



---

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“COMPORTAMIENTO FUERA DEL PLANO DE MUROS  
DE MAMPOSTERÍA CONFINADA SUJETOS A CARGAS  
SÍSMICAS: EFECTO DE LA CARGA AXIAL Y LA  
RELACIÓN DE ASPECTO”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR**

**MI. DANTE NAVARRETE MACIAS**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE**

**DOCTOR EN INGENIERÍA**

**OPCIÓN ESTRUCTURAS**

**MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO**

**2015**

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, por las facilidades otorgadas para el desarrollo de este trabajo de tesis.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de posgrado. Asimismo, agradezco al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por el apoyo económico brindado para el desarrollo de este trabajo. El apoyo se recibió a través del proyecto de redes “Red Interinstitucional para el Desarrollo e Innovación en Ingeniería Estructural” con título del proyecto “Reducción de la vulnerabilidad de estructuras de mampostería y puentes ante riesgos naturales, tercera parte”.

## RESUMEN

Los muros de mampostería confinada son uno de los sistemas estructurales más utilizados para la edificación de vivienda en México. Dichos muros deben resistir tanto cargas gravitacionales como cargas laterales generadas por acciones accidentales. El comportamiento fuera del plano de los muros está relacionado principalmente con dos tipos de cargas: una carga distribuida que actúa sobre la superficie total del muro o una carga concentrada en el extremo superior del muro. Se han desarrollado trabajos de investigación sobre el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada sujetos a una presión uniforme (Navarrete 2009, López 2010, Moreno 2010, Moreno 2014, Polanco 2011 y Varela et. al. 2011, 2012a y 2012b). Sin embargo, no existen trabajos sobre el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada sujetos a cargas concentradas en el extremo superior.

En este trabajo se evaluó el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada sujetos a una combinación de carga axial y carga lateral concentrada en el extremo superior de los muros. Se estudió el efecto de la carga axial y la relación de aspecto. Se ensayaron 5 muros a escala natural, construidos con tabiques de arcilla extruida con dimensiones de 0.12x0.12x0.25 m (espesor x altura x longitud). Se consideró mortero en proporciones por volumen 1:2:7 (Cemento Portland: Cal: Arena). El acero de refuerzo longitudinal de los elementos confinantes verticales consistió de 4 barras de 9 mm y el transversal de estribos de alambón de 6 mm espaciados a cada 20 cm. El esfuerzo de fluencia del acero longitudinal y transversal fue de 411 y 248 MPa, respectivamente. Se consideró una altura de muros constante e igual a 2.8 m. Para considerar el efecto de la relación de aspecto, se consideraron muros con longitudes de 1.41 m, 2.45 m y 3.49 m. Las relaciones de aspecto resultantes fueron de 1.84, 1.06 Y 0.74. Para considerar el

efecto de la carga axial, se consideraron tres esfuerzos axiales de compresión de 0.12, 0.24 Y 0.36 MPa.

Se desarrollaron modelos analíticos para determinar la resistencia de agrietamiento fuera del plano y la resistencia fuera del plano de MC. La resistencia de agrietamiento fuera del plano fue determinada utilizando los principios de la mecánica de materiales. Por otra parte, la resistencia fuera del plano fue calculada como la suma de la contribución de la resistencia del panel de mampostería y la resistencia de los elementos confinantes verticales . La primera fue determinada usando el método del puntal unidireccional, propuesto en este trabajo. La segunda fue calculada mediante un análisis plástico. Adicionalmente, se desarrolló un modelo analítico tri-lineal para representar las curvas carga fuera del plano - distorsión de los muros ensayados. Dicho modelo se construyó a partir de la rigidez del muro y las resistencias obtenidas con los modelos analíticos antes mencionados.

Se concluyó que el comportamiento fuera del plano de los muros ensayados fue en general similar. Se observó un comportamiento elástico lineal hasta el primer agrietamiento. Después de dicho agrietamiento el comportamiento fue no lineal. Se observó un patrón de agrietamiento similar para los cinco muros. Dicho patrón de agrietamiento consiste en grietas horizontales en la parte inferior y superior del panel de mampostería, así como en los elementos confinantes. Para muros con la misma relación de aspecto, la resistencia fuera del plano aumenta si la carga axial es mayor, mientras que, para muros con la misma carga axial, la resistencia fuera del plano aumenta si la relación de aspecto es menor. Los modelos analíticos desarrollados en este trabajo predicen de forma adecuada la resistencia de agrietamiento fuera del plano y la resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada. El modelo tri-lineal propuesto en este trabajo representa en general de forma satisfactoria el comportamiento de las curvas carga fuera del plano- distorsión de los muros ensayados.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 GENERALIDADES.....	1
1.2 OBJETIVO GENERAL .....	3
1.3 OBJETIVOS PARTICULARES .....	3
1.4 ALCANCE DE LA TESIS .....	3
1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	4
<b>CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES .....</b>	<b>5</b>
2.1 CARGAS SÍSMICAS FUERA DEL PLANO QUE ACTÚAN SOBRE MUROS .....	5
2.2 DAÑOS OBSERVADOS EN MC DURANTE SISMOS.....	6
2.3 TRABAJOS EXPERIMENTALES O ANALÍTICOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO FUERA DEL PLANO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA.....	7
2.3.1 Muros reforzados.....	7
2.3.2 Muros confinados.....	9
2.3.3 Muros diafragma.....	13
2.4 ANÁLISIS DE LA REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	16
2.4.1 Daños observados en MC durante sismos .....	16
2.4.2 Comportamiento fuera del plano de muros de mampostería.....	16
2.4.3 Modelos analíticos.....	19

2.4.4	<i>Principales variables que influyen en el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería sujetos a cargas sísmicas.</i> .....	21
<b>CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA</b> .....		<b>22</b>
3.1	DESARROLLO DE MODELOS ANALÍTICOS .....	22
3.1.1	<i>Resistencia de agrietamiento</i> .....	22
3.1.2	<i>Resistencia máxima</i> .....	23
3.1.3	<i>Análisis de sensibilidad</i> .....	37
3.2	OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS MATERIALES .....	47
3.3	DISEÑO DE LOS MUROS .....	48
3.4	CONSTRUCCIÓN DE MUROS.....	51
3.5	DISEÑO DEL SISTEMA DE CARGA E INSTRUMENTACIÓN .....	53
3.6	ENSAYE DE LOS MUROS.....	59
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS</b> .....		<b>61</b>
4.1	PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS MATERIALES .....	61
4.2	ENSAYE DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA .....	64
4.3	MODELOS ANALÍTICOS PARA LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA...	73
<b>CAPÍTULO 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....		<b>75</b>
5.1	PATRÓN DE AGRIETAMIENTO EN MUROS .....	75
5.2	CURVA CARGA FUERA DEL PLANO - DISTORSIÓN.....	77
5.3	MUROS CON DIFERENTE CARGA AXIAL.....	78
5.4	MUROS CON DIFERENTE RELACIÓN DE ASPECTO .....	79
5.5	DISTORSIONES MÁXIMAS DE LOS MUROS .....	80
5.6	COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANALÍTICOS .....	81

5.7	PROPUESTA DE MODELO TRI-LINEAL .....	82
<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>89</b>
<b>APÉNDICE A RESULTADOS DE PRUEBAS A MATERIALES.....</b>		<b>91</b>
A.1	GRANULOMETRÍA DE LA ARENA.....	91
A.2	RESISTENCIA A COMPRESIÓN AXIAL DEL CONCRETO. ....	92
<b>APÉNDICE B OBTENCIÓN DE FACTORES <math>\phi</math>, <math>\alpha</math>, Y <math>\beta</math> PARA LA</b>		
<b>CONSTRUCCIÓN DE MODELO TRI-LINEAL .....</b>		<b>93</b>
B.1	OBTENCIÓN DE RIGIDEZ INICIAL. RIGIDEZ A LA CARGA MÁXIMA Y RIGIDEZ DE DESCARGA DE LAS CURVAS "CARGA FUERA DEL PLANO - DISTORSIÓN" .....	93
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>99</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Cargas fuera del plano. ....	5
Figura 2.2 Patrón de agrietamiento, muro sujeto a cargas distribuidas.....	18
Figura 2.3 Patrón de agrietamiento, muro sujeto a cargas concentradas. ....	18
Figura 2.4 División del muro en segmentos, carga distribuida. ....	19
Figura 2.5 División del muro, carga concentrada. ....	19
Figura 3.1 Condiciones de apoyo.....	23
Figura 3.2 Método del puntal bidireccional y método del puntal unidireccional. ....	24
Figura 3.3 Patrón de agrietamiento. ....	25
Figura 3.4 División de muro de mampostería.....	26
Figura 3.5 División de marco de elementos confinantes en n numero de elementos.	26
Figura 3.6 Desplazamiento vertical como cuerpo rígido, $u^C$ . ....	27
Figura 3.7 Distribución de fuerza arbitraria. ....	27
Figura 3.8 Distribución lineal de deformaciones en segmento de muro. ....	29
Figura 3.9 Relación geométrica para obtención de $b_i$ .....	31
Figura 3.10 Equilibrio de fuerzas vertical y ángulos. ....	32
Figura 3.11 Curva carga fuera del plano – distorsión, contribución del panel de mampostería. ....	33
Figura 3.12 Diagrama momento – curvatura, elementos confinantes verticales. ....	34
Figura 3.13 Integración del diagrama Momento – Curvatura. ....	35
Figura 3.14 Diagrama fuerza horizontal – desplazamiento, Elementos confinantes.	36
Figura 3.15 Curva fuerza horizontal – desplazamiento, mampostería y elementos confinantes.....	37

Figura 3.16 Curvas carga horizontal – desplazamiento, $f_m$ .	40
Figura 3.17 Curvas carga horizontal – desplazamiento, H/L.	41
Figura 3.18 Curvas fuerza horizontal – desplazamiento, H/t.	42
Figura 3.19 Curvas fuerza horizontal – desplazamiento, $\varepsilon$ .	43
Figura 3.20 Curvas fuerza horizontal – desplazamiento. Sección transversal de elementos confinantes verticales.	44
Figura 3.21 Curvas carga horizontal – desplazamiento, Carga axial.	45
Figura 3.22 Diagrama Fuerza Horizontal – Desplazamiento. Resistencia a compresión axial de concreto.	46
Figura 3.23 Condiciones de apoyo.	48
Figura 3.24 Análisis de elementos confinantes.	49
Figura 3.25 Muros de mampostería confinada.	50
Figura 3.26 Habilitado de acero de refuerzo, cimbrado y colocación de concreto en cadena inferior.	51
Figura 3.27 Colocación de piezas de mampostería.	52
Figura 3.28 Cimbrado y colocación de concreto en castillos.	52
Figura 3.29 Habilitado de acero de refuerzo y colocación de concreto en cadena superior.	53
Figura 3.30 Construcción de losa de concreto.	53
Figura 3.31 Sistema de carga axial.	54
Figura 3.32 Sistema de apoyo guiado.	55
Figura 3.33 Losa de concreto.	55
Figura 3.34 Sistema de carga lateral.	56

Figura 3.35 Aplicación y medición de cargas. ....	57
Figura 3.36 Medición de desplazamientos. ....	58
Figura 3.37 Medición de deformaciones unitarias. ....	58
Figura 3.38 Protocolo de carga, NTCM del RCDF (GDF 2004). ....	59
Figura 3.39 Sistema de carga e instrumentación. ....	60
Figura 4.1. Curvas granulométrica agregado fino. ....	61
Figura 4.2 Dimensiones generales de las piezas de mampostería ....	63
Figura 4.3 Agrietamiento horizontal en el panel de mampostería. ....	65
Figura 4.4 Agrietamiento horizontal en los castillos. ....	66
Figura 4.5 Aplastamiento de la mampostería. ....	66
Figura 4.6 Aplastamiento del concreto en castillos. ....	67
Figura 4.7 Patrón de agrietamiento final de muros.....	68
Figura 4.8 Curva "Carga fuera del plano - distorsión" del muro M1. ....	69
Figura 4.9 Curva "Carga fuera del plano - distorsión" del muro M2. ....	69
Figura 4.10 Curva "Carga fuera del plano - distorsión" del muro M3. ....	70
Figura 4.11 Curva "Carga fuera del plano - distorsión" del muro M4. ....	70
Figura 4.12 Curva "Carga fuera del plano - distorsión" del muro M5. ....	71
Figura 4.13 Resistencia de agrietamiento, obtenida de curva carga - distorsión. ....	71
Figura 5.1. Flexión fuera del plano del panel de mampostería.....	74
Figura 5.2. Localización del momento máximo actuante.....	75
Figura 5.3. Concreto en ultima hilada de tabiques. ....	75
Figura 5.4. Curva "Carga fuera del plano - distorsión del muro M3.....	76
Figura 5.5. Componente horizontal de los puntales de compresión.....	77

Figura 5.6. Curvas "Carga fuera del plano - distorsión" para muros con diferente carga axial.....	78
Figura 5.7. Curvas "Carga fuera del plano - distorsión" para muros con diferente relación de aspecto.....	79
Figura 5.8. Longitud inicial de primer agrieta horizontal.....	80
Figura 5.8. Modelo analítico tri-lineal, comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada.....	83
Figura 5.10. Curva "Carga fuera del plano - distorsión" y modelo tri-lineal del muro M-1.....	85
Figura 5.11. Curva "Carga fuera del plano - distorsión" y modelo tri-lineal del muro M-2.....	85
Figura 5.12. Curva "Carga fuera del plano - distorsión" y modelo tri-lineal del muro M-3.....	86
Figura 5.13. Curva "Carga fuera del plano - distorsión" y modelo tri-lineal del muro M-4.....	86
Figura 5.14. Curva "Carga fuera del plano - distorsión" y modelo tri-lineal del muro M-5.....	87
Figura 5.15. Curvas "carga fuera del plano - distorsión" y resistencia calculada considerando sólo los elementos confinantes.....	88
Figura B.1. Rigidez inicial de agrietamiento, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de los muros ensayados. ....	94
Figura B.2. Rigidez inicial de agrietamiento, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de los muros ensayados. ....	95

Figura B.3. Rigidez inicial de agrietamiento, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de los muros ensayados. ....	96
Figura B.4. Rigidez inicial de agrietamiento, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de los muros ensayados. ....	97
Figura B.5. Rigidez inicial de agrietamiento, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de los muros ensayados. ....	97
Figura B.6. Rigidez inicial de agrietamiento, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de los muros ensayados. ....	98
Figura B.7. Rigidez inicial de agrietamiento, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de los muros ensayados. ....	98

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Características de los muros analizados. ....	39
Tabla 3.2. Resistencia máxima fuera del plano. ....	47
Tabla 3.3. Dimensiones de MC, relación de aspecto y carga axial. ....	50
Tabla 4.1. Resistencia a compresión axial del concreto. ....	62
Tabla 4.2. Dimensiones y resistencia a compresión axial de la piezas de mampostería. ....	63
Tabla 4.3. Resistencia a compresión axial y modulo de elasticidad de pilas de mampostería. ....	64
Tabla 4.4. Resistencia a tensión por flexión perpendicular y paralela de la mampostería. ....	64

Tabla 4.5. Resistencia de agrietamiento ( $V_{ae}$ ), máxima ( $V_{me}$ ) fuera del plano de los muros y sus correspondientes distorsiones. ....	72
Tabla 4.6. Resistencia de agrietamiento ( $V_{aa}$ ) y máxima ( $V_{ma}$ ) fuera del plano de los muros, obtenidas con los modelos analíticos.....	73
Tabla 5.1. Resistencia de agrietamiento ( $V_{aa}$ ) fuera del plano de los muros, determinada con el factor de reducción de longitud.....	81
Tabla 5.2. Resistencia de agrietamiento experimental y analítica.....	81
Tabla 5.3. Resistencia máxima experimental y analítica.....	82
Tabla A.1. Granulometría de la arena. ....	90
Tabla A.2. Resistencia a compresión axial del concreto .....	91
Tabla B.1. Rigidez inicial de agrietamiento, a la carga máxima y de descarga. ....	94
Tabla B.2. Rigidez inicial de agrietamiento, a la carga máxima y de descarga. ....	95
Tabla B.3. Rigidez inicial de agrietamiento, a la carga máxima y de descarga. ....	96

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Generalidades

Los muros de mampostería son uno de los sistemas estructurales más utilizados para la edificación. En México se utilizan principalmente para la construcción de viviendas, escuelas, naves industriales, bardas, etc. El sistema estructural utilizado generalmente para la construcción de vivienda consiste en muros de mampostería y losas de concreto. En dicho sistema, los muros de mampostería deben resistir tanto cargas gravitacionales como cargas laterales generadas por acciones accidentales como el sismo y el viento. Las cargas laterales pueden actuar sobre los muros de manera paralela o perpendicular a su plano principal. Cuando las cargas actúan de forma perpendicular se dice que el comportamiento es fuera del plano. Dicho comportamiento está relacionado principalmente con dos tipos de cargas: una carga distribuida que actúa sobre la superficie total del muro o una carga concentrada en la parte superior del muro. En el primer caso, la carga distribuida puede estar relacionada con las fuerzas de inercia generadas por el peso propio del muro durante un sismo, o a una presión uniforme debida a la acción del viento. En el segundo caso, la carga concentrada se relaciona con la fuerza de inercia generada por el peso de una losa de concreto durante un sismo.

Por otro lado, los muros de mampostería pueden clasificarse en general en no reforzados, reforzados, confinados y diafragma. Los muros no reforzados (MNR) son aquellos que no tienen ningún tipo de refuerzo, y en caso de tenerlo, no cumple con los requisitos mínimos establecidos en los reglamentos correspondientes. Los muros reforzados (MR) son aquellos que tienen acero de refuerzo vertical y horizontal, distribuido uniformemente. Este refuerzo debe cumplir con los criterios mínimos establecidos en los reglamentos correspondientes. Los muros confinados (MC) son aquellos que tienen en su periferia elementos de concreto reforzado. Estos elementos se construyen después del muro de mampostería. La dimensión de la

sección transversal de los elementos confinantes es, en general, igual al espesor del muro. Los muros diafragma (MD) son aquellos que se encuentran entre marcos de concreto reforzado o acero estructural. Las dimensiones de la sección transversal de las trabes y columnas de dichos marcos son mayores que el espesor del muro. Para este caso, los marcos se construyen primero y posteriormente el muro. Debido a dicho procedimiento constructivo, puede no haber contacto entre los marcos y el muro. En gran parte de México para la construcción de viviendas se utilizan principalmente MC debido a la sencillez de su proceso constructivo y bajo costo.

Para el diseño de los muros de mampostería, sujetos a cargas fuera del plano, en las Normas Técnicas Complementarias de Mampostería (NTCM, GDF 2004) se especifica que los esfuerzos de tensión generados en los muros, deben ser resistidos exclusivamente por acero de refuerzo. Para el caso de un MC, el acero de refuerzo se encuentra en los elementos confinantes. Sin embargo se desconoce el comportamiento del panel de mampostería. Adicionalmente, se ha observado que durante diversos sismos, los MC presentan por la acción de cargas fuera del plano grietas horizontales, grietas en la unión de la mampostería y los elementos confinantes, así como, el colapso parcial o total de los muros principalmente con aberturas (Jagadish et al. 2003, Kaushik et al. 2006, Sepúlveda et al. 2008 y Brzec et al. 2010). Por lo anterior, es importante evaluar el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada debido a que su daño o colapso durante sismos puede causar pérdidas humanas y económicas.

Se han desarrollado trabajos de investigación sobre el comportamiento fuera del plano de MC (Navarrete 2009, López 2010, Moreno 2010, Polanco 2011, Varela et. al. 2011, 2012a y 2012b y Moreno et. al 2014). En estos trabajos, se ensayaron muros sujetos a una presión uniforme. Dicha presión puede simular tanto la acción del viento como las fuerzas de inercia generadas por el peso propio del muro durante un sismo. Sin embargo, no existen trabajos sobre el comportamiento fuera de plano de MC sujetos a cargas concentradas en el extremo superior, simulando las fuerzas de inercia generadas por el peso de las losas de concreto durante un sismo. El

estudio de MC sujetos a este tipo de carga complementará el conocimiento del comportamiento fuera del plano.

## **1.2 Objetivo general**

Evaluar el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada sujetos a combinaciones de cargas axiales y cargas laterales concentradas en el extremo superior del muro.

## **1.3 Objetivos particulares**

Los objetivos particulares de este trabajo son:

- Desarrollar modelos analíticos para determinar la resistencia de agrietamiento fuera del plano y la resistencia fuera del plano de MC, sujetos a cargas laterales concentradas en el extremo superior.
- Determinar mediante ensayos en laboratorio, el comportamiento fuera del plano de MC, sujetos a cargas laterales concentradas en el extremo superior.
- Determinar la influencia de la carga axial y la relación de aspecto en el comportamiento fuera del plano de MC, sujetos a cargas laterales concentradas en el extremo superior.
- Calibrar los modelos analíticos con base en el análisis de los resultados obtenidos de forma experimental.

## **1.4 Alcance de la tesis**

En este trabajo se evaluó el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada, sujetos a cargas sísmicas. Específicamente, cargas laterales concentradas en el extremo superior. El trabajo se limita a estudiar muros de mampostería confinada con diferente relación de aspecto, y diferente magnitud de la carga axial. Experimentalmente, se ensayaron cinco muros a escala natural

sujetos a combinaciones de carga axial y cargas laterales concentradas. En la parte analítica se desarrollaron modelos para determinar la resistencia de agrietamiento fuera del plano y la resistencia fuera del plano de MC. Adicionalmente, se propone un modelo analítico tri-lineal para representar el comportamiento fuera del plano de MC.

## **1.5 Organización de la tesis**

En el Capítulo 1 se presentan las generalidades, los objetivos y el alcance de la tesis. En el Capítulo 2 se presenta el análisis y revisión de la literatura sobre el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería sujetos a cargas sísmicas. Se presentan los principales daños observados en MC durante diversos sismos, así como trabajos experimentales o analíticos sobre el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería. En el Capítulo 3 se presenta el desarrollo de modelos analíticos para determinar la resistencia de agrietamiento fuera del plano y resistencia fuera del plano de MC, así como, un análisis de sensibilidad para determinar el efecto de las variables que influyen en la resistencia fuera del plano MC. Adicionalmente, se presenta la metodología para la obtención de las propiedades básicas de los materiales, el diseño y construcción de los muros ensayados, el diseño de los sistemas de carga e instrumentación y el protocolo de carga utilizado durante los ensayos. En el Capítulo 4 se presentan las propiedades básicas de los materiales, los resultados obtenidos del ensayo de los muros, así como, los resultados obtenidos con los modelos analíticos desarrollados. En el Capítulo 5 se presenta la discusión de los resultados obtenidos en los ensayos de los muros, se comparan con los correspondientes resultados analíticos, y finalmente se propone un modelo para representar el comportamiento de los muros ensayados. En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y las recomendaciones finales del trabajo.

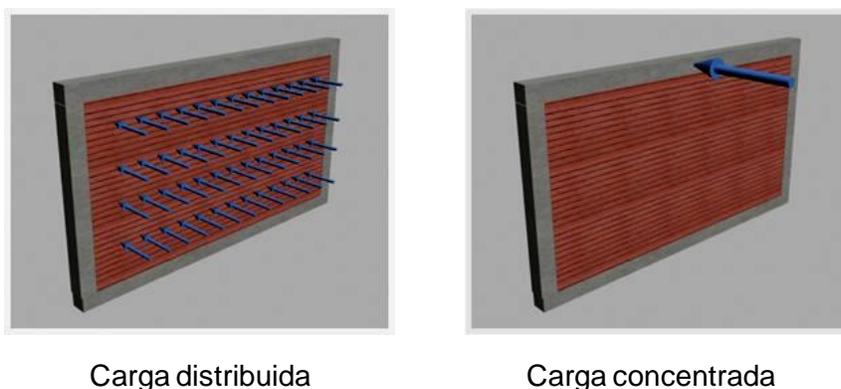
## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES

Se realizó una revisión de la literatura sobre el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería sujetos a cargas sísmicas. En la primera parte se presentan los tipos de carga que pueden generar el comportamiento fuera del plano de los muros de mampostería. En la segunda parte de la revisión se presenta una descripción de los principales daños observados en MC durante diversos sismos, debido al comportamiento fuera del plano. En la tercera parte se presentan trabajos experimentales o analíticos sobre el comportamiento fuera del plano de MR, MC y MD. Por último, se presenta el análisis de la revisión de la literatura.

#### 2.1 Cargas sísmicas fuera del plano que actúan sobre muros

El comportamiento sísmico fuera del plano de muros de mampostería en una vivienda está relacionado principalmente con dos tipos de carga: (1) una carga distribuida que actúa sobre la superficie total del muro o (2) una carga concentrada que actúa en la parte superior del muro, Figura 2.1. La primer carga puede estar relacionada con las fuerzas de inercia generadas por el peso propio del muro durante un sismo, o a una presión uniforme debida a la acción del viento. La segunda carga se relaciona con la fuerza de inercia generada por el peso de las losas o sistemas de piso durante un sismo.



**Figura 2.1 Cargas fuera del plano.**

## **2.2 Daños observados en MC durante sismos**

Jagadish et al. (2003) reportan los daños observados en un edificio de dos niveles durante el sismo de Bhuj en la India. El edificio fue construido a base de MC. Durante el sismo, el edificio presentó un comportamiento de piso suave en el nivel inferior. Este comportamiento provocó el incremento de desplazamientos fuera del plano en los MC. Debido a dichos desplazamientos, se presentaron grietas horizontales en el panel de mampostería de los MC.

Kaushik et al. (2006) reportan los daños observados durante el sismo de Sikkim en India en edificios construidos a base de MC. Debido a la acción fuera del plano en los muros, se reportaron grietas horizontales y verticales en la unión de la mampostería y los elementos confinantes. Adicionalmente, se observaron grietas horizontales en los muros y principalmente colapsos parciales en muros con aberturas. En algunos edificios se presentó un comportamiento de piso suave en el nivel inferior, provocando en los muros, mayores desplazamientos fuera de su plano y agrietamientos horizontales.

Sepúlveda et al. (2008) reportan los daños observados durante el sismo de Las Melosas en Chile en edificios a base de MC y edificios a base de MNR con columnas de concreto en los extremos. En el primer caso se reportaron grietas en la unión de la mampostería y los elementos confinantes debido a la acción fuera del plano. En el segundo caso, se presentaron colapsos parciales o totales fuera del plano de los muros, así como, grietas verticales en la unión de la mampostería y las columnas.

Brzec et al. (2010), reportan los daños observados en edificios de MC durante el sismo de Maule en Chile. Se reportaron daños en edificios de 3 y 4 niveles. Debido a la acción fuera del plano, se observaron grietas horizontales y verticales en la unión de la mampostería y los elementos confinantes. Adicionalmente se presentaron grietas horizontales en los muros. Se presentó un comportamiento de piso suave en algunos edificios lo cual causó el colapso de algunos muros.

## **2.3 Trabajos experimentales o analíticos sobre el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería**

### **2.3.1 Muros reforzados.**

Zhang et al. (1999) estudiaron 3 MR sujetos a cargas sísmicas fuera del plano. Los muros se construyeron con bloques huecos de concreto. Las dimensiones de los muros fueron 2.4 m de altura y 9 m de longitud. Los muros fueron reforzados con acero vertical y horizontal. Las celdas que contenían el acero de refuerzo vertical fueron las únicas rellenas con mortero. Dos de los muros fueron construidos con aberturas. Los muros tenían apoyos en el borde inferior y en los bordes laterales. Se aplicó a los muros una presión uniforme mediante bolsas de aire colocadas en ambas caras para simular la acción reversible del sismo. La variable de estudio fue la localización y el tamaño de las aberturas. Durante las pruebas se observaron grietas horizontales en la parte inferior del muro, así como grietas diagonales que se extienden de la parte superior del muro a las esquinas inferiores del mismo. En la relación carga – desplazamiento obtenida, se observa que el comportamiento del muro se puede dividir en dos etapas. La primera se caracteriza por un comportamiento elástico lineal hasta la fluencia del acero de refuerzo. Durante la segunda etapa se observa un comportamiento no lineal. En esta etapa la rigidez del muro se degrada, sin embargo la resistencia fuera del plano sigue incrementándose. La prueba finalizó cuando el desplazamiento fuera del plano, medido al centro del muro en el extremo superior, fue igual al 7% de la altura del muro. En la parte analítica, se determinó la resistencia máxima y los desplazamientos fuera del plano del muro. La resistencia se determinó utilizando un modelo analítico basado en el método de líneas de fluencia (LF). Los desplazamientos se determinaron utilizando una ecuación desarrollada por Slizard (1974). Se compararon los resultados obtenidos de forma analítica y experimental. Se concluyó que el modelo de LF predice la carga de falla sólo para los muros sin aberturas. Los desplazamientos obtenidos analíticamente son menores a los observados de forma experimental. Por otra parte, se concluyó que la posición y tamaño de las aberturas influyen de forma significativa en la resistencia de MR.

Da Porto et al. (2010a) estudiaron 2 estructuras a base de MR sujetas a cargas laterales fuera del plano. Cada estructura fue formada por dos MR y una losa simplemente apoyada en la parte superior. Los MR se construyeron con tabiques de arcilla extruida. La longitud de los muros fue de 2 m y la altura de 6 m. Los muros se reforzaron de forma uniforme con acero vertical y horizontal. En la primera estructura se colocó acero de refuerzo vertical mínimo. En la segunda estructura se colocó el doble del acero de refuerzo vertical mínimo. La carga fuera del plano fue aplicada mediante un actuador hidráulico en la parte superior de la estructura. Adicionalmente se aplicó una carga axial. Durante las pruebas se observaron 3 eventos principales. El primero fue la aparición de la primera grieta horizontal entre la mampostería y las juntas de mortero, generalmente se presentó en las primeras 3 hiladas del muro. El segundo evento fue la carga máxima, caracterizada por la fluencia del acero de refuerzo. Entre el primer agrietamiento y la carga máxima, se observaron un mayor número de grietas horizontales. El último evento observado fue el desplazamiento máximo, relacionado al 15 % de degradación de la carga máxima. Entre la carga máxima y el desplazamiento máximo, se observaron nuevas grietas horizontales y el aplastamiento de algunas piezas de mampostería. El patrón de agrietamiento final está formado por grietas horizontales en las juntas de mortero a partir de la primera hilada hasta la altura media del muro. Se observó que la rigidez después el primer agrietamiento, la resistencia máxima y los desplazamientos máximos fueron mayores para la estructura con mayor cantidad de acero de refuerzo.

Da Porto et al. (2010b) desarrollaron un modelo analítico para determinar el comportamiento de MR sujetos a cargas laterales fuera del plano. El modelo se basa en el método de elementos finitos (MEF). Se considera un comportamiento no lineal de la mampostería. Se modelaron las estructuras descritas en Da Porto (2010a). Los MR se modelaron mediante elementos tipo viga. Cada elemento representa una hilada del MR. Con el modelo analítico se obtuvo la relación carga desplazamiento de las estructuras. Dicha relación fue comparada con las obtenidas experimentalmente (Da Porto et al. 2010a). Se concluyó que el modelo predice el

primer agrietamiento de forma aproximada. Las cargas máximas obtenidas por el modelo analítico presentan errores entre 1.8 y 4.4 %, en comparación con los resultados experimentales. Los desplazamientos obtenidos con el modelo analítico presentan errores entre 2.5 y 3 %. Por otra parte, con el modelo analítico se realizó un análisis de sensibilidad. Las variables consideradas fueron la carga axial, la relación de esbeltez y el refuerzo vertical. Con base en este análisis se concluyó que la resistencia de agrietamiento aumenta si aumenta la carga axial. La resistencia máxima del muro aumenta si aumenta la cantidad de acero de refuerzo vertical o disminuye la relación de esbeltez.

