados para este muro corresponden al promedio de las lecturas de los potenciómetros lineales PL-01 y PL-02 (Figura 3.17). La carga máxima fuera del plano fue de  $2010.68 \text{ kg/m}^2$  con un correspondiente desplazamiento horizontal fuera del plano de  $1.39 \text{ cm}$ . La carga de colapso fue de  $2008.99 \text{ kg/cm}^2$  con un correspondiente desplazamiento horizontal fuera el plano de  $1.44 \text{ cm}$ . Las cargas anteriores se representan en la Figura 4.3 con un marcador cuadrado y uno en forma de cruz, respectivamente.

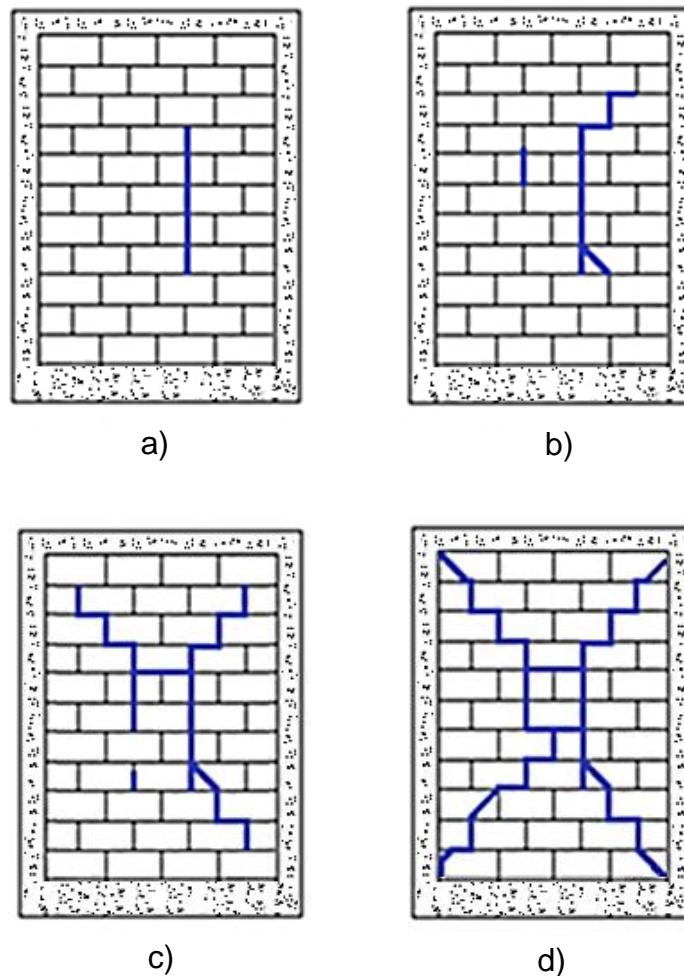


Figura 4.1: Patrón de agrietamiento del muro M-1.4-0.





Figura 4.2: Patrón de agrietamiento final del muro M-1.4-0.

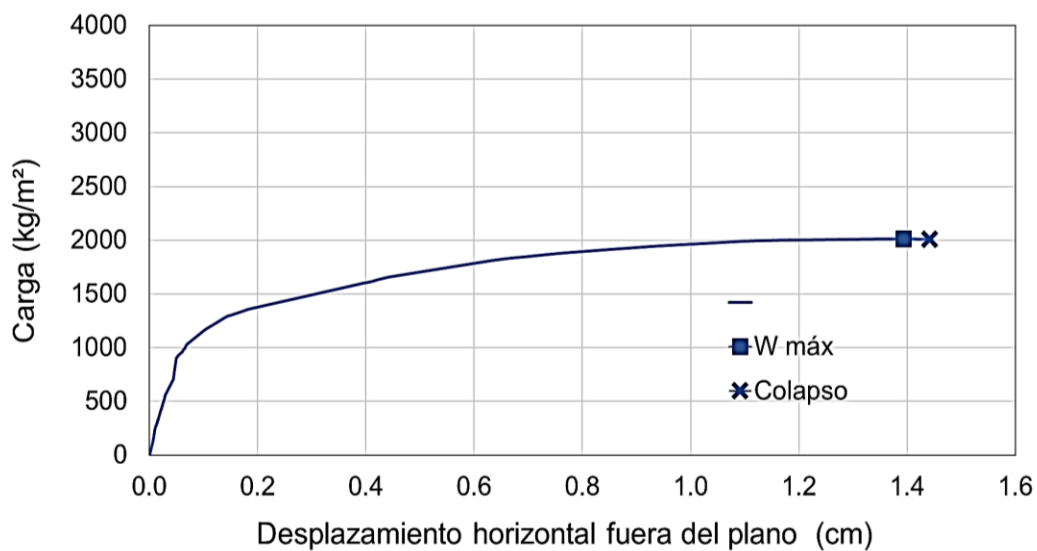


Figura 4.3: Curva carga-desplazamiento horizontal fuera del plano del muro M-1.4-0.

En la Figura 4.4 se presenta la curva carga-desplazamiento horizontal en el plano del castillo izquierdo del muro M-1.4-0. Los desplazamientos horizontales en el plano reportados para la parte inferior, central y superior del castillo izquierdo (Figura 4.4) corresponden a las lecturas del potenciómetro PL-05, al promedio de los PL-06 y PL-07 y del PL-08 (Figura 3.17), respectivamente. Los desplazamientos horizontales en el plano de la parte inferior, central y superior del castillo izquierdo,

asociados a la carga máxima fuera del plano del muro, fueron de 0.96 mm, 1.01 mm y 1.03 mm, respectivamente. En la Figura 4.5 se presenta la curva carga-desplazamiento horizontal en el plano del castillo derecho del muro M-1.4-0. Los desplazamientos horizontales en el plano reportados para la parte superior, central e inferior del castillo derecho (Figura 4.5) corresponden a las lecturas del potenciómetro PL-13, al promedio de los PL-14 y PL-15 y del PL-16 (Figura 3.17), respectivamente. Los desplazamientos horizontales en el plano de la parte superior, central e inferior del castillo derecho, asociados a la carga máxima fuera del plano del muro, fueron de 4.58 mm, 3.53 mm y 2.24 mm, respectivamente.

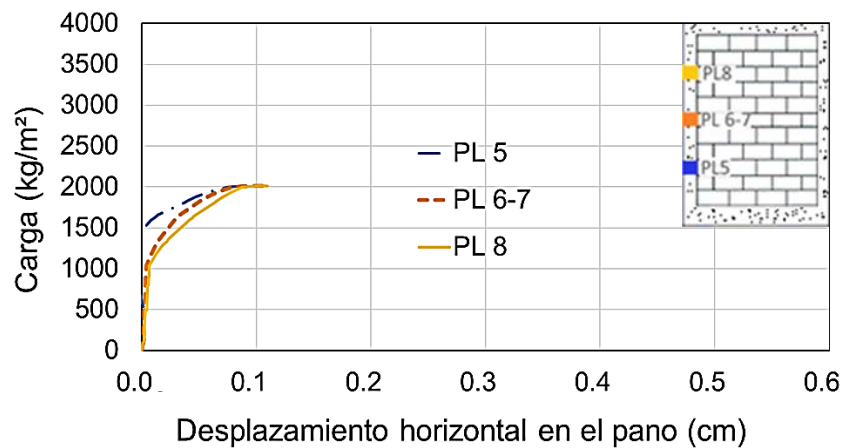


Figura 4.4: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo izquierdo) del muro M-1.4-0.

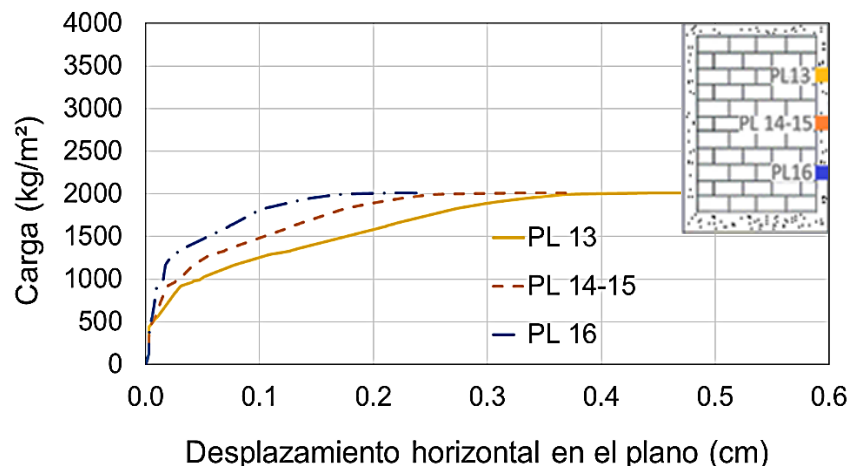
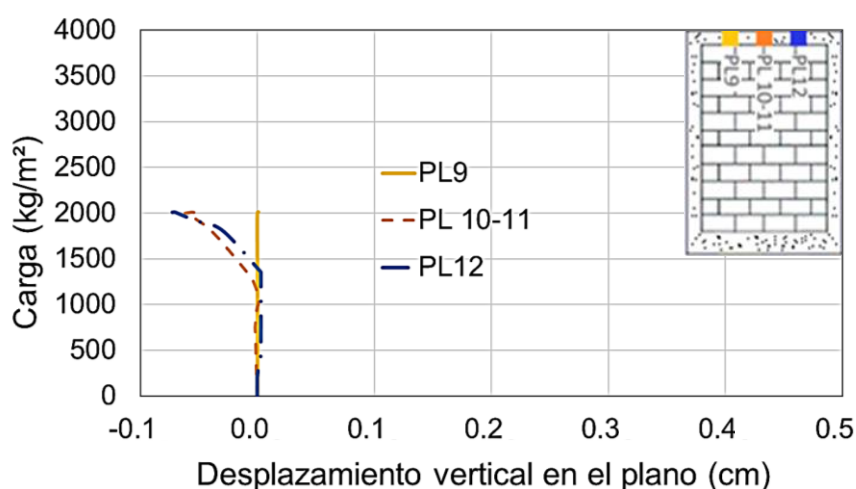


Figura 4.5: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo derecho) del muro M-1.4-0.

En la Figura 4.6 se presenta la curva carga-desplazamiento vertical en el plano de la cadena superior del muro M-1.4-0. Los desplazamientos verticales en el plano reportados para la parte izquierda, central y derecha de la cadena superior (Figura 4.6) corresponden a las lecturas del potenciómetro PL-09, al promedio de los PL-10 y PL-11, y del PL-12 (Figura 3.17), respectivamente. Los desplazamientos verticales en el plano de la parte izquierda, central y derecha de la cadena superior, asociados a la carga máxima fuera del plano del muro, fueron de -0.005 mm, -0.56 mm y -0.72 mm, respectivamente.



