



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**PRUEBAS EXPERIMENTALES DE CINCO
MUROS DE MAMPOSTERÍA A ESCALA NATURAL
SUJETOS A CARGA CÍCLICA REVERSIBLE**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Humberto Daniel Alquicira Suárez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Héctor Guerrero Bobadilla



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Dedicatorias

A mi madre; Elisa Suárez:

*Eres mi ejemplo a seguir y cada día que pasa solo recuerdo
todo tu esfuerzo en haber sido madre y padre al mismo tiempo,
por todo el sacrificio que hiciste para que saliéramos adelante,
por ser mi pilar en los momentos que sentí que el mudo se me caía.
Sabes que todos mis logros llevan tu nombre, porque sin ti no sé dónde estaría.
Te amo, ma.*

A mi padre; José Juan Alquicira:

*Fue poco el tiempo que pasé a tu lado, te adelantaste a un lugar mejor,
pero en ese tiempo siempre te observé y tu forma tan cálida de ser
me enseñó el camino para ser un hombre de bien, responsable y dedicado.
Espero que, donde quiera que estés, te sientas orgulloso de mi.*

A mi hermana; Paola:

*A ti que me has acompañado a lo largo de este camino,
llenando mis días de risas, apoyo y comprensión.*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería, instituciones a las cuales estoy orgulloso de pertenecer, ya que me brindaron los conocimientos necesarios para desarrollarme profesionalmente, además de permitirme conocer personas increíbles, como profesores con mucho conocimiento por transmitir, además de compañeros que se convirtieron en grandes amigos y por todas las experiencias que me han dejado enseñanzas muy valiosas.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por el apoyo y facilidades que se me brindaron al ser becario de esta institución y darme la oportunidad de aplicar y adquirir nuevos conocimientos durante este proyecto.

Al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) por el apoyo brindado para llevar a cabo las pruebas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, mediante el proyecto FORDECyT No. 297246 "Desarrollo de capacidades nacionales para aumentar la resiliencia sísmica de edificios de concreto y mampostería con un enfoque de diseño por desempeño".

Al Dr. Héctor Guerrero Bobadilla por confiar en mí y darme la confianza para este proyecto que me permitió fortalecer mi desarrollo académico y profesional, gracias por su apoyo en los tiempos difíciles que viví, por el tiempo que invirtió, por los consejos que me dio y, principalmente, gracias por la confianza que puso en mí, espero poder compartir más proyectos a su lado.

A mi familia y amigos, por siempre estar ahí para apoyarme cuando siempre que lo necesité, por escucharme, alentarme, apoyarme con sus consejos y por todos los momentos que me permitieron compartir a su lado.

RESUMEN

En esta tesis se presentan resultados experimentales de ensayos realizados en el Laboratorio de Estructuras Grandes del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), los cuales consistieron en la aplicación de carga cíclica reversible a cinco muros de mampostería divididos en dos grupos con diferente armado en los castillos. Los modelos fueron ensayados sin daño inicial para analizar su comportamiento y comparar la respuesta obtenida.

Se presenta el proceso de construcción de los modelos, la colocación de la instrumentación utilizada y la descripción de la ejecución de las pruebas. También se presentan los resultados obtenidos de las pruebas, por medio de curvas de carga-desplazamiento (curvas de histéresis), curvas de degradación de rigidez, los factores de amortiguamiento viscoso equivalente, la evolución del daño en los modelos, así como anchos de grietas para ambos grupos.

Con base en los resultados se realizan conclusiones y se dan recomendaciones. También se propone metodología para la evaluación de estructuras con daños a partir de sus grietas residuales.

ABSTRACT

This thesis presents experimental results of tests carried out at the Laboratory of Large Structures of the National Center for the Prevention of Disasters (CENAPRED), which consisted on the application of reversible cyclic loading to five masonry walls divided into two groups with different steel reinforcement in the vertical boundary elements. The models were tested without initial damage to analyze their behavior and to compare their response.

The model construction process, the placement of the instrumentation used in the models, as well as the description of the execution of the tests are presented in this thesis. Also the results obtained from the tests, in terms of load-displacement curves, (hysteresis curves), stiffness degradation curves, equivalent viscous damping factors damage evolution, as well as crack widths.