### **2.3.2 Muros confinados.**

Kazemi et al. (2010) estudiaron un edificio construido a base de MC sujeto a cargas sísmicas. Los MC se construyeron con tabiques de arcilla y elementos confinantes de mortero reforzado. Las dimensiones de los muros fueron 3.4 m de longitud y 2.2 m de altura. Tres de los muros se construyeron con aberturas. La losa del edificio se construyó a base de tabiques de arcilla y fue cubierta con 12 cm de concreto, para simular masa adicional. Se aplicaron dos tipos de excitación mediante una mesa vibradora. La primera corresponde a tres sismos escalados. En la segunda se aplicaron desplazamientos con incrementos de aceleración hasta llevar al edificio a la resonancia. Durante la prueba, se observaron grietas en las esquinas de las aberturas, en la unión del techo y el muro, y en la unión de la mampostería y los elementos confinantes. Adicionalmente, durante el segundo tipo de excitación, se observó el colapso de los muros con aberturas y la separación del techo y los muros. Analíticamente, se realizó un modelo basado en el MEF. La mampostería se modeló como un material homogéneo y continuo. Se utilizaron elementos sólidos. Se realizó un análisis dinámico lineal y un estático no lineal. Con el modelo analítico, se obtuvo la localización de las zonas más débiles del edificio, así como el patrón de agrietamiento de los muros.

Varela et al. (2011) estudiaron 6 MC sujetos a cargas fuera del plano. Los muros se construyeron con bloques huecos de concreto. Las dimensiones de los muros fueron de 3.6 m de longitud, 1.76 m de altura y 150 mm de espesor. La variable de estudio fue la condición de apoyo. Se ensayaron muros con apoyo en 3 y 4 bordes. Las cargas se aplicaron con una bolsa de aire. Durante la prueba se observó que el patrón de agrietamiento de los muros con 3 y 4 apoyos fue similar. Dicho patrón consistió en una grieta horizontal al centro y grietas diagonales a 45° del centro hacia las esquinas del muro. El patrón de agrietamiento dividió al muro en segmentos. La falla estuvo asociada a la excesiva rotación de dichos segmentos (inestabilidad). Para determinar la resistencia de agrietamiento, se desarrolló un modelo basado en el MEF. La resistencia máxima se determinó mediante cuatro modelos analíticos. Dichos modelos se basaron en los métodos de líneas de fluencia (LF), líneas de falla (LFa), puntal de compresión (PC) (Abrams, 1996) y puntal de compresión modificado (PCM). El modelo de PC se basa en la formación de puntales de compresión a lo largo de los segmentos verticales del muro. Dicho modelo considera que la resistencia del muro se alcanza cuando se aplasta la mampostería. La resistencia máxima fuera del plano se obtiene del equilibrio de las fuerzas horizontales aplicadas en el muro y las componentes horizontales de los puntales de compresión. Al igual que el PC, el modelo de PCM se basa en la formación de puntales de compresión. Adicionalmente, en este modelo se incluye la rigidez de los elementos confinantes mediante la colocación de un resorte en el extremo superior del muro. En el modelo se considera que el muro puede tener dos tipos de falla; la inestabilidad de los segmentos del muro y aplastamiento de la mampostería. El modelo basado en el MEF predice el primer agrietamiento del muro. El modelo de LFa subestima la resistencia máxima del muro, mientras que el modelo de PC la sobrestima. Los modelos de LF y PCM predicen la resistencia máxima del muro. Adicionalmente el modelo de PCM predice el tipo de falla.

Varela et al. (2012a) ensayaron 6 MC sujetos a cargas fuera del plano. Los muros se construyeron con bloques huecos de concreto con espesores de 12 cm y 15 cm. Las dimensiones de los muros fueron 2.72 m de altura y longitudes de 3.77 y 2.95. Las

variables de estudio fueron la relación de aspecto, la relación de esbeltez y la rigidez en el plano de los elementos confinantes. Las cargas fuera del plano se aplicaron mediante bolsas de aire. Los muros con una relación de aspecto de 0.75 presentaron un patrón de agrietamiento que consistió en una grieta horizontal al centro del muro y grietas diagonales a  $45^\circ$  de los extremos de dicha grieta hacia las esquinas del muro. Los muros con relación de aspecto 1.0, presentaron grietas diagonales del centro del muro a las esquinas formando una "X". Se observaron dos tipos de falla, la inestabilidad de los segmentos y el aplastamiento de la mampostería. La primera se asocia con los muros con elementos confinantes de menor rigidez, mientras que la segunda con los de mayor rigidez. La resistencia máxima fue mayor para los muros con elementos confinantes de mayor rigidez, así como para los muros con una relación de aspecto menor. Se utilizó un modelo basado en MEF para determinar la resistencia de agrietamiento. La resistencia máxima fuera del plano se determinó utilizando modelos basados en los métodos de LF, LFa, PC y punta y resorte (PyR). El modelo basado en el MEF predice la resistencia de agrietamiento del muro. Los modelos de LF y LFa subestiman la resistencia máxima del muro, mientras que el modelo de PC la sobrestima. El modelo de PyR predice la resistencia máxima del muro así como el tipo de falla.

Varela et al. (2012b) ensayaron 3 MC sujetos a cargas fuera del plano. Los muros se construyeron con bloques huecos de concreto. Las dimensiones de los muros fueron de 3.6 m de longitud y 2.8 m de altura. Las cargas fuera del plano se aplicaron mediante bolsas de aire. Adicionalmente, se aplicaron cargas axiales a dos de los muros. La magnitud de la carga axial fue de 0.065 y 0.198 MPa. Se observó un patrón de agrietamiento similar al reportado para los muros con relación de aspecto de 0.75 en Varela (2012a). Se observó que la resistencia de agrietamiento y la resistencia máxima se incrementan si se aumenta la carga axial. El tipo de falla de los muros con carga axial estuvo asociada al aplastamiento de la mampostería. Se utilizó un modelo de EF para determinar la resistencia de agrietamiento. Con dicho modelo se obtienen resistencias al agrietamiento similares a las obtenidas experimentalmente. Para determinar la resistencia máxima fuera del plano de los

muros se utilizaron modelos basados en los métodos de LF, LFa y PyR. Los modelos de LF y LFa subestiman la resistencia del muro, mientras que el PC la sobrestima. El modelo de PyR predice la resistencia del muro. Adicionalmente el modelo de PyR predice el tipo de falla.

Moreno et al. (2014) desarrollaron el método del puntal bidireccional para determinar la resistencia fuera del plano de MC sujetos a cargas uniformes. El método se basa en la formación de un mecanismo de arco en dos direcciones. En el método se asume que después de formarse el patrón de agrietamiento final, el muro se divide en segmentos. Dichos segmentos al rotar generan puntales de compresión. La fuerza de los puntales de compresión se transfiere de forma excéntrica a los elementos confinantes. La resistencia fuera del plano se obtiene del equilibrio entre las cargas aplicadas y las componentes fuera del plano de los puntales de compresión. El método considera los efectos de flexión, torsión, así como la variación de los desplazamientos a lo largo de los elementos confinantes. Los elementos confinantes son modelados por medio de un número  $n$  de elementos tipo marco unidos por nodos con 6 grados de libertad. El método consiste en un proceso iterativo para obtener la componente fuera del plano de los puntales de compresión dado un desplazamiento fuera del plano. Para cada desplazamiento dado se obtiene un valor de la resistencia fuera del plano ( $W$ ). La resistencia fuera del plano del muro se obtiene cuando se alcanza el valor máximo de  $W$ , o cuando la magnitud de los puntales de compresión es igual a la resistencia a compresión axial de la mampostería ( $f_m$ ). En el primer caso, la falla del muro está relacionada con la inestabilidad de los segmentos del muro, y en el segundo caso la falla está relacionada con el aplastamiento de la mampostería. Se compararon los resultados analíticos y experimentales obtenidos por Varela et al. 2012a con los obtenidos con el método del puntal bidireccional. Concluyen que la resistencia fuera del plano de MC puede ser determinada usando el método del puntal bidireccional. Con dicho método se obtiene una mejor precisión comparando con los resultados obtenidos con el método del PyR.

### 2.3.3 Muros diafragma.

Abrams et al. (1996) estudiaron 8 MD con MNR sujetos a cargas fuera del plano. Los muros fueron construidos con bloques de concreto y tabiques de arcilla con diferentes espesores. Las dimensiones de los muros fueron de 1.6 m de altura y 2.4 m de longitud. Los muros fueron construidos con tres tipos de mortero. Se consideraron relaciones de esbeltez de 9, 11, 17, 18 y 34. La carga fue aplicada mediante bolsas de aire. Previo a la aplicación de la carga los muros fueron sujetos a desplazamientos laterales en el plano, con la finalidad de agrietar el muro. El patrón de agrietamiento debido a las cargas fuera del plano, consta de una grieta horizontal al centro del muro y grietas diagonales a  $45^\circ$  de los extremos de dicha grieta hacia las esquinas del muro. Se observó que la resistencia del muro es mayor para aquellos con una relación de esbeltez menor. La resistencia de los muros aumenta si la resistencia a compresión de la mampostería aumenta. Analíticamente, se desarrollo un modelo basado en el método de PC para determinar la resistencia fuera del plano de los muros. Con dicho modelo se predijo la resistencia máxima de algunos de los muros ensayados.

Klingner et al. (1996) ensayaron 2 estructuras sujetas a cargas sísmicas. Las estructuras estaban formadas por dos MD con MNR, conectados en la parte superior a una losa de concreto. Los muros fueron construidos con tabiques de arcilla. La altura de los muros fue de 83 cm y un espesor de 4.5 cm. Se construyeron dos tipos de marcos, el primero denominado “débil” que cumple con las especificaciones del reglamento del ACI (1956), y el segundo, denominado “fuerte” que cumple con las especificaciones del reglamento del ACI (1989). Las columnas de los marcos fueron post tensadas para simular la carga de niveles superiores. Las estructuras fueron ensayadas en una mesa vibradora. Durante la prueba se observó un patrón de agrietamiento que consta de una grieta horizontal a la altura media del muro y grietas diagonales que se extienden desde las esquinas hacia la grieta horizontal. Los muros no fueron llevados a la falla, sin embargo resistieron fuerzas de inercia con una magnitud de 10 veces su peso propio. Se desarrolló un modelo analítico basado en la formación de puntales de compresión, para determinar la resistencia fuera del

plano de los muros. En el modelo se consideró la formación de puntales horizontales y verticales.

Tu et al. (2007) estudiaron 2 estructuras de dos niveles construidas a base de MD con MC sujetas a cargas sísmicas. Cada estructura consta de marcos de concreto y 4 MD de MC en cada nivel. Se aplicaron cargas laterales concentradas a la altura del entrepiso y techo. El patrón de agrietamiento observado para los muros fuera del plano, fueron grietas horizontales en la parte superior e inferior del muro. Se utilizó un modelo analítico basado en la formación de un puntal de compresión para obtener la resistencia de los MC. Dicha resistencia es directamente proporcional a la resistencia a compresión de la mampostería e inversamente proporcional a la relación de esbeltez del muro. Se obtuvo la resistencia de la estructura considerando la contribución de los MC. Se compararon los resultados experimentales y analíticos. Se observó que el modelo desarrollado, es muy conservador para una de las estructuras, mientras que predice de forma razonable para la otra.

Tu et al. (2010) estudiaron 4 estructuras sujetas a cargas sísmicas. Las estructuras estaban formadas por 2 MD de concreto reforzado. Los muros se conectaron en la parte superior con una losa de concreto. Los MD fueron construidos en su interior con MNR y MC. La longitud de los muros fue de 2.7 m y la altura de 2.8 m. Las variables de estudio fueron la relación de esbeltez y la condición de frontera entre la mampostería y el marco de concreto reforzado. Las estructuras fueron ensayadas en una mesa vibradora. Se aplicaron inicialmente ciclos de desplazamientos con aceleraciones entre de 200 y 500 gal. Debido a que los muros no presentaron el daño esperado, se aplicaron ciclos de desplazamientos con cambios graduales de frecuencia, con el fin de llegar a la resonancia. Durante la prueba se observó que las columnas de los marcos controlan el modo de falla. Para las cuatro estructuras se observó el primer agrietamiento en la base de las columnas. El patrón de agrietamiento observado para los MD con MC fue de grietas horizontales en la parte superior e inferior del muro. Adicionalmente se observó el aplastamiento de piezas de mampostería en las esquinas superiores del muro. El patrón de agrietamiento

para los MD con MNR fue de grietas en la unión de la mampostería y el marco de concreto. Las grietas principales se presentaron en la parte inferior y superior del muro. Adicionalmente, se observó la separación del muro con respecto al marco de concreto, así como grietas horizontales a los  $\frac{3}{4}$  de altura del muro. Al aplicarse el segundo tipo de carga, se observó el colapso parcial de los MD con MNR. Analíticamente, se desarrolló un modelo basado en la formación de un puntal de compresión, para determinar la resistencia fuera del plano de los muros. Se compararon los resultados experimentales y analíticos. Se concluyó que el modelo analítico predice de forma conservadora la resistencia de los muros. Adicionalmente, se concluyó que la resistencia máxima aumenta si se disminuye la relación de esbeltez.

Chen et al. (2012) estudiaron 4 MD construidos con MNR y MC sujetos a cargas sísmicas. Los muros se construyeron con tabiques de arcilla. La longitud de los muros fue de 3.5 m y la altura de 3 m. Se aplicaron cargas laterales concentradas en la parte superior del muro. Adicionalmente se aplicó una carga axial. En la parte superior del muro se permitieron los desplazamientos fuera del plano, pero se restringieron las rotaciones. Por lo anterior, el muro presenta una deformación de curvatura doble. Las variables de estudio fueron la condición de frontera entre el marco y la mampostería y el refuerzo con fibras de carbono (CFRP). Se observó que la falla de los MD está controlada por las columnas del marco de concreto. En general el comportamiento de las columnas fue: el primer agrietamiento debido a flexión en la parte inferior de la columna, la fluencia del acero de refuerzo, agrietamiento por cortante en las columnas y el desprendimiento del recubrimiento de las columnas. El patrón de agrietamiento de los muros consistió de grietas horizontales en la parte superior e inferior del muro. Se observó que no existe diferencia significativa en las resistencias de MD con MC y MD con MNR. Se desarrolló un modelo analítico para determinar la resistencia fuera del plano de los muros y el desplazamiento máximo. En dicho modelo, el muro es considerado como una columna compuesta de concreto, mampostería y en su caso CFRP. Se

compararon los resultados experimentales y analíticos. Se concluye que el modelo predice la resistencia y los desplazamientos de forma confiable.

## **2.4 Análisis de la revisión de la literatura**

Con base en la revisión de la literatura se presenta un análisis del comportamiento fuera del plano de muros de mampostería sujetos a cargas sísmicas. Se describen los principales daños observados en MC durante diversos sismos, debido al comportamiento fuera del plano. Se describen las diferencias de comportamiento debido al tipo de carga que se actúa sobre el muro. Se presentan los principales modelos analíticos utilizados para determinar el comportamiento de los muros. Finalmente, se presentan las principales variables que influyen el comportamiento de los muros.

### **2.4.1 Daños observados en MC durante sismos**

Los principales daños observados en MC durante sismos, debido al comportamiento fuera del plano, fueron: (1) grietas horizontales y verticales entre las uniones de la mampostería y los elementos confinantes. (2) Grietas horizontales principalmente en las hiladas superiores e inferiores de los muros. (3) Colapso parcial o total de muros principalmente con aberturas. (4) Efecto de piso suave en algunos edificios. Este efecto generó un incremento en los desplazamientos fuera del plano, hasta alcanzar el colapso de algunos muros.

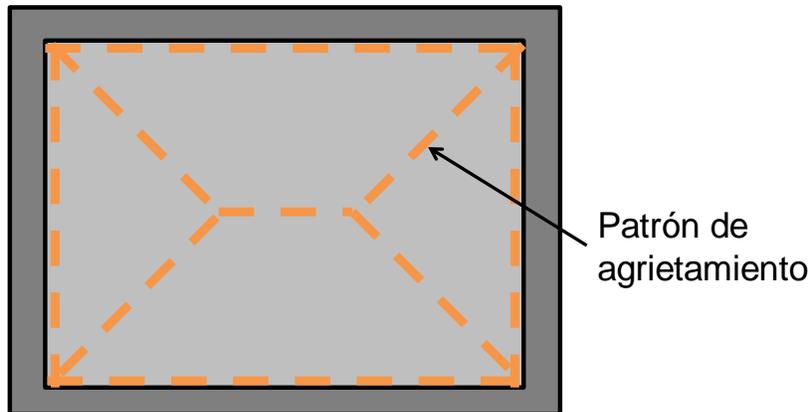
### **2.4.2 Comportamiento fuera del plano de muros de mampostería.**

El comportamiento fuera del plano de MC es diferente al de otros tipos de muros como MR o MD. La diferencia esta principalmente asociada con el refuerzo y procesos en la construcción. Por ejemplo, la diferencia entre MC y MD son las siguientes: los MC se encuentran rodeados de elementos flexibles de concreto reforzado, mientras que los MD se encuentran rodeados por marcos rígidos de concreto reforzado o acero. Adicionalmente, para los MD, el marco rígido se construye primero y después el panel de mampostería. Este tipo de construcción

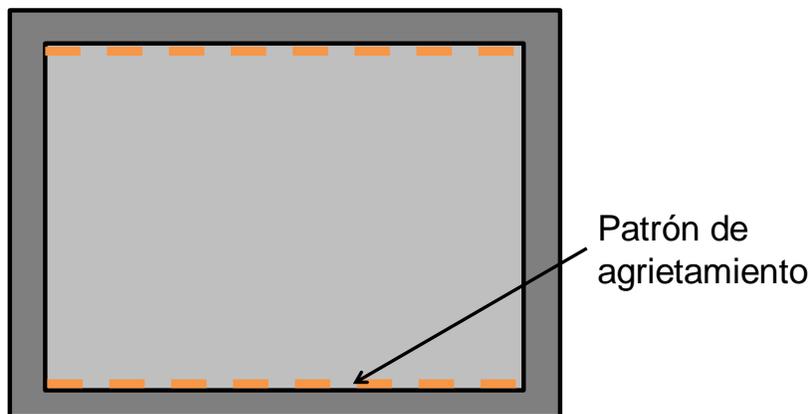
permite que exista una separación entre el panel de mampostería y el marco. Debido a esta separación, la carga axial se transfiere solo al marco rígido. Mientras que para MC la carga axial es transferida al panel de mampostería.

El comportamiento fuera del plano de MC puede dividirse en cuatro etapas. La primera se caracteriza por un comportamiento elástico lineal hasta la aparición del primer agrietamiento. Después de dicho agrietamiento se observa un comportamiento no lineal. En la segunda etapa se observa la formación de un patrón de agrietamiento que divide al muro en segmentos. En esta etapa se observa una degradación de la rigidez relacionada con la formación de dicho patrón. La tercera etapa termina cuando se alcanza la carga máxima. En esta etapa los segmentos del muro rotan creando un mecanismo de arco. Finalmente, en la cuarta etapa se observa una degradación de la resistencia hasta alcanzar la falla. Dicha falla se relaciona con la inestabilidad de los segmentos del muro o el aplastamiento de la mampostería.

El patrón de agrietamiento final de los muros de mampostería, depende del tipo de carga aplicada: (1) carga distribuida o (2) carga concentrada. Por ejemplo, para un muro rectangular sujeto a una carga distribuida, el patrón de agrietamiento está definido por grietas horizontales, verticales y diagonales como se presenta en la Figura 2.2 (Moreno-Herrera et al., 2014). Sin embargo, para un muro sujeto a cargas concentradas, el patrón de agrietamiento está definido por grietas horizontales en la parte inferior y superior del muro, Figura 2.3 (Tu et al. 2007, Tu et al. 2010 y Chen et al. 2012). Dicho patrón de agrietamiento es consistente con el observado en MC durante diversos sismos (Jagadish et al. 2003, Kaushik et al. 2006, Sepúlveda et al. 2008 y Brzec et al. 2010).

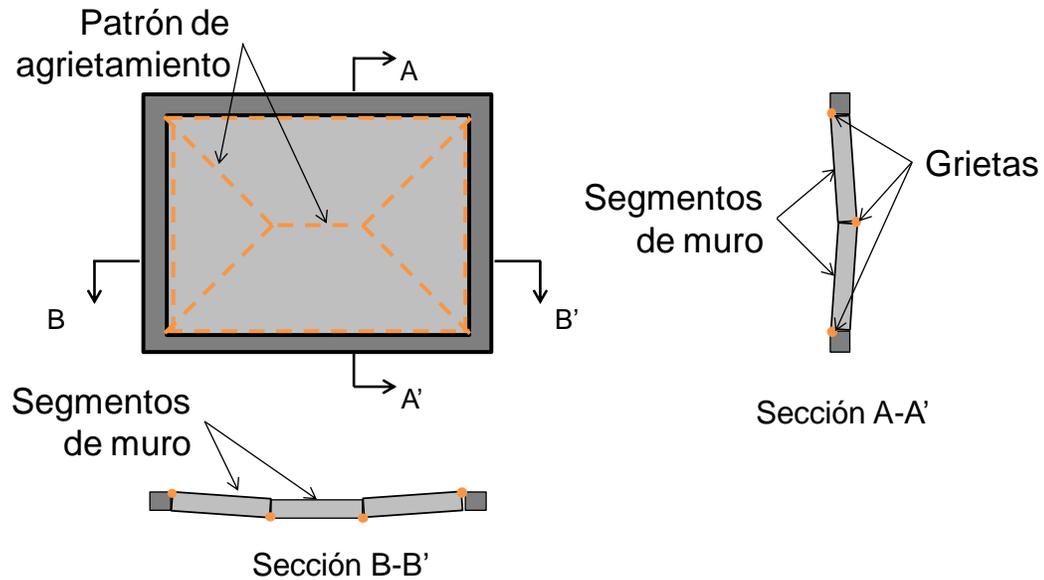


**Figura 2.2 Patrón de agrietamiento, muro sujeto a cargas distribuidas.**

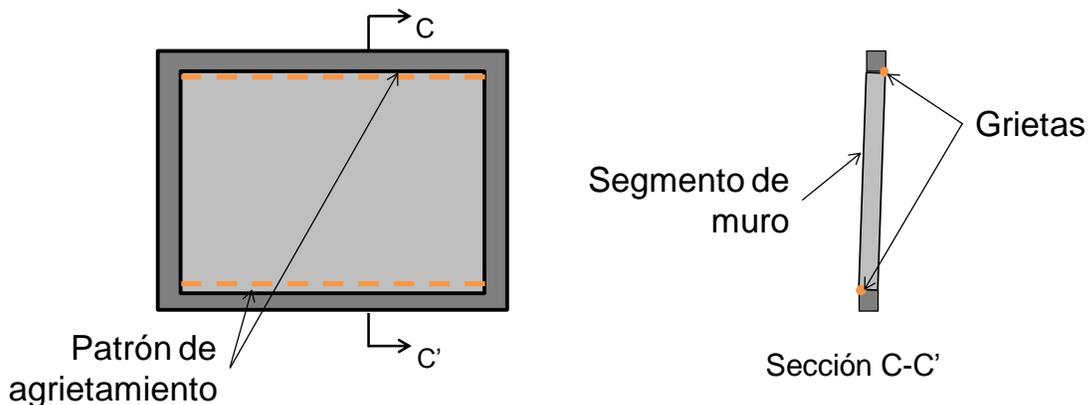


**Figura 2.3 Patrón de agrietamiento, muro sujeto a cargas concentradas.**

Ambos patrones de agrietamiento dividen al muro en segmentos. Dichos segmentos rotan generando un mecanismo de arco. Para cargas distribuidas, el muro se divide en al menos dos segmentos a lo largo de la longitud y altura del muro, Figura 2.4. Sin embargo, para cargas concentradas, solo hay un segmento a lo largo de la altura del muro, Figura 2.5. Lo anterior indica que en muros con carga distribuida se presenta el mecanismo de arco en dos direcciones, mientras que para cargas concentradas, solo se presenta el mecanismo de arco en una dirección.



**Figura 2.4 División del muro en segmentos, carga distribuida.**



**Figura 2.5 División del muro, carga concentrada.**

### 2.4.3 Modelos analíticos

El comportamiento fuera del plano de MC se puede definir por dos eventos importantes, la resistencia de agrietamiento y la resistencia fuera del plano. Para determinar la resistencia de agrietamiento se han utilizado modelos analíticos basados en el MEF (Da Porto et al. 2010a y 2010b, y Varela et al. 2011, 2012a y 2012b). Los muros son modelados con elementos tipo viga, placa o sólidos. Con

dichos modelos, en general se obtienen resistencias de agrietamiento similares a las observadas en pruebas experimentales.

Para determinar la resistencia fuera del plano, se han utilizado diferentes métodos analíticos. Por ejemplo, el método de líneas de fluencia ha sido utilizado para MR por Zhang et al. (2001) y para MC por Varela-Rivera et al. (2011) y Varela-Rivera et al. (2012a). Dicho método predice la resistencia fuera del plano para MR sin aberturas, mientras que para MC el método de líneas de fluencia subestima la resistencia fuera del plano. El método de líneas de falla ha sido utilizado para MC por Varela-Rivera et al. (2011) y Varela-Rivera et al. (2012a). Sin embargo, dicho método subestima la resistencia fuera del plano de los muros. El método del puntal de compresión ha sido utilizado para MD por Abrams et al. 1996, Klingner et al. 1996, Tu et al. 2007 y Tu et al. 2010, y para MC por Varela-Rivera et al. 2011 y Varela-Rivera et al. 2012a. Dicho método predice de forma conservadora la resistencia fuera del plano de MD, mientras que sobrestima la resistencia de MC. Finalmente, el método del puntal y el resorte y el método del puntal bidireccional han sido utilizados para MC por Varela-Rivera et al. 2011, Varela-Rivera et al. 2012a and 2012b y Moreno-Herrera et al. 2014. Ambos métodos predicen la resistencia fuera del plano, sin embargo, el método del puntal bidireccional considera aspectos que no son considerados en el método del puntal y el resorte. Dichos aspectos son: (1) la acción en dos direcciones del mecanismo de arco, (2) el efecto de torsión sobre los elementos confinantes y (3) la variación de la rigidez a lo largo de los elementos confinantes.

Basado en la comparación entre la resistencia fuera del plano obtenida de forma experimental y la obtenida por medio de los métodos analíticos realizada por diferentes autores (Varela-Rivera et al. y Moreno-Herrera et al.), se concluye que el método del puntal bidireccional predice con mayor precisión la resistencia fuera del plano de MC.

#### **2.4.4 Principales variables que influyen en el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería sujetos a cargas sísmicas.**

Las principales variables que influyen en el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería sujetos a cargas sísmicas son: (1) El tipo de carga, (2) las condiciones de apoyo, (3) la relación de aspecto, (4) la relación de esbeltez, (5) la carga axial, (6) las aberturas, (7) el tipo de pieza, (8) la rigidez en el plano de los elementos confinantes, y (9) el daño previo por acción en el plano.

La mayoría de las variables antes mencionadas han sido estudiadas en MR, MC y MD bajo la acción de una mesa vibradora o la aplicación de una presión uniforme. Sin embargo, existen pocos estudios para muros de mampostería bajo la acción de cargas concentradas en el extremo superior. Los MC no han sido estudiados bajo la acción de este tipo de cargas, siendo el tipo de muro más utilizado para la edificación en México.

## **CAPÍTULO 3**

### **METODOLOGÍA**

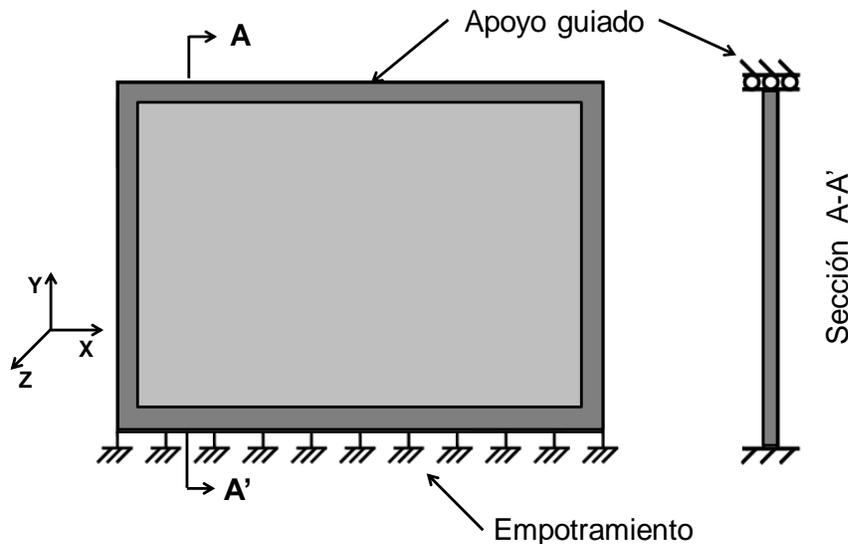
Las actividades realizadas para determinar el comportamiento fuera del plano de MC, fueron: (1) desarrollo de modelos analíticos, (2) obtención de las propiedades básicas de los materiales, (3) diseño de muros (4) construcción de muros, (5) diseño de sistema de carga e instrumentación, y (6) ensaye de los muros.

#### **3.1 Desarrollo de modelos analíticos**

Se desarrollaron modelos analíticos para determinar la resistencia de agrietamiento fuera del plano y la resistencia fuera del plano de MC sujetos a cargas concentradas en el extremo superior. La primera fue determinada utilizando los principios de la mecánica de materiales. Por otra parte, la resistencia fuera del plano fue calculada como la suma de la contribución de la resistencia del panel de mampostería y la resistencia de los elementos confinantes. La primera fue determinada usando el método del puntal unidireccional propuesto en este trabajo, el cual es una versión modificada del método del puntal bidireccional (Moreno-Herrera, 2014). La segunda fue calculada mediante un análisis plástico. En esta sección, se presenta la descripción de los modelos desarrollados, así como los aspectos que fueron considerados durante su desarrollo.

##### **3.1.1 Resistencia de agrietamiento**

Para obtener la resistencia de agrietamiento, se consideró un muro con las condiciones de apoyo como se presenta en la Figura 3.1. Se consideró un apoyo empotrado en la parte inferior y un apoyo guiado en la parte superior. El apoyo guiado restringe la rotación alrededor del eje X (Figura 3.1).



**Figura 3.1 Condiciones de apoyo.**

La resistencia de agrietamiento fuera del plano ( $V_{aa}$ ) fue calculada con la ecuación 3.1. En dicha ecuación  $M_{agr}$  es el momento resistente de agrietamiento calculado con la Ecuación 3.2,  $h'$  es la altura del panel de mampostería y  $L$  es la longitud del muro. En la ecuación 3.2,  $f_{tpe}$  es la resistencia a tensión por flexión perpendicular a las juntas horizontales de la mampostería,  $W_{cd}$  es el peso de la cadena superior por unidad de longitud,  $P$  es la carga axial por unidad de longitud sobre el muro,  $A$  es el área y  $S$  es el módulo de sección calculados utilizando la sección gruesa del muro.