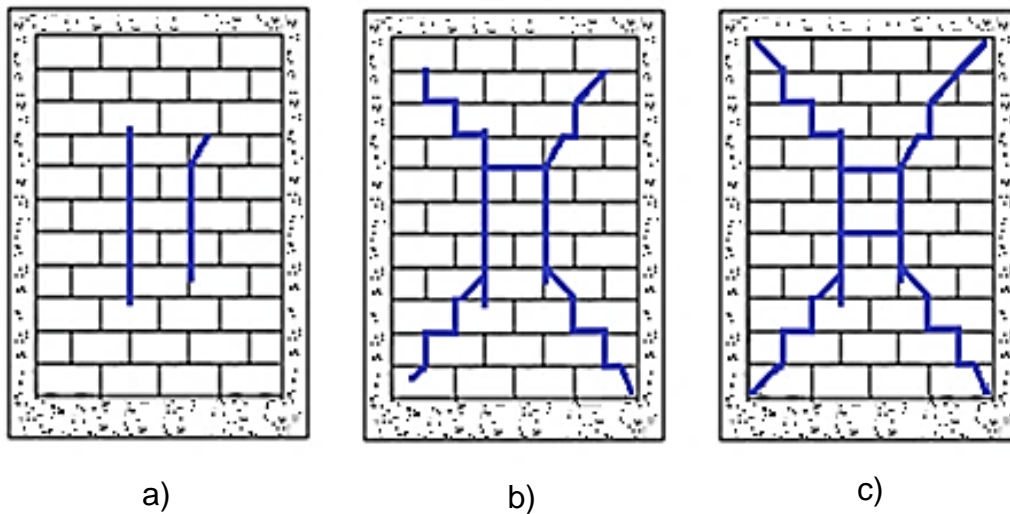
*Figura 4.6: Curva carga desplazamiento vertical en el plano (cadena superior) del muro M-1.4-0.*

#### **4.2.2. Comportamiento del muro M-1.4-3.33**

El primer evento observado en el muro M-1.4-3.33 fue la aparición de dos grietas verticales localizadas a 75 cm de los extremos de los castillos. Las grietas verticales se propagaron aproximadamente desde la cuarta hasta la octava hilada de bloques (Figura 4.7.a). Al incrementarse la carga se observó la aparición de una grieta horizontal entre la séptima y la octava hilada de bloques y la propagación en forma diagonal de las grietas verticales hacia los extremos de los castillos (Figura 4.7.b). Finalmente, se observó la aparición de una segunda grieta horizontal entre la quinta y la sexta hilada de bloques y la propagación de las grietas diagonales hasta los extremos de los castillos (Figura 4.7.c). En la Figura 4.8 se presenta el patrón de

agrietamiento final observado antes de la falla del muro. La falla del muro se atribuyó al aplastamiento de la mampostería.

En la Figura 4.9 se presenta la curva carga-desplazamiento horizontal fuera del plano del muro M-1.4-3.33. Los desplazamientos horizontales fuera del plano reportados para este muro corresponden al promedio de las lecturas de los potenciómetros lineales PL-01 y PL-02 (Figura 3.17). La carga máxima registrada fue de 2470.45 kg/m<sup>2</sup> con un correspondiente desplazamiento horizontal fuera del plano de 0.66 cm. La carga de colapso fue de 2470.02 kg/cm<sup>2</sup> con un correspondiente desplazamiento horizontal fuera el plano de 0.72 cm.



*Figura 4.7: Patrón de agrietamiento del muro M-1.4-3.33.*



Figura 4.8: Patrón de agrietamiento final del muro M-1.4-3.33.

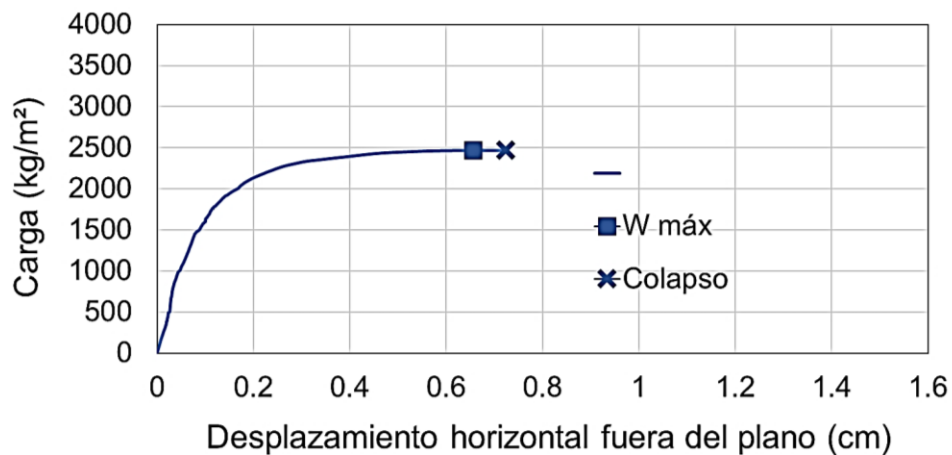


Figura 4.9: Curva carga-desplazamiento horizontal fuera del plano del muro M-1.4-3.33.

En la Figura 4.10 se presenta la curva carga-desplazamiento horizontal en el plano del castillo izquierdo del muro M-1.4-3.33. Los desplazamientos horizontales en el plano reportados para la parte inferior, central y superior del castillo izquierdo (Figura 4.10) corresponden a las lecturas del potenciómetro PL-05, al promedio de los PL-06 y PL-07 y del PL-08 (Figura 3.17), respectivamente. Los desplazamientos horizontales en el plano de la parte inferior, central y superior del castillo izquierdo, asociados a la carga máxima fuera del plano del muro, fueron de 0.001 mm, 0.002 mm y 0.003 mm, respectivamente. En la Figura 4.11 se presenta la curva

carga-desplazamiento horizontal en el plano del castillo derecho del muro M-1.4-3.33. Los desplazamientos horizontales en el plano reportados para la parte superior, central e inferior del castillo derecho (Figura 4.11) corresponden a las lecturas del potenciómetro PL-13, al promedio de los PL-14 y PL-15 y del PL-16 (Figura 3.17), respectivamente. Los desplazamientos horizontales en el plano de la parte superior, central e inferior del castillo derecho, asociados a la carga máxima fuera del plano del muro, fueron de 5.45 mm, 4.53 mm y 3.07 mm, respectivamente. Para el muro M-1.4-3.33 no se reportan los desplazamientos verticales en el plano ya que no se midieron.

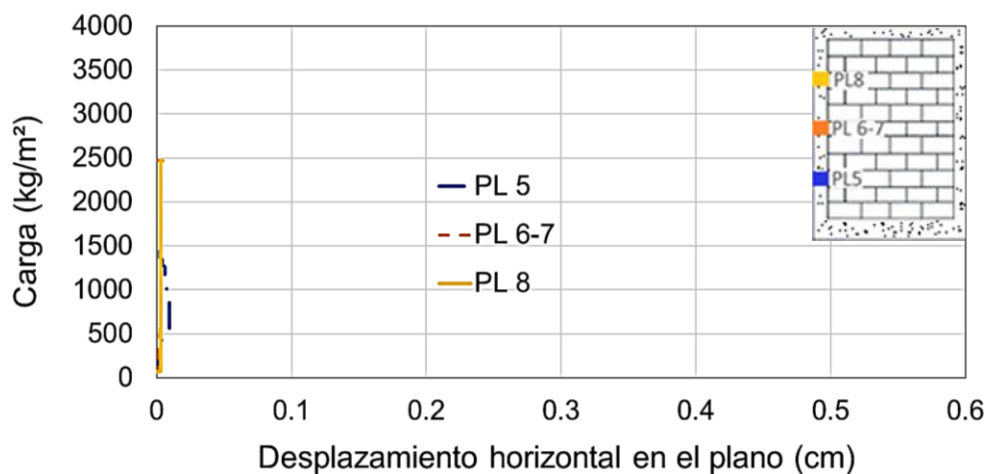


Figura 4.10: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo izquierdo) del muro M-1.4-3.33.

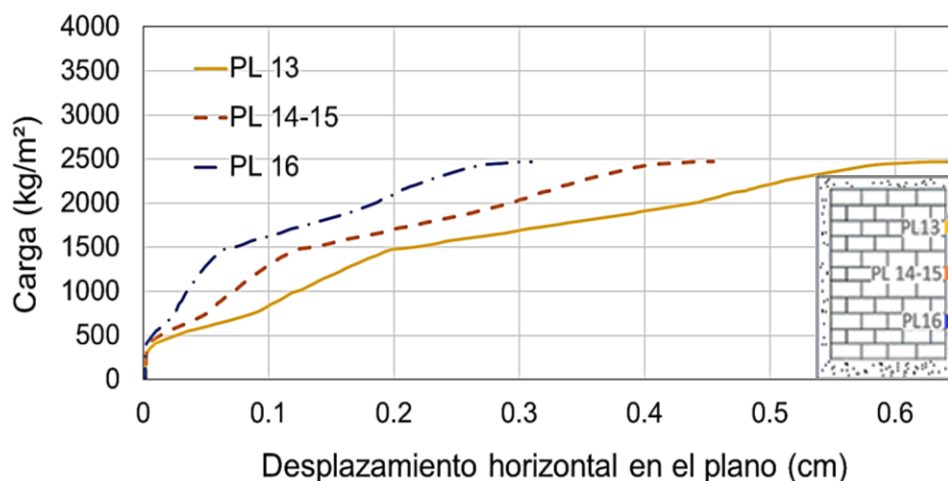


Figura 4.11: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo derecho) del muro M-1.4-3.33.

### 4.2.3. Comportamiento del muro M-2.0-0

El primer evento observado en el muro M-2.0-0 fue la aparición de una grieta vertical localizada al centro del panel. La grieta se propagó de la sexta a la mitad de la quinta hilada de bloques (Figura 4.12.a). Al incrementarse la carga, se observó la propagación de la grieta vertical la cual se extendió de la quinta a la octava hilada (Figura 4.12.b). Finalmente, se observó la propagación de dicha grieta una hilada más hacia arriba y una hilada más hacia abajo y su propagación en forma diagonal hasta llegar a los extremos de los castillos (Figura 4.12.c). En la Figura 4.13 se presenta el patrón de agrietamiento final observado antes de la falla del muro. La falla del muro se atribuyó al aplastamiento de la mampostería.

En la Figura 4.14 se presenta la curva carga-desplazamiento horizontal fuera del plano del muro M-2.0-0. Los desplazamientos horizontales fuera del plano reportados para este muro corresponden únicamente a los registrados por el potenciómetro lineal PL-01 (Figura 3.17). La carga máxima registrada fue de 3226.30 kg/m<sup>2</sup> con un correspondiente desplazamiento horizontal fuera del plano de 0.79 cm. La carga de colapso fue de 3218.83 kg/cm<sup>2</sup> con un correspondiente desplazamiento horizontal fuera el plano de 0.89 cm.