Based on the results, conclusions are drawn and recommendations are given. Also a methodology is proposed for the evaluation of structures with damage from their residual cracks.

Contenido

Introducción.....	13
1. Planteamiento del problema	15
1.1. Antecedentes.....	15
1.2. Justificación.....	18
1.3. Objetivos y alcance.....	18
1.4. Descripción de la tesis	19
2. Revisión bibliográfica	20
3. Descripción de las pruebas experimentales	23
3.1. Cálculo de la resistencia de diseño	23
3.2. Materiales y sus propiedades	23
3.2.1. Piezas de la mampostería	24
3.2.2. Mortero	25
3.2.3. Concreto.....	26
3.3. Características de los muros	26
3.3.1. Geometría	26
3.3.2. Cimentación.....	27
3.3.3. Armado de elementos confinantes.....	28
3.4. Instrumentación.....	31
3.4.1. Instrumentación interna	31
3.4.2. Instrumentación externa	31
3.5. Proceso constructivo	32
3.6. Arreglo experimental	40
3.7. Protocolo de carga	41
3.7.1. Control por carga lateral.....	41
3.7.2. Control por desplazamiento	42
4. Resultados experimentales	43
4.1. Muro 1	43
4.2. Muro 2.....	51
4.3. Muro 3.....	57
4.4. Muro 4.....	65
4.5. Muro 5.....	72

5.	Análisis de los resultados.....	79
5.1.	Envolventes carga-distorsión	79
5.2.	Degradación de la rigidez.....	81
5.3.	Amortiguamiento.....	82
5.1.	Agrietamiento.....	84
5.1.1.	Ancho de grietas en pico.....	84
5.1.2.	Ancho de grietas residuales.....	85
5.1.3.	Relación de grieta residual entre pico.....	86
6.	Propuesta de metodología para la evaluación post-sísmica.....	87
7.	Conclusiones y recomendaciones	91
7.1.	Conclusiones	91
7.2.	Recomendaciones	92
	Referencias.....	93

Lista de figuras

Figura.0.1. Clasificación de muros de mampostería según Tomazevic.	13
Figura 0.2. Sistema de muros confinados utilizados para la vivienda en México.....	14
Figura 1.1 Cinturón Circumpacífico (Adaptado de Ciencia UNAM, 2018).	15
Figura 1.2. Adaptación de los epicentros de los sismos reportados por el SSN, 2020. ...	16
Figura 1.3. Daños en estructuras de mampostería tras sismo de septiembre 2017.....	17
Figura 3.1. Dimensiones de pilas.	24
Figura 3.2. Dimensiones de muretes.....	24
Figura 3.3. Cubos de mortero para ensaye.....	25
Figura 3.4. Cilindros de concreto para compresión axial.....	26
Figura 3.5. Geometría de los especímenes.....	27
Figura 3.6. Viga de cimentación.....	27
Figura 3.7. Dimensiones de castillos.....	28
Figura 3.8. Armado de dala-losa.....	29
Figura 3.9. Armado de acero en los elementos de concreto.....	30
Figura 3.10. Instrumentación interna en castillos.....	31
Figura 3.11. Instrumentación externa de los especímenes.....	32
Figura 3.12. Limpieza y disposición de la viga de cimentación.....	33
Figura 3.13. Colocación de castillos en la cimentación.....	33
Figura 3.14. Anclaje de castillos en las vigas de cimentación.....	34
Figura 3.15. Colocación de piezas de mampostería para los muros.....	35
Figura 3.16. Colado de elementos confinantes laterales.....	35
Figura 3.17. Colocación de armado y cimbra para sistema dala-losa.....	36
Figura 3.18. Disposición del espécimen para prueba.....	37
Figura 3.19. Colocación de viga horizontal para distribución de carga.....	37
Figura 3.20. Viga para contrapeso sobre celda de carga.....	38
Figura 3.21. Disposición de carga vertical sobre el muro.....	39
Figura 3.22. Colocación de instrumentación externa.....	39
Figura 3.23. Marco de carga utilizado en las pruebas.....	40
Figura 3.24. Sistema para aplicación de carga vertical.....	41
Figura 3.25. Protocolo de carga.....	42
Figura 4.1. Daños en el muro 1 durante la etapa controlada por carga.....	43
Figura 4.2. Daños en el muro 1 a una distorsión de 0.0015.....	44
Figura 4.3. Estado final del muro 1.....	45
Figura 4.4. Grieta diagonal al final de la prueba del muro 1.....	46
Figura 4.5. Acercamiento a daños en castillo y panel central del muro 1.....	47
Figura 4.6. Comportamiento de las grietas en pico del muro 1.....	48
Figura 4.7. Comportamiento de las grietas residuales del muro 1.....	48
Figura 4.8. Curva de histéresis muro 1.....	49
Figura 4.9. Degradación de rigidez del muro 1.....	50
Figura 4.10. Amortiguamiento del muro 1 durante la prueba.....	50
Figura 4.11. Daños en el muro 2 durante la etapa controlada por carga.....	51
Figura 4.12. Daños en el muro 2 a una distorsión de 0.0015.....	52
Figura 4.13. Estado final del muro 2.....	53