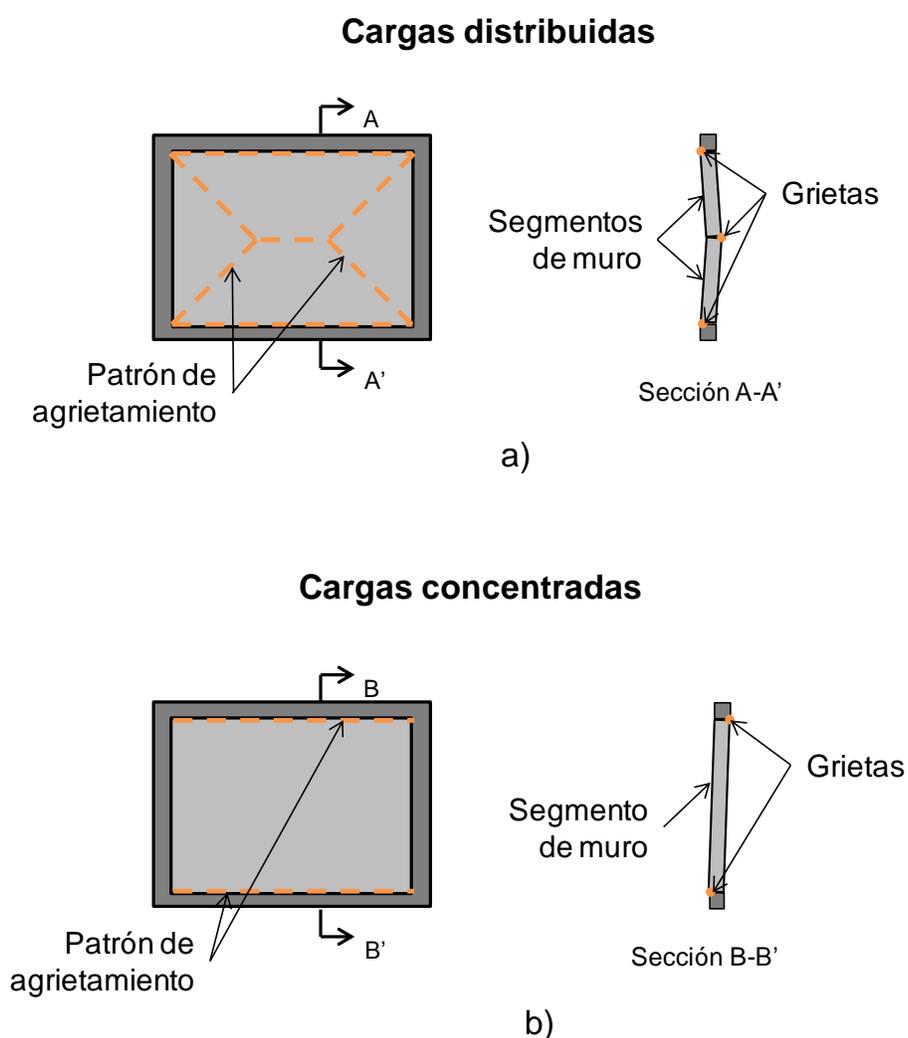
$$V_{aa} = \frac{2 \cdot M_{agr}}{h'} \cdot L \quad 3.1$$

$$M_{agr} = \left( f_{tpe} + \frac{W_{cd} + P}{A} \right) \cdot S \quad 3.2$$

### 3.1.2 Resistencia máxima

Para la obtención de la resistencia máxima fuera del plano de los MC, se calculó de manera independiente la contribución del panel de mampostería y la contribución de los elementos confinantes. Para determinar la primera se utilizó el método del puntal unidireccional, el cual es una versión modificada del método del puntal bidireccional (Moreno-Herrera, 2014). El método original fue desarrollado para muros de

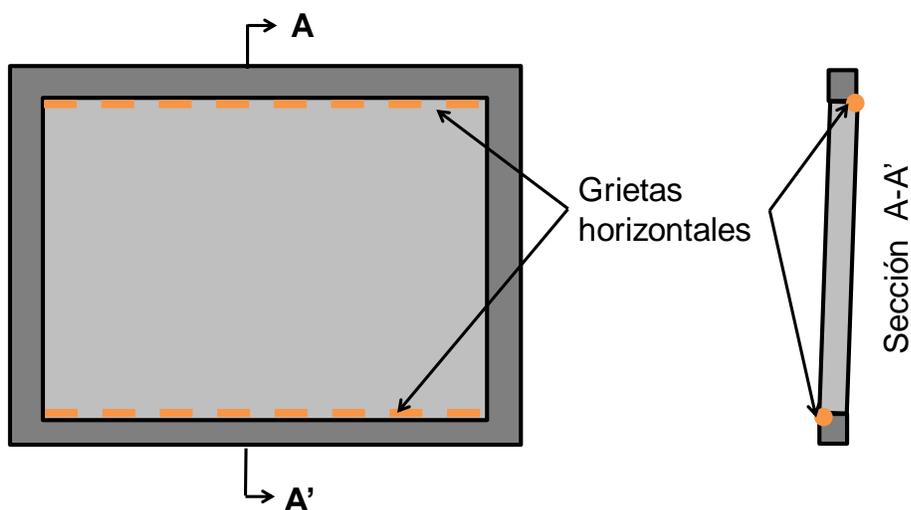
mampostería confinada sujetos a una carga distribuida. Se basa en la formación de un mecanismo de arco en dos direcciones, debido al patrón de agrietamiento considerado en el muro (Figura 3.2a ). En el caso de un muro con una carga concentrada en el extremo superior se espera un patrón de agrietamiento que consta de grietas horizontales en la parte inferior y superior del muro, así como, la formación de un mecanismo de arco en una sola dirección (Figura 3.2b). El método del puntal unidireccional considera el patrón de agrietamiento correspondiente y la formación de del mecanismo de arco en una dirección.



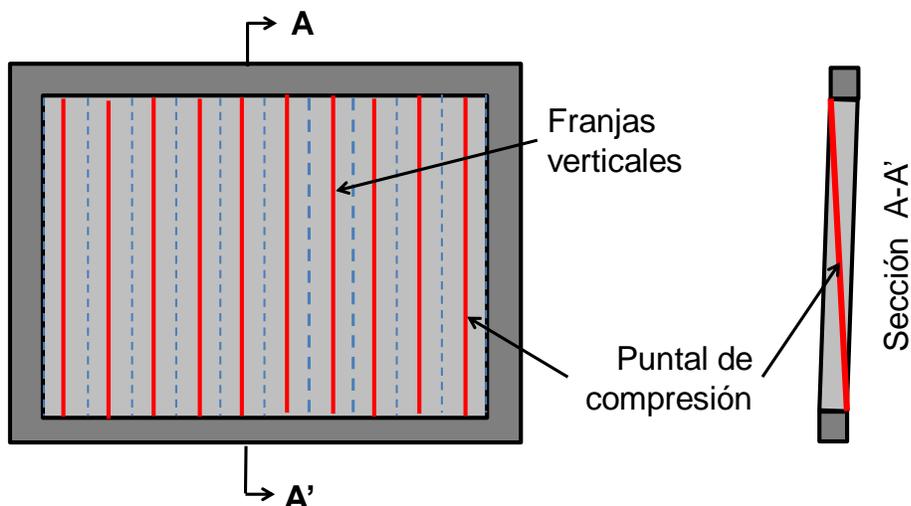
**Figura 3.2 Método del puntal bidireccional y método del puntal unidireccional.**

El procedimiento del método unidireccional para determinar la contribución del panel de mampostería se detalla a continuación.

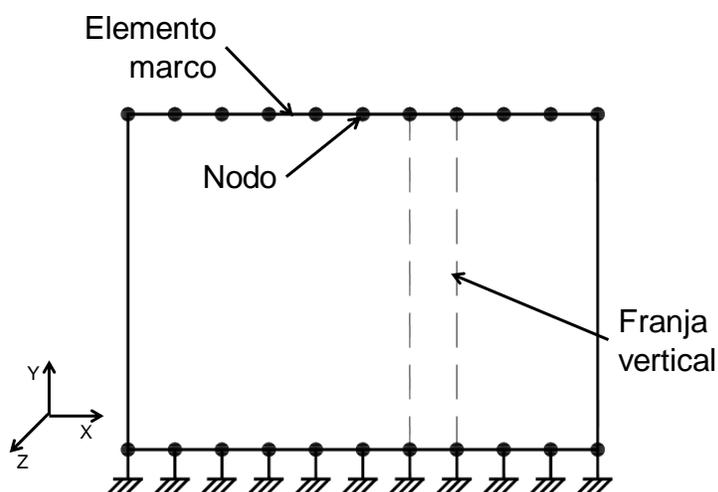
Se considera un patrón de agrietamiento en el muro, que consiste en grietas horizontales en la parte superior e inferior del muro, Figura 3.3. Adicionalmente, el muro es dividido en franjas verticales (Figura 3.4). Se asume que, al desplazarse la parte superior del muro, en cada franja vertical se formara un puntal de compresión. Las fuerzas de dichos puntales se transfieren a los elementos confinantes horizontales. El marco de dichos elementos confinantes es dividido en  $n$  número de elementos (Figura 3.5). Se modeló el marco de elementos confinantes considerando elementos tipo marco con seis grados de libertad por nodo, tres desplazamientos y tres rotaciones. Las condiciones de frontera consideradas para dicho modelo fueron de empotramiento en la parte inferior del marco, mientras que en la parte superior se restringe la rotación alrededor del eje X.



**Figura 3.3 Patrón de agrietamiento.**



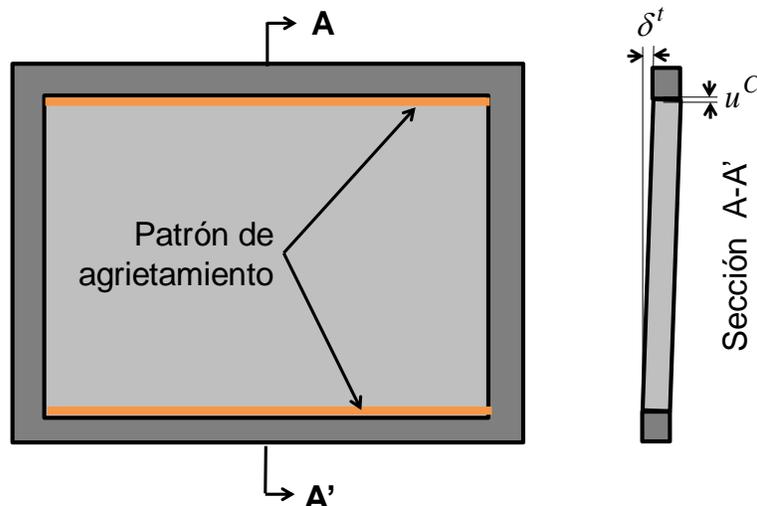
**Figura 3.4 División de muro de mampostería.**



**Figura 3.5 División de marco de elementos confinantes en  $n$  numero de elementos.**

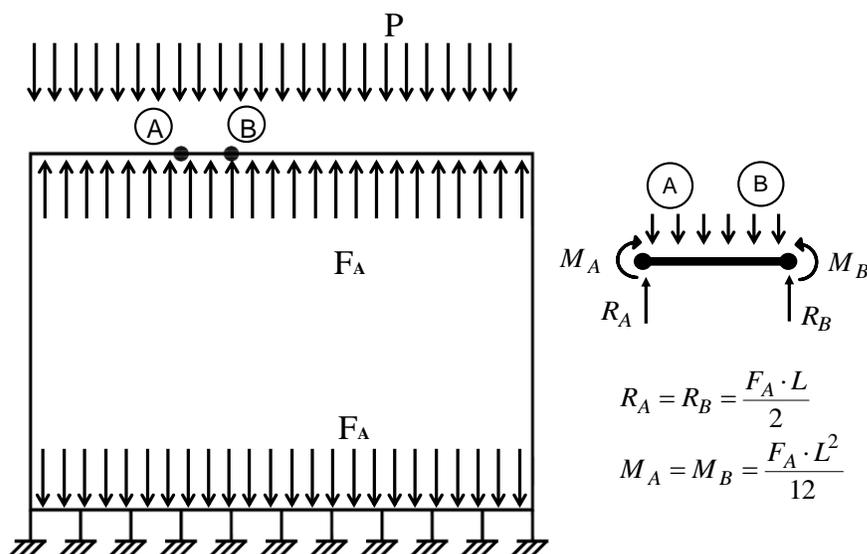
El proceso iterativo para determinar la contribución del panel de mampostería se describe a continuación:

1. Se asume un desplazamiento horizontal  $\delta^t$  fuera del plano en la parte superior del muro. Se determina el desplazamiento vertical ( $u^c$ ) asumiendo que el segmento del muro rota como cuerpo rígido, Figura 3.6



**Figura 3.6 Desplazamiento vertical como cuerpo rígido,  $u^C$ .**

2. Se asume que una fuerza distribuida ( $F_A$ ) actúa en el marco. Inicialmente el valor de  $F_A$  es arbitrario. Se incluye la carga axial ( $P$ ) como una fuerza distribuida en la parte superior del marco de elementos confinantes, (Figura 3.7). Se determinan las fuerzas y momentos de empotramiento ( $M_A$ ,  $M_B$ ,  $R_A$  y  $R_B$ ) para cada elemento del marco y se calcula el vector de fuerzas  $\{F^A\}$ .



**Figura 3.7 Distribución de fuerza arbitraria.**

3. Se determina el vector de desplazamientos  $\{U^A\}$  debido al vector de fuerzas  $\{F^A\}$  mediante la Ecuación 3.3, donde  $[K]$  es la matriz de rigidez global del marco. Dicha rigidez es constante y calculada con las secciones transversales gruesas del marco de elementos confinantes.

$$\{U^A\} = [K]^{-1} \cdot \{F^A\} \quad 3.3$$

4. Se obtiene un vector para normalizar la configuración de la deformada  $\{N\}$  (Ecuación 3.4), donde  $u^{Ac}$  es el desplazamiento vertical en la longitud media de la cadena superior obtenido del vector  $\{U^A\}$ .

$$\{N\} = \{U^A\} \frac{1}{u^{Ac}} \quad 3.4$$

5. Se determina el vector de desplazamientos  $\{U^C\}$  mediante la Ecuación 3.5. Dicho vector es asociado con el desplazamiento vertical  $u^C$  calculado asumiendo la rotación como cuerpo rígido del segmento de muro (Figura 3.6). El vector  $\{N\}$  es utilizado para simplificar el cálculo de vector de desplazamientos  $\{U^C\}$ .

$$\{U^C\} = [N] \cdot u^C \quad 3.5$$

6. Se calcula el vector de fuerzas  $\{F^C\}$  asociado con el vector de desplazamientos  $\{U^C\}$  mediante la Ecuación 3.6.

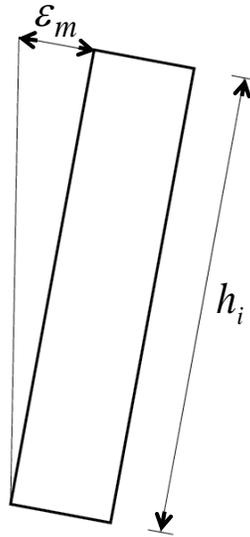
$$\{F^C\} = [K] \cdot \{U^C\} \quad 3.6$$

7. Se determinan los acortamientos axiales  $\delta_i^a$  para cada franja (Ecuación 3.7). Se asume una distribución triangular de esfuerzos y una relación lineal entre

los esfuerzos y las deformaciones hasta el aplastamiento de la mampostería. En la Ecuación 3.7,  $f_m$  es la resistencia a compresión axial de la mampostería,  $h_i$  es la altura del segmento del muro, y  $\delta_i^{cr}$  (Ecuación 3.8) es la deformación axial asociada con el aplastamiento de la mampostería. En la ecuación  $\varepsilon_m$  es la deformación última de la mampostería igual a 0.003 (Drysdale et al. 1999).  $\delta_i^{cr}$  es calculada asumiendo una distribución lineal a lo largo de la longitud del segmento de muro (Figura 3.8).

$$\delta_i^a = \sqrt{\frac{2 \cdot F_i \cdot \cos\left(\frac{\delta_i^s}{h_i}\right) \cdot \delta_i^s \cdot \delta_i^{cr}}{f_m \cdot h_i}} \quad 3.7$$

$$\delta_i^{cr} = \frac{\varepsilon_m \cdot h_i}{2} \quad 3.8$$



**Figura 3.8 Distribución lineal de deformaciones en segmento de muro.**

8. Se calcula el desplazamiento total de cada franja  $u_i^T$  considerando la deformación axial de la mampostería  $\delta_i^a$ , Ecuación 3.9. Con dichos desplazamiento se ensambla el vector total de desplazamientos  $\{U^T\}$ .

$$u_i^T = u_i^C + \delta_i^a \quad 3.9$$

9. Se calcula el vector de fuerzas  $\{F^T\}$  mediante la Ecuación 3.10,  $\{F^A\}$  es sustituido por  $\{F^T\}$ . Los pasos del 3 al 9 se repiten de forma iterativa hasta obtener el criterio de convergencia (Ecuación 3.11) . En esta ecuación  $Tol$  es el valor de tolerancia y  $\|U^T\|$  es la norma del desplazamiento  $\{U^T\}$  (Ecuación°3.12).

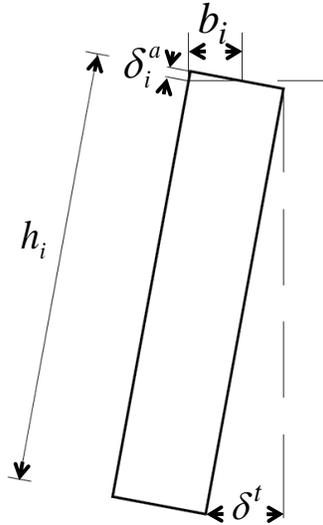
$$\{F^T\} = [K]\{U^T\} \quad 3.10$$

$$\frac{\|U^T_j\| - \|U^T_{j-1}\|}{\|U^T_{j-1}\|} \leq Tol \quad 3.11$$

$$\|U^T\| = \sqrt{\{U^T\}^T \cdot \{U^T\}} \quad 3.12$$

10. Se calcula en ancho de contacto ( $b_i$ ) entre el segmento de muro y los elementos confinantes utilizando una relación geométrica, Ecuación 3.13 (Figura 3.9)

$$b_i = \frac{\delta_i^a}{\delta_i^s} h_i \quad 3.13$$



**Figura 3.9 Relación geométrica para obtención de  $b_i$ .**

11. Se calcula el esfuerzo axial ( $f_i^e$ ) de cada franja asumiendo una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación (Ecuación 3.14).

$$f_i^e = \frac{\delta_i^a}{\delta_i^{cr}} f_m \quad 3.14$$

12. Se calcula la magnitud del puntal de compresión ( $C_i$ ) para cada franja, basado en el equilibrio de fuerzas entre  $F_i$  y  $C_i$ . Figura 3.10.

$$C_i = \frac{F_i}{\cos(\gamma_i)} \quad 3.15$$

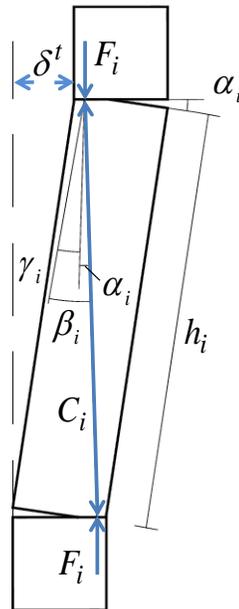
13. Basado en el equilibrio fuera del plano entre las fuerzas externas y los puntales de compresión, se calcula la resistencia fuera del plano del muro  $V$  (Ecuación 3.16), donde  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  y  $\gamma_i$  se calculan con las ecuaciones 3.17 a 3.19 respectivamente. En la ecuación 3.19  $k_2$  es la relación entre la distancia de la fibra extrema y la resultante del puntal de compresión.

$$V = \sum_{i=1}^n C_i \cdot \sin(\gamma_i) \quad 3.16$$

$$\gamma_i = \beta_i - \alpha_i \quad 3.17$$

$$\alpha_i = \sin^{-1} \left( \frac{\delta_i^s}{h_i} \right) \quad 3.18$$

$$\beta_i = \tan^{-1} \left( \frac{t - 2 \cdot k_2 \cdot b_i}{h_i - 4 \cdot k_2 \cdot \delta_i^a} \right) \quad 3.19$$

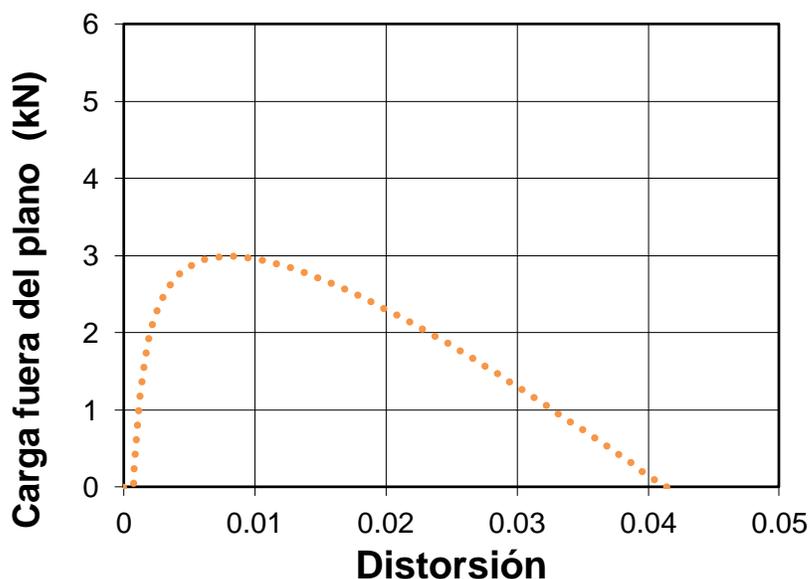


**Figura 3.10 Equilibrio de fuerzas vertical y ángulos.**

14. Se propone un nuevo desplazamiento horizontal fuera del plano  $\delta^t$ . Se repite el procedimiento del paso 1 al 13 hasta que los esfuerzos  $f_i^e$  sean igual a  $f_m$  o hasta que el desplazamiento fuera del plano ( $\delta^t$ ) sea igual al espesor del muro de mampostería. En el primer caso, la falla del muro está relacionada con el aplastamiento de la mampostería. En el segundo caso, la componente fuera del plano de los puntales de compresión son igual a cero,

por lo tanto, la falla del muro está asociada con la inestabilidad de los segmentos del muro.

El procedimiento descrito anteriormente fue programado en el lenguaje de programación Fortran. En la Figura 3.11 se muestra una curva típica de los resultados obtenidos para un muro.

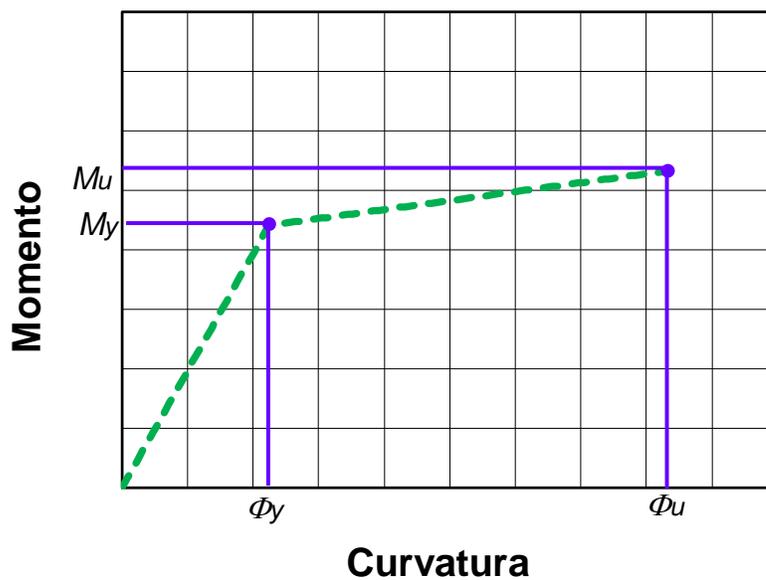


**Figura 3.11 Curva carga fuera del plano – distorsión, contribución del panel de mampostería.**

Para determinar la contribución de los elementos confinantes se realizó el análisis plástico de dichos elementos. Se modelaron los elementos confinantes de forma independiente al panel de mampostería. Las condiciones de frontera consideradas en el análisis plástico son presentadas en la Figura 3.1.

Se determinó un diagrama bilineal de la relación momento-curvatura para cada elementos confinante vertical. Se determinaron los momentos de fluencia y último ( $M_y$ ,  $M_u$ ) con sus correspondientes curvaturas ( $\Phi_y$  y  $\Phi_u$ ), (Figura 3.12). Para el cálculo del diagrama momento curvatura se utilizó la curva esfuerzo-deformación propuesta por Scott et al. (1982) para el concreto. Adicionalmente, se utilizó la curva esfuerzo

deformación del acero propuesta por Rodríguez y Botero (1996). La deformación máxima de concreto considerada fue igual a 0.003 (Wight and Macgregor, 2009). La falla de los elementos confinantes verticales está relacionada con el aplastamiento del concreto.



**Figura 3.12 Diagrama momento – curvatura, elementos confinantes verticales.**

Se determinó el diagrama bilineal carga fuera del plano - desplazamiento de los elementos confinantes. Se calcularon la resistencia de fluencia y última fuera del plano ( $V_y$ ,  $V_u$ ) mediante las ecuaciones 3.20 y 3.21, respectivamente. El desplazamiento de fluencia y último fuera del plano ( $\Delta_y$ ,  $\Delta_u$ ) se calcularon mediante las ecuaciones 3.22 y 3.23, respectivamente. Dichos desplazamientos se determinaron mediante la integración del diagrama momento - curvatura, Figura 3.13. En la ecuación 3.23,  $L_p$  es la longitud plástica calculada con la ecuación 3.24 (Paul y Priestley, 1992). En dicha ecuación,  $d_b$  es el diámetro del refuerzo longitudinal del elemento confinante.

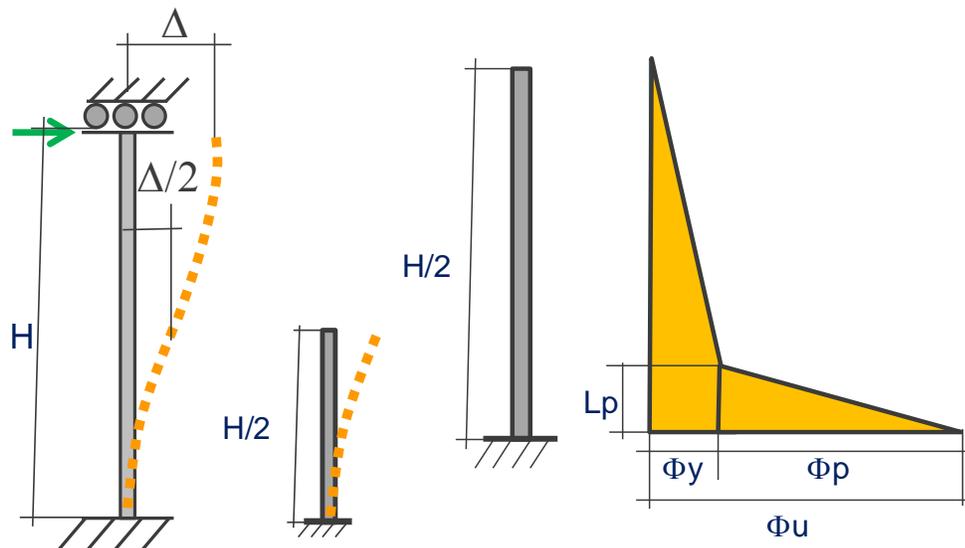
$$V_y = \frac{4 \cdot M_y}{h'} \quad 3.20$$

$$V_u = \frac{4 \cdot M_u}{h'} \quad 3.21$$

$$\Delta_y = 2 \cdot \frac{\Phi_y \cdot \left(\frac{h'}{2}\right)^2}{3} \quad 3.22$$

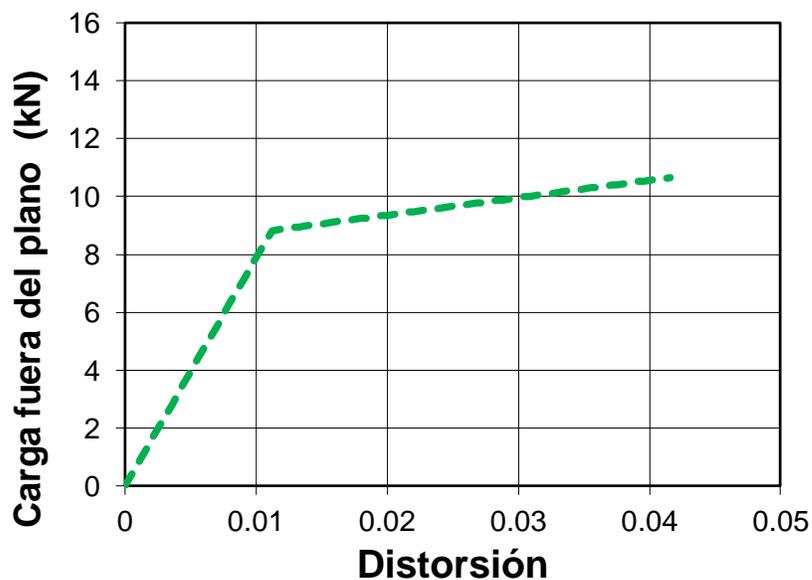
$$\Delta_u = \Delta_y + 2 \cdot \left[ \frac{(\Phi_u - \Phi_y)}{2} \cdot L_p \cdot \left(\frac{h'}{2} - \frac{2}{3} \cdot L_p\right) \right] \quad 3.23$$

$$L_p = 0.08 \cdot h' + 0.88 \cdot d_b \quad 3.24$$



**Figura 3.13 Integración del diagrama Momento – Curvatura.**

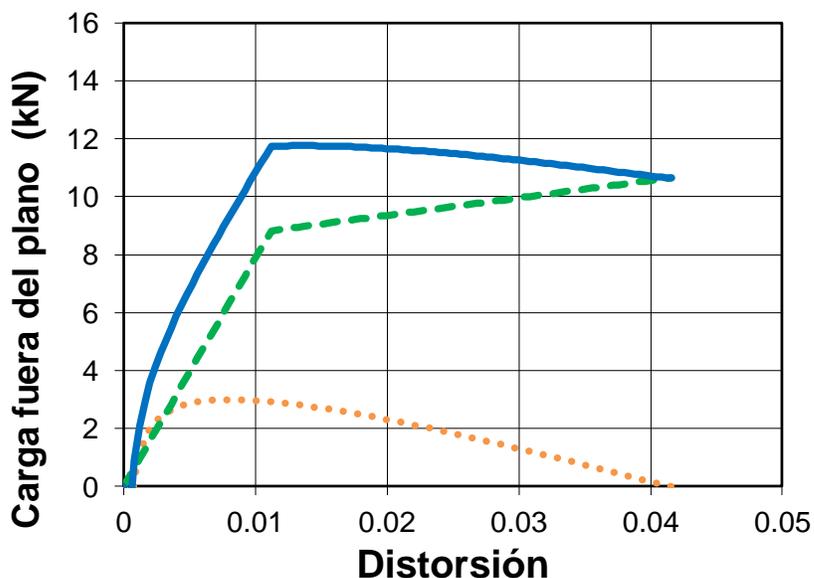
En la Figura 3.14 se muestra el diagrama carga fuera del plano - distorsión obtenido para el marco de un muro.



**Figura 3.14 Diagrama fuerza horizontal – desplazamiento, Elementos confinantes.**

Para determinar la resistencia fuera del plano ( $V_{ma}$ ) del muro, se realiza la superposición de la contribución del panel de mampostería y los elementos confinantes al mismo nivel de desplazamiento, Figura 3.15. La resistencia fuera del plano ( $V_{ma}$ ) se obtiene cuando la carga alcanza el valor máximo. Adicionalmente se pueden definir tres tipos de falla:

1. Falla por aplastamiento, cuando los esfuerzos axiales en la mampostería son igual a la resistencia a compresión axial.
2. Falla por inestabilidad, cuando la componente horizontal de los puntales de compresión es igual cero.
3. Falla de los elementos confinantes, cuando el concreto alcanza la deformación máxima.