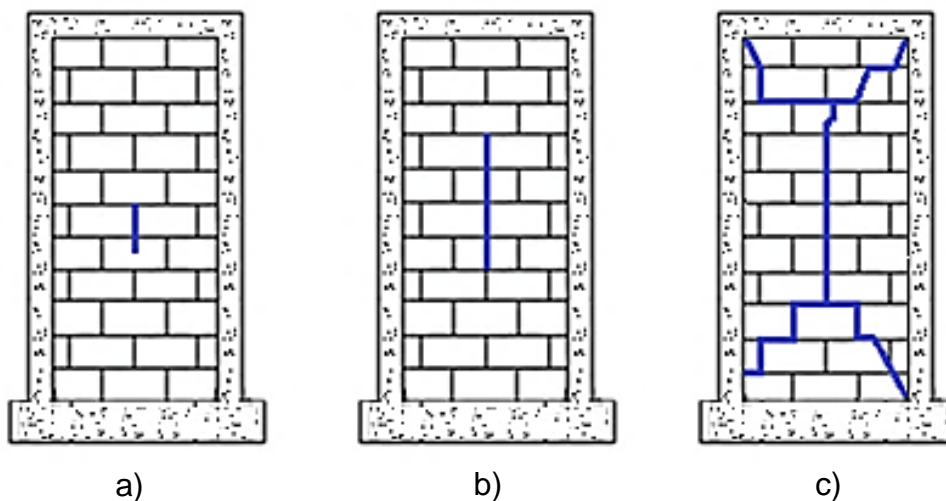


Figura 4.12: Patrón de agrietamiento del muro M-2.0-0.

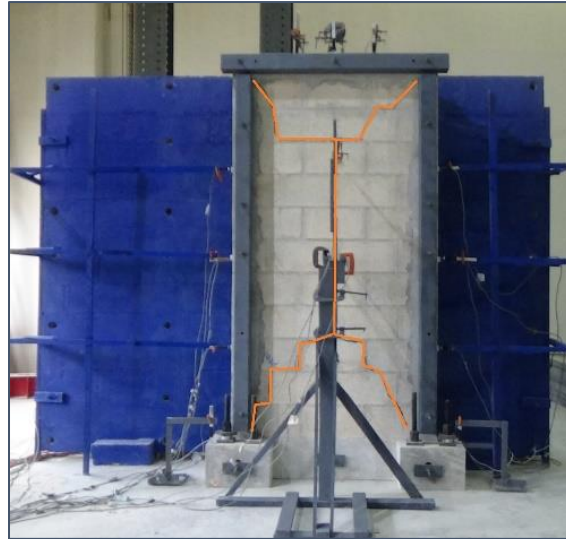


Figura 4.13: Patrón de agrietamiento final del muro M-2.0-0.

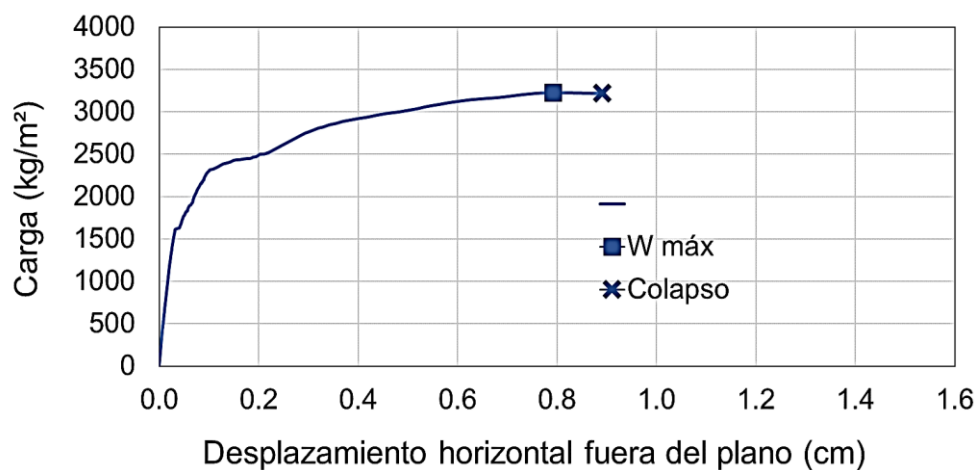


Figura 4.14: Curva carga-desplazamiento horizontal fuera el plano del muro M-2.0-0.

En la Figura 4.15 se presenta la curva carga-desplazamiento horizontal en el plano del castillo izquierdo del muro M-2.0-0. Los desplazamientos horizontales en el plano reportados para la parte inferior, central y superior del castillo izquierdo (Figura 4.15) corresponden a las lecturas del potenciómetro PL-05, al promedio de los PL-06 y PL-07 y del PL-08 (Figura 3.17), respectivamente. Los desplazamientos horizontales en el plano de la parte inferior, central y superior del castillo izquierdo, asociados a la carga máxima fuera del plano del muro, fueron de 1.71 mm, 1.74 mm



y 1.85 mm, respectivamente. En la Figura 4.16 se presenta la curva carga-desplazamiento horizontal en el plano del castillo derecho del muro M-2.0-0. Los desplazamientos horizontales en el plano reportados para la parte superior, central e inferior del castillo derecho (Figura 4.16) corresponden a las lecturas del potenciómetro PL-13, al promedio de los PL-14 y PL-15 y del PL-16 (Figura 3.17), respectivamente. Los desplazamientos horizontales en el plano de la parte superior, central e inferior del castillo derecho, asociados a la carga máxima fuera del plano del muro, fueron de 1.12 mm, 0.62 mm y 0.29 mm, respectivamente.

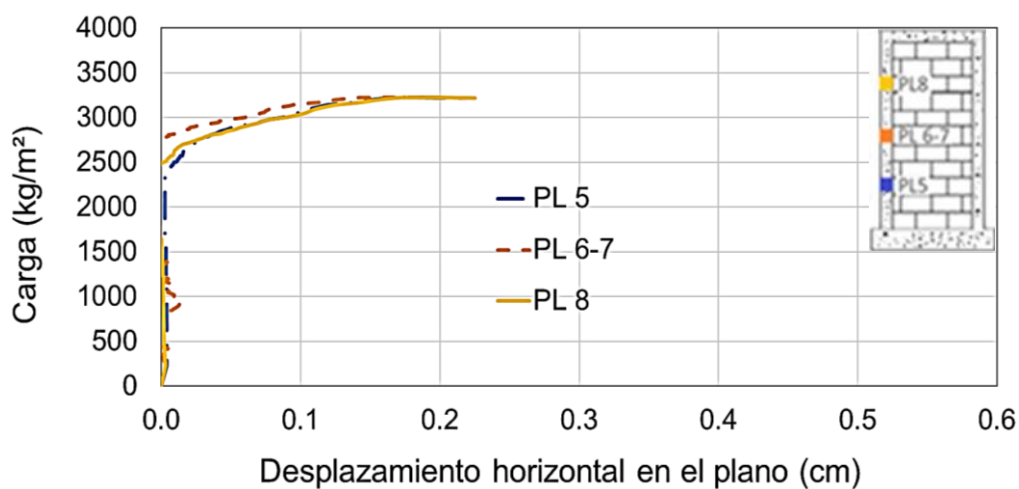


Figura 4.15: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo izquierdo) del muro M-2.0-0.

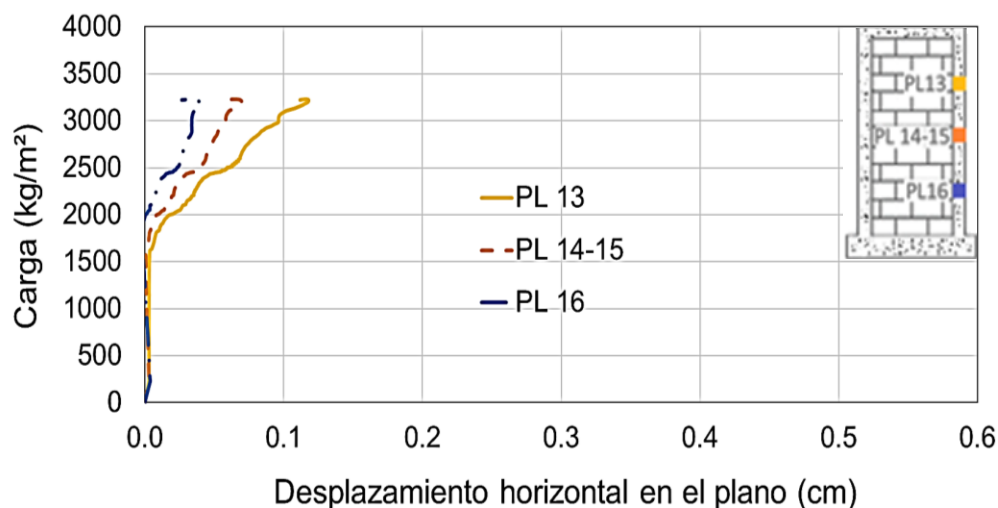


Figura 4.16: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo derecho) del muro M-2.0-0.

En la Figura 4.17 se presenta la curva carga-desplazamiento vertical en el plano de la cadena superior del muro M-2.0-0. Los desplazamientos verticales en el plano reportados para la parte izquierda, central y derecha de la cadena superior (Figura 4.17) corresponden a las lecturas del potenciómetro PL-09, al promedio de los PL-10 y PL-11, y del PL-12 (Figura 3.17), respectivamente. Los desplazamientos verticales en el plano de la parte izquierda, central y derecha de la cadena superior, asociados a la carga máxima fuera del plano del muro, fueron de -0.39 mm, -0.49 mm y -0.28 mm, respectivamente.

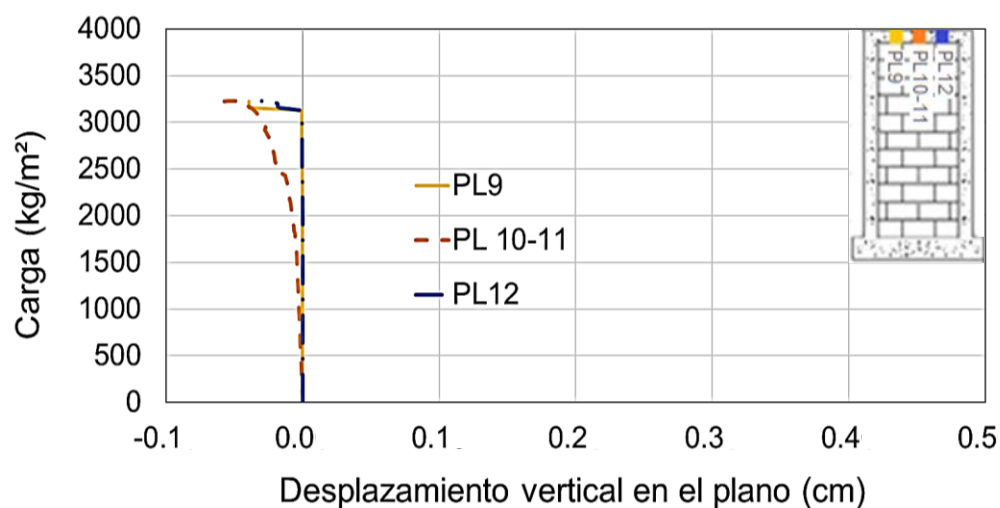


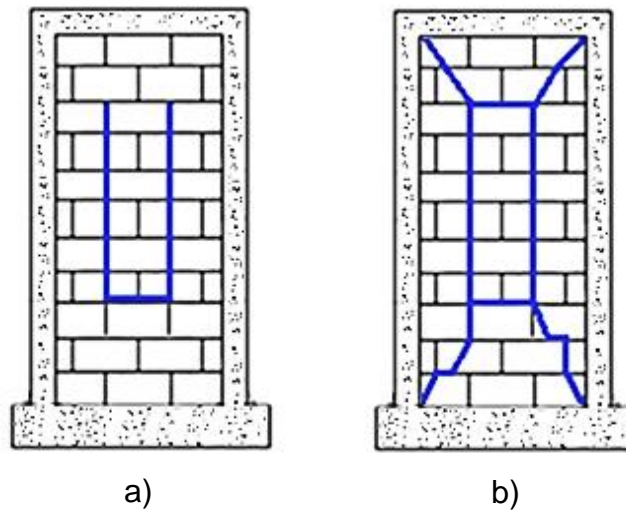
Figura 4.17: Curva carga desplazamiento vertical en el plano (cadena superior) del muro M-2.0-0.