Figura 4.14. Acercamiento al desplazamiento en el panel del muro 2.....	54
Figura 4.15. Comportamiento de grietas en pico del muro 2.....	55
Figura 4.16. Comportamiento de grietas residuales del muro 2.....	55
Figura 4.17. Curva de histéresis muro 2.....	56
Figura 4.18. Degradación de rigidez del muro 2.....	57
Figura 4.19. Amortiguamiento del muro 2 durante la prueba.....	57
Figura 4.20. Muro 3 al final de la etapa controlada por carga.....	58
Figura 4.21. Daños en el muro 3 a una distorsión de 0.0015.....	59
Figura 4.22. Estado final del muro 3.....	60
Figura 4.23. Acercamiento a daños del muro 3.....	61
Figura 4.24. Comportamiento de grietas en pico del muro 3.....	62
Figura 4.25. Comportamiento de grietas residuales en el muro 3.....	62
Figura 4.26. Curva de histéresis muro 3.....	63
Figura 4.27. Degradación de rigidez del muro 3.....	64
Figura 4.28. Amortiguamiento del muro 3 durante la prueba.....	64
Figura 4.29. Muro 4 al final de la etapa controlada por carga.....	65
Figura 4.30. Daños en el muro 4 a una distorsión de 0.0015.....	66
Figura 4.31. Estado final del muro 4.....	67
Figura 4.32. Acercamiento a daños en el muro 4.....	68
Figura 4.33. Comportamiento de grietas en pico del muro 4.....	69
Figura 4.34. Comportamiento de grietas residuales en el muro 4.....	69
Figura 4.35. Curva de histéresis muro 4.....	70
Figura 4.36. Degradación de rigidez del muro 4.....	71
Figura 4.37. Amortiguamiento del muro 4 durante la prueba.....	71
Figura 4.38. Muro 5 al final de la etapa controlada por carga.....	72
Figura 4.39. Daños en el muro 5 a una distorsión de 0.0015.....	73
Figura 4.40. Estado final del muro 5.....	74
Figura 4.41. Acercamiento a daños en el muro 5.....	75
Figura 4.42. Comportamiento de grietas en pico del muro 5.....	76
Figura 4.43. Comportamiento de grietas residuales en el muro 5.....	76
Figura 4.44. Curva de histéresis muro 5.....	77
Figura 4.45. Degradación de rigidez del muro 5.....	78
Figura 4.46. Amortiguamiento del muro 5 durante la prueba.....	78
Figura 5.1. Envoltentes histeréticas.....	79
Figura 5.2. Envoltentes histeréticas por grupos.....	80
Figura 5.3. Degradación de rigidez en los especímenes.....	81
Figura 5.4. Comparación de las curvas de degradación de la rigidez.....	82
Figura 5.5. Factor de amortiguamiento en los especímenes.....	82
Figura 5.6. Comparación de las curvas del factor de amortiguamiento.....	83
Figura 5.7. Comportamiento de grietas en pico de los modelos ensayados.....	84
Figura 5.8. Promedio de ancho de grietas en pico por grupo.....	85
Figura 5.9. Comportamiento de grietas residuales de los modelos ensayados.....	85
Figura 5.10. Promedio de ancho de grietas residuales por grupo.....	86
Figura 5.11. Relación de grieta residual - grieta pico.....	86
Figura 6.1. Diagrama de flujo para la propuesta de metodología de evaluación.....	88