**Figura 3.15** Curva fuerza horizontal – desplazamiento, mampostería y elementos confinantes.

### 3.1.3 Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad para estudiar el efecto de las variables que influyen en la resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada sujetos a cargas concentradas en el extremo superior. El análisis se realizó utilizando el modelo del puntal unidireccional, descrito anteriormente. Las variables estudiadas fueron la resistencia a compresión axial de la mampostería, la relación de aspecto, la relación de esbeltez, la deformación última de la mampostería, la rigidez de los elementos confinantes, la carga axial y la resistencia a compresión axial del concreto. Se determinaron curvas cargas fuera del plano – desplazamiento fuera del plano, correspondientes a la contribución del panel de mampostería y los elementos confinantes. Adicionalmente se realizó la suma de las contribuciones para determinar la resistencia fuera del plano de los muros de mampostería confinada.

Para determinar los valores mínimos y máximos de las variables antes mencionadas, se realizó un análisis de la geometría de MC en diversos prototipos de viviendas ubicadas en diferentes zonas del país. De dicho análisis, se determinó que la longitud de los MC varía entre 1.0 y 4.0 m, mientras que la altura entre 2.4 y 3.0 m.

Por otra parte, del análisis realizado por Moreno (2014), se obtuvo que los tipos de piezas de mampostería más utilizadas en México son los bloques huecos o sólidos de concreto, tabiques de arcilla (artesanal) y tabique de arcilla multiperforadora (industrializado). Además, el espesor de dichas piezas varía entre 10 y 20 cm. Por otro lado, la resistencia a compresión axial de la mampostería varía entre 0.98 y 5.88 MPa. Se analizó también la carga axial que se transmite a muros en viviendas de uno, dos y tres niveles. El esfuerzo axial obtenido para muros interiores fue de 0.12, 0.24 y 0.36 MPa, respectivamente.

En este análisis de sensibilidad, se consideró un muro base con altura de 240 cm, longitud de 400 cm, espesor de 15 cm, resistencia a compresión axial de la mampostería  $f_m = 3.9$  MPa, deformación última de la mampostería  $\varepsilon = 0.003$ , elementos confinantes verticales con una sección transversal de 15 x 15 cm, elementos confinantes horizontales de 15 x 25 cm (base x altura), carga axial  $P$  igual a 0.12 MPa y una resistencia a la compresión axial del concreto de 14.7 MPa. Para el estudio de la primera variable se consideraron resistencias a la compresión axial de la mampostería de 1.9, 3.9 y 5.8 MPa. Para la segunda variable se mantuvo constante la altura del muro y se varió la longitud. Las relaciones de aspecto consideradas fueron 0.6, 1.0 y 1.5. Para la tercera variable se mantuvo constante la altura y se varió el espesor del muro utilizando espesores de 10, 15 y 20 cm. Las relaciones de esbeltez que resultaron de estos espesores fueron de 12, 16 y 24. Para la cuarta variable se consideraron muros con una deformación última de la mampostería de 0.002 y 0.003. En la quinta variable se consideraron elementos confinantes verticales con secciones trasversales de 10 x 10, 15 x 15 y 20 x 20 cm, así como elementos confinantes horizontales con secciones trasversales de 15 x 15, 15 x 25 y 15 x 35 cm (base por altura). El refuerzo longitudinal de los elementos confinantes consistió en 4 barras de acero corrugado de 0.95 cm de diámetro. El esfuerzo de fluencia ( $f_y$ ) de dichas barras es de 412 MPa. Por otro lado, el refuerzo transversal de los elementos confinantes consistió en estribos de acero liso de 0.63 cm de diámetro. El esfuerzo de fluencia ( $f_y$ ) del acero transversal es de 248 MPa. Se considero para este análisis un espaciamiento del refuerzo transversal para los

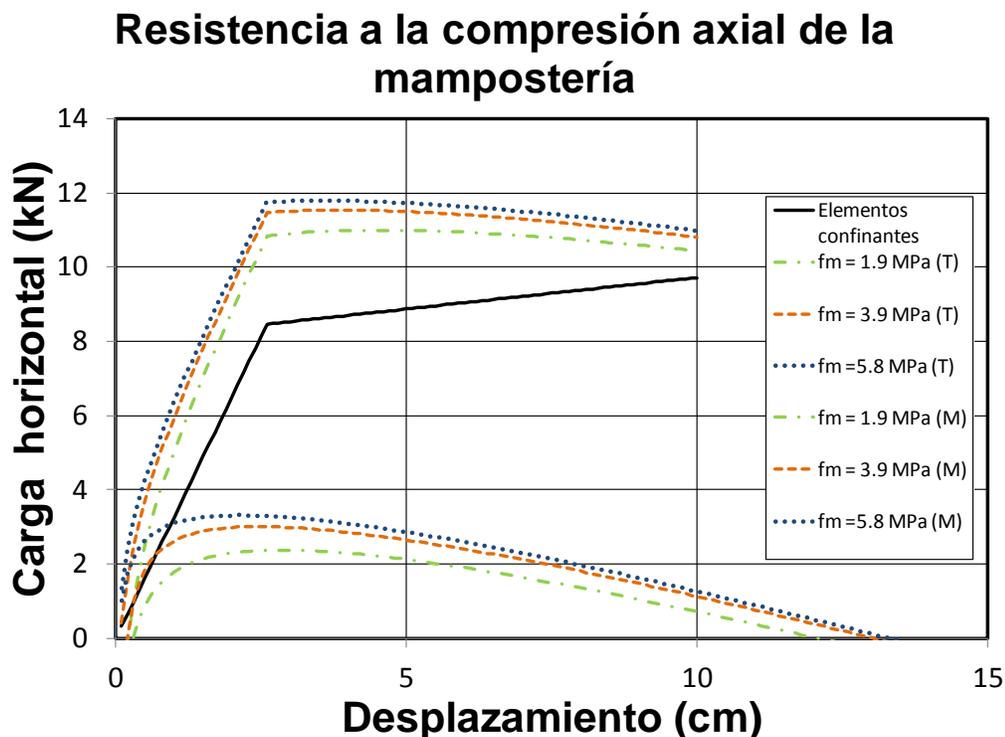
elementos confinantes verticales y horizontales de 15 cm. Para la sexta variable se consideraron cargas axiales de 0.12, 0.24 y 0.36 MPa. Por último para la séptima variable se consideraron resistencia a la compresión axial del concreto de 14.7, 19.6 y 24.5 MPa. En la Tabla 3.1 se presentan las características de los muros analizados.

**Tabla 3.1. Características de los muros analizados.**

Muro	$f_m$	L	t	$e_{max}$	K		P	$f_c$	H/L	H/t
	Mpa	cm	cm		cm	cm	Mpa	Mpa		
M-1	3.9	400	15	0.003	15	15	0.12	14.7	0.60	16
M-2	1.9	400	15	0.003	15	15	0.12	14.7	0.60	16
M-3	5.8	400	15	0.003	15	15	0.12	14.7	0.60	16
M-4	1.9	400	10	0.003	15	15	0.12	14.7	0.60	24
M-5	1.9	400	20	0.003	15	15	0.12	14.7	0.60	12
M-6	1.9	160	15	0.003	15	15	0.12	14.7	1.50	16
M-7	1.9	240	15	0.003	15	15	0.12	14.7	1.00	16
M-8	1.9	400	15	0.002	15	15	0.12	14.7	0.60	16
M-9	1.9	400	15	0.003	15	15	0.24	14.7	0.60	16
M-10	1.9	400	15	0.003	15	15	0.36	14.7	0.60	16
M-11	1.9	400	15	0.003	15	15	0.12	19.6	0.60	16
M-12	1.9	400	15	0.003	15	15	0.12	24.5	0.60	16
M-13	1.9	400	15	0.003	10	10	0.12	14.7	0.60	16
M-14	1.9	400	15	0.003	20	20	0.12	14.7	0.60	16

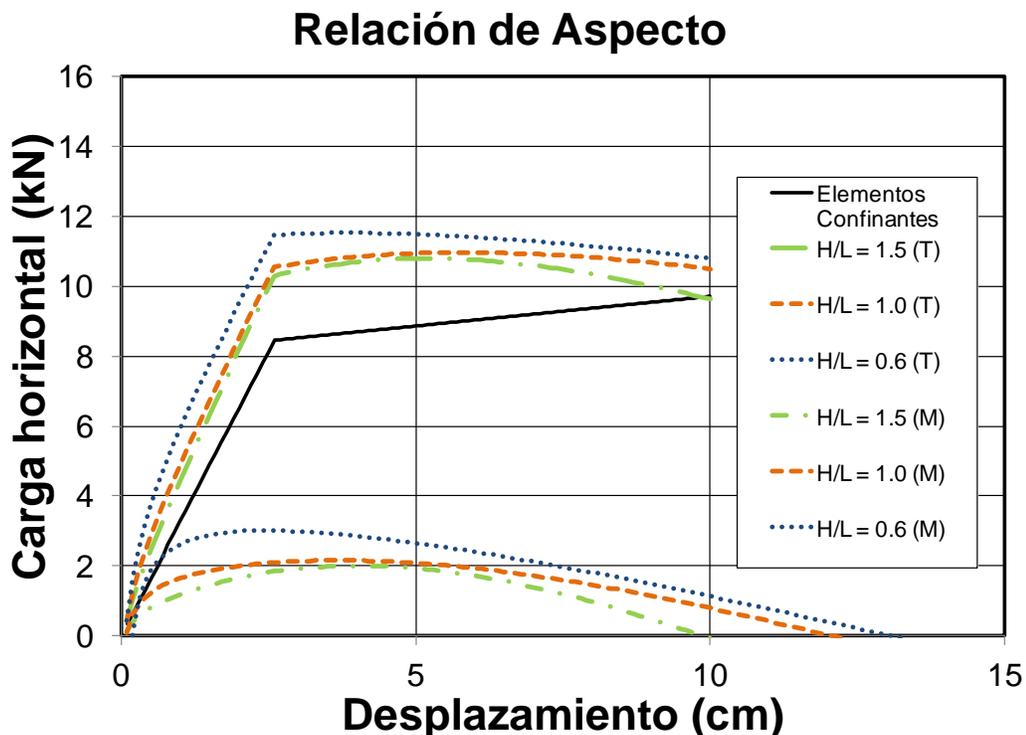
En la Figura 3.16 se presentan las curvas carga horizontal – desplazamiento fuera del plano de los muros analizados con diferente resistencia a compresión axial de la mampostería ( $f_m$ ). La resistencia máxima fuera del plano de los muros con  $f_m$  igual a 1.9, 3.9 y 5.8 MPa fue de 11.00, 11.53 y 11.79 kN, respectivamente. En la Figura 3.16 se observa que la contribución de la mampostería aumenta si la resistencia a compresión axial es mayor. Por otro lado la contribución de los elementos confinantes es igual para los tres muros. En la resistencia máxima fuera del plano de los muros, la variación de  $f_m$  no es significativa debido a que la contribución de los elementos confinantes aporta entre el 75 y 80 %, por lo que una variación en la

contribución de la mampostería no es significativa en relación a la suma. La falla del muro está asociada a la resistencia de los elementos confinantes verticales.



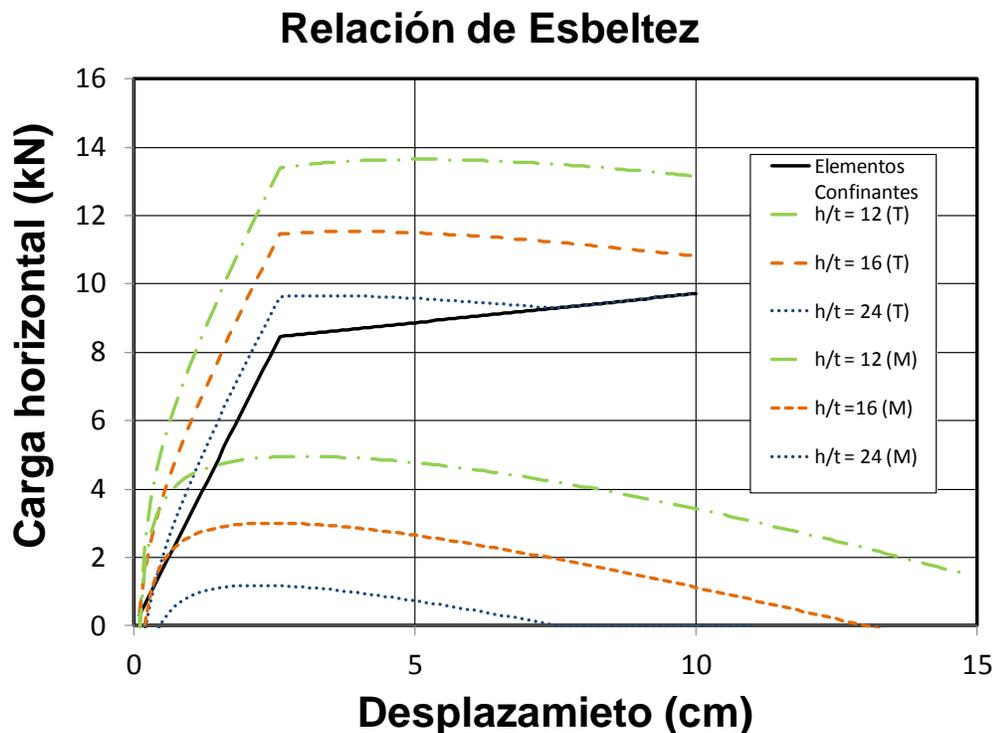
**Figura 3.16** Curvas carga horizontal – desplazamiento,  $f_m$ .

En la Figura 3.17 se presentan las curvas carga horizontal – desplazamiento fuera del plano de los muros analizados con diferente relación de aspecto ( $H/L$ ). La resistencia máxima fuera del plano de los muros con  $H/L$  de 0.6, 1.0 y 1.5 fue de 11.53, 10.97 y 10.80 kN, respectivamente. En la Figura 3.17 se observa que la contribución de la mampostería aumenta si la relación de aspecto es menor. Por otro lado la contribución de los elementos confinantes es igual para los tres muros. En la resistencia máxima fuera del plano de los muros, la variación de  $H/L$  no es significativa debido a que la contribución de los elementos confinantes aporta entre el 75 y 80 %, por lo que una variación en la contribución de la mampostería no es significativa en relación a la suma. La falla del muro está asociada a la resistencia de los elementos confinantes verticales.



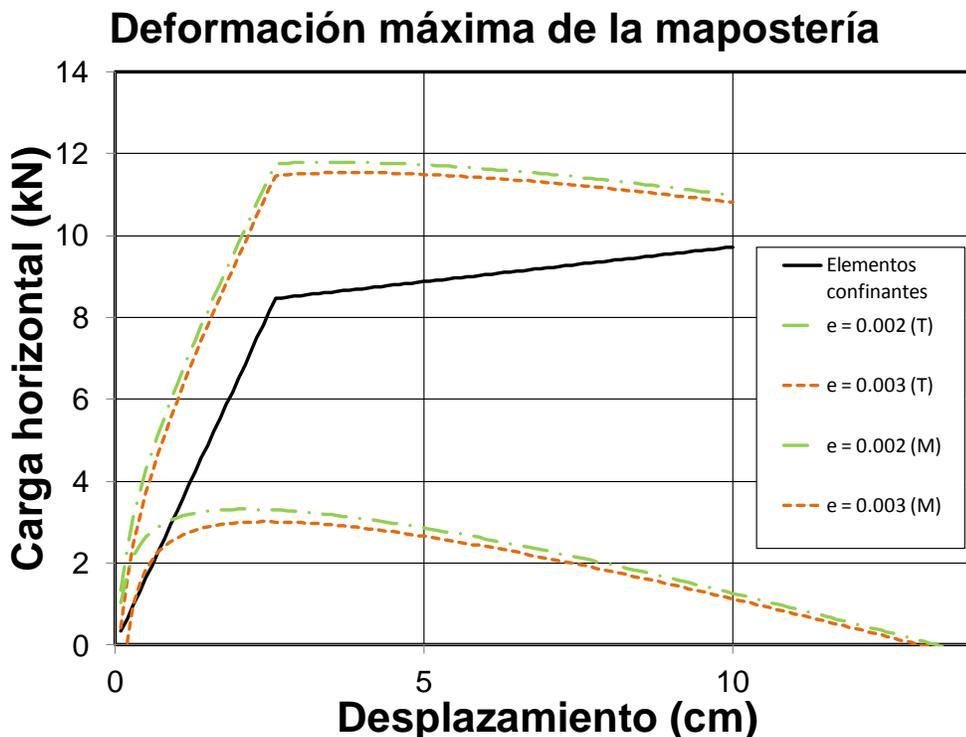
**Figura 3.17** Curvas carga horizontal – desplazamiento,  $H/L$ .

En la Figura 3.18 se presentan las curvas carga horizontal – desplazamiento fuera del plano de los muros analizados con diferente relación de esbeltez ( $H/t$ ). La resistencia máxima fuera del plano de los muros con  $H/t$  de 12, 16 y 24 fue de 13.64, 11.53 y 9.72 kN, respectivamente. En la Figura 3.18 se observa que la contribución de la mampostería aumenta si la relación de esbeltez es menor. Por otro lado la contribución de los elementos confinantes es igual para los tres muros. En la resistencia máxima fuera del plano de los muros, la variación de  $H/t$  es significativa debido a que la contribución de la mampostería incrementa hasta cuatro veces su valor. Lo anterior es debido a que la componente horizontal de los puntales de compresión es mayor para muros con una relación de esbeltez menor. La falla del muro está asociada a la resistencia de los elementos confinantes verticales.



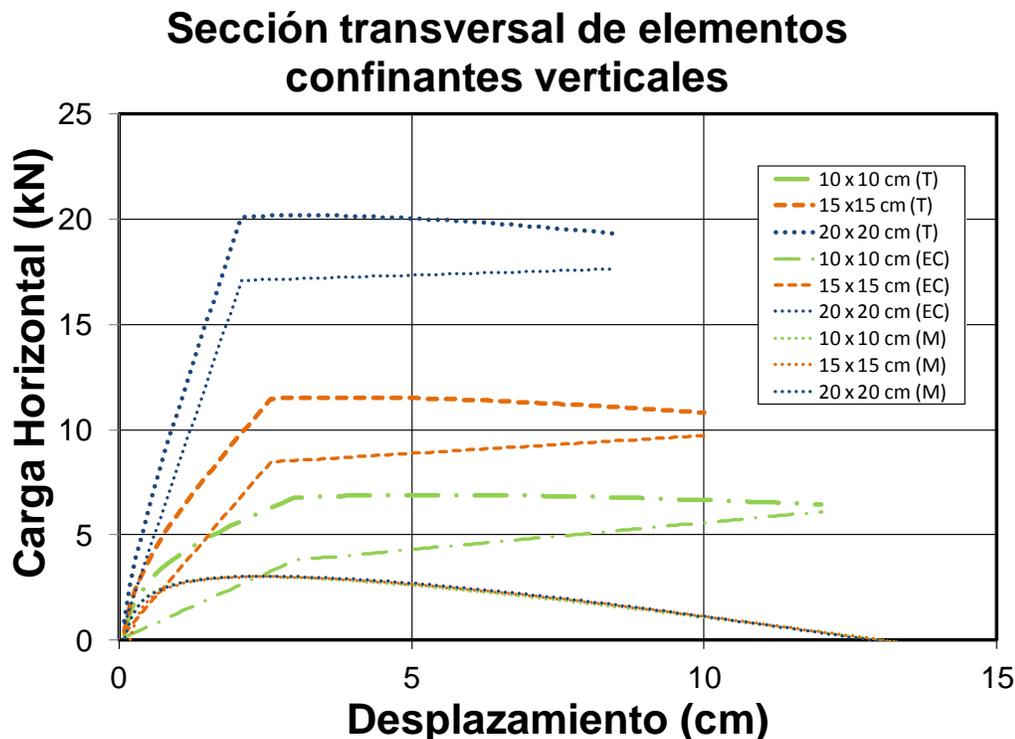
**Figura 3.18** Curvas fuerza horizontal – desplazamiento,  $H/t$ .

En la Figura 3.19 se presentan las curvas fuerza horizontal – desplazamiento fuera del plano de los muros analizados con diferente deformación última de la mampostería  $\varepsilon$ . La resistencia máxima fuera del plano de los muros con  $e$  de 0.002 y 0.003 fue de 11.79 y 11.53 kN, respectivamente. En la Figura 3.19 se observa que la contribución de la mampostería es mayor considerando un valor de deformación máxima menor. Por otro lado la contribución de los elementos confinantes es igual para los tres muros. En la resistencia máxima fuera del plano de los muros, la variación de la deformación máxima de la mampostería no es significativa debido a que la contribución de los elementos confinantes aporta entre el 75 y 80 %, por lo que una variación en la contribución de la mampostería no es significativa en relación a la suma. La falla del muro está asociada a la resistencia de los elementos confinantes verticales.



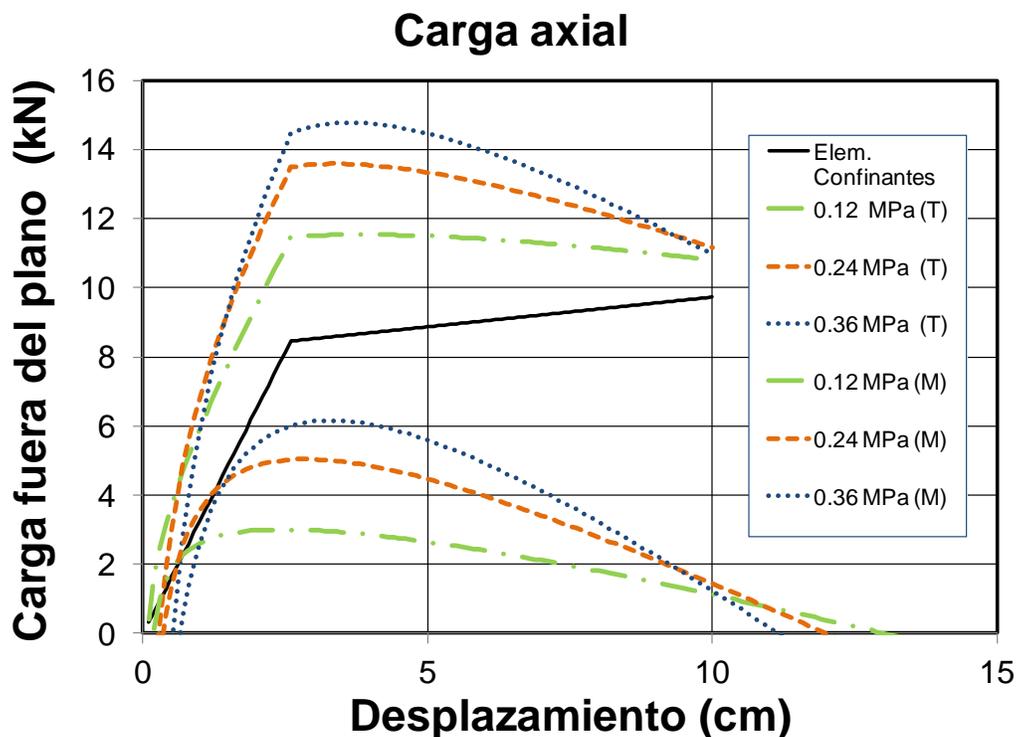
**Figura 3.19** Curvas fuerza horizontal – desplazamiento,  $\varepsilon$ .

En la Figura 3.20 se presentan las curvas carga horizontal – desplazamiento fuera del plano de los muros analizados con diferente sección transversal de los elementos confinantes verticales. La resistencia máxima fuera del plano de los muros con elementos confinantes de 10x10, 15x15 y 20x20 cm fue de 6.90, 11.53 y 20.18 kN, respectivamente. En la Figura 3.20 se observa que la contribución de la mampostería es igual para los tres muros. Por otra parte se observa que la contribución de los elementos confinantes aumenta cuando la sección transversal es mayor. La falla del muro está asociada a la resistencia de los elementos confinantes verticales.



**Figura 3.20** Curvas fuerza horizontal – desplazamiento. Sección transversal de elementos confinantes verticales.

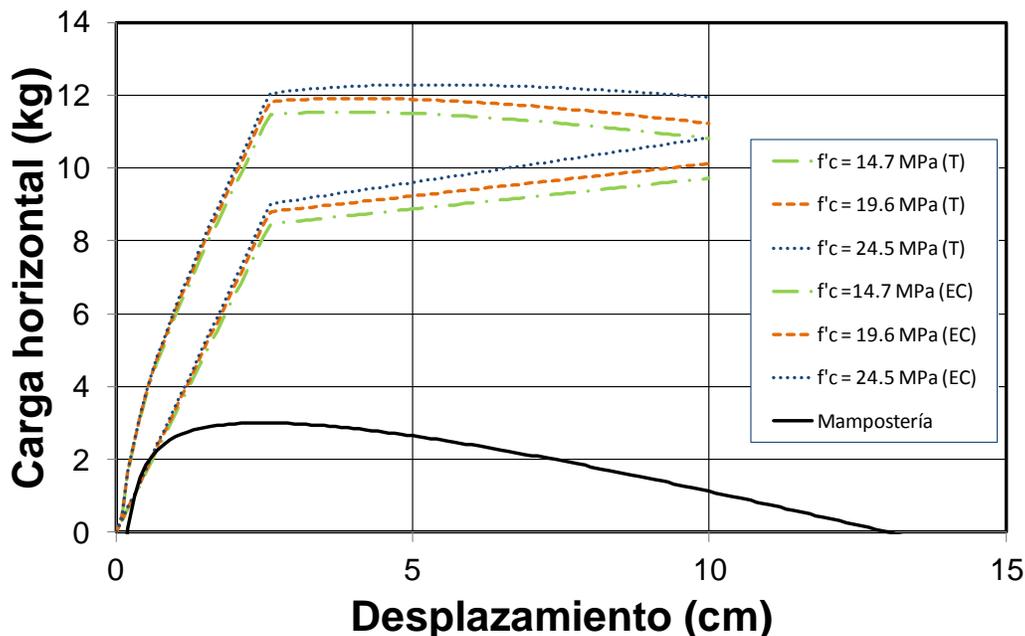
En la Figura 3.21 se presentan las curvas fuerza horizontal – desplazamiento fuera del plano de los muros analizados con diferente carga axial. La resistencia máxima fuera del plano de los muros con carga axial de 0.12, 0.24 y 0.36 MPa fue de 11.53, 13.58 y 14.77 kg, respectivamente. En la Figura 3.21 se observa que la contribución de la mampostería aumenta si la carga axial es mayor. Lo anterior es debido a que la magnitud de los puntales de compresión aumenta por los esfuerzos que produce la carga axial. Por otro lado la contribución de los elementos confinantes es igual para los tres muros. La falla del muro está asociada a la resistencia de los elementos confinantes verticales.



**Figura 3.21** Curvas carga horizontal – desplazamiento, Carga axial.

En la Figura 3.22 se presentan las curvas fuerza horizontal – desplazamiento fuera del plano de los muros analizados con diferente resistencia a la compresión axial del concreto. La resistencia máxima fuera del plano de los muros con  $f'_c$  de 14.7, 19.6 y 24.5 MPa fue de 11.53, 11.91 y 12.29 kg, respectivamente. En la Figura 3.22 se observa que la contribución de la mampostería es igual para los tres muros. Por otra parte la contribución de los elementos confinantes aumenta cuando la resistencia a compresión axial del concreto es mayor. La falla de los muros está asociada a resistencia de los elementos confinantes verticales.

### Resistencia a la compresión axial del concreto



**Figura 3.22 Diagrama Fuerza Horizontal – Desplazamiento. Resistencia a compresión axial de concreto.**

Del análisis anterior se obtuvo que las variables que afectan de forma significativa a la resistencia máxima fuera del plano de MC sujetos a cargas concentradas en el extremo superior son la relación de esbeltez, la sección transversal de los elementos confinantes verticales y la carga axial. Mientras que la resistencia a compresión axial de la mampostería, la deformación máxima de la mampostería y la resistencia a compresión axial del concreto no afectan de forma significativa la resistencia máxima. En la Tabla 3.2 se presentan las resistencias obtenidas para los 14 muros analizados. Debido a los resultados del análisis realizado, las variables de estudio de este trabajo serán la relación de aspecto y la carga axial.

**Tabla 3.2. Resistencia máxima fuera del plano.**

Muro	Total	Relación	Variable
M-1	11.5	1.00	Base
M-2	11.0	0.96	fm
M-3	11.8	1.02	
M-4	9.7	0.85	H/t
M-5	13.6	1.16	
M-6	11.0	0.93	H/L
M-7	10.8	0.94	
M-8	11.8	1.02	e
M-9	13.6	1.16	P ax
M-10	14.8	1.26	
M-11	11.9	1.03	f'c
M-12	12.3	1.08	
M-13	6.9	0.66	E C
M-14	20.2	1.60	

### 3.2 Obtención de las propiedades básicas de los materiales

Previo al diseño y ensaye de los muros, se obtuvieron las propiedades básicas de los materiales. Se determinó la granulometría de los agregados de acuerdo con las normas NMX-C-030-ONCCE-2004 y NMX-C-077-ONNCCE-2002, y la resistencia a compresión axial del concreto de acuerdo a la norma NMX-C-083-ONNCCE-2002. Las propiedades correspondientes a los tabiques, pilas y muretes de mampostería se tomaron del trabajo de Moreno (2014). En dicho trabajo, la resistencia a compresión axial de las piezas y pilas de mampostería, así como, la resistencia a tensión por flexión fuera del plano, fueron determinadas de acuerdo a las normas NMX-C-036-ONNCCE-2004, NMX-C-464-ONNCCE-2010 y ASTM E72 (2003), respectivamente. Se consideraron 6 especímenes para cada caso.

### 3.3 Diseño de los muros

Para determinar las características de los muros se consideró en este trabajo un muro interior de una vivienda sujeta a cargas laterales (Figura 3.23). El muro interior se idealiza como un elemento con un empotramiento en la parte inferior y un apoyo guiado en la parte superior.

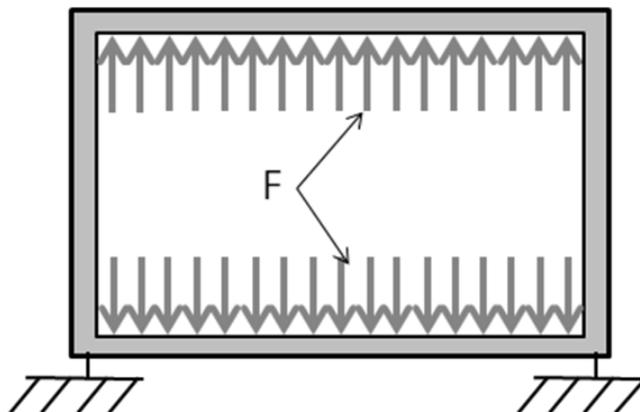


**Figura 3.23 Condiciones de apoyo.**

Se consideraron cinco muros con tabiques de arcilla multiperforados de 25 x 12 x 12 cm. (Longitud x Altura x Espesor). Los tabiques son comúnmente utilizados en diversas zonas sísmicas del país. Se consideró mortero en proporciones por volumen 1:2:7 (Cemento Portland: Cal: Arena). Este mortero es tradicionalmente utilizado en el sureste del país. La resistencia a la compresión axial de la mampostería formada con dichos tabiques y mortero es de 6.47 MPa. Se consideró una altura de muros constante e igual a 2.8 m. Para considerar el efecto de la relación de aspecto, se consideraron muros con longitudes de 1.41 m, 2,45 m y 3.49 m. Las longitudes fueron seleccionadas con base en la modulación de los tabiques seleccionados. Las relaciones de aspecto resultantes fueron de 1.84, 1.06 y 0.74. Para considerar el efecto de la carga axial, se consideraron tres esfuerzos axiales de compresión de 0.12, 0.24 y 0.36 MPa. Dichos esfuerzos corresponden a muros interiores de planta baja de una vivienda de 1, 2 y 3 niveles, respectivamente. Se seleccionaron dimensiones de elementos confinantes de 12 x 12 cm de sección

transversal. El acero de refuerzo longitudinal de dichos elementos consistió de 4 barras de 9 mm y el transversal de estribos de alambrión de 6 mm espaciados a cada 20 cm. El esfuerzo de fluencia del acero longitudinal y transversal fue de 411 y 248 MPa, respectivamente. Se consideró una resistencia a compresión axial del concreto de 14.7 MPa para los elementos confinantes.