#### 4.2.4. Comportamiento del muro M-2.0-3.33

El primer evento observado en el muro M-2.0-3.33 fue la aparición de dos grietas verticales localizadas cada una a 50 cm de los extremos de los castillos. Las grietas se propagaron desde la cuarta hasta la novena hilada de bloques. Se observó también la aparición de una grieta horizontal entre la tercera y la cuarta hilada de bloques (Figura 4.18.a). Posteriormente, se observó la aparición de una segunda grieta horizontal entre la séptima y la octava hilada de bloques y finalmente la propagación en forma diagonal de las grietas verticales hasta los extremos los castillos (Figura 4.18.b). En la Figura 4.19 se presenta el patrón de agrietamiento

final observado antes de la falla del muro. La falla del muro se atribuyó al aplastamiento de la mampostería.

En la Figura 4.20 se presenta la curva carga-desplazamiento horizontal fuera del plano del muro M-2.0-3.33. Los desplazamientos horizontales fuera del plano reportados para este muro corresponden únicamente a los registrados por el potenciómetro lineal PL-01 (Figura 3.17). La carga máxima registrada fue de  $3907.53 \text{ kg/m}^2$  con un correspondiente desplazamiento horizontal fuera del plano de  $0.58 \text{ cm}$ . La carga de colapso fue de  $3897.57 \text{ kg/cm}^2$  con un correspondiente desplazamiento horizontal fuera el plano de  $0.63 \text{ cm}$ .



*Figura 4.18: Patrón de agrietamiento del muro M-2.0-3.33.*

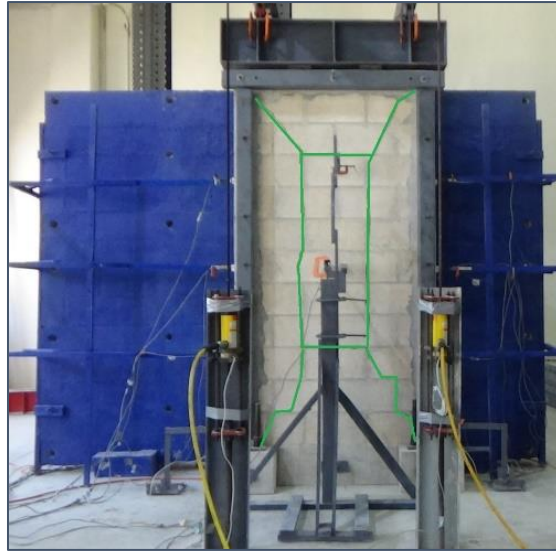


Figura 4.19: Patrón de agrietamiento final del muro M-2.0-3.33.

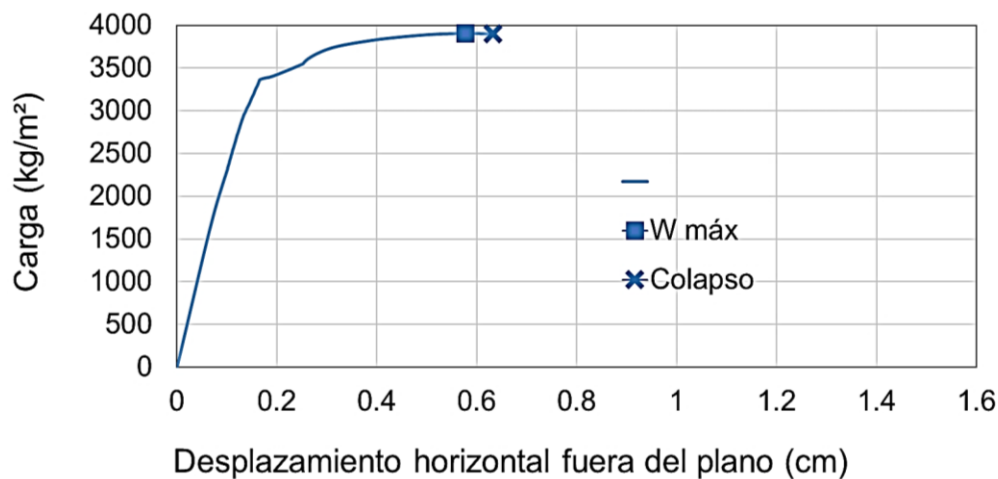


Figura 4.20: Curva carga-desplazamiento horizontal fuera del plano del muro M-2.0-3.33.

En la Figura 4.21 se presenta la curva carga-desplazamiento horizontal en el plano del castillo izquierdo del muro M-2.0-3.33. Los desplazamientos horizontales en el plano reportados para la parte inferior, central y superior del castillo izquierdo (Figura 4.21) corresponden a las lecturas del potenciómetro PL-05, al promedio de los PL-06 y PL-07 y del PL-08 (Figura 3.17), respectivamente. Los desplazamientos horizontales en el plano de la parte inferior, central y superior del castillo izquierdo, asociados a la carga máxima fuera del plano del muro, fueron de 0.82 mm, 1.12 mm

y 1.46 mm, respectivamente. En la Figura 4.22 se presenta la curva carga-desplazamiento horizontal en el plano del castillo derecho del muro M-2.0-3.33. Los desplazamientos horizontales en el plano reportados para la parte superior, central e inferior del castillo derecho (Figura 4.22) corresponden a las lecturas del potenciómetro PL-13, al promedio de los PL-14 y PL-15 y del PL-16 (Figura 3.17), respectivamente. Los desplazamientos horizontales en el plano de la parte superior, central e inferior del castillo derecho, asociados a la carga máxima fuera del plano del muro, fueron de 1.50 mm, 1.20 mm y 0.91 mm, respectivamente. Para el muro M-2.0-3.33 no se reportan los desplazamientos verticales en el plano ya que no se midieron.

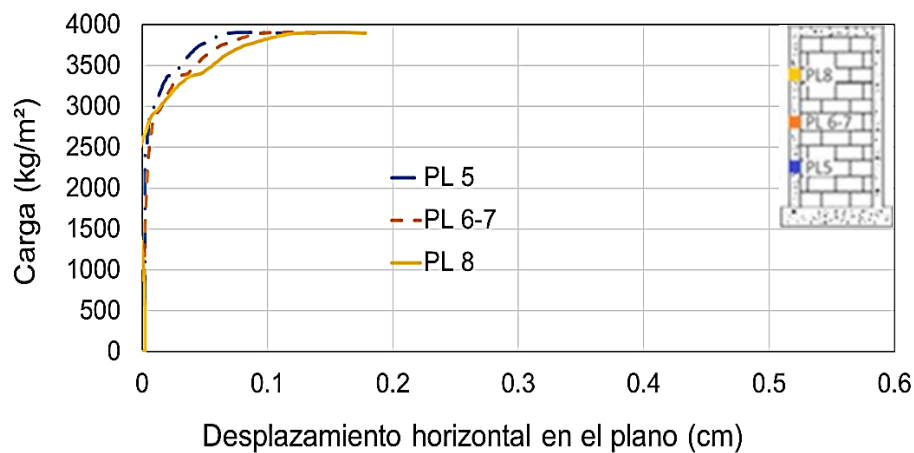


Figura 4.21: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo izquierdo) del muro M-2.0-3.33.

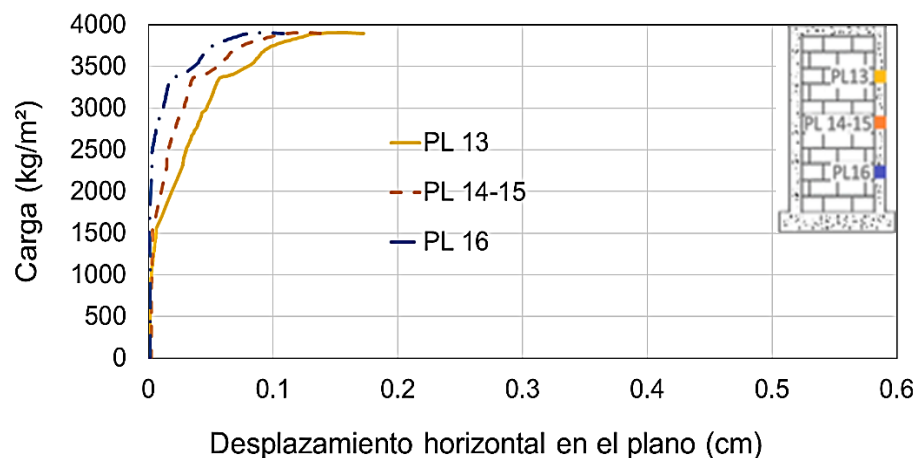


Figura 4.22: Curva carga desplazamiento horizontal en el plano (castillo derecho) del muro M-2.0-3.33.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se presenta una discusión sobre el comportamiento fuera del plano de los muros ensayados y la comparación entre las resistencias fuera del plano experimentales y analíticas.

### 5.1. Patrón de agrietamiento

El patrón de agrietamiento final de los muros (Figura 5.1) fue en general similar. Primero se observaron grietas verticales en la zona central de los muros, que posteriormente se propagaron en forma diagonal hacia los extremos de los castillos. Se observaron dos grietas verticales en la zona central de los muros, a excepción del muro M-2.0-0, en el que sólo se presentó una. Esta diferencia se puede atribuir a variaciones en la colocación de las bolsas de aire, a grietas por contracción en el mortero, o a variaciones en la resistencia a tensión de los bloques. La formación de las grietas diagonales siguió una trayectoria escalonada con un ángulo de aproximadamente 45 grados. Esta trayectoria se debió a que la adherencia entre el bloque y el mortero fue menor que la resistencia a tensión de los bloques. Para el caso de los muros M-1.4-0 y M-1.4-3.33 y M-2.0-3.33, el patrón de agrietamiento dividió a los muros en dos segmentos trapezoidales, dos triangulares y uno rectangular al centro (Figura 5.1.a, Figura 5.1.b y Figura 5.1.d). Para el caso del muro M-2.0-0, el patrón de agrietamiento dividió al muro en dos segmentos trapezoidales y dos triangulares (Figura 5.1.c). El tipo de falla observado fue el mismo en todos los muros y estuvo asociado al aplastamiento de la mampostería.