Con base en las características y propiedades anteriores, se determinó la resistencia de agrietamiento y fuera del plano de los cinco muros. Se utilizó la metodología descrita anteriormente en este capítulo. Se diseñaron los elementos confinantes para inducir la falla en el panel del muro. Para tal propósito, se modelaron los elementos confinantes como un marco de concreto reforzado sujeto a las condiciones de apoyo y cargas presentadas en la Figura 3.24. La magnitud de la carga  $F$  fue obtenida del modelo analítico del puntal unidireccional. Se verificó que el acero de refuerzo propuesto inicialmente de los elementos confinantes fuera el suficiente para evitar su falla durante el ensayo. Se revisó flexión y cortante.



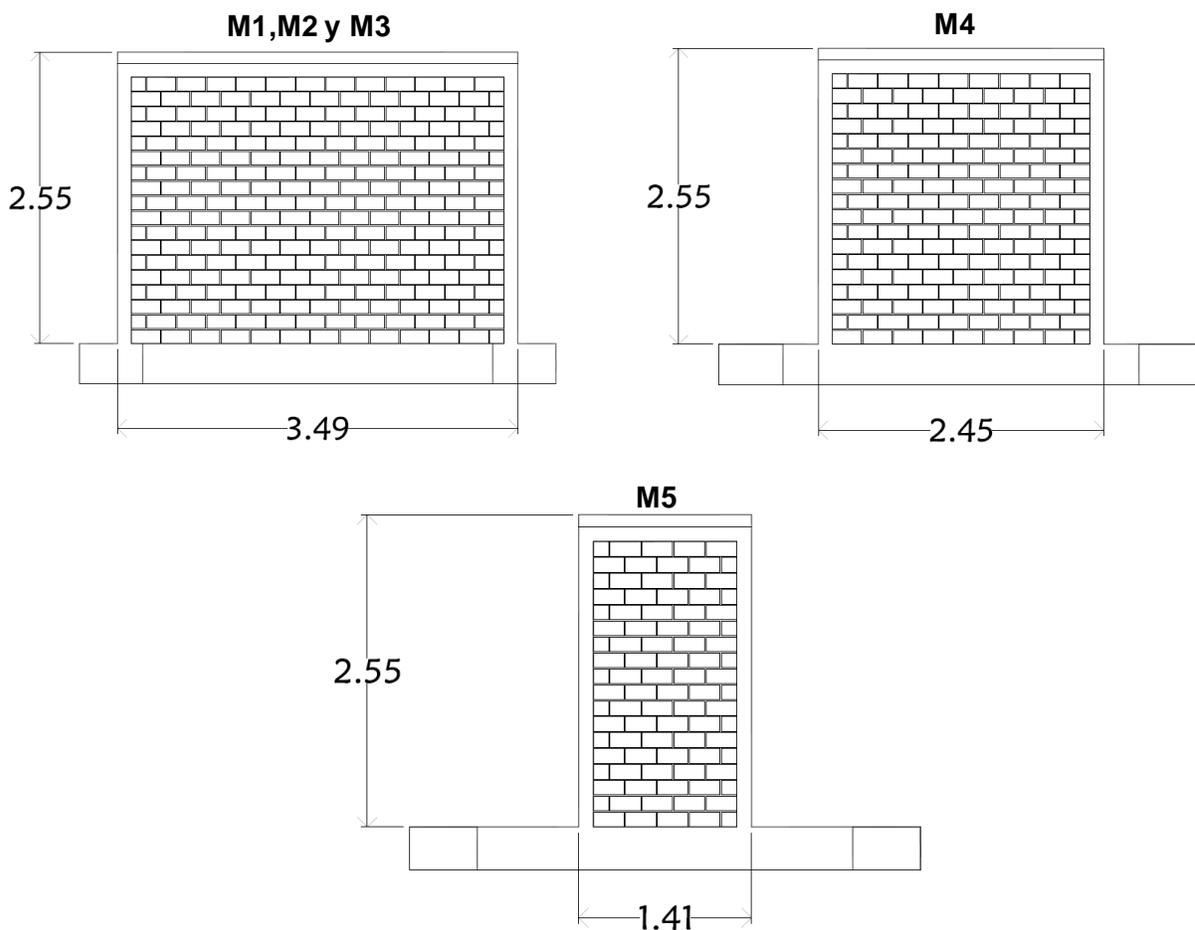
**Figura 3.24 Análisis de elementos confinantes.**

En la Tabla 3.3 se presentan las características geométricas de los muros. Para evaluar la influencia de la relación de aspecto se compararán los resultados de los muros M-1, M-2 y M-3. Similarmente, para evaluar la influencia de la carga axial se compararán los resultados de los muros M-1, M-4 y M-5. En la Figura 3.25 se

muestran de forma esquemática la geometría los muros. Los detalles constructivos de dichos muros se anexan en el Apéndice C.

**Tabla 3.3. Dimensiones de MC, relación de aspecto y carga axial.**

Muro	Longitud m.	Altura m.	R. Aspecto	Carga axial MPa
M1	3.49	2.55	0.74	0.11
M2	3.49	2.55	0.74	0.23
M3	3.49	2.55	0.74	0.35
M4	2.45	2.55	1.04	0.23
M5	1.41	2.55	1.80	0.23



**Figura 3.25 Muros de mampostería confinada.**

### 3.4 Construcción de muros

La construcción de los muros se realizó en el Laboratorio de Estructuras y Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. Los muros se construyeron a plomo y nivel por un trabajador calificado. El procedimiento para la construcción de los muros fue el siguiente: (1) se realizó el habilitado del acero de refuerzo de la cadena inferior y de los castillos, (2) se realizó el cimbrado y colado de la cadena inferior, (3) se colocaron las piezas de mampostería unidas con mortero hasta la mitad de la altura del muro, (4) se cimbró y colocó concreto en los castillos hasta dicha altura, (5) se continuó con la colocación de las piezas de mampostería hasta la altura total del muro, (6) se realizó el cimbrado y colocación de concreto en la parte restante de los castillos, finalmente, (7) se realizó el habilitado del acero de refuerzo, cimbrado y colocación de concreto en la cadena superior. En las Figura 3.26 a Figura 3.29 se presenta el proceso constructivo de los muros. Adicionalmente, el proceso de construcción de la losa de concreto del sistema de carga lateral se presenta en la Figura 3.30.



**Figura 3.26** *Habilitado de acero de refuerzo, cimbrado y colocación de concreto en cadena inferior.*



**Figura 3.27 Colocación de piezas de mampostería.**



**Figura 3.28 Cimbrado y colocación de concreto en castillos.**



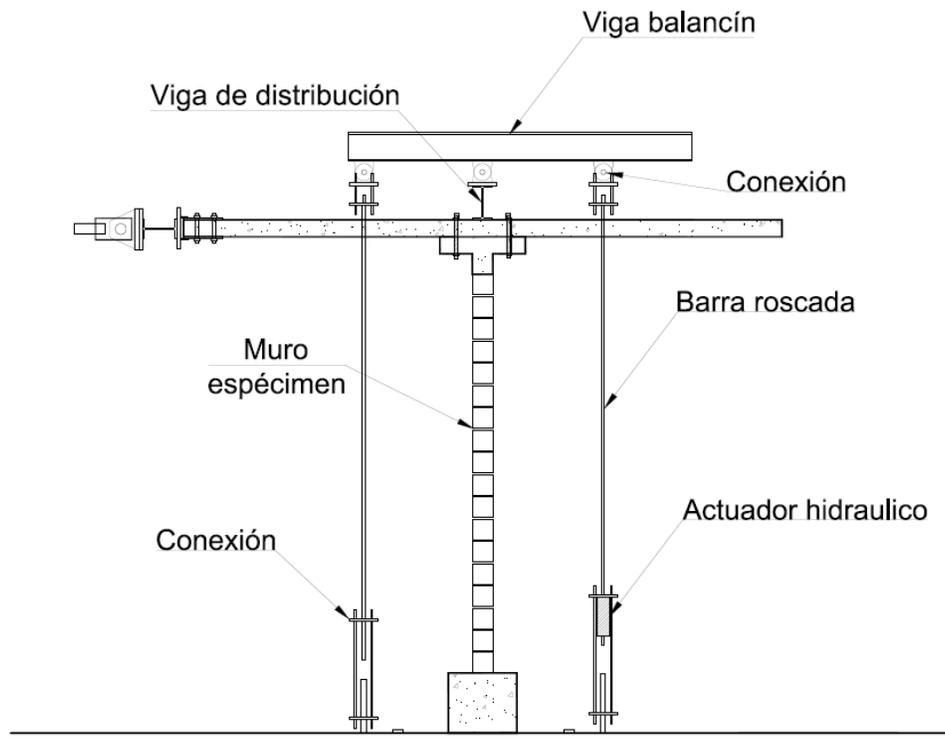
**Figura 3.29** *Habilitado de acero de refuerzo y colocación de concreto en cadena superior.*



**Figura 3.30** *Construcción de losa de concreto.*

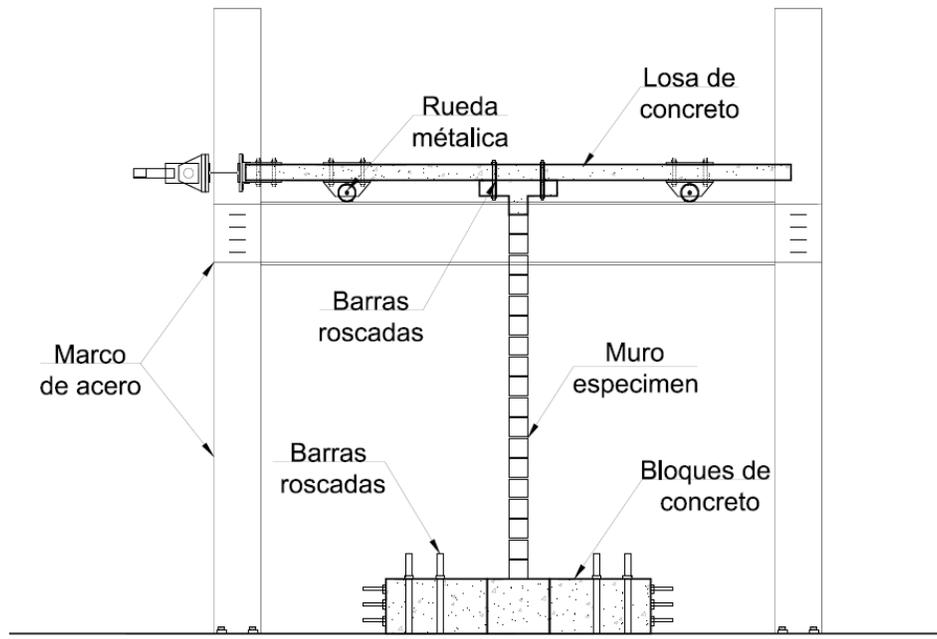
### **3.5 Diseño del sistema de carga e instrumentación**

Los muros especímenes se ensayaron mediante la aplicación de una carga axial de compresión constante y carga lateral cíclica reversible hasta la falla. Para realizar los ensayos se utilizó un sistema de carga axial, un sistema de apoyos y un sistema de carga lateral. El sistema de carga axial consistió en dos vigas balancín de acero, dos vigas de acero para distribución de cargas, un sistema de conexiones y barras roscadas (Figura 3.31). La carga axial se aplicó mediante dos actuadores hidráulicos y se mantuvo constante mediante el uso de un servo control mecánico.

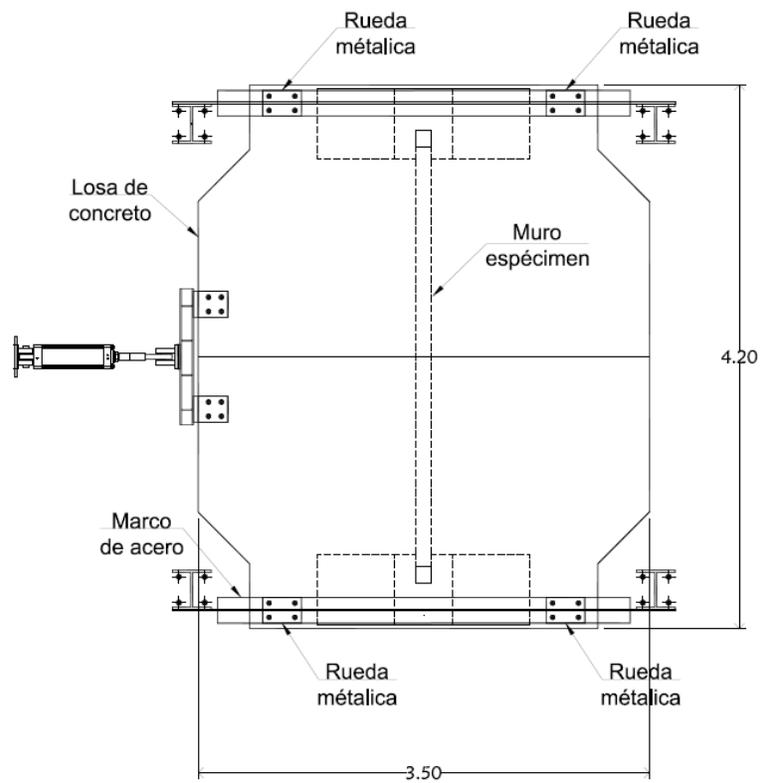


**Figura 3.31 Sistema de carga axial.**

El sistema de apoyos consistió de una losa de concreto reforzado, dos marcos de acero, cuatro ruedas metálicas, bloques de concreto y barras roscadas (Figura 3.32). Las dimensiones de la losa de concreto fueron de 4.20°m de ancho y 3.50 m de longitud (Figura 3.33). La losa se conectó al muro espécimen utilizando barras roscadas. Las ruedas se colocaron entre la parte inferior de losa de concreto y la parte superior de los marcos de acero (Figura 3.32). Dichas ruedas se conectaron en dos de los extremos de la losa (Figura 3.33). La conexión entre la losa de concreto y el marco de acero permitió el desplazamiento horizontal de la losa pero no el desplazamiento vertical. Adicionalmente, el muro espécimen se conectó en su parte inferior a la losa de reacción del laboratorio. La conexión se realizó utilizando bloques de concreto y barras roscadas (Figura 3.32).

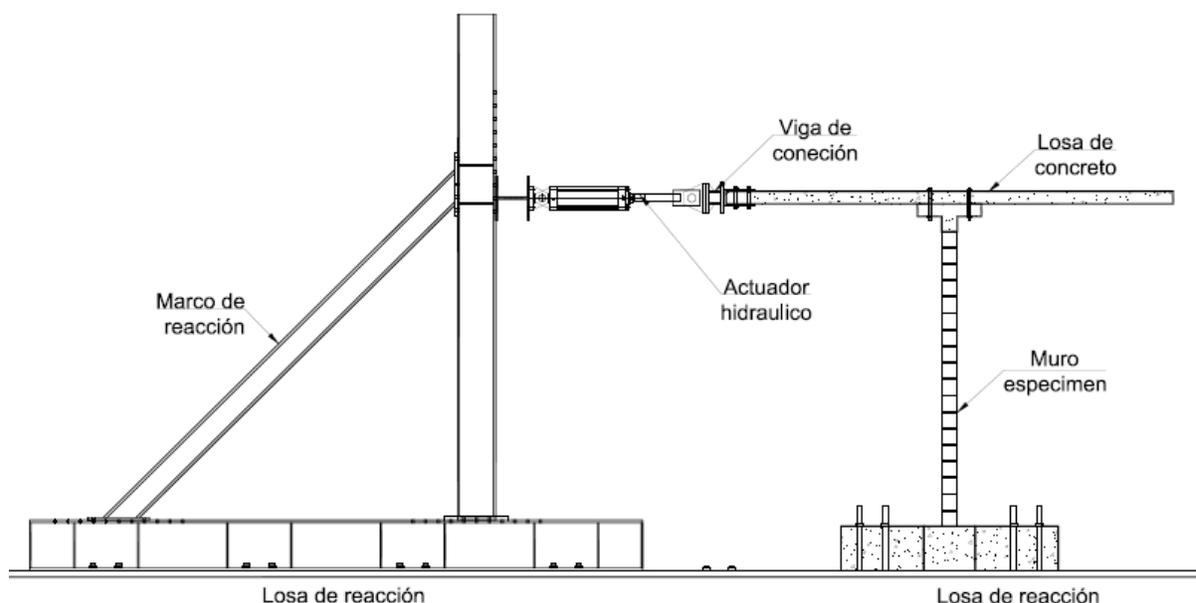


**Figura 3.32 Sistema de apoyo guiado.**



**Figura 3.33 Losa de concreto.**

El sistema de carga lateral consistió en un marco de reacción de acero, un actuador hidráulico de doble acción y una viga de conexión entre el actuador y la losa de concreto (Figura 3.34). El marco de reacción se conectó a la losa de reacción en el laboratorio mediante barras roscadas. Un extremo del actuador hidráulico se conectó al marco de reacción y el otro a la viga de conexión. El actuador hidráulico se controló de forma manual mediante una bomba hidráulica.

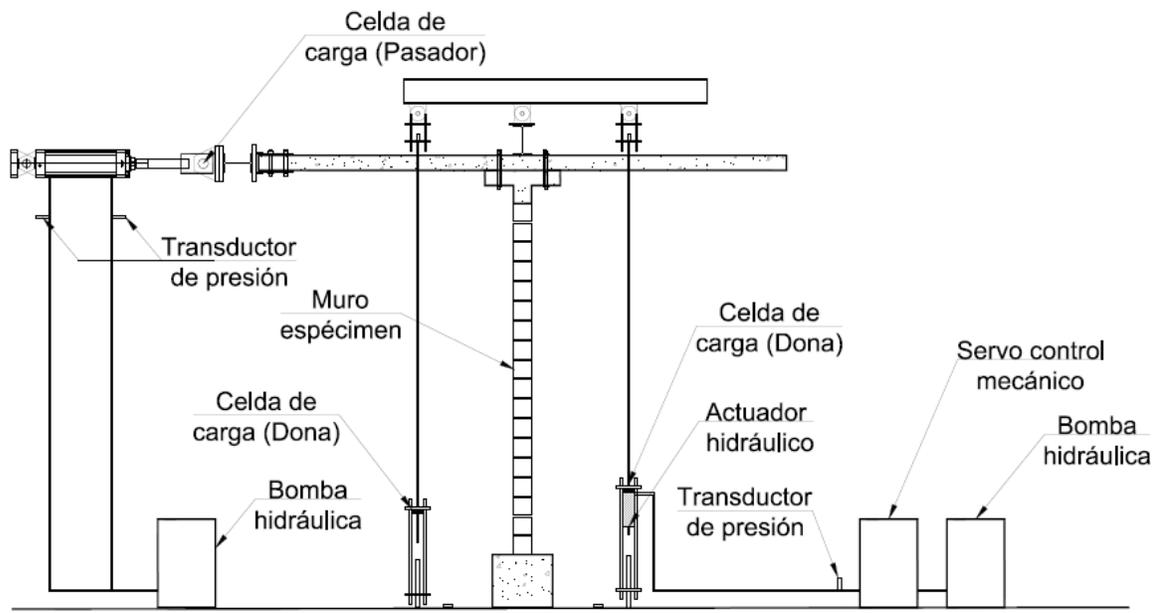


**Figura 3.34 Sistema de carga lateral.**

Para medir la carga axial se utilizaron cuatro celdas de carga tipo dona y un transductor de presión (Figura 3.35). Las celdas de carga fueron colocadas en las conexiones inferiores del sistema de carga axial. Se utilizaron celdas de carga de la marca "Futek", dos celdas con una capacidad de 4,500 kg y dos con una capacidad de 11,000 kg. El transductor de presión se conectó en la línea de alimentación de los actuadores hidráulicos. Se utilizó un transductor de presión de la marca "Sensotec" con una capacidad de 10,000 PSI.

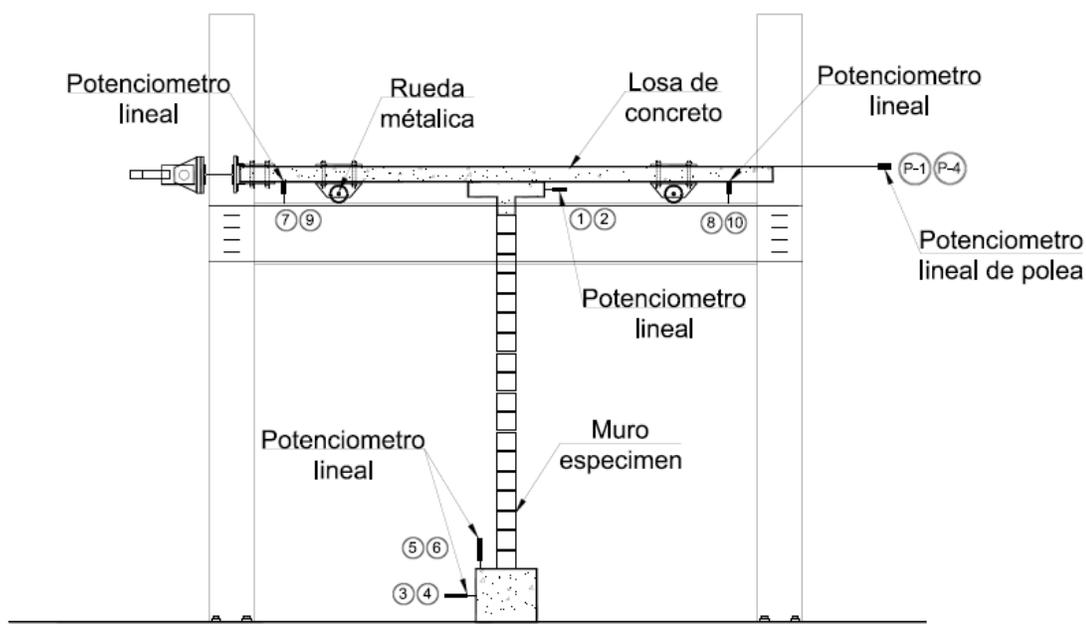
Para medir la carga lateral se utilizó una celda de carga tipo pasador y cuatro transductores de presión (Figura 3.35). La celda de carga se colocó en la conexión

entre el actuador hidráulico y la losa de concreto. Se utilizó una celda de carga de la marca “Strainert” de 40,000 kg de capacidad. Los transductores de presión se conectaron en ambas líneas de alimentación del actuador hidráulico. Se utilizaron transductores de la marca “Sensotec” de 1000 y 5000 PSI de capacidad.



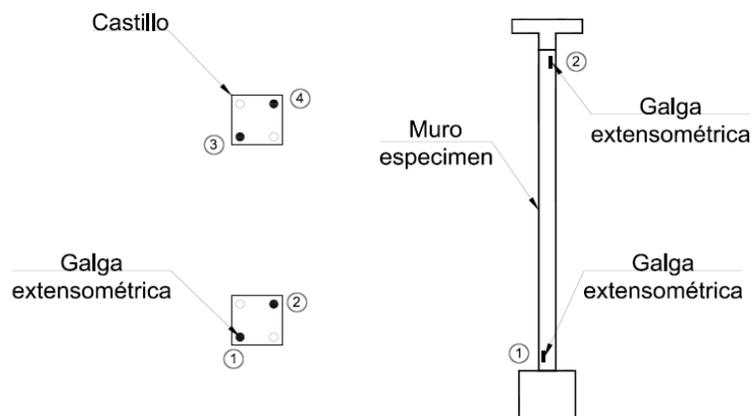
**Figura 3.35 Aplicación y medición de cargas.**

Durante el ensayo de los muros se midieron los desplazamientos fuera del plano en la parte superior del muro, el desplazamiento relativo entre el muro espécimen y la losa de concreto, el desplazamiento horizontal y vertical de la cadena inferior, el desplazamiento vertical de la losa de concreto y el desplazamiento vertical de las ruedas metálicas (Figura 3.36). Los desplazamientos fuera del plano fueron medidos por cuatro potenciómetros de polea de la marca “Unimesure” de 127 y 381 mm de capacidad. Para medir los desplazamientos relativos de la losa de concreto se utilizaron 2 potenciómetros lineales de 25 mm de longitud. Los desplazamientos de la cadena inferior se midieron con potenciómetros de 12 mm de longitud. Para medir los desplazamientos de la losa de concreto y las ruedas metálicas se utilizaron potenciómetros de 50 mm de longitud (Figura 3.36).



**Figura 3.36 Medición de desplazamientos.**

Se midió la deformación unitaria del acero de refuerzo longitudinal de los castillos. Se colocaron galgas extensométricas de 6 mm en dos barras del acero de refuerzo de cada uno de los castillos. En la Figura 3.37 se presenta la ubicación de dichas galgas.

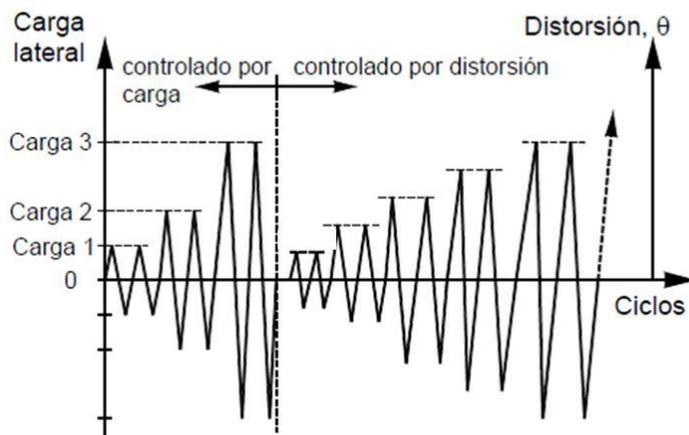


**Figura 3.37 Medición de deformaciones unitarias.**

La adquisición de los datos se realizó utilizando un equipo de la marca “National Instruments”. Se utilizaron 4 bloques terminales SCXI-1314, conectados mediante 4 módulos SCXI-1520 a un chasis modelo SCXI-1000. Dicho Chasis se conecto a una computadora portátil por medio de una tarjeta DAQCard modelo 6042E. Para la adquisición de los datos se utilizó el software de programación LabView.

### 3.6 Ensaye de los muros

El protocolo de carga utilizado en los ensayos se presenta en el Apéndice Normativo A “Criterio de aceptación de sistemas constructivos a base de mampostería diseñados por sismo” de las NTCM del RCDF (GDF 2004). En dicho protocolo se establece que los muros deberán ser probados en ciclos divididos en dos etapas (Figura 3.38). La primera controlada por la magnitud de la carga, aplicando cargas correspondientes al 25%, 50% y 100% de una carga estimada de agrietamiento. La segunda etapa se controla por distorsiones hasta la falla. En este proyecto la carga de agrietamiento fue sustituida por la carga estimada de fluencia del acero de refuerzo longitudinal de castillos.



**Figura 3.38 Protocolo de carga, NTCM del RCDF (GDF 2004).**

En la Figura 3.39 se presenta una vista general del sistema de carga e instrumentación antes de los ensayos.



**Figura 3.39 Sistema de carga e instrumentación.**

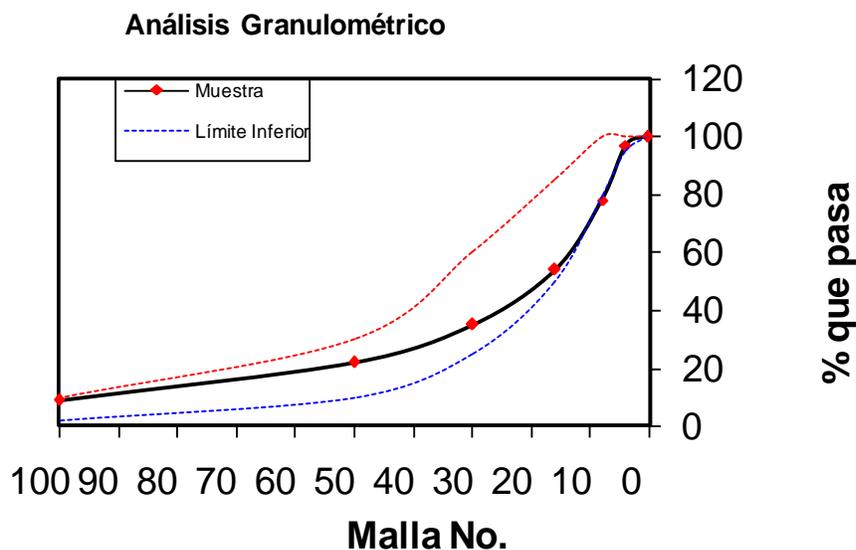
## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

En este capítulo se presentan las propiedades básicas de los materiales utilizados en la construcción de los muros de mampostería confinada, los resultados experimentales obtenidos de los ensayos de dichos muros, así como, los resultados analíticos obtenidos con los modelos desarrollados en este trabajo.

#### 4.1 PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS MATERIALES

En la Figura 4.1 se presenta la curva granulométrica obtenida para la muestra de la arena utilizada. El módulo de finura para dicha muestra fue de 3.05. Los detalles del análisis de dicha granulometría se presentan en el apéndice A.



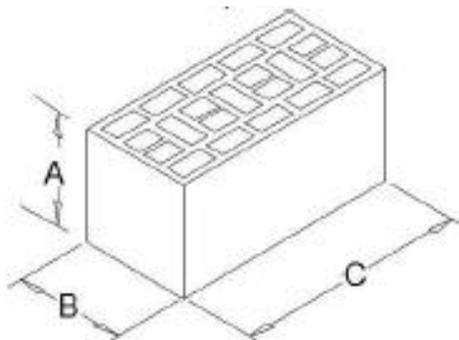
**Figura 4.1. Curvas granulométrica agregado fino.**

En la Tabla 4.1 se presentan las resistencias a compresión axial del concreto utilizado para la construcción de los diferentes elementos confinantes en cada uno de los muros, cadena inferior (CI), cadena superior (CS) y castillos (C). Dichos valores se obtuvieron de muestras curadas por inmersión en agua y ensayados a la edad de 28 días. Las resistencias a compresión axial promedio obtenidas fueron de 17.98, 16.08, 18.90, 16.30 y 17.12 MPa para los muros M1 a M5, respectivamente.

**Tabla 4.1. Resistencia a compresión axial del concreto**

<b>Muro</b>	<b>Elemento</b>	<b><math>f_c</math> (MPa)</b>	<b>Promedio y CV</b>
M1	C1	18.50	Promedio 17.98  CV 3.58%
	C 1	18.09	
	C 2	17.19	
	C 2	17.31	
	CS	18.83	
	CS	14.52	
M2	C1	15.35	Promedio 16.08  CV 8.41%
	C1	17.88	
	C2	18.94	
	C2	18.92	
	CS	19.12	
	CS	18.96	
M3	CI	19.08	Promedio 18.90  CV 1.97%
	CI	18.67	
	C1	19.13	
	C1	19.26	
	C2	17.09	
	C2	19.27	
	CS	14.87	
	CS	15.23	
M4	CI	15.09	Promedio 16.30  CV 9.96%
	CI	17.04	
	C1	14.16	
	C1	17.72	
	C2	18.65	
	C2	18.00	
	CS	17.88	
	CS	16.58	
M5	CI	15.10	Promedio 17.12  CV 6.56%
	CI	17.56	
	C1	16.84	
	C1	18.50	
	C2	18.09	
	C2	17.19	
	CS	17.31	
	CS	18.83	

En la Figura 4.2 se presenta un esquema general de la nomenclatura utilizada para las dimensiones de los tabiques. En la Tabla 2 se presentan las dimensiones y la resistencia a compresión axial de dichos tabiques. La resistencia a compresión axial promedio sobre área neta fue de 18.90 MPa, con un coeficiente de variación (CV) igual a 14 %.