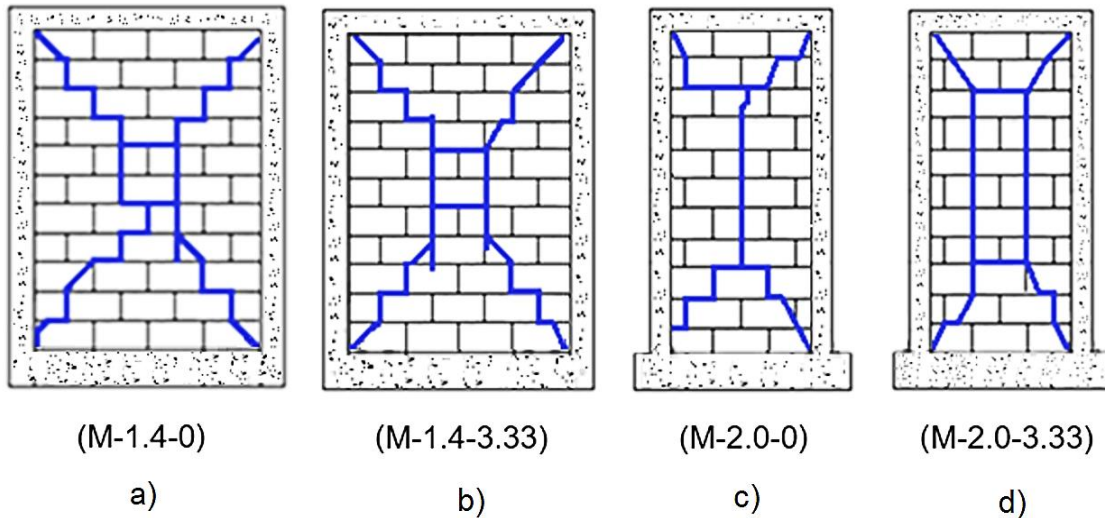


Figura 5.1: Patrón de agrietamiento final de los muros.

## 5.2. Resistencia fuera del plano

En la Figura 5.2 se presentan las curvas carga-desplazamiento fuera del plano de los muros ensayados.

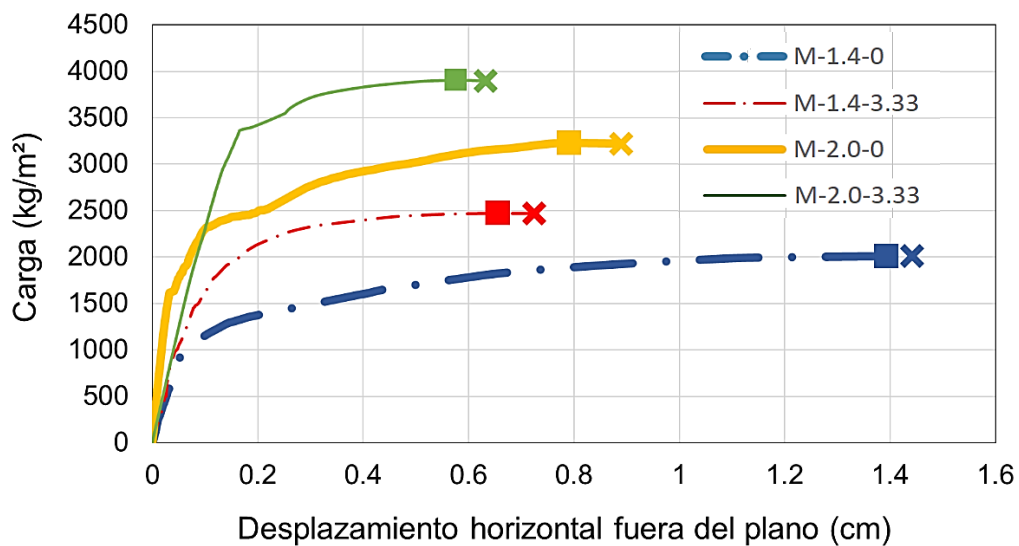
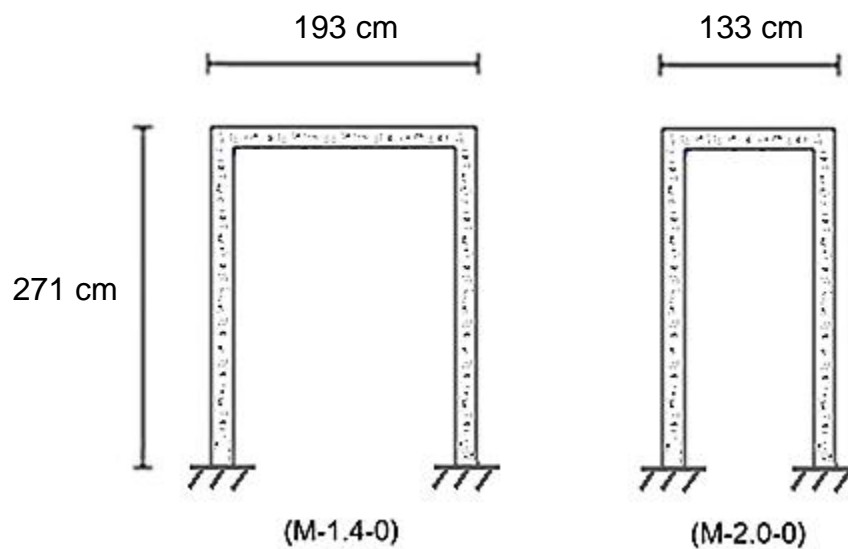


Figura 5.2: Curva carga-desplazamiento horizontal fuera del plano de los muros ensayados.

En la Figura 5.2 se observa que, para los muros con el mismo esfuerzo axial, conforme la relación de aspecto aumentó, la resistencia fuera del plano aumentó. El aumento en la resistencia se atribuyó a la menor longitud de la cadena superior

de los muros M-2.0-0 y M-2.0-3.33 con respecto a la de los muros M-1.4-0 y M-1.4-3.33. La reducción de la longitud de la cadena superior ( $L$ ) tuvo un efecto en la rigidez en el plano de los elementos confinantes ( $K$ ), en la rotación de los segmentos de los muros ( $\theta$ ) y en los desplazamientos horizontales en el plano como cuerpo rígido de dichos segmentos ( $\delta_p$ ).

En la Figura 5.3 se presentan los marcos de elementos confinantes (castillos y cadena superior) de los muros M-1.4-0 y M-2.0-0. Dichos marcos se presentan sin sus paneles de mampostería.



*Figura 5.3: Marcos de elementos confinantes (castillos y cadena superior) de los muros M-2.0-0 y M-1.4-0.*

Debido a que el marco de elementos confinantes del muro M-2.0-0 tuvo la misma longitud de los castillos y una menor longitud de la cadena superior respecto a las de muro M-1.4-0 (Figura 5.3), la rigidez en el plano del primero fue mayor que la del segundo. De la misma forma, la rigidez en el plano del marco de elementos confinantes del muro M-2.0-3.33 fue mayor que la del muro M-1.4-3.33.

En la Figura 5.4 se presenta un corte longitudinal de los muros M-1.4-0 y M-2.0-0, y las vistas de sus segmentos horizontales, dado un desplazamiento horizontal fuera del plano ( $\delta_{fp}$ ).



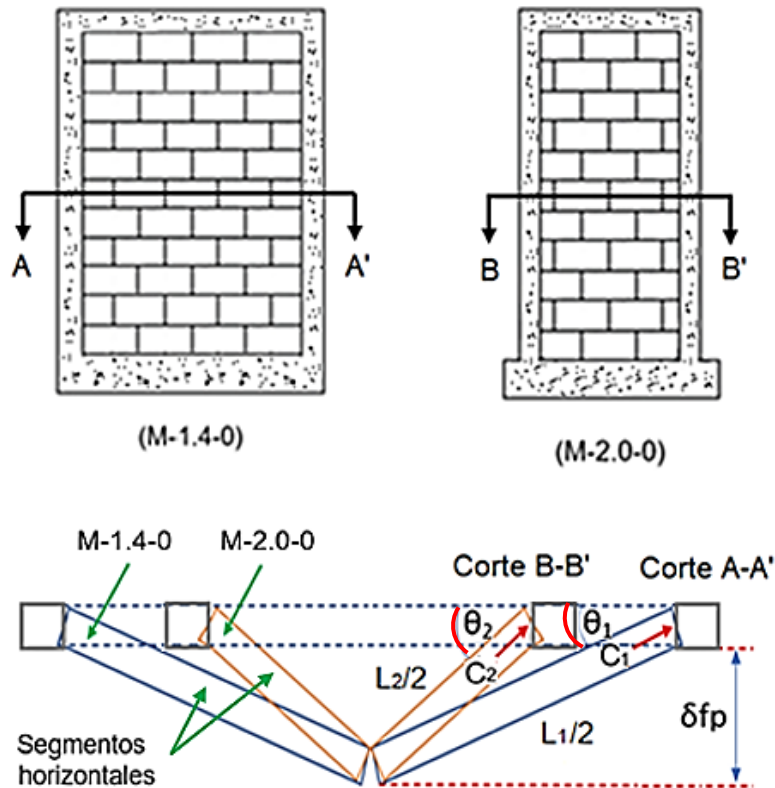
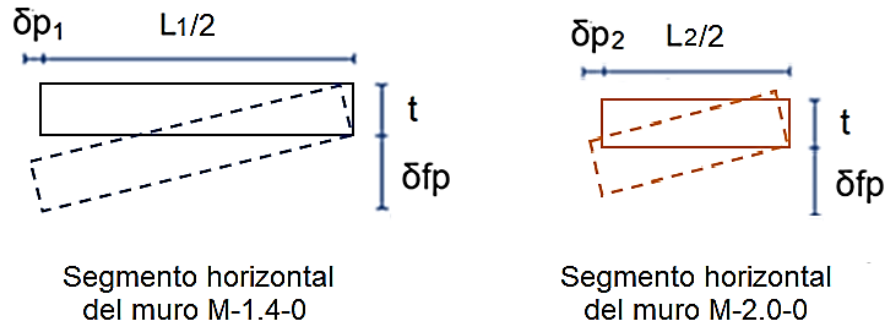


Figura 5.4: Corte longitudinal de los muros M-1.4-0 y M-2.0-0, y las vistas de sus segmentos horizontales, dado un desplazamiento horizontal fuera del plano ( $\delta_{fp}$ ).

Debido a que la longitud de la cadena superior del muro M-2.0-0 fue menor que la del muro M-1.4-0, la longitud de los segmentos horizontales del primero fue menor que la de los segundos (Figura 5.4). Debido a la menor longitud de los segmentos horizontales del muro M-2.0-0 respecto a la del muro M-1.4-0, la rotación de los primeros ( $\theta_2$ ) fue mayor que la de los segundos ( $\theta_1$ ). De la misma forma, la rotación de los segmentos horizontales del muro M-2.0-3.33 fue mayor que la del muro M-1.4-3.33.

En la Figura 5.5 se comparan los desplazamientos horizontales en el plano como cuerpo rígido ( $\delta_p$ ) de los segmentos de los muros M-1.4-0 y M-2.0-0, dado un desplazamiento fuera del plano ( $\delta_{fp}$ ).



*Figura 5.5: Comparación de los los desplazamientos horizontales en el plano como cuerpo rígido ( $\delta p$ ) de los segmentos A y B de los muros M-1.4-0 y M-2.0-0, respectivamente, dado un desplazamiento fuera del plano ( $\delta_{fp}$ ).*

Debido a que la longitud de la cadena superior del muro M-2.0-0 fue menor que la del muro M-1.4-0, la longitud de los segmentos horizontales del primero fue menor que la de los segundos (Figura 5.5: ). Debido a la menor longitud de los segmentos horizontales del M-2.0-0 respecto a la del muro M-1.4-0, los desplazamientos horizontales en el plano como cuerpo rígido de los primeros ( $\delta p_2$ ) fueron mayores que los de los segundos ( $\delta p_1$ ). De la misma forma, los desplazamientos horizontales en el plano como cuerpo rígido de los segmentos del muro M-2.0-3.33 fueron mayores que los del muro M-1.4-3.33.

Debido a la suma de los tres efectos anteriores, se generó una mayor fuerza de compresión en los segmentos del muro M-2.0-0 respecto del muro M-1.4-0. Debido a esto, la magnitud de los puntales de compresión horizontales y verticales de los muros M-2.0-0 y M-2.0-3.33 fue mayor que la de los muros M-1.4-0 y M-1.4-3.33, respectivamente. Por tanto, las componentes fuera del plano de los puntales de compresión horizontales y verticales de los primeros fueron mayores que las de los segundos.

En la Figura 5.2 se observa también que, para los muros con la misma relación de aspecto, conforme el esfuerzo axial aumentó, la resistencia fuera del plano aumentó. Lo anterior se atribuyó a que la carga axial restringió los desplazamientos verticales en el plano de la cadena superior. Debido a esto, la magnitud de los puntales de compresión verticales de los muros M-1.4-3.33 y M-2.0-3.33 fue mayor

que la de los muros M-1.4-0 y M-2.0-0, respectivamente. Por tanto, las componentes fuera del plano de los puntales de compresión verticales de los primeros fueron mayores que las de los segundos, respectivamente.

### **5.3. Desplazamientos horizontales fuera del plano**

En la Figura 5.2 se observa que, para los muros con el mismo esfuerzo axial, conforme la relación de aspecto aumentó, los desplazamientos horizontales fuera del plano disminuyeron. Lo anterior se atribuyó a la menor longitud de la cadena superior de los muros M-2.0-0 y M-2.0-3.33 respecto a la de los muros M-1.4-0 y M-1.4-3.33. La reducción en la longitud de la cadena superior tuvo los mismos tres efectos descritos anteriormente. Debido a la suma de dichos efectos, la magnitud de los puntales de compresión horizontales y verticales de los muros M-2.0-0 y M-2.0-3.33 fue mayor que la de los muros M-1.4-0 y M-1.4-3.33, respectivamente. El aumento en la magnitud de los puntales de compresión generó mayores esfuerzos en los segmentos de los muros M-2.0-0 y M-2.0-3.33 respecto a los de los muros M-1.4-0 y M-1.4-3.33. Por tanto, el aplastamiento de la mampostería de los primeros se alcanzó a un menor desplazamiento fuera del plano que el de los segundos, respectivamente.

En la Figura 5.2 se observa también que, para los muros con la misma relación de aspecto, conforme el esfuerzo axial aumentó, los desplazamientos horizontales fuera del plano disminuyeron. Lo anterior se atribuyó a que la carga axial restringió los desplazamientos verticales en el plano de la cadena superior. Debido a esto, la magnitud de los puntales de compresión verticales de los muros M-1.4-3.33 y M-2.0-3.33 fue mayor que la de los muros M-1.4-0 y M-2.0-0, respectivamente. El aumento en la magnitud de los puntales de compresión verticales generó mayores esfuerzos en los segmentos de los muros M-1.4-3.33 y M-2.0-3.33 respecto a los de los muros M-1.4-0 y M-2.0-0. Por tanto, el aplastamiento de la mampostería de los muros M-1.4-3.33 y M-2.0-3.33 se alcanzó a un menor desplazamiento fuera del plano que el de los muros M-1.4-0 y M-2.0-0, respectivamente.

## 5.4. Desplazamientos horizontales en el plano

En la Figura 5.6 se presentan los desplazamientos promedio horizontales en el plano de los castillos izquierdo y derecho de cada muro. Dichos desplazamientos en el plano corresponden a un desplazamiento horizontal fuera del plano de 0.58 cm. Este desplazamiento fuera del plano está asociado a la resistencia fuera del plano del muro M-2.0-3.33. Los desplazamientos reportados para la parte inferior de los castillos se determinaron con los potenciómetros PL-05 y PL-16, los centrales con los PL-06, PL-07, PL-14 y PL-15 y los de la parte superior con los PL-08 y PL-13 (Figura 3.17).

En la Figura 5.6 se presentan también los desplazamientos promedio verticales en el plano de la cadena superior de cada muro. Dichos desplazamientos en el plano corresponden al mismo desplazamiento horizontal fuera del plano mencionado anteriormente de 0.58 cm. Los desplazamientos reportados para la parte izquierda de la cadena superior se determinaron con los potenciómetros PL-09 y PL-12, los centrales con los PL-10 y PL-11 y los de la parte derecha con los PL-09 y PL-12 (Figura 3.17).

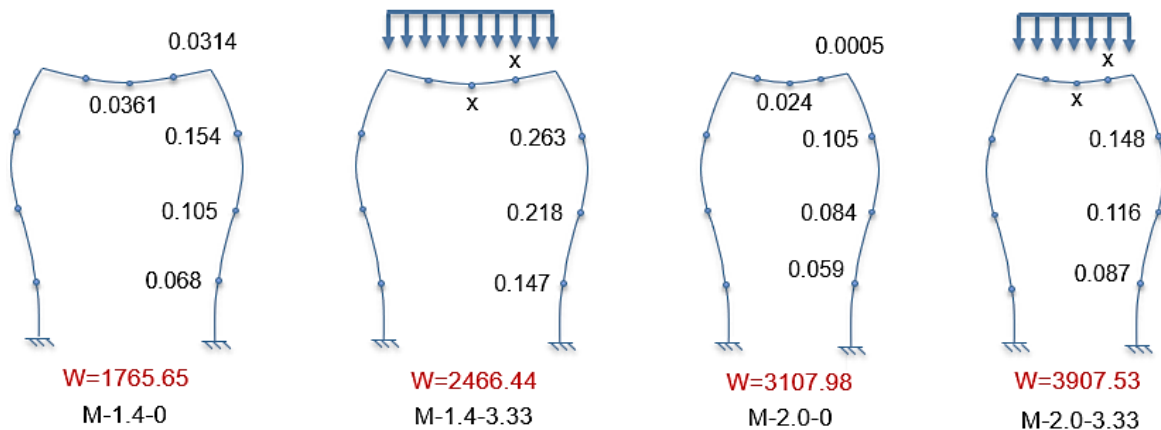


Figura 5.6: Desplazamientos promedio horizontales en el plano de los castillos y desplazamientos promedio verticales en el plano de la cadena superior de los muros ensayados, correspondientes a un desplazamiento horizontal fuera del plano de 0.58 cm, asociado a la resistencia fuera del plano del muro M-2.0-3.33.

En la Figura 5.6 se observa que los desplazamientos en la parte superior de los castillos fueron mayores que los de las partes central e inferior, respectivamente. Lo anterior se atribuyó a las condiciones de apoyo empotradas de la parte inferior de los castillos. Se observa también que, los desplazamientos horizontales en el plano de los castillos fueron mayores que los desplazamientos verticales en el plano de la cadena superior (Figura 5.6). Esto se atribuyó a la mayor longitud de los castillos respecto a la de la cadena superior. Debido a esto, la rigidez en el plano de los castillos fue mayor que la de la cadena superior.

En la Figura 5.6 se observa por otro lado que, para los muros con el mismo esfuerzo axial, conforme la relación de aspecto aumentó, los desplazamientos horizontales y verticales en el plano de los elementos confinantes (castillos y cadena superior) disminuyeron. Para el caso de los desplazamientos horizontales en el plano, esto se presentó de forma más evidente en los muros sometidos a esfuerzo axial. Lo anterior se atribuyó a la menor longitud de la cadena superior de los muros M-2.0-0 y M-2.0-3.33 respecto a la de los muros M-1.4-0 y M-1.4-3.33. Debido a lo anterior, la rigidez en el plano de los elementos confinantes de los muros M-2.0-0 y M-2.0-3.33 fue mayor que la de los muros M-1.4-0 y M-1.4-3.33, respectivamente. El ángulo de rotación de los segmentos horizontales de los primeros fue mayor que la de los segundos, respectivamente. Los desplazamientos horizontales en el plano como cuerpo rígido de los primeros fueron mayores que los de los segundos, respectivamente. Debido a los dos primeros efectos, los desplazamientos horizontales y verticales en el plano del marco de elementos confinantes de los muros M-2.0-0 y M-2.0-3.33 fueron menores que los de los muros M-1.4-0 y M-1.4-3.33, respectivamente. El tercer efecto tuvo una tendencia contraria a la anterior, sin embargo, no fue suficiente para regir en este ámbito del comportamiento de los muros.

En la Figura 5.6 se observa también que, para los muros con la misma relación de aspecto, conforme el esfuerzo axial aumentó, los desplazamientos horizontales en el plano de los castillos aumentaron. Lo anterior se atribuyó a que la carga axial en los muros contribuyó a la rotación de los extremos superiores de los castillos. Por

tanto, los desplazamientos horizontales en el plano de los muros M-1.4-3.33 y M-2.0-3.33 fueron mayores que los de los muros M-1.4-0 y M-2.0-0, respectivamente.

### 5.5. Resistencias fuera del plano experimentales y analíticas

En la Tabla 5.1 se compara la resistencia fuera del plano experimental y analítica para cada uno de los muros. La resistencia experimental se asoció en este trabajo a la carga máxima reportada en los ensayos ( $W_{EXP}$ ). La resistencia analítica se determinó utilizando el método del puntal bidireccional ( $W_{MPB}$ ) (Freyre, 2019). En la Tabla 5.1 se compara también el tipo de falla experimental y analítico para cada uno de los muros. El tipo de falla analítico se determinó utilizando el método del puntal bidireccional ( $W_{MPB}$ ) (Freyre, 2019). La relación entre la resistencia fuera del plano experimental y analítica de los muros varió entre 0.84 y 0.98. El promedio de la relación entre ambas resistencias fue de 0.90, con un coeficiente de variación de 7.39%. El tipo de falla del panel de los muros experimental y analítico estuvo en ambos casos asociado al aplastamiento de la mampostería.

*Tabla 5.1: Resistencias máximas fuera del plano y tipo de falla experimentales y analíticas de los muros ensayados.*

Muro	$W_{EXP}$ (kg/m <sup>2</sup> )	$W_{MPB}$ (kg/m <sup>2</sup> )	$TF_{EXP}$	$TF_{MPB}$	$W_{MPB}/W_{EXP}$
M-1.4-0	2010.68	1986.89	A.M.	A.M.	0.99
M-1.4-3.33	2470.45	2205.58	A.M.	A.M.	0.89
M-2.0-0	3226.30	3338.54	A.M.	A.M.	1.03
M-2.0-3.33	3907.53	3541.13	A.M.	A.M.	0.91
<b>Promedio</b>					0.96
<b>CV.</b>					7.39%

AM: Aplastamiento de la mampostería.