**Figura 4.2 Dimensiones generales de las piezas de mampostería**

**Tabla 4.2. Dimensiones y resistencia a compresión axial de la piezas de mampostería.**

Tabique	Dimensiones			Área	Carga	fp
	A	B	C	Total		
	(mm)	(mm)	(mm)	(cm <sup>2</sup> )	(kN)	MPa
T-1	119.75	119.89	247.75	297.03	509.95	17.17
T-2	119.39	119.95	248.5	298.08	519.75	17.44
T-3	120.20	121.21	249.52	302.44	549.17	18.16
T-4	119.55	121.94	250.81	305.84	549.17	17.96
T-5	118.57	119.19	245.92	293.11	539.37	18.40
T-6	119.92	121.26	249.87	302.99	735.50	24.27
Promedio	119.56	120.57	248.73	299.91	567.15	18.90
CV	1.00%	0.00%	1.00%	2.00%	15.00%	14.00%

La resistencia a compresión axial y el modulo de elasticidad de la mampostería se presentan en la Tabla 4.3. La resistencia a compresión axial promedio sobre área total de las pilas de mampostería fue de 6.48 MPa, con un coeficiente de variación (CV) igual a 5%. El modulo de elasticidad obtenido fue de 5705.67 MPa, con un CV igual a 12%.

**Tabla 4.3. Resistencia a compresión axial y modulo de elasticidad de pilas de mampostería.**

Pila	fm MPa	Em MPa
P-1	6.32	5810.73
P-2	5.98	6616.64
P-3	7.00	5791.02
P-4	6.64	5443.57
P-5	6.38	4601.57
P-6	6.54	5970.48
Promedio	6.48	5705.67
CV	5.00%	12.00%

La resistencia a tensión por flexión perpendicular ( $f_{tpe}$ ) y paralela ( $f_{tpa}$ ) a las juntas de mortero horizontales se presentan en la Tabla 4.4. La resistencia a tensión perpendicular promedio fue de 0.45 MPa con un CV igual a 4%, mientras que la paralela fue de 0.78 MPa con un CV igual a 2%.

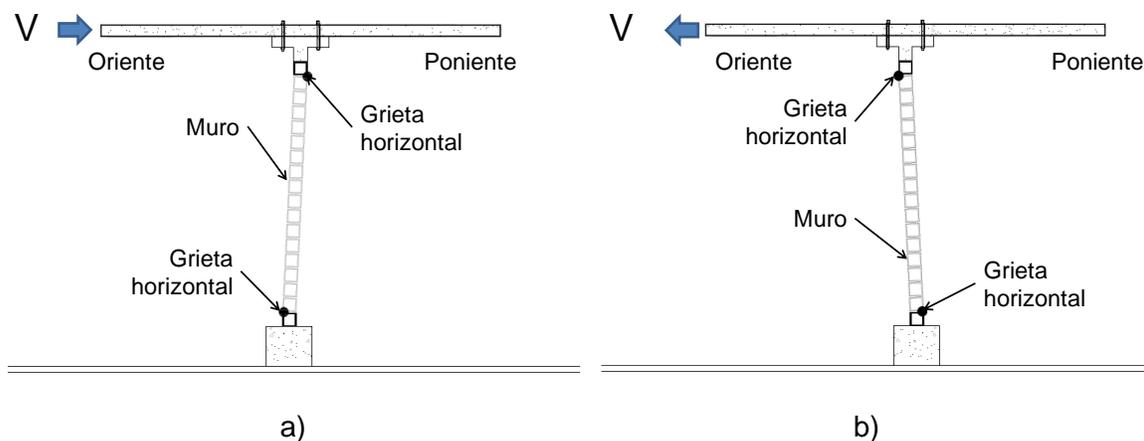
**Tabla 4.4. Resistencia a tensión por flexión perpendicular y paralela de la mampostería.**

Pila	ftpe MPa	ftpa MPa
M-1	0.44	0.77
M-2	0.47	0.80
M-3	0.46	0.76
Promedio	0.45	0.78
CV	4.00%	2.00%

## 4.2 ENSAYE DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA

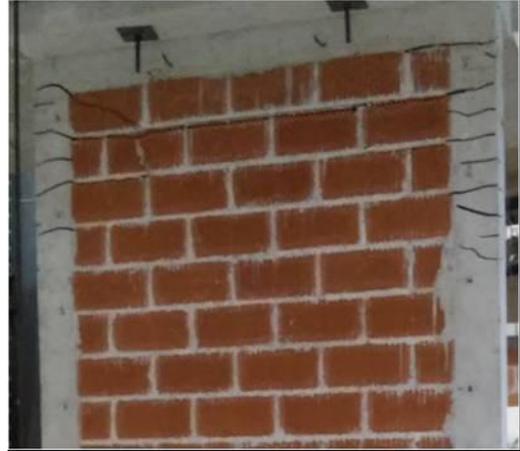
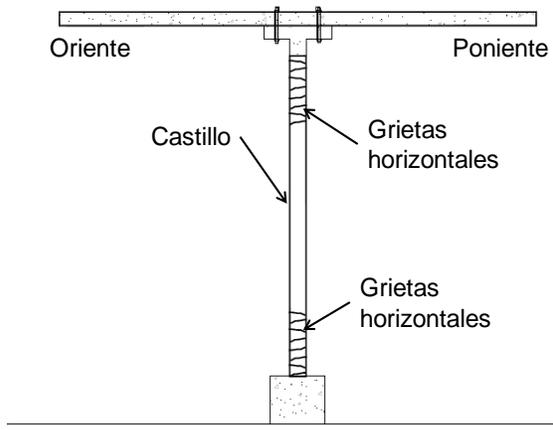
El comportamiento de los muros de mampostería confinada fue en general similar. Dicho comportamiento se describe en función de los eventos observados durante los ensayos. El primer evento observado fue la formación de grietas horizontales en la parte inferior del muro de la cara oriente y en la parte superior del muro en la cara poniente (Figura 4.3a). Dicho agrietamiento se observó durante la carga en dirección hacia el poniente. Al cargar hacia el oriente los agrietamientos se presentaron en la

parte inferior de la cara poniente y en la parte superior de la cara oriente del muro (Figura 4.3b). El agrietamiento horizontal se observó generalmente, entre las dos primeras hiladas de tabiques en la parte inferior y entre las dos últimas hiladas en la parte superior. Dichas grietas horizontales, inicialmente no se observaron a lo largo de toda la longitud del muro.



**Figura 4.3 Agrietamiento horizontal en el panel de mampostería.**

Posteriormente, se registró la fluencia del acero de refuerzo longitudinal, tanto en la parte superior como en la parte inferior de los castillos. Dicha fluencia del acero de refuerzo se observó durante la carga en ambas direcciones. Se observaron grietas horizontales en la parte inferior y superior de los castillos. Dichas grietas horizontales se formaron a lo largo de una longitud aproximada de 45 cm (Figura 4.4). Posterior al registro de la carga máxima, se observó una grieta vertical en la parte central del panel de mampostería en los muros M1, M3 y M4. Se observó el aplastamiento de la mampostería principalmente en las esquinas superiores de panel del muro (Figura 4.5). Adicionalmente se observó el aplastamiento del concreto en la parte inferior y superior de los castillos (Figura 4.6). El ensaye de los muros se detuvo cuando el desplazamiento horizontal en la parte superior del muro fue igual a 17.5 cm. Dicho desplazamiento fue limitado por la capacidad del actuador hidráulico utilizado en el ensaye.



**Figura 4.4** Agrietamiento horizontal en los castillos.

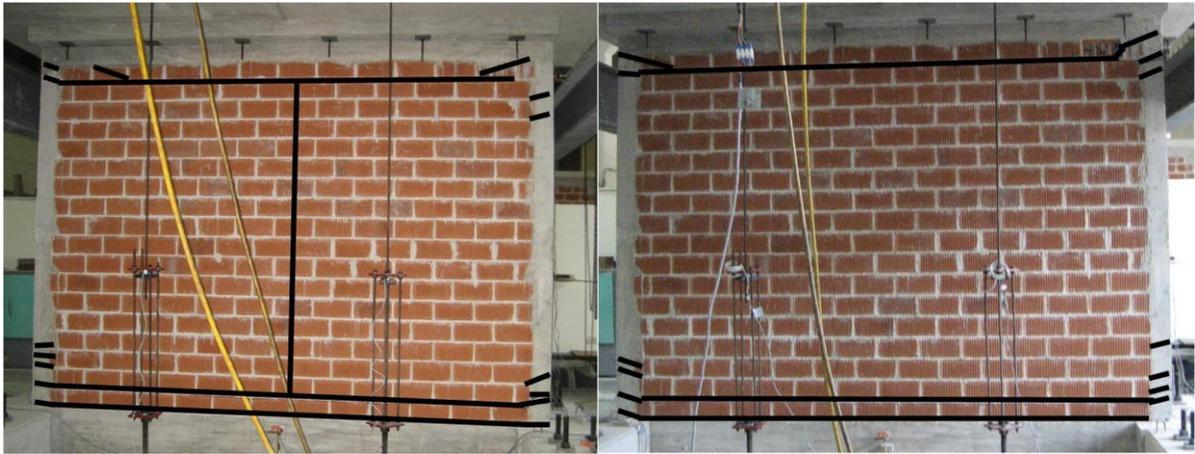


**Figura 4.5** Aplastamiento de la mampostería.



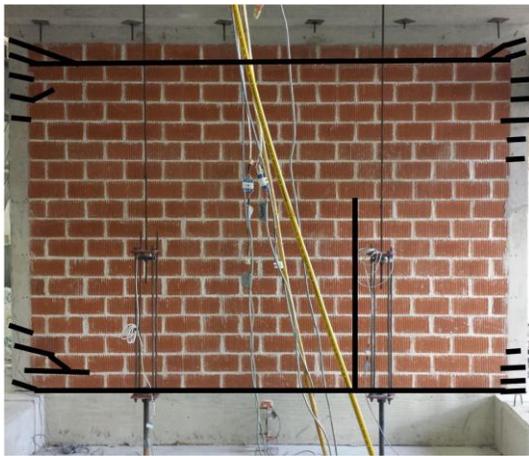
**Figura 4.6 Aplastamiento del concreto en castillos.**

En la Figura 4.7 se presenta el patrón de agrietamiento final de los muros ensayados. En la Figura 4.8, Figura 4.9, Figura 4.10, Figura 4.11 y Figura 4.12 se presentan las curvas "Carga fuera del plano - distorsión" obtenidas del ensaye de los muros M1 al M5, respectivamente.



M1

M2



M3

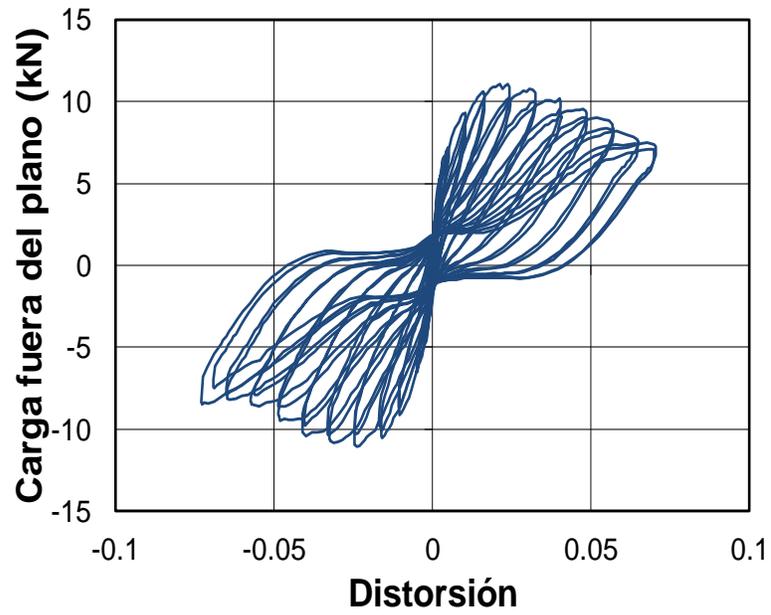


M4

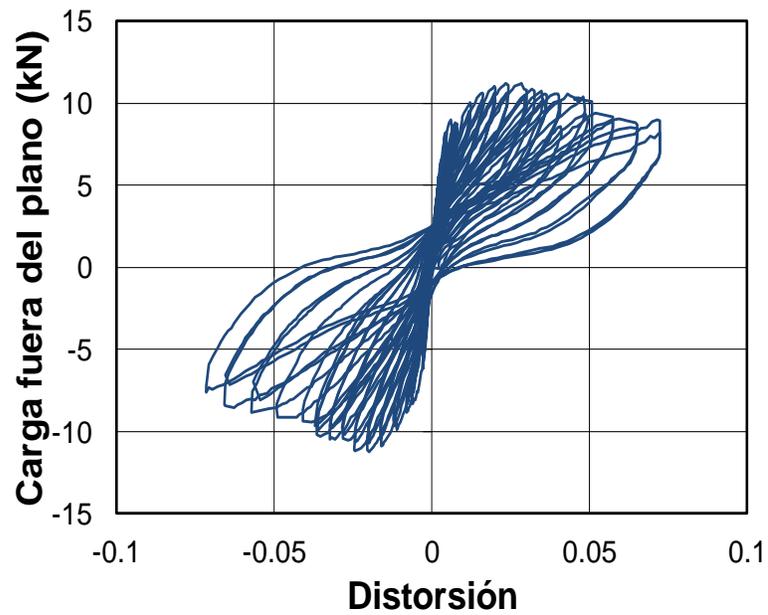


M5

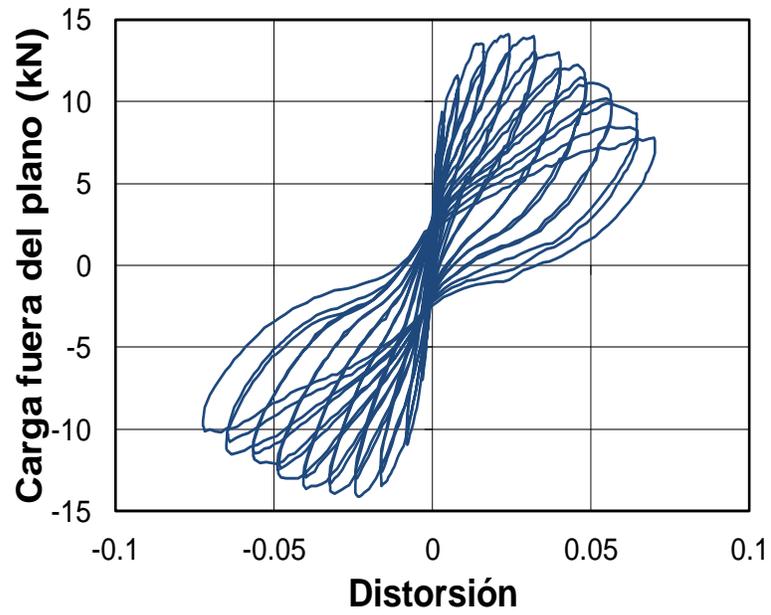
**Figura 4.7 Patrón de agrietamiento final de muros.**



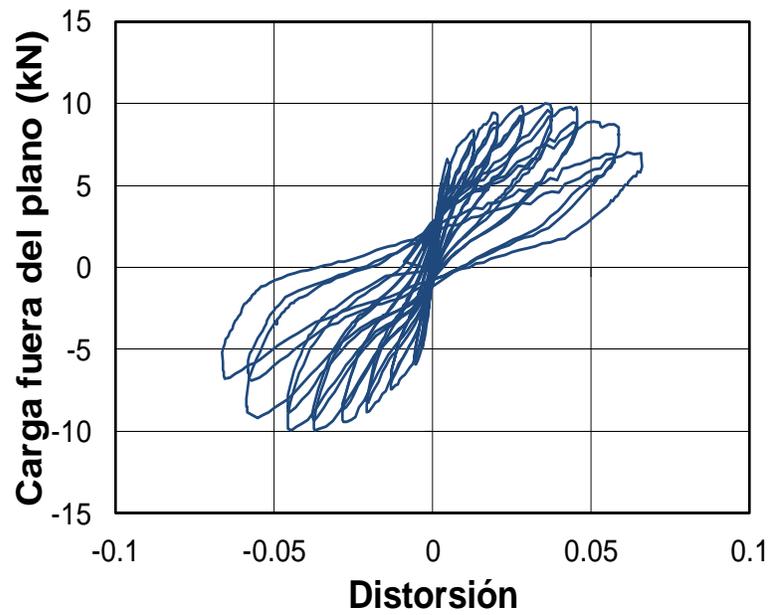
**Figura 4.8** Curva "Carga fuera del plano - distorsión" del muro M1.



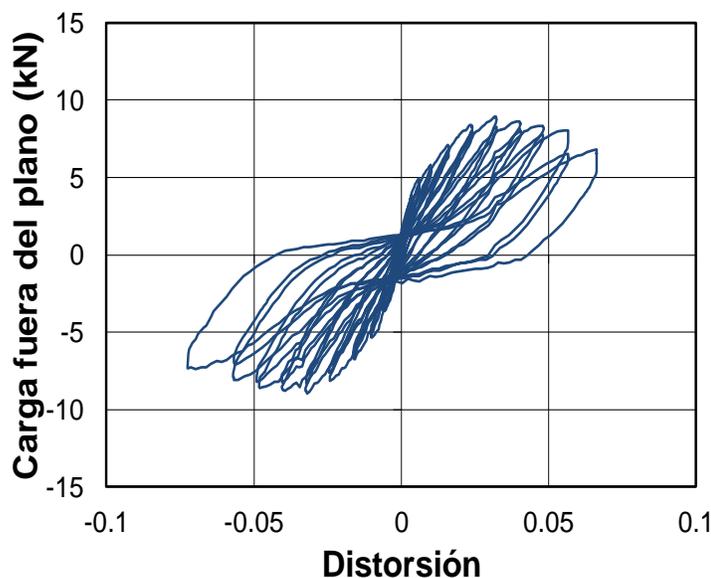
**Figura 4.9** Curva "Carga fuera del plano - distorsión" del muro M2.



**Figura 4.10** Curva "Carga fuera del plano - distorsión" del muro M3.



**Figura 4.11** Curva "Carga fuera del plano - distorsión" del muro M4.

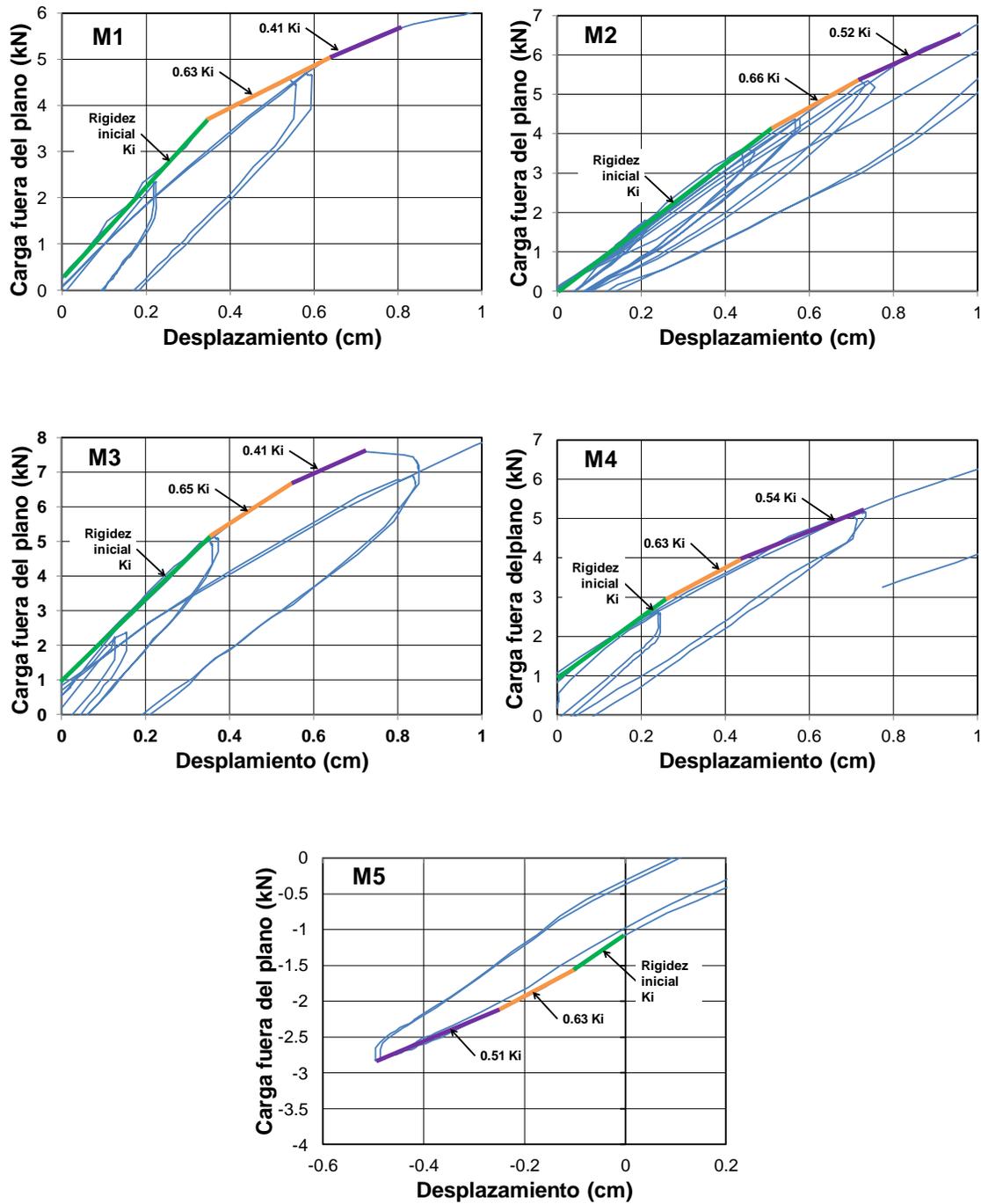


**Figura 4.12** Curva "Carga fuera del plano - distorsión" del muro M5.

Debido a que fue difícil determinar el instante en el cual ocurrió el agrietamiento, se determinaron las cargas de agrietamiento utilizando las curvas carga fuera del plano - distorsión de cada uno de los muros. Las cargas de agrietamiento se obtuvieron determinando la rigidez secante de dos puntos consecutivos de la curva durante los primeros ciclos. Se consideró que la carga de agrietamiento ( $V_{ae}$ ) corresponde a aquella en la cual la relación de la rigidez secante entre la rigidez inicial es aproximadamente el 50% (Figura 4.13).

En la

Tabla 4.5 se presentan las resistencias de agrietamiento fuera del plano ( $V_{ae}$ ) y resistencia fuera del plano ( $V_{me}$ ) obtenidas de los ensayos para cada uno de los muros, así como, su correspondiente distorsión. La resistencia de agrietamiento corresponde a la obtenida de las graficas carga-distorsión mediante el procedimiento descrito anteriormente. La resistencia máxima fuera del plano corresponde al valor máximo obtenido durante el ensaye. La distorsión corresponde a la obtenida con los desplazamientos medidos en la parte superior del muro.



**Figura 4.13 Resistencia de agrietamiento, obtenida de curva carga - distorsión.**

**Tabla 4.5. Resistencia de agrietamiento ( $V_{ae}$ ), máxima ( $V_{me}$ ) fuera del plano de los muros y sus correspondientes distorsiones.**

<b>Muro</b>	<b><math>P</math> (MPa)</b>	<b><math>H/L</math></b>	<b><math>V_{ae}</math> (kN)</b>	<b>Distorsión agr.</b>	<b><math>V_{me}</math> (kN)</b>	<b>Distorsión max.</b>
M-1	0.11	0.74	5.07	.00256	10.95	0.024
M-2	0.23	0.74	5.36	.00287	11.22	0.028
M-3	0.35	0.74	6.71	.0022	14.07	0.026
M-4	0.23	1.06	3.95	.00172	9.96	0.032
M-5	0.23	1.84	2.18	.00116	8.93	0.034

### **4.3 MODELOS ANALÍTICOS PARA LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA**

Se determinaron las resistencias de agrietamiento fuera del plano ( $V_{aa}$ ) y las resistencias fuera del plano ( $V_{ma}$ ) utilizando los modelos analíticos presentados en el capítulo anterior. Se utilizó la resistencia a compresión axial promedio de la mampostería ( $f_m$ ) de 6.48 MPa, un modulo de elasticidad de la mampostería ( $E_m$ ) de 5705 MPa, el valor promedio de la resistencia a compresión axial del concreto ( $f'_c$ ) para los elementos confinantes de cada muro (Tabla 4.1), la deformación unitaria máxima de la mampostería igual a 0.003 (Drysdale and Hamid 2008) y las características geométricas de los muros ensayados. En la Tabla 4.6 se presentan las resistencias de agrietamiento fuera del plano y las resistencias fuera del plano obtenidas para los muros M1 a M5.

**Tabla 4.6. Resistencia de agrietamiento ( $V_{aa}$ ) y máxima ( $V_{ma}$ ) fuera del plano de los muros, obtenidas con los modelos analíticos.**

<b>Muro</b>	<b><math>P</math> (Mpa)</b>	<b><math>H/L</math></b>	<b><math>V_{aa}</math> (kN)</b>	<b><math>V_{ma}</math> (kN)</b>
M-1	0.11	0.74	4.80	10.71
M-2	0.23	0.74	5.77	11.76
M-3	0.35	0.74	6.37	12.91
M-4	0.23	1.06	3.85	10.61
M-5	0.23	1.84	2.24	9.69

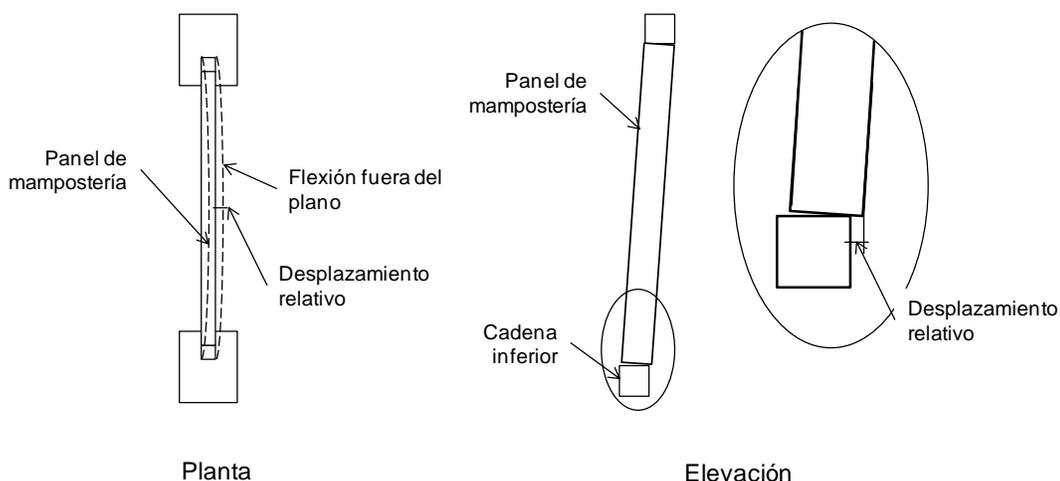
## CAPÍTULO 5

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se presenta una discusión sobre los resultados obtenidos de los ensayos de los muros de mampostería confinada estudiados en este trabajo, así como la calibración del modelo utilizado para obtener la resistencia de agrietamiento fuera del plano. Se comparan y discuten los resultados obtenidos de forma experimental con los correspondientes analíticos. Finalmente, se propone un modelo tri-lineal para representar el comportamiento de las curvas carga fuera del plano - distorsión de los muros ensayados.

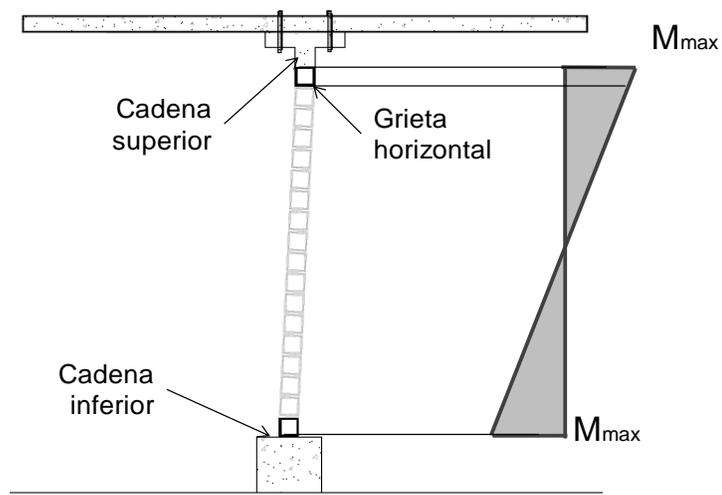
#### 5.1 PATRÓN DE AGRIETAMIENTO EN MUROS

El patrón de agrietamiento final de los muros fue en general similar. Se observaron grietas horizontales entre las dos primeras y las dos últimas hiladas de tabiques en ambas caras del muro. Se observaron grietas horizontales en la parte inferior y superior de los castillos. En la parte final del ensaye de los muros M1, M3 y M4, se observó una grieta vertical en la parte central del panel de mampostería. Dicha grieta vertical está relacionada con el desplazamiento relativo observado entre el panel de mampostería y la cadena inferior. Debido a lo anterior en el panel de mampostería se presentó flexión fuera del plano alrededor del eje vertical (Figura 5.1).

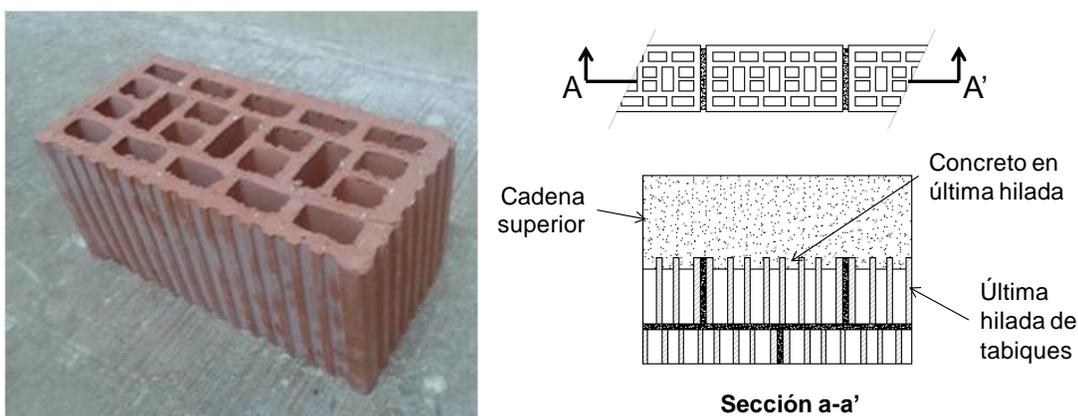


**Figura 5.1. Flexión fuera del plano del panel de mampostería.**

La localización de la primera grieta horizontal se presentó entre las dos últimas hiladas de tabiques en la parte superior del panel de mampostería. Esta localización no coincide con la del momento máximo actuante, la cual se ubica entre la última hilada de tabiques y la cadena superior (Figura 5.2). Lo anterior se atribuye a que cuando se colocó el concreto de la cadena superior, este entró en las perforaciones de los tabiques (Figura 5.3). Lo anterior creó una mayor adherencia entre la última hilada de tabiques y la cadena superior.