Se observa que, para los muros sin esfuerzo axial (M-1.4-0 y M-2.0-0), se predijo mejor la resistencia fuera del plano comparada con los muros con esfuerzo axial (M-1.4-3.33 y M-2.0-3.33) (Tabla 5.1). Se ha reportado en la literatura que, para

muros con esfuerzo axial y relación de aspecto menor que uno, con el método del puntal bidireccional se predijo satisfactoriamente la resistencia fuera del plano (Moreno et. al. 2015b). En este trabajo sólo se ensayaron dos muros con esfuerzo axial y relación de aspecto mayor que uno, por tanto, se recomienda realizar un mayor número de ensayos de muros con estas características.

## 6. CONCLUSIONES

Con base en los resultados experimentales de los cuatro muros confinados sujetos a cargas uniformes incrementales fuera del plano, se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones.

- El patrón de agrietamiento final de los muros fue en general similar. Este patrón se caracterizó por grietas verticales en la parte central y su propagación en forma diagonal a los extremos de los castillos. La falla de los muros estuvo asociada al aplastamiento de la mampostería.
- Para muros con el mismo esfuerzo axial, conforme la relación de aspecto aumentó, la resistencia fuera del plano aumentó y su capacidad de deformación fuera del plano disminuyó. Esto se atribuyó a la disminución de la longitud de la cadena superior de los muros y su efecto en la rigidez en el plano del marco de elementos confinantes, en el ángulo de rotación de los segmentos horizontales y en los desplazamientos horizontales en el plano como cuerpo rígido de los mismos.
- Para muros con la misma relación de aspecto, conforme el esfuerzo axial aumentó, la resistencia fuera del plano aumentó y su capacidad de deformación fuera del plano disminuyó. Esto se atribuyó a la restricción de los desplazamientos verticales en el plano de la cadena superior de los muros generada por la carga axial y su efecto en la magnitud de los puntales de compresión verticales de los muros.
- Para los muros con el mismo esfuerzo axial, conforme la relación de aspecto aumentó, los desplazamientos horizontales y verticales en el plano disminuyeron. Para muros con la misma relación de aspecto, conforme el esfuerzo axial aumentó, los desplazamientos horizontales y verticales en el plano aumentaron. Lo primero se atribuyó a la disminución de la longitud de la cadena superior de los muros y sus efectos mencionados anteriormente. Lo segundo se atribuyó a



la rotación de los extremos superiores de los castillos de los muros generada por la carga axial.

- Con el MPB se predice satisfactoriamente la resistencia fuera del plano y el tipo de falla de los muros.
- Se recomienda realizar un mayor número de ensayos de muros con relación de aspecto mayor que uno sujetos a esfuerzo axial.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abrams D., Angel R., Uzarski J. (1996) Out-of Plane Strength of Unreinforced Masonry Infill Panels, *Earthquake Spectra*, Vol 12, No. 4.
2. Chan E. S. (2012). Comportamiento de muros de mampostería confinada con aberturas sujetos a cargas fuera del plano. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
3. Drysdale R., Essawy A. (1988). Out Of Plane Bending Of Concrete Block Walls, ASCE, *Structural Journal Engineering*, Vol. 144, 1988, Num. 1.
4. González T. V. (2006). Determinación de la resistencia a compresión axial de muros de mampostería de piezas huecas prefabricadas de concreto para vivienda en Yucatán. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México. 152 pp.
5. Griffith M, Vaculik J. (2007). Out of Plane Flexural Strength of Unreinforced Clay Brick Masonry Walls, *TMS Journal*, September, 2007.
6. G.Cantón D. J. (2016). Comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada con elementos confinantes de sección transversal mínima. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
7. Marín G. F. (2008). Determinación de la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería de piezas de concreto. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
8. Moreno H. J. (2015a). Bidirectional strut method: out-of-plane strength of confined masonry walls. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(4), 1029-1035.
9. Moreno H. J., Varela R. J., Fernandez B. L., (2015b). Out-of-Plane Design Procedure for Confined Masonry Walls. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 141(12), 1331-1343. 59.

10. Navarrete M. D. (2009). Comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada con diferentes condiciones de apoyo. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
11. Norma Mexicana NMX-C-036-ONNCE-2004. Industria de la construcción - Bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines- Resistencia a la compresión - método de prueba. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
12. Norma Mexicana NMX-C-038-ONNCE-2004. Industria de la construcción – Determinación de las dimensiones de ladrillos, tabiques, bloques y tabicones para la construcción. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
13. Norma Mexicana NMX-C-077-ONNCCE-1997. Industria de la construcción – Agregados para concreto – Análisis granulométrico – Método de prueba. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
14. 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. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
15. Norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-1997. Industria de la construcción – Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – Especificaciones y métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
16. 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. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
17. Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, 2017.
18. Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcciones de Mérida, Yucatán, 2017.

19. Polanco M. M. (2011). Comportamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas axiales y cargas fuera del plano, Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
20. Rosado G. A. (2014). Desempeño elástico y plástico del concreto fabricado con agregados reciclados de origen calizo de residuos de demolición. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
21. Varela R. J., Chan E. S., Fernández B. L., Moreno E. I. (2015). Comportamiento de muros de mampostería confinada con aberturas sujetos a cargas fuera del plano. "Concreto y cemento, investigación y desarrollo", Vol. 7(1), 52-65.
22. Varela R. J., Moreno H. J., López G. I., Fernández B. L., Moreno E. I. (2012a). Out-of-plane strength of confined masonry walls. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 138(11), 1331 -1341. 56.
23. Varela R. J., Navarrete M. D, Fernández B. L., Moreno E. I. (2011). Out-of plane behavior of confined masonry walls. "Engineering Structures", 33(5), 1734-1741. 55.
24. Varela R. J., Polanco M. M., Fernández B. L., Moreno E. I. (2012b). Confined masonry walls subjected to combined axial loads and out-of-plane uniform pressures. "Canadian Journal of Civil Engineering", 39(4), 439-447.
25. Rodríguez C. M. (2018). Ecuaciones de diseño para muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

## APÉNDICE A

En este apéndice se presentan los detalles de la obtención de las propiedades de los materiales: granulometrías de la arena, dimensiones y resistencia de los bloques y resistencia a compresión del mortero y del concreto.

### A.1. Granulometría de la arena

Tabla A.1: Granulometría de la arena.

Malla	Peso retenido (gr)	% del peso total	% acumulado	% que pasa	Límite inferior	Límite superior
4	1.4	0.28	0.28	99.72	100	100
8	64.6	12.92	13.2	86.8	95	100
16	130.8	26.16	39.36	60.64	80	100
30	103.4	20.68	60.04	39.96	50	85
50	72.3	14.46	74.5	25.5	25	60
100	87.2	17.44	91.94	8.06	10	30
charola	40.3	8.06	100	0	2	10
<b>Totales</b>	500	100				

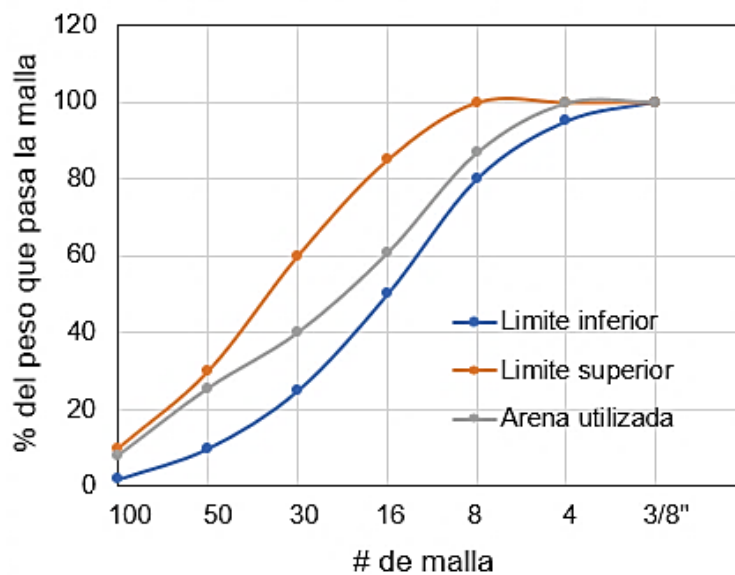


Figura A.1: Curva granulométrica de la arena.

## A.2. Dimensiones y resistencia de los bloques

Tabla A.2: Dimensiones de los bloques.

Bloque	A (cm)	B (cm)	C (cm)	T1 (cm)	T2 (cm)	T3 (cm)	T4 (cm)	T5 (cm)	T6 (cm)	T7 (cm)	T8 (cm)	T9 (cm)	T10 (cm)
1	39.4	14.6	19.45	2.73	2.88	2.86	2.87	2.74	2.74	2.82	2.78	2.82	2.71
2	39.5	14.6	19.4	2.6	2.94	2.85	2.76	2.71	2.74	2.64	2.77	2.78	2.76
3	39.4	14.6	19.3	2.75	2.78	2.78	2.75	2.83	2.7	2.78	2.7	2.81	2.69
4	39.4	14.5	19.6	2.74	2.83	2.84	2.82	2.85	2.73	2.8	2.68	2.8	2.68
5	39.4	14.5	19.4	2.77	2.78	2.82	2.77	2.7	2.76	2.68	2.76	2.75	2.77

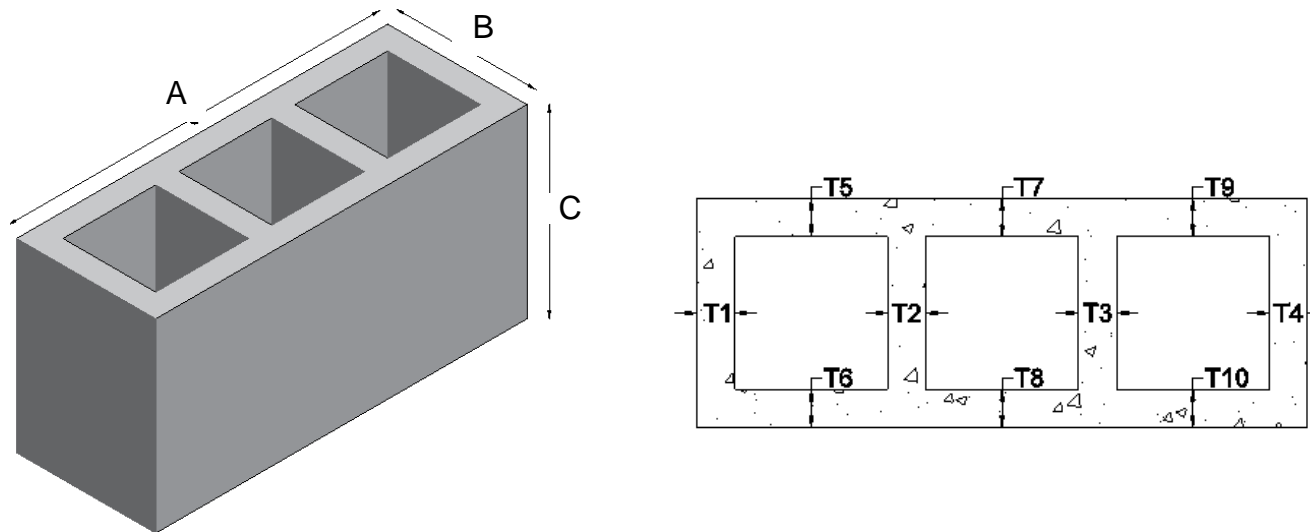


Figura A.2: Vistas de las dimensiones de los bloques.