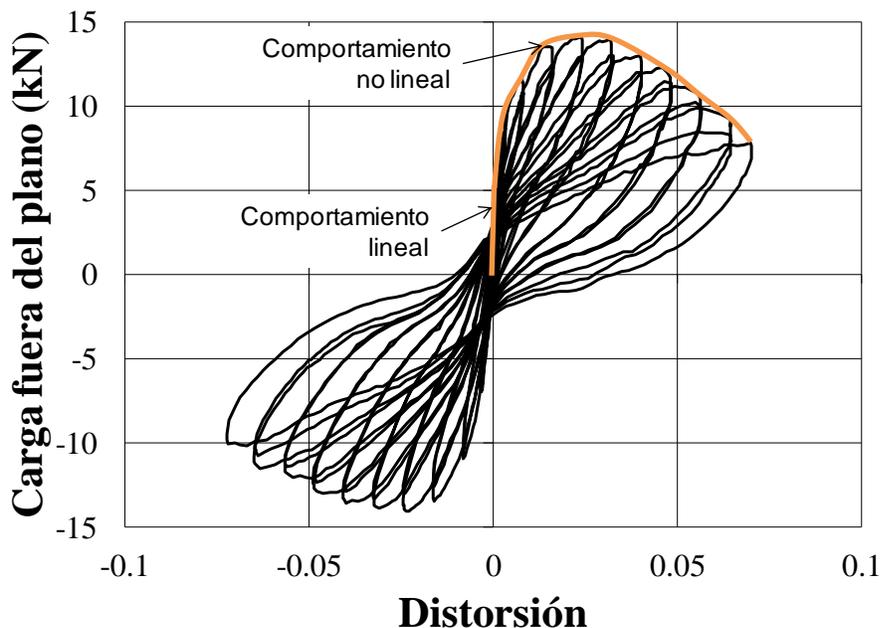
**Figura 5.2. Localización del momento máximo actuante.**



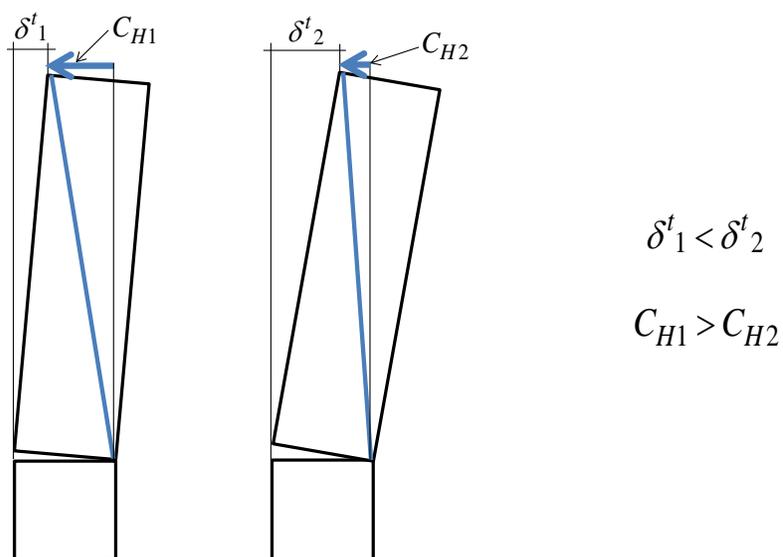
**Figura 5.3. Concreto en última hilada de tabiques.**

## 5.2 CURVA CARGA FUERA DEL PLANO - DISTORSIÓN

El comportamiento fuera del plano de los muros de mampostería confinada fue en general similar. Se observó un comportamiento elástico lineal hasta la formación de las primeras grietas horizontales. Después de dicho agrietamiento se observó un comportamiento no lineal (Figura 5.4). Dicho comportamiento no lineal está relacionado con la formación de nuevas grietas horizontales en el panel de mampostería y la formación de grietas horizontales en los castillos, así como a la fluencia del acero de refuerzo longitudinal de dichos elementos. Al alcanzarse la resistencia máxima fuera del plano, se presentó una disminución en la carga hasta alcanzar el desplazamiento máximo. Dicha reducción está relacionada con el aplastamiento de la mampostería observado en las dos últimas hiladas de tabiques (Figura 4.5) y el aplastamiento del concreto en los castillos (Figura 4.6). Adicionalmente, el incremento en el desplazamiento fuera del plano, generó que la componente horizontal de los puntales de compresión fuera menor (Figura 5.5). Lo anterior, causó una reducción de la contribución del panel de mampostería a la resistencia fuera del plano del muro.



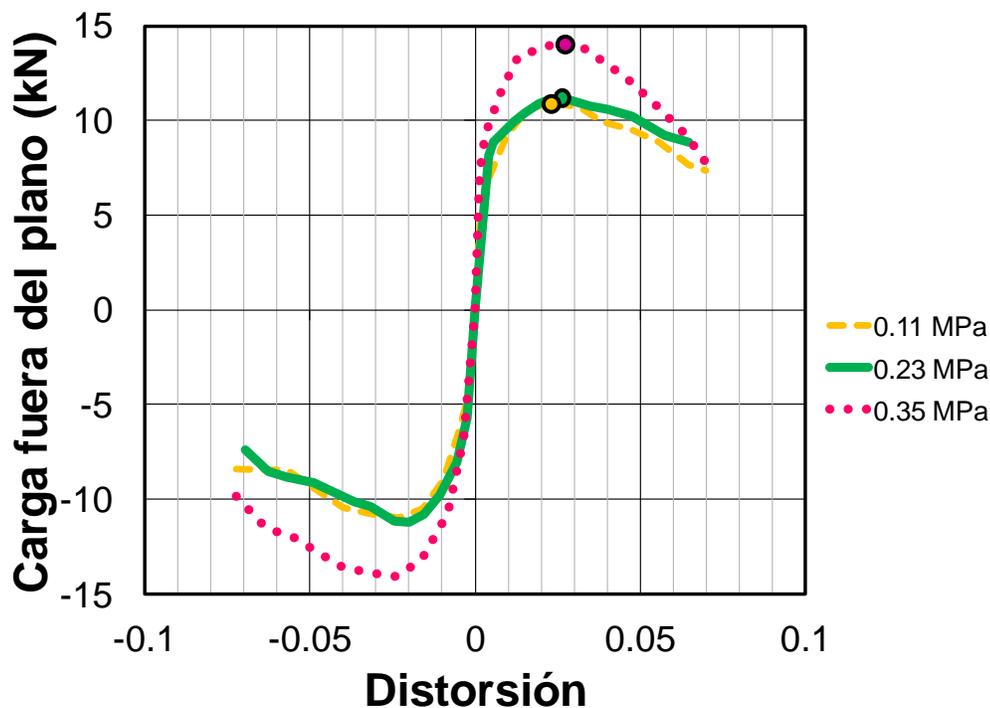
**Figura 5.4. Curva "Carga fuera del plano - distorsión del muro M3.**



**Figura 5.5. Componente horizontal de los puntales de compresión.**

### 5.3 MUROS CON DIFERENTE CARGA AXIAL

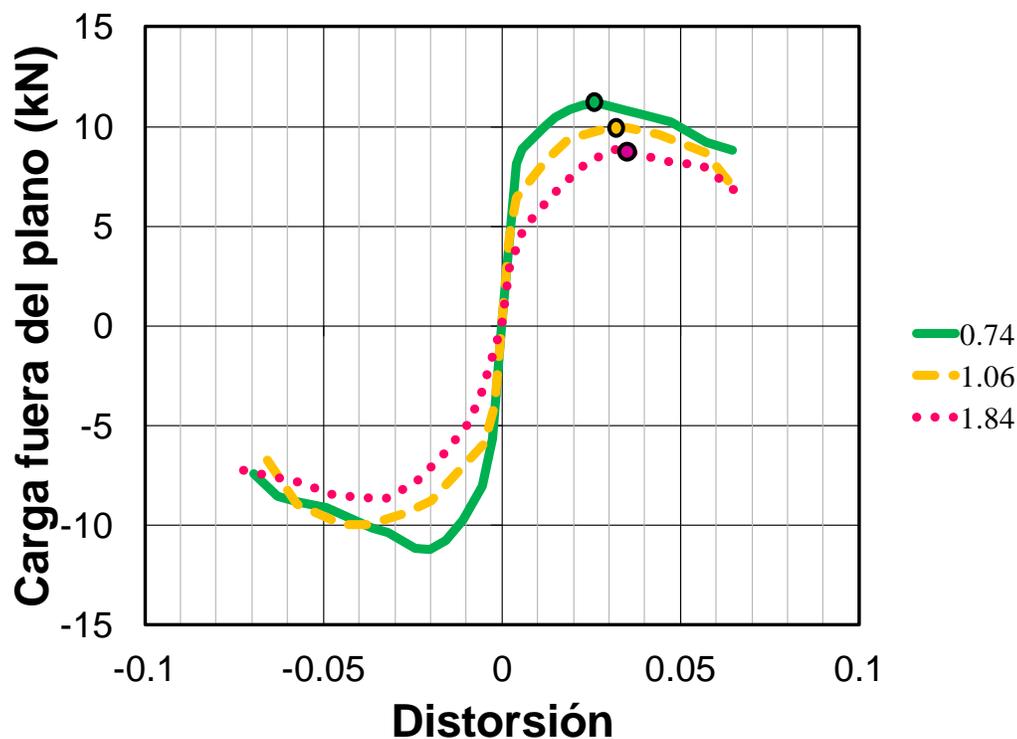
En la Figura 5.6 se presentan las curvas carga fuera del plano-distorsión obtenidas en los ensayos para los muros con diferente carga axial. En dicha figura se observa que el comportamiento de los muros fue similar. La resistencia fuera del plano se presentó entre una distorsión de 0.024 y 0.028. Se observa que para muros con la misma relación de aspecto, la resistencia fuera del plano aumenta si la carga axial aumenta. Lo anterior está relacionado con la restricción adicional al desplazamiento vertical de la cadena superior que provee la carga axial. Dicha restricción incrementa la magnitud de los puntales de compresión para un desplazamiento fuera del plano dado. La pequeña diferencia entre la resistencia máxima fuera del plano del muro M1 y M2 está relacionada con la menor resistencia a la compresión axial del concreto en los elementos confinantes verticales del muro M2 con respecto de los del muro M1 (Tabla 4.1).



**Figura 5.6. Curvas "Carga fuera del plano - distorsión" para muros con diferente carga axial.**

#### 5.4 MUROS CON DIFERENTE RELACIÓN DE ASPECTO

En la Figura 5.7 se presentan las curvas carga fuera del plano-distorsión obtenidas en los ensayos para los muros con diferente relación de aspecto. En dicha figura se observa que la resistencia fuera del plano se presentó entre una distorsión de 0.028 y 0.034. Se observa que para muros con la misma carga axial, mientras la relación de aspecto del muro aumenta, la resistencia fuera del plano disminuye. Lo anterior está relacionado con la longitud de los muros, mientras la longitud del muro aumenta, la contribución del panel de mampostería también aumenta. Sin embargo la contribución a la resistencia de los elementos confinantes se mantiene igual.



**Figura 5.7. Curvas "Carga fuera del plano - distorsión" para muros con diferente relación de aspecto.**

## 5.5 DISTORSIONES MÁXIMAS DE LOS MUROS

En la Figura 5.6 y Figura 5.7 se observa que las resistencias fuera del plano de los muros están asociadas con distorsiones entre 0.024 y 0.034. Las distorsiones permitidas por las NTC-M (2004) para muros en el plano, son menores que las observadas en este trabajo para muros fuera del plano. Debido a lo anterior las resistencias en y fuera del plano no pueden ser sumadas. La resistencia fuera del plano debe ser calculada utilizando una distorsión asociada con la resistencia de los muros en el plano. Aún cuando la distorsión máxima de los muros fue mayor a 0.05 (Figura 5.6 y Figura 5.7) los muros no colapsaron. El confinamiento de los catillos proporcionó suficiente soporte fuera del plano para evitar el colapso del panel de mampostería.

## 5.6 COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANALÍTICOS

En la Tabla 5.1 se presentan las resistencias de agrietamiento analíticas y experimentales obtenidas para los muros ensayados. En dicha tabla se observa que la relación entre los resultados analíticos y experimentales varía entre 0.94 y 1.07, lo que indica que con el modelo analítico se obtienen valores de predicción satisfactorios.

**Tabla 5.1. Resistencia de agrietamiento experimental y analítica.**

<b>Muro</b>	<b>V<sub>aa</sub></b> <b>(kN)</b>	<b>V<sub>ae</sub></b> <b>(kN)</b>	<b>V<sub>aa</sub>/V<sub>ae</sub></b>
M1	4.80	5.07	0.95
M2	5.77	5.36	1.07
M3	6.33	6.71	0.94
M4	3.87	3.95	0.98
M5	2.24	2.18	1.02
		<b>Promedio</b>	<b>0.99</b>
		<b>C V</b>	<b>5.71 %</b>

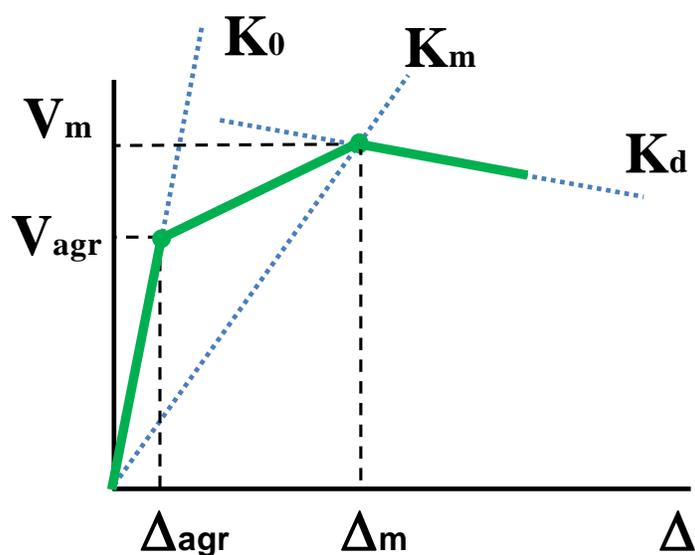
En la Tabla 5.2 se presentan las resistencias fuera del plano analíticas y experimentales obtenidas para los muros ensayados. En dicha tabla se observa que la relación entre los resultados analíticos y experimentales varía entre 0.92 y 1.08, lo que indica que con el modelo analítico se predicen de forma satisfactoria las resistencias fuera del plano.

**Tabla 5.2. Resistencia máxima experimental y analítica.**

<b>Muro</b>	<b>V<sub>ma</sub></b> <b>(kN)</b>	<b>V<sub>me</sub></b> <b>(kN)</b>	<b>V<sub>ma</sub>/V<sub>me</sub></b>
M1	10.71	10.95	0.98
M2	11.76	11.22	1.05
M3	12.91	14.07	0.92
M4	10.61	9.96	1.06
M5	9.69	8.93	1.08
		<b>Promedio</b>	<b>1.02</b>
		<b>C V</b>	<b>6.53%</b>

## 5.7 PROPUESTA DE MODELO TRI-LINEAL

Se desarrolló un modelo analítico tri-lineal para representar las curvas carga fuera del plano - distorsión de los muros ensayados. Dicho modelo está definido por una rigidez inicial de agrietamiento ( $K_0$ ), una rigidez a la carga máxima ( $K_m$ ), y una rigidez de descarga ( $K_d$ ), Figura 5.8. La rigidez inicial de agrietamiento se calculó con la ecuación 5.1, donde  $\phi_1$  y  $\phi_2$  son factores que dependen de la carga axial y relación de aspecto, respectivamente (ecuación 5.2 y ecuación 5.3).  $K_{muro}$  es la rigidez del muro calculada con la ecuación 5.4, donde  $E_m$  es el módulo de elasticidad de la mampostería,  $I$  es el momento de inercia calculado con la sección total del muro y  $h'$  es la altura del panel de mampostería.



**Figura 5.8. Modelo analítico tri-lineal, comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada.**

$$K_0 = \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot K_{muro} \quad 5.1$$

$$\phi_1 = 0.4 + 0.6 \cdot P \quad 5.2$$

$$\phi_2 = 1.26 - 0.33 \left( \frac{H}{L} \right) \quad 5.3$$

$$K_{muro} = \frac{12 \cdot E_m \cdot I}{h^3} \quad 5.4$$

La rigidez a la carga máxima y de descarga se calcularon con las ecuaciones 5.5 y 5.6, respectivamente. Donde  $\alpha_1$  y  $\beta_1$  son factores que dependen de la carga axial, y  $\alpha_2$  y  $\beta_2$  son factores que dependen de la relación de aspecto del muro. Dichos factores se obtienen con las ecuaciones 5.7 a 5.10.. El procedimiento para determinar los factores  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  relacionados con la carga axial y la relación de aspecto se presenta en el Apéndice B.

$$K_m = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot K_0 \quad 5.5$$

$$K_d = -\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot K_0 \quad 5.6$$

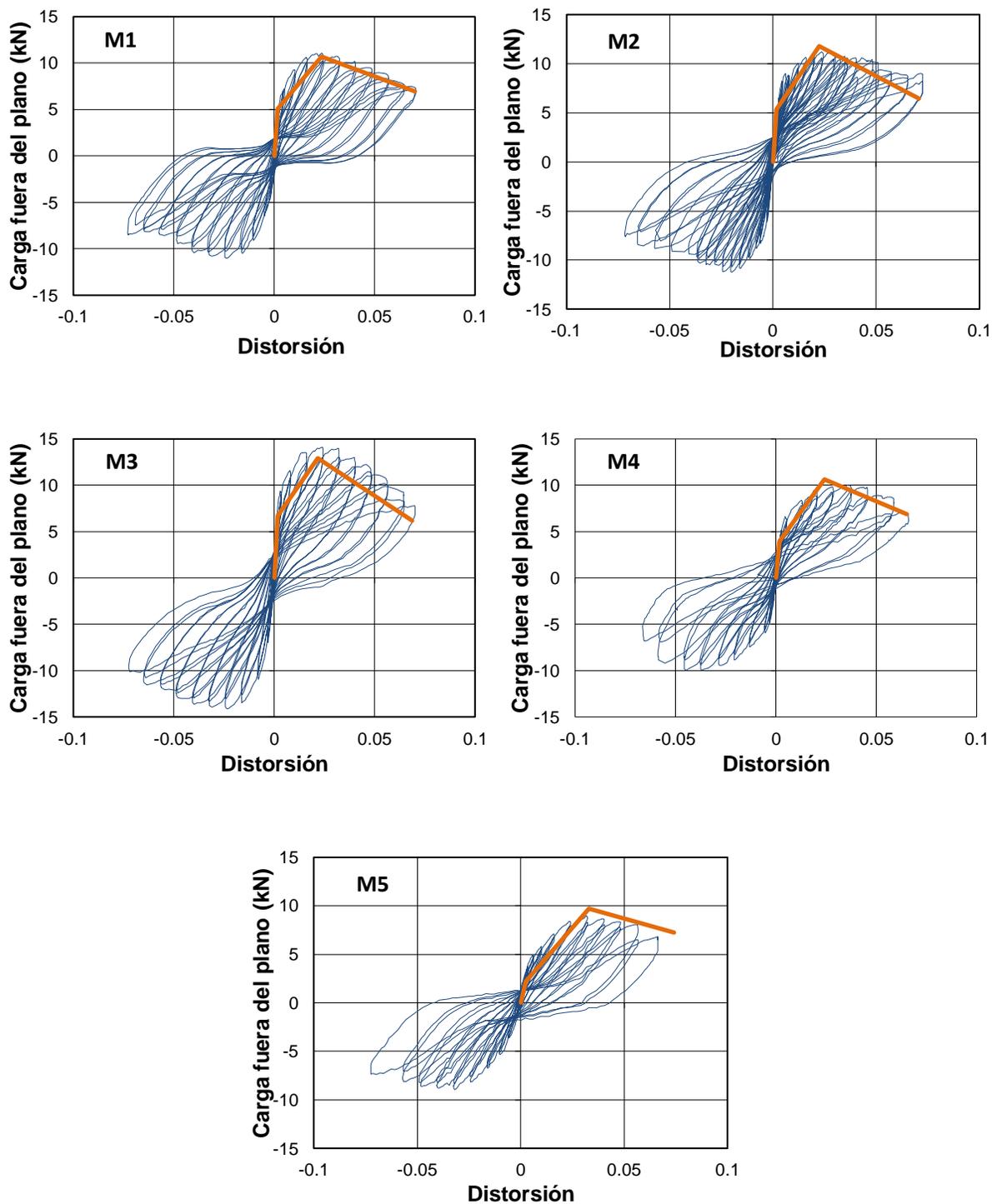
$$\alpha_1 = 0.16 \quad 5.7$$

$$\alpha_2 = 0.21 + 1.02 \left( \frac{H}{L} \right) \quad 5.8$$

$$\beta_1 = 0.03 \quad 5.9$$

$$\beta_2 = 0.33 + 1.16 \left( \frac{H}{L} \right) \quad 5.10$$

Se determinó el modelo tri-lineal para los muros M1 a M5. Se utilizaron las propiedades geométricas de cada uno de los muros y el modulo de elasticidad promedio de la mampostería ( $E_m$ ) de 5705 MPa. Se utilizó la resistencia de agrietamiento y la resistencia fuera del plano obtenidas con los modelos analíticos propuestos. En la Figura 5.9 se presentan las curvas carga fuera del plano - distorsión y el modelo tri-lineal obtenido para cada uno de los muros.



**Figura 5.9. Curva "Carga fuera del plano - distorsión" y modelo tri-lineal de muros.**

En la Figura 5.9 se observa que el modelo tri-lineal representa de forma conservadora la primera parte de las curvas carga fuera del plano- distorsión de los muros ensayados. Para representar de mejor forma el comportamiento a partir del agrietamiento de muro y hasta la carga máxima, se propuso utilizar la resistencia de agrietamiento  $V_{aa}$  multiplicada por un factor  $\phi$  (ecuación 5.11).

$$V_a = \phi \cdot V_{aa} = 1.7 \cdot V_{aa} \quad 5.11$$

El valor del factor  $\phi$  se obtuvo mediante un proceso iterativo utilizando el criterio de áreas iguales bajo la curva carga fuera del plano- distorsión. El procedimiento utilizado se describe a continuación:

1. Se define la resistencia fuera del plano ( $V_{ma}$ ) obtenida con el modelo analítico y su correspondiente distorsión obtenida con la rigidez  $K_m$ , (Punto B, Figura 5.10).
2. Se calcula el área bajo la curva experimental carga fuera del plano - distorsión ( $A_{curva}$ ), Figura 5.10.
3. Se determina el valor de la carga de agrietamiento ( $V_a$ ) (Ecuación 5.12). En este paso inicialmente se asume un valor de  $\phi_i$  igual a 1

$$V_a = \phi_i \cdot V_{aa} \quad 5.12$$

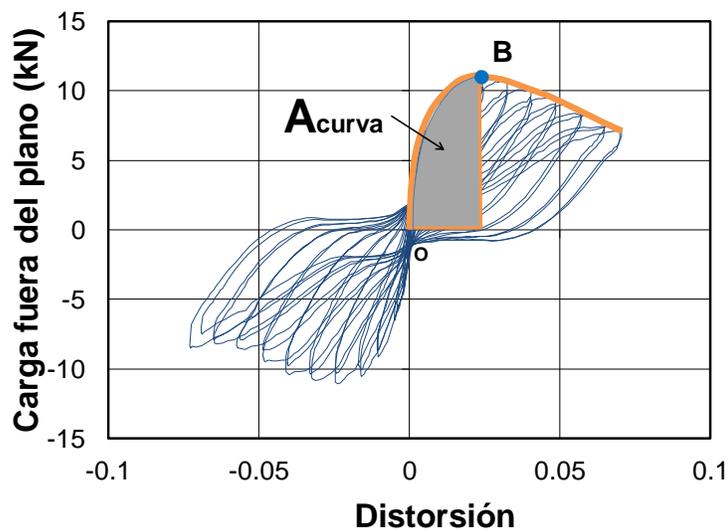
4. Se define la resistencia de agrietamiento fuera del plano ( $V_a$ ) y su correspondiente distorsión, obtenida con la rigidez  $K_0$  (Punto A, Figura 5.11).
5. Se definen las líneas OA y AB y se calcula el área bajo la curva analítica ( $A_{lineal}$ ), Figura 5.11.
6. Se determina el error (Ecuación 5.13); si el error es mayor a la tolerancia (5%), se calcula un nuevo valor de  $\phi_i$ .

$$error = \frac{A_{curva} - A_{lineal}}{A_{curva}} \cdot 100 \quad 5.13$$

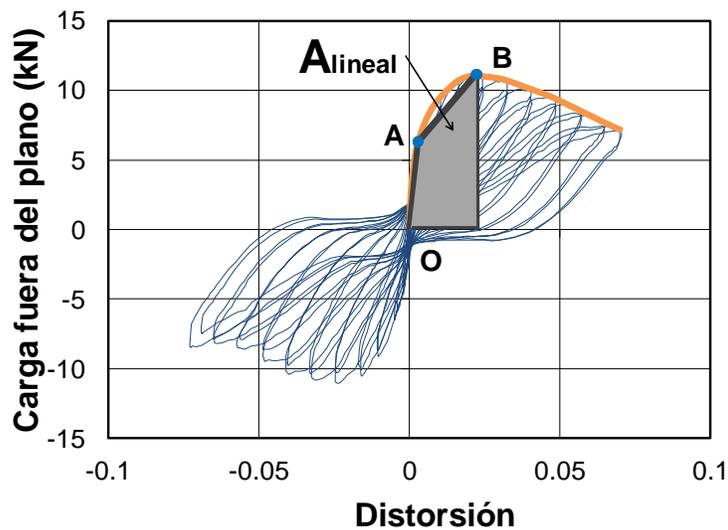
7. Se calcula el nuevo valor de  $\phi_i$ , (ecuación 5.14).

$$\phi_{i+1} = \phi_i \cdot \frac{A_{curva}}{A_{lineal}} \quad 5.14$$

8. Se repiten los pasos del 3 al 8 con el nuevo valor de  $\phi_i$ , hasta que el error sea menor que la tolerancia.

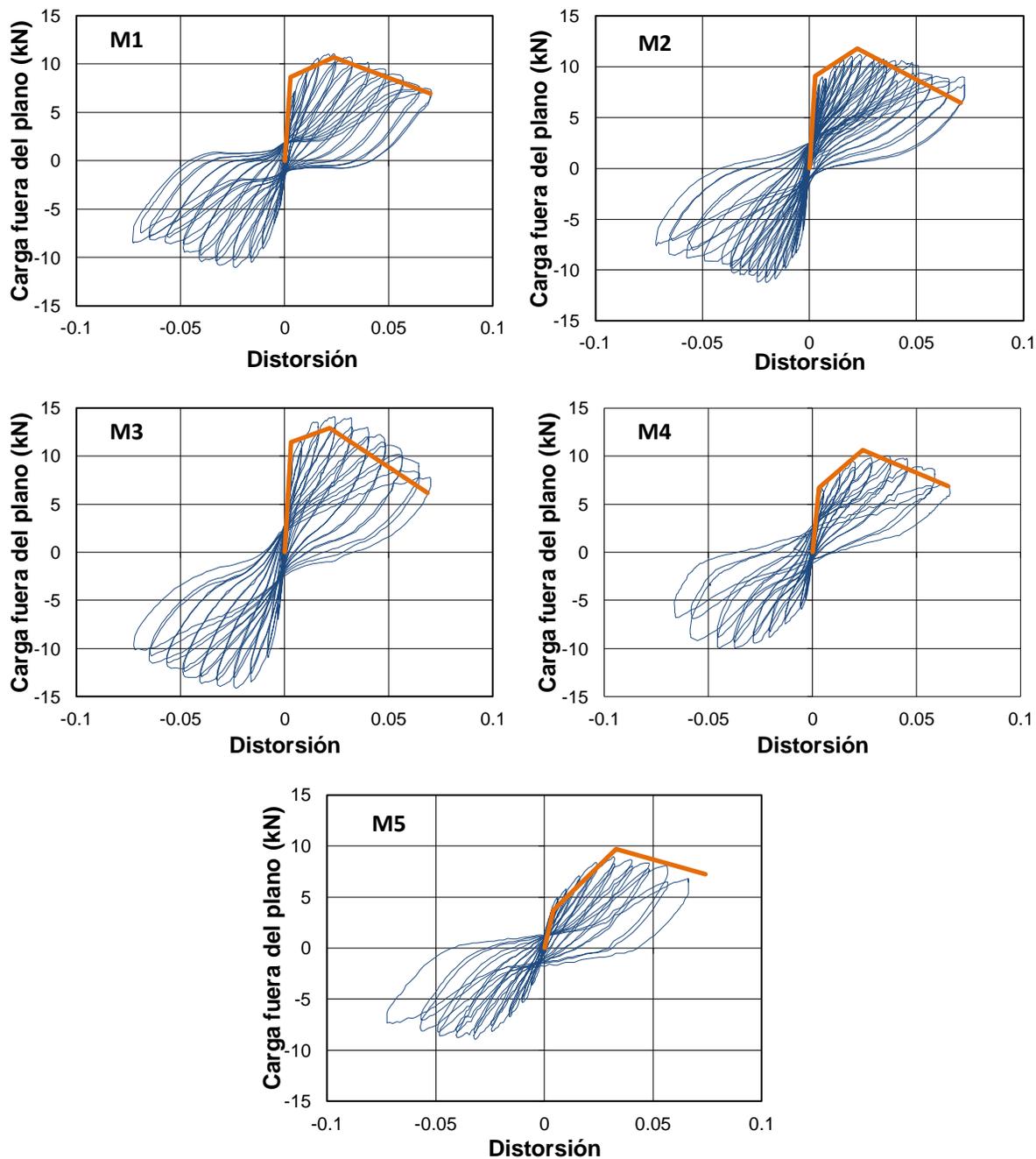


**Figura 5.10. Área de la curva envolvente carga fuera del plano - distorsión.**



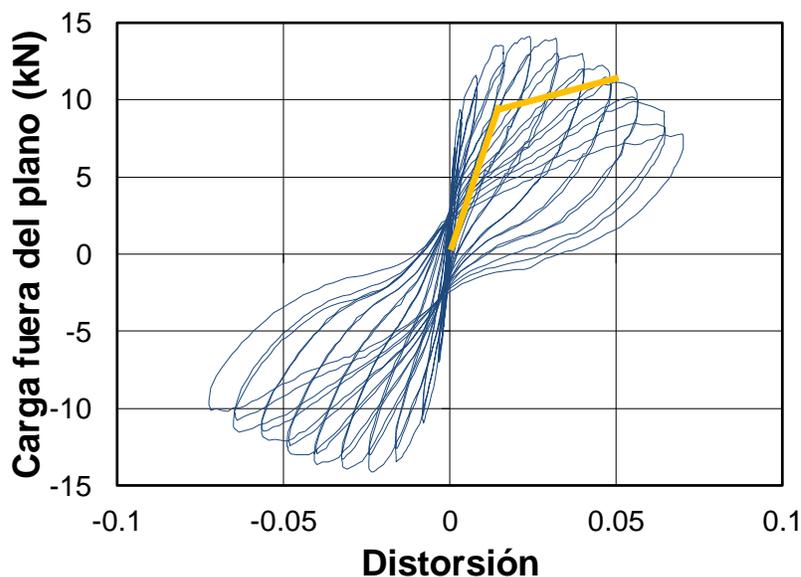
**Figura 5.11. Área bajo las líneas OAB.**

Se obtuvo un valor promedio de  $\phi$  igual a 1.7 para los cinco muros ensayados. Se determinó el modelo tri-lineal para los muros M1 a M5, utilizando la nueva carga de agrietamiento ( $V_a$ ). En la Figura 5.12 se presentan las curvas carga fuera del plano - distorsión y el modelo tri-lineal obtenido para cada uno de los muros. En dicha figura se observa como el modelo tri-lineal representa de forma satisfactoria dichas curvas.



**Figura 5.12. Curva "Carga fuera del plano - distorsión" y modelo tri-lineal de muros.**

La resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada calculada según NTC-M (2004), considera únicamente la contribución de los elementos confinantes verticales. En la Figura 5.13 se presentan las curvas carga fuera del plano - distorsión y las resistencias calculadas considerando sólo los elementos confinantes. En dicha figura se observa, como se esperaba, que la resistencia calculada de acuerdo a NTC-M (2004) es subestimada. Por otra parte, el comportamiento fuera del plano de los elementos confinantes es diferente al observado en los muros ensayados. Por ejemplo, no se observa degradación de la resistencia. Dicha degradación de la resistencia si se observa en el modelo tri-lineal Figura 5.12.



**Figura 5.13. Curvas "carga fuera del plano - distorsión" y resistencia calculada considerando sólo los elementos confinantes.**

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ensayaron cinco muros de mampostería confinada sujetos a combinaciones de cargas laterales fuera del plano y cargas axiales. Se consideraron muros con diferente relación de aspecto y magnitud de carga axial. Se determinó la resistencia de agrietamiento fuera de plano de los muros usando los principios de la mecánica de materiales. Se determinó la resistencia fuera del plano de los muros considerando tanto la contribución del panel de mampostería, como la contribución de los elementos confinantes verticales. Basado en los resultados analíticos y experimentales obtenidos en este trabajo se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones.

- El patrón de agrietamiento final de los muros fue en general similar. Se observaron grietas horizontales en las dos primeras hiladas de tabiques en la parte inferior y entre las dos últimas hiladas de tabiques en la parte superior del muro. Dichas grietas fueron observadas en ambas caras del muro. Se observaron grietas horizontales en la parte inferior y superior de los castillos. Se observó para el muro M1, M3 y M4 una grieta vertical en la parte central de los muros.
- El comportamiento fuera del plano de los muros fue elástico lineal hasta la formación de la primer grieta horizontal en el panel de mampostería. Después de las primeras grietas horizontales, el comportamiento de los muros fue no lineal. Dicha no linealidad está relacionada con la formación de nuevas grietas horizontales en el panel de mampostería, la formación de grietas horizontales en los castillos y la fluencia del acero de refuerzo longitudinal de los mismos.
- Para muros con la misma relación de aspecto, la resistencia máxima fuera del plano aumenta si la carga axial es mayor. Lo anterior está relacionado con la restricción al desplazamiento vertical del marco de elementos confinantes que provoca la carga axial. Para muros con la misma carga

axial, la resistencia máxima fuera del plano es aumenta si la relación de aspecto es menor. Lo anterior está relacionado con el incremento de la contribución del panel de mampostería a la resistencia cuando la longitud del muro es mayor.

- La resistencia máxima fuera del plano de los muros está asociada con distorsiones mayores a aquellas que están relacionadas con la resistencia máxima en el plano de los muros de mampostería confinada. La contribución de la resistencia fuera del plano debe ser calculada usando la distorsión asociada con la resistencia de los muros en el plano.
- Los modelos analíticos desarrollados en este trabajo predicen de forma adecuada la resistencia de agrietamiento y la resistencia máxima fuera del plano de muros de mampostería confinada. En este trabajo se consideraron muros con diferente carga axial y diferente relación de aspecto.
- El modelo tri-lineal propuesto en este trabajo representa en general de forma satisfactoria el comportamiento de las curvas carga fuera del plano-distorsión de los muros ensayados.
- La resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada, calculada considerando únicamente la contribución de los elementos confinantes, subestima la resistencia de los muros y no representa el comportamiento fuera del plano de los muros ensayados.
- La resistencia máxima fuera del plano de los muros debe ser calculada usando una distorsión asociada con la resistencia de los muros en el plano. Lo anterior debido a que la distorsión de los muros fuera del plano relacionada con la resistencia máxima es mayor a las distorsiones permitidas para los muros en el plano.

## APÉNDICE A

### RESULTADOS DE PRUEBAS A MATERIALES

En esta sección se presentan los resultados de la prueba granulométrica realizada a la arena utilizada y los resultados de la prueba de resistencia a compresión axial de los cilindros de concreto obtenidos durante la construcción de los muros.

#### A.1 Granulometría de la arena

**Tabla A.1. Granulometría de la arena.**

Malla	Peso (gr)	% del peso total		% Acumulado	% Que pasa	Limites de la norma	
		Decimales	Enteros			L. Inferior	L. Superior
3/8	0	0.00	0	0	100	100	100
No. 4	13.5	2.70	3	3	97	95	100
No. 8	96.5	19.30	19	22	78	80	100
No. 16	120	24.00	24	46	54	50	85
No.30	92.5	18.50	19	65	35	25	60
No. 50	65.5	13.10	13	78	22	10	30
No. 100	67	13.40	13	91	9	2	10
Charola	45	9.00	9	100	0		
Sumas	500	100.00	100				

Módulo de Finura	Obtenido	Limites de la norma	
		L. Inferior	L. Superior
	3.05	2.3	3.1

## A.2 Resistencia a compresión axial del concreto.

**Tabla A.2. Resistencia a compresión axial del concreto**

Muro	Elemento	Diametro 1	Diametro 2	Diametro 3	Diametro 4	Diam. Prom.	Area (cm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
M1	Castillo 1	15.14	15.15	15.06	15.10	15.11	179.35	332	18.50
	Castillo 1	15.11	15.09	15.10	15.08	15.10	178.96	322	17.97
	Castillo 2	15.17	15.22	15.23	15.19	15.20	181.48	328	18.09
	Castillo 2	15.01	15.03	14.97	14.99	15.00	176.73	304	17.19
	C Superior	15.13	15.21	14.96	14.96	15.07	178.25	309	17.31
	C Superior	15.15	15.05	14.95	14.99	15.04	177.54	334	18.83
M2	Castillo 1	14.97	14.96	14.96	14.97	14.97	175.96	256	14.52
	Castillo 1	15.03	15.03	15.06	14.96	15.02	177.18	265	14.94
	Castillo 2	15.03	14.94	15.08	15.17	15.06	178.01	273	15.35
	Castillo 2	15.20	15.24	15.13	15.17	15.19	181.12	270	14.88
	C Superior	15.01	15.01	15.01	15.02	15.01	177.01	316	17.88
	C Superior	15.23	15.10	15.16	15.25	15.19	181.10	343	18.94
M3	C Inferior	14.97	15.03	15.06	15.15	15.05	177.95	337	18.92
	C Inferior	15.12	15.13	15.04	15.08	15.09	178.90	342	19.12
	Castillo 1	15.20	15.20	15.24	15.12	15.19	181.22	344	18.96
	Castillo 1	14.94	14.99	14.97	14.92	14.96	175.66	318	18.10
	Castillo 2	14.98	14.90	15.00	15.00	14.97	176.04	336	19.08
	Castillo 2	15.24	15.27	15.28	15.17	15.24	182.37	341	18.67
	C Superior	14.96	14.87	14.97	14.92	14.93	175.07	335	19.13
	C Superior	14.94	15.06	14.96	14.98	14.99	176.37	340	19.26
M4	C Inferior	15.09	15.26	15.09	15.20	15.16	180.49	308	17.09
	C Inferior	15.01	14.99	14.96	14.99	14.99	176.46	330	18.72
	Castillo 1	15.11	15.23	15.17	15.18	15.17	180.84	269	14.87
	Castillo 1	14.96	14.98	14.98	15.03	14.99	176.38	269	15.23
	Castillo 2	14.91	14.99	14.89	14.90	14.92	174.85	264	15.09
	Castillo 2	14.94	14.93	15.00	14.99	14.97	175.93	300	17.04
	C Superior	14.99	14.98	14.98	14.97	14.98	176.24	250	14.16
	C Superior	15.11	15.18	15.11	15.20	15.15	180.27	319	17.72
M5	C Inferior	15.11	15.10	15.09	15.03	15.08	178.69	333	18.65
	C Inferior	14.94	15.01	14.97	14.93	14.96	175.83	316	18.00
	Castillo 1	14.99	14.97	15.02	14.92	14.97	176.11	315	17.88
	Castillo 1	15.17	15.15	15.19	15.15	15.17	180.62	300	16.58
	Castillo 2	14.91	14.97	14.89	14.97	14.94	175.19	265	15.10
	Castillo 2	14.97	14.94	14.97	14.85	14.93	175.14	287	16.41
	C Superior	14.90	14.92	14.85	14.85	14.88	173.90	305	17.56
	C Superior	14.94	15.01	14.92	14.97	14.96	175.77	296	16.84

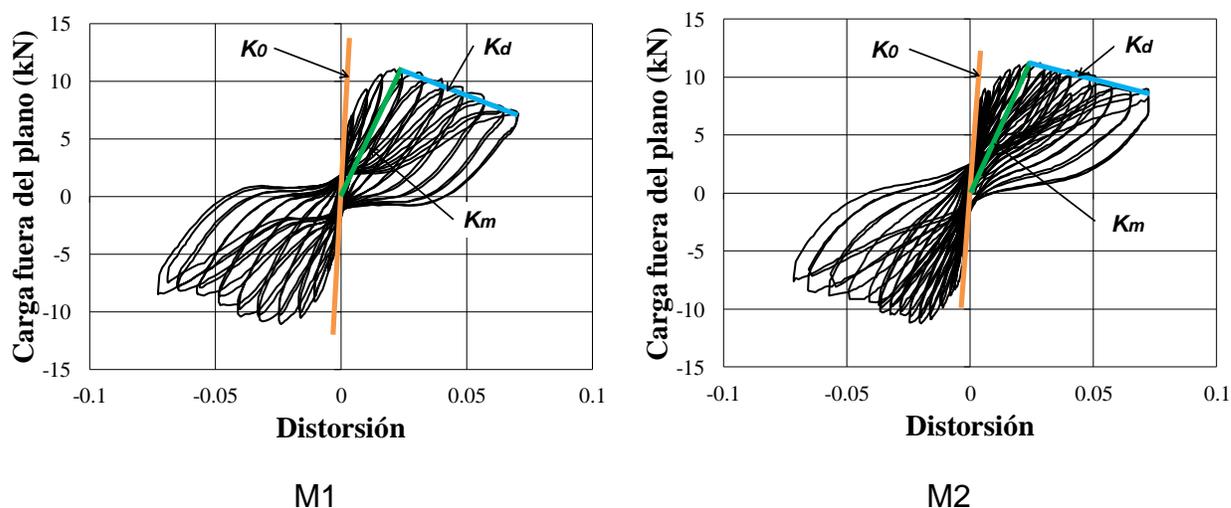
## APÉNDICE B

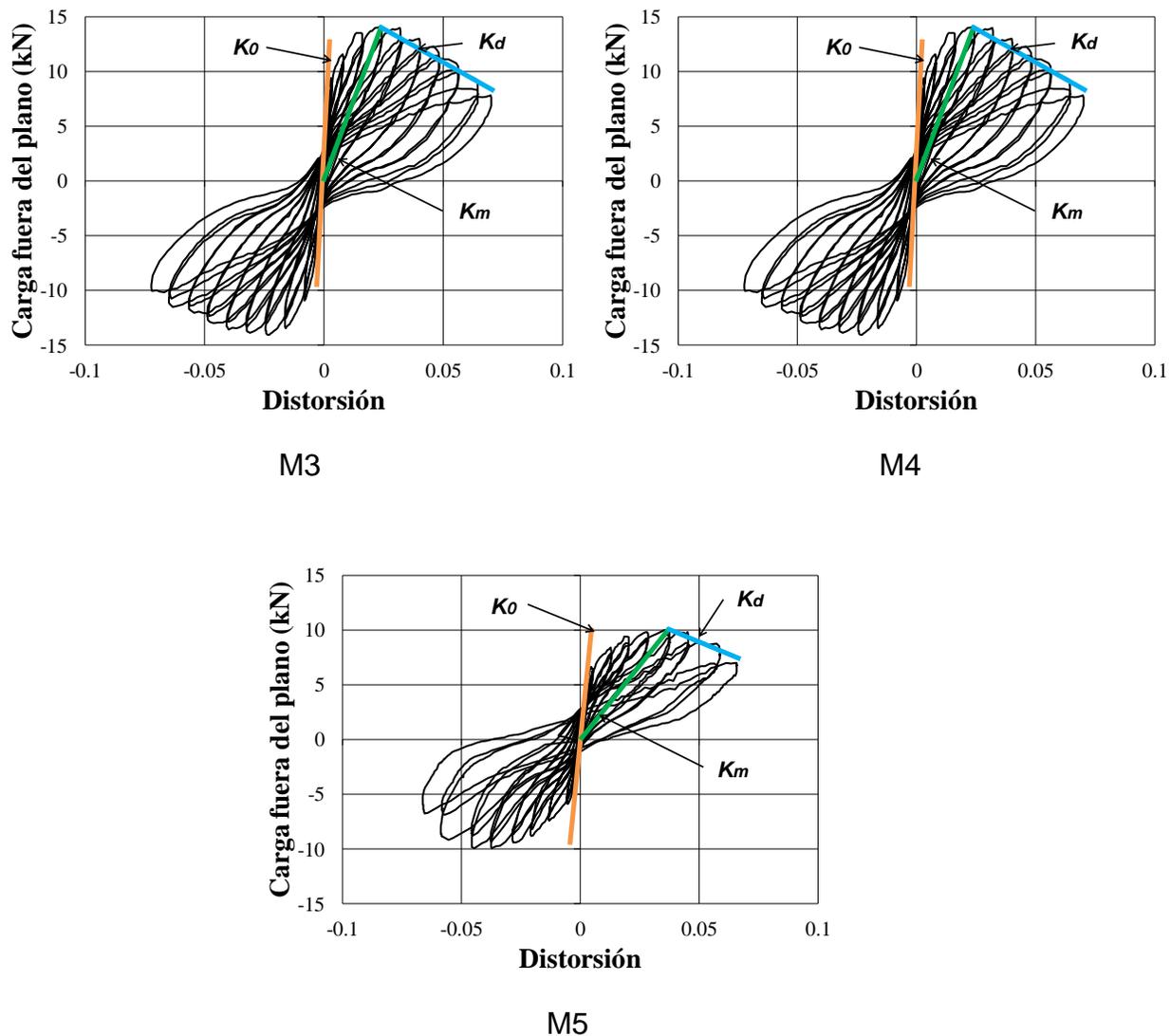
### OBTENCIÓN DE FACTORES $\phi$ , $\alpha$ , Y $\beta$ PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MODELO TRI-LINEAL

En esta sección se presenta el procedimiento realizado para la obtención de los factores  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  relacionados con la carga axial y la relación de aspecto, para la construcción del modelo tri-lineal.

#### B.1 Obtención de rigidez inicial, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de las curvas "carga fuera del plano - distorsión"

Se obtuvo la rigidez inicial de agrietamiento ( $K_0$ ), la rigidez a la carga máxima ( $K_m$ ) y la rigidez de descarga ( $K_d$ ) de las curvas carga fuera del plano - distorsión correspondientes para cada uno de los muros ensayados (Figura B.1). En la Tabla B.1 se presenta el valor de las rigideces obtenidas.





**Figura B.1. Rigidez inicial de agrietamiento, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de los muros ensayados.**

**Tabla B.1. Rigidez inicial de agrietamiento, a la carga máxima y de descarga.**

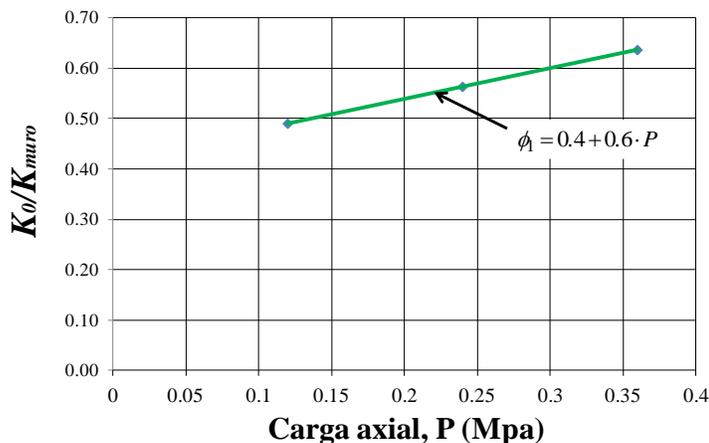
Muro	$K_0$ (kN/cm)	$K_m$ (kN/cm)	$K_d$ (kN/cm)
M1	10.78	2.63	-0.30
M2	12.39	3.25	-0.20
M3	14.00	3.48	-0.50
M4	8.40	2.88	-0.28
M5	3.34	1.69	-0.22

Se obtuvo la rigidez de cada uno de los muros de acuerdo con la Ecuación<sup>o</sup>5.5, se consideró un modulo de elasticidad de la mampostería ( $E_m$ ) de 5705 MPa, y las características geométricas de los muros ensayados. En la Tabla B.2 se presentan el valor de las rigideces obtenido para cada muro. Así como, la relación entre la rigidez inicial de agrietamiento ( $K_0$ ) y la rigidez del muro ( $K_{muro}$ ).

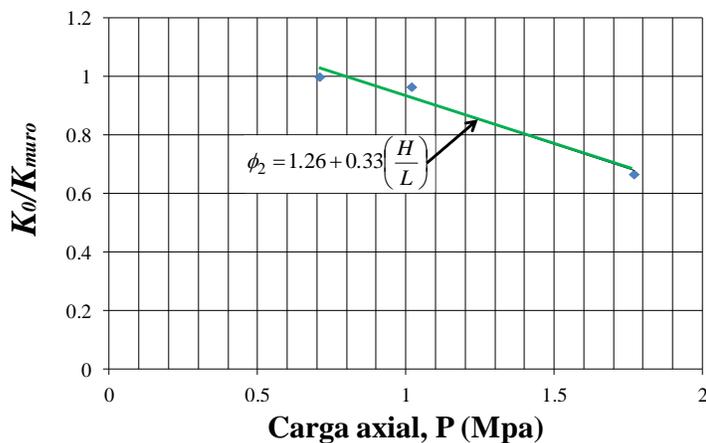
**Tabla B.2. Rigidez inicial de agrietamiento, a la carga máxima y de descarga.**

Muro	$P$ (MPa)	$H/L$	$K_{muro}$ (kN/cm)	$K_0/K_{muro}$
M1	0.11	0.74	22.02	0.49
M2	0.23	0.74	22.02	0.56
M3	0.35	0.74	22.02	0.64
M4	0.23	1.06	15.45	0.54
M5	0.23	1.84	8.89	0.38

En la Figura B.2 se presenta la tendencia de la relación entre la rigidez inicial de agrietamiento ( $K_0$ ) y la rigidez del muro ( $K_{muro}$ ) para los muros con diferente carga axial. Por otra parte en la Figura B.3 se presenta la tendencia para muros con diferente relación de aspecto.



**Figura B.2. Rigidez inicial de agrietamiento, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de los muros ensayados.**



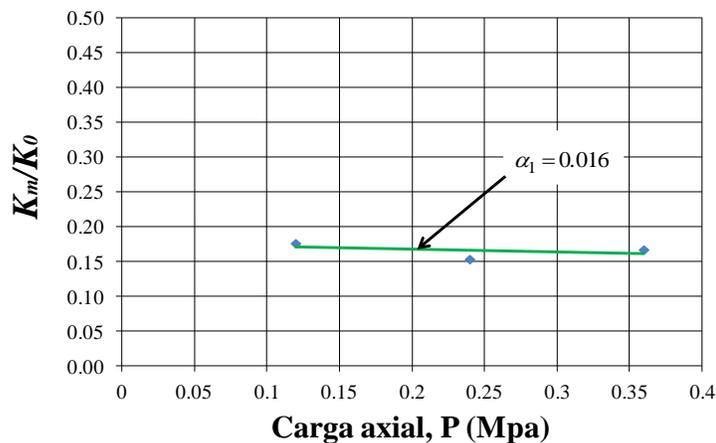
**Figura B.3. Rigidez inicial de agrietamiento, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de los muros ensayados.**

En la Tabla B.3 se presenta la relación entre la rigidez a la carga máxima ( $K_m$ ) y la rigidez inicial de agrietamiento ( $K_0$ ), así como, la relación entre la rigidez de descarga ( $K_d$ ) y la rigidez inicial de agrietamiento ( $K_0$ ).

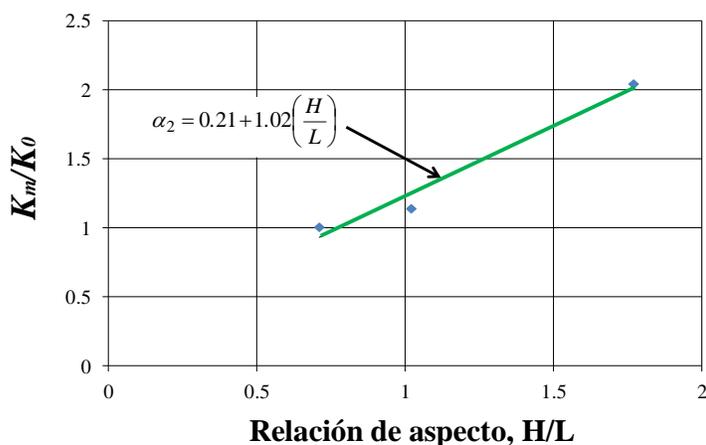
**Tabla B.3. Rigidez inicial de agrietamiento, a la carga máxima y de descarga.**

Muro	P (MPa)	H/L	$K_m/K_0$	$K_d/K_0$
M1	0.11	0.74	0.18	-0.03
M2	0.23	0.74	0.15	-0.02
M3	0.35	0.74	0.17	-0.04
M4	0.23	1.06	0.19	-0.03
M5	0.23	1.84	0.34	-0.07

En la Figura B.4 se presenta la tendencia de la relación entre la rigidez a la carga máxima ( $K_m$ ) y la rigidez inicial de agrietamiento ( $K_0$ ) para los muros con diferente carga axial. Por otra parte en la Figura B.5 se presenta la tendencia para muros con diferente relación de aspecto.

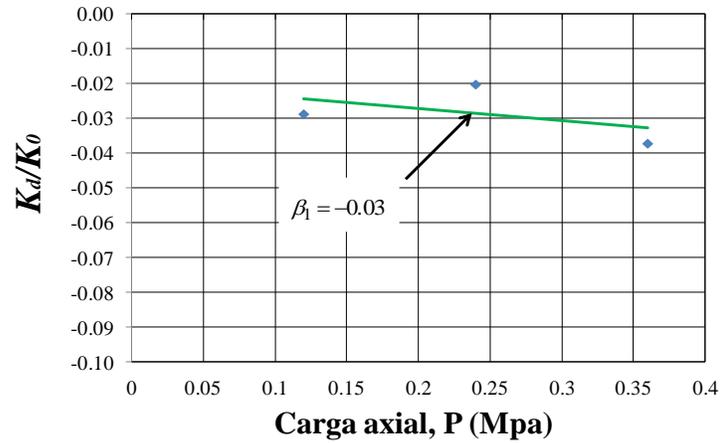


**Figura B.4. Rigidez inicial de agrietamiento, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de los muros ensayados.**

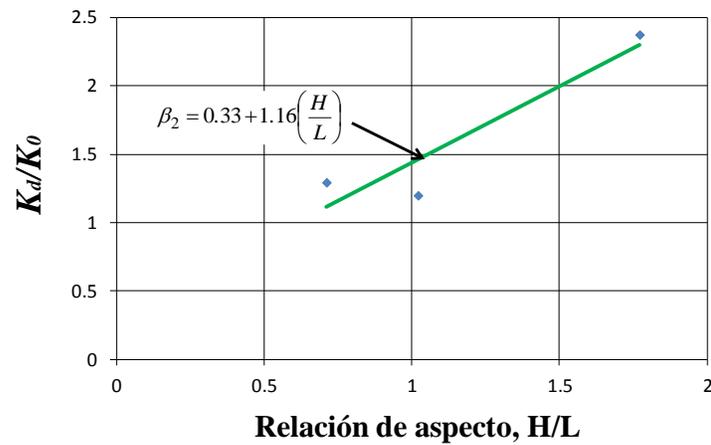


**Figura B.5. Rigidez inicial de agrietamiento, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de los muros ensayados.**

En la Figura B.6 se presenta la tendencia de la relación entre la rigidez a la carga máxima ( $K_m$ ) y la rigidez inicial de agrietamiento ( $K_0$ ) para muros con diferente carga axial. Por otra parte en la Figura B.7 se presenta la tendencia para muros con diferente relación de aspecto.



**Figura B.6. Rigidez inicial de agrietamiento, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de los muros ensayados.**



**Figura B.7. Rigidez inicial de agrietamiento, rigidez a la carga máxima y rigidez de descarga de los muros ensayados.**

## Referencias

1. Abrams D., Angel R., Uzarski J. (1996) Out of plane strength of unreinforced masonry infill panels. Earthquake Spectra, 12(4): 825-844.
2. Angel R. (1994) Behavior of reinforced concrete Frames whit Masory Infills, Tesis de Doctorado de la Universidad de Illinois at Urbana-Champaing. EUA.
3. Brzev S., Astroza M., Monroi Yadlinn M. (2010) Performance of Confined Masonry Buildings in the February 27. Chile Earthquake.
4. Button M., Mayes R. (1992) Out of Plane Seismic Response of Reinforced Masonry Walls. Journal of Structural Engineering, 118:9.
5. Chen W., Kae Yeh Y., Jiann S., Ching H., Lu H, Cheng C. (2012) Out of plane seismic behavior and CFRP retrofitting of RC frames Infilled with brick walls. Engineering Structures, 34, 213-224.
6. Computers and Structures Inc., 2005, SAP2000, (Structural Analysis Program) University Avenue Berkeley California.
7. Da Porto F., Mosele F., Modena C.(2010a) Experimental Testing of tall reinforced masonry walls under out of plane actions, Construction and Building Materials 24, 2559-2571.
8. Da Porto F., Mosele F., Modena C (2010b) Cyclic out of plane behavior of tall reinforced masonry walls under P- $\Delta$  effects, Engineering Structures, 33, 287-297.
9. Drysdale R. G., Hamid A. A., Baker L. R. (1999). Masonry Structures: Behavior and Design, The Masonry Society, Boulder Colorado 80304, USA.
10. Flores C R.. (2008), Determinación de la resistencia a tensión de la mampostería de bloque huecos de concreto, Tesis de Maestría en Ingeniería opción Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México
11. Gobierno del Distrito Federal, (2004). Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, Gaceta Oficial.

12. Gobierno del Distrito Federal, (2004). Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, Gaceta Oficial.
13. Griffith M, Lam N., Wilson J., Doherty K. (2004), Experimental Investigations of Unreinforced Brick Masonry Walls in Flexure, Journal of Structural Engineering, 130, 3(423)
14. Jagadish K., Raghunath S., Nanjunda S. (2003), Behaviour of masonry structures during the Bhuj earthquake of January 2001, Earth Planet Sci, 112, 431-440
15. Kaushik H., Dasgupta K, Sahoo D., Kharel G. (2006), Performance of structures during the Sikkim earthquake of 14 February 2006, Current Science, 91.
16. Kazemi M.T., Asl M.H., Bakhshi A., Rofooei R. (2010) Shaking Table Study of a Full Scale Single Storey Confined Brick Masonry Building, Scientia Iranica, 17:3 ,184-193
17. Klingner R., Rubiano N., Bashandy T., Sweeney S (1996) Evaluation and analytical verification of shaking table data from infilled frames, Part Two, Seventh North American Masonry Conference.
18. Lam N.T.K., Griffith M., Wilson J., Doherty K., (2003) Time-history analysis of URM walls in out-of-plane flexure, Engineering Structures, 25,743-754
19. López Gutiérrez Iván Uriel, (2010) Comportamiento de muros de mampostería confinada con diferentes relaciones de esbeltez sujetos a cargas fuera del plano, Tesis de Maestría en Ingeniería opción Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México
20. Moreno Herrera Joel Alberto, (2010) Comportamiento de muros de mampostería confinada con diferente relación de aspecto sujetos a cargas perpendiculares a su plano, Tesis de Maestría en Ingeniería opción Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México
21. Moreno Herrera Joel Alberto, (2014) Propuesta de diseño para muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano, Tesis de Doctorado

- en Ingeniería opción Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México
22. Navarrete Macías Dante, (2009), Comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada con diferentes condiciones de apoyo, Tesis de Maestría en Ingeniería opción Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México
  23. Norma Mexicana NMS-C-030-ONNCCE-2004 “Industria de la construcción – Agregados- Muestreo”.
  24. Norma Mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2004 “Industria de la construcción Bloques, tabiques o ladrillo, tabicones y adoquines - Resistencia a la compresión - método de prueba”.
  25. Norma Mexicana NMX-C-038-ONNCCE-2004 “Industria de la construcción – Determinación de las dimensiones de ladrillos, tabiques, bloques y tabicones para la construcción”
  26. Norma Mexicana NMX-C-061-ONNCCE-2010 “Industria de la construcción – Cementos Hidráulicos – Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos”
  27. Norma Mexicana NMX-C-077-ONNCCE-2002 “Industria de la construcción – Concreto –Agregados para concreto– Análisis Granulométrico - Método de prueba”.
  28. Norma Mexicana NMX-C-083-ONNCCE-2002 “Industria de la construcción – Concreto –Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto – Método de prueba”.
  29. Polanco May Manuel Alejandro, (2011) Comportamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas axiales y cargas fuera del plano, Tesis de Maestría en Ingeniería opción Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México
  30. Raygoza L., E. (2012), Muros de mampostería confinada de bloques huecos de concreto de 15 cm, con relación de aspecto mayor a uno, sujetos a cargas laterales, Tesis de Maestría en Ingeniería opción Estructuras,

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

31. Sepulveda A, Astroza M., Kausel E., Campos J., Casas E., Rebolledo S, Verdugo R.(2008), New Findings on the 1958 Las Melosas Earthquake Sequence, Central Chile: Implications for Seismic Hazard Related to Shallow Crustal Earthquakes in Subduction Zones, Journal of Earthquake Engineering, 12:3, 432-455
32. Varela R. J., Navarrete M. D. Fernández B. L. y Moreno E. I. (2011). Out-of-plane behaviour of confined masonry walls. Engineering Structures, 33(5): 1734-1741.
33. Varela R. J., Moreno H. J., Lopez G. I. y Fernandez B. L. (2012a) Out-of-plane strength of confined masonry walls. Journal of Structural Engineering, ASCE. Vol. 138, No. 11, November 1.
34. Varela R. J., Polanco M. M., Fernández B. L. y Moreno E. I. (2012b). Confined masonry walls subject to combined axial loads and out-of-plane uniform pressures. Canadian Journal, Civ. Eng. 39: 439-447 (2012).
35. Tu Y.H., Liu P.M., Lin H.P. (2007) Out of Plane Seismic Behavior of Unreinforced Masonry In Filled Walls, Structures Congress: New Horizons and Better Practices, ASCE.
36. Tu Y.H., Chuang T.H., Liu P.M., Yang Y.S. (2010) Out of plane shaking table tests on unreinforced masonry panels in RC frames, Engineering Structures, 32, 3925-3935.
37. Zhang X., Singh S., Bull D., Cooke N. (2001) Out of Plane Performance of Reinforced Masonry Walls with Openings, Journal of Structural Engineering, 127:1