Tabla A.3: Resistencia a compresión de los bloques.

Bloque	Área (cm <sup>2</sup> )		Carga de ruptura (kg)	$f_{pt}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
	Total	Neta		Total	Neta
1	575.24	320.83	30050	52.24	93.66
2	576.7	317.77	33332	57.80	104.89
3	575.24	317.44	35621	61.92	112.21
4	571.3	318.15	26545	46.46	83.44
5	571.3	316.21	31116	54.47	98.40
<b>Promedio</b>				54.58	98.52
<b>CV.</b>				6.17%	6.54%

### A.3. Dimensiones y resistencia de los cubos de mortero

Tabla A.4: Dimensiones y resistencia a compresión de los cubos de mortero.

Cubo	L1	L2	L3	L4	L5	L6	Promedio (L1-L3)	Promedio (L4-L6)	Área	Carga (kg)	$f_j$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1	5.00	4.96	4.97	5.06	5.10	5.02	4.98	5.06	25.19	733	29.09
2	4.98	5.00	4.99	5.07	5.03	5.06	4.99	5.06	25.23	721	28.59
3	4.99	5.04	5.00	5.06	5.05	5.05	5.01	5.05	25.31	746	29.47
4	5.00	4.96	4.98	5.04	5.11	5.02	4.98	5.06	25.19	755	29.96
5	4.99	5.00	4.99	5.04	5.08	5.07	4.99	5.06	25.29	728	28.80
6	4.98	5.01	5.02	5.03	5.05	5.03	5.00	5.04	25.20	742	29.43
<b>Promedio</b>											29.22
<b>Coef. Var.</b>											2.03%

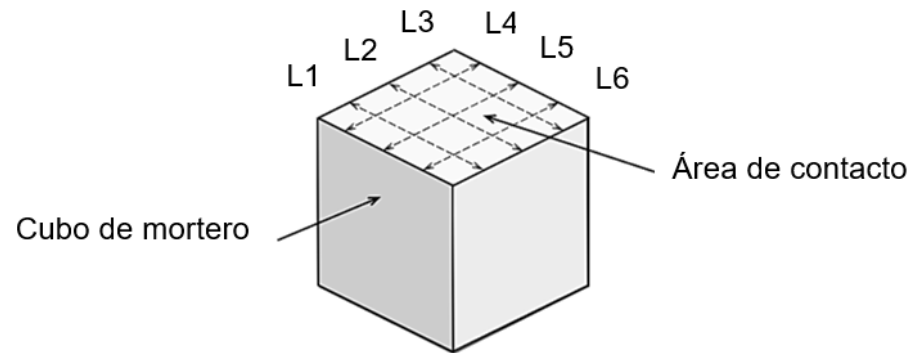


Figura A.3: Cubo de mortero.

#### A.4. Dimensiones y resistencia de los cilindros de concreto

Tabla A.5: Dimensiones y resistencia a compresión de los cilindros de concreto del muro M-1.4-0.

Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	Diámetro 3 (mm)	Diámetro promedio (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kg)	$f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Zona
149.7	149.9	149.11	14.957	175.703	46305	263.542	Cimentación
149.66	149.4	149.51	14.952	175.593	51005	290.472	
151.1	151.08	150.01	15.073	178.439	49806	279.121	Castillo inferior
149.9	151.2	151.3	15.080	178.605	48101	269.316	
151.1	151.1	149.11	15.044	177.745	45067	253.549	Castillo superior
151.2	149.4	149.6	15.007	176.872	49900	282.125	
151.1	151.08	149.4	15.053	177.958	49812	279.909	Cadena superior
151.1	151.4	151.3	15.127	179.712	47739	265.642	
Prom.						272.959	
C.V.						4.94%	



Tabla A.6: Dimensiones y resistencia a compresión de los cilindros de concreto del muro M-1.4-3.33.

Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	Diámetro 3 (mm)	Diámetro promedio (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kg)	$f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Zona
149.4	151.4	151.3	15.070	178.368	48994	274.680	Cimentación
151.1	151.1	149.11	15.044	177.745	49052	275.968	
151.2	149.4	149.6	15.007	176.872	52092	294.519	Castillo inferior
149.7	150.06	149.95	14.990	176.487	52024	294.775	
149.65	149.4	149.51	14.952	175.585	49753	283.355	Castillo superior
151.1	151.08	151.12	15.110	179.316	48209	268.850	
149.9	151.2	151.3	15.080	178.605	48101	269.316	Cadena superior
151.1	151.1	149.11	15.044	177.745	45067	253.549	
						Prom.	276.876
						C.V.	5.01%

Tabla A.7: Dimensiones y resistencia a compresión de los cilindros de concreto del muro M-2.0-0.

Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	Diámetro 3 (mm)	Diámetro promedio (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kg)	$f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Zona
151.1	151.08	149.4	15.053	177.958	47913	269.238	Cimentación
151.1	151.4	151.3	15.127	179.712	45683	254.202	
150.4	149.1	149.8	14.977	176.165	51507	292.379	Castillo inferior
151.1	149.4	149.51	15.000	176.722	49753	281.532	
151.1	151.08	151.12	15.110	179.316	48209	268.850	Castillo superior
149.9	151.2	151.3	15.080	178.605	48101	269.316	
151.1	151.1	149.11	15.044	177.745	45067	253.549	Cadena superior
151.2	149.4	149.6	15.007	176.872	49900	282.125	
						Prom.	271.399
						C.V.	6.09%

Tabla A.8: Dimensiones y resistencia a compresión de los cilindros de concreto del muro M-2.0-3.33.

Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	Diámetro 3 (mm)	Diámetro promedio (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga (kg)	$f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Zona
150.7	150.01	149.9	15.020	177.194	49254	277.967	Cimentación
149.6	149.41	151.1	15.004	176.801	50768	287.148	
151.12	151.1	151.2	15.114	179.411	48701	271.450	Castillo inferior
150.7	150.01	149.9	15.020	177.194	44990	253.902	
149.6	149.41	151.1	15.004	176.801	49812	281.741	Castillo superior
151.1	149.91	151.2	15.074	178.455	47739	267.513	
149.7	150.06	149.95	14.990	176.487	52024	294.775	Cadena superior
149.65	149.4	149.51	14.952	175.585	49753	283.355	
						Prom.	277.231
						C.V.	4.60%

## APÉNDICE B

En este apéndice se presenta el cálculo del factor de corrección por área efectiva, el cual se utilizó para transformar las cargas por área efectiva a cargas equivalentes por área total en los muros.

$$FC = \frac{4}{3} * \left(\frac{Lm}{Lb}\right) * \left(\frac{Hm}{Hb}\right) * \left(2 - \frac{Lm}{Lb}\right) * \left(2 - \frac{Hm}{Hb}\right)$$

O también:

$$FC = \frac{4}{3} * \left(\frac{Am}{Ab}\right) * \left(2 - \frac{Lm}{Lb}\right) * \left(2 - \frac{Hm}{Hb}\right)$$

Donde:

*FC*: Factor de corrección

*Hm*: Altura del muro

*Hb*: Altura efectiva de las bolsas

*Lm*: Longitud total del muro

*Lb*: Longitud efectiva de las bolsas

*Am*: Área total del muro

*Ab*: Área efectiva de las bolsas

El área efectiva de la bolsa se calcula restando a su área original (sin inflar) un área que es función de la separación que existe entre el muro de reacción y el muro espécimen al alcanzar la resistencia fuera del plano. Dicha separación se calcula como la suma de la separación inicial entre ambos muros y el desplazamiento fuera del plano del muro al momento de alcanzar la resistencia fuera del plano. En la Figura B.1 se presenta la pérdida de longitud en cada uno de los cuatro lados de una bolsa. Las dimensiones de las bolsas de aire fueron de 120 cm x 300 cm (ancho x largo). Las bolsas se colocaron entre el muro espécimen y el muro de reacción. La separación entre ambos muros fue de 30 cm. Para el caso de los muros M-1.4-0 y M-1.4-3.33 se utilizaron dos bolsas de aire (B1 y B2) y para los otros dos muros una bolsa (B1) (Figura 3.13).

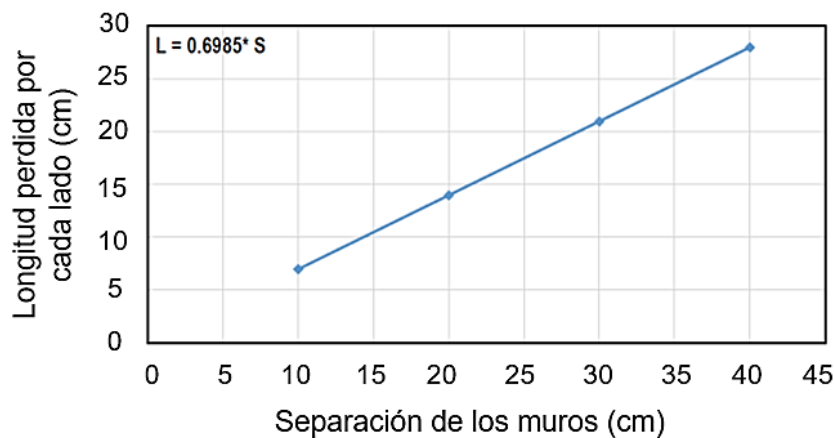


Figura B.1: Pérdida de dimensiones por inflado de las bolsas de aire.

Tabla B.1: Parámetros utilizados para el cálculo del factor de corrección por área efectiva de los muros.

Parámetros		M-1.4.0	M-1.4-3.33	M-2.0-0	M-2.0-3.33
Factor de corrección	$FC$	0.84	0.85	0.82	0.82
Área total del muro	$A_m$ (m <sup>2</sup> )	5.23	5.25	3.60	3.60
Área efectiva de las bolsas	$A_b$ (m <sup>2</sup> )	1.95	1.97	1.98	1.99
Altura del muro	$H_m$ (cm)	271	271	271	271
Altura efectiva de las bolsas	$H_b$ (cm)	256.14	257.17	256.99	257.28
Longitud total del muro	$L_m$ (cm)	193	193	133	133
Longitud efectiva de las bolsas	$L_b$ (cm)	76.14	77.17	76.99	77.28
Separación inicial entre los muros	$S$ (cm)	30	30	30	30
Desplazamiento fuera del plano	$\delta_{fp}$ (cm)	1.39	0.66	0.79	0.58
Longitud perdida por lado	$l$ (cm)	21.93	21.41	21.50	21.36