Figura 6.2. Tamaño de grieta residual.	89
Figura 6.3. Cociente grieta residual/ grieta pico.....	89
Figura 6.4. Rigidez remanente en el muro.	90
Figura 6.5. Curva Resistencia - Distorsión.....	90

Lista de tablas

Tabla 1.1. Sismos reportados por el SSN (2020) de 1990 a 2019.....	16
--	----

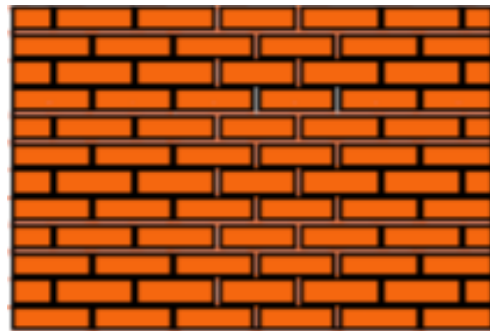
Introducción

La mampostería es un material con una gran variedad de usos por su fácil obtención, ya que se puede definir como un material integrado por piezas naturales o creadas por el hombre, unidas por un mortero. Sus componentes han ido cambiando a largo del tiempo, desde el uso de simples rocas hasta las piezas industrializadas de arcilla y concreto como las conocemos hoy en día, utilizándose ampliamente en la construcción de estructuras destinadas a la vivienda en México (Cruz, 2010).

Comúnmente, en una estructura el sistema de la mampostería son los muros. Una manera de clasificarlos es de acuerdo al refuerzo que tenga el muro (Tomazevic, 1999).

- Muros simples:

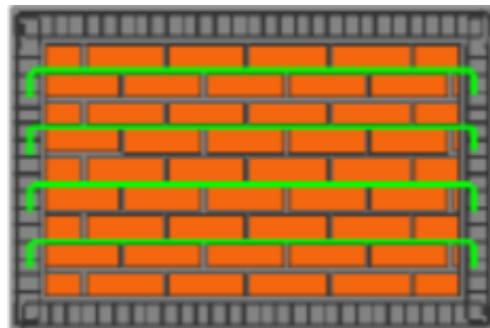
Son muros sin ningún refuerzo de acero u otro tipo, están basados prácticamente en la resistencia de las piezas de mampostería que lo conforman. Usado en estructuras temporales, comunidades pobres, autoconstrucción.



a. Muro simple.

- Muros reforzados interiormente:

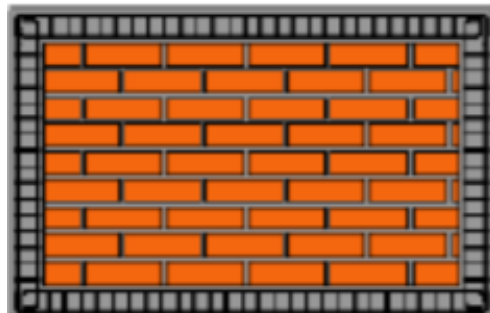
Son aquellos en los que el acero se distribuye tanto vertical como horizontalmente, colocándolo entre hiladas y dentro de las celdas de las piezas que conforman a la mampostería. Países como Estados Unidos, Canadá, Nueva Zelanda y Japón adoptaron este método constructivo como única opción.



b. Muro reforzado interiormente.

- Muros confinados:

Son aquellos en los que el refuerzo de acero se coloca dentro de elementos de concreto, de sección transversal pequeña, con dimensiones similares al muro, confinándolo. Este refuerzo de acero y concreto rodea al muro, confinándolo. Este sistema es ampliamente usado en Latinoamérica, algunos países de Europa y Asia.



c. Muro confinado.

Figura.0.1. Clasificación de muros de mampostería según Tomazevic.

En México, la construcción de muros está basada principalmente en dos sistemas de mampostería: los muros reforzados interiormente y los muros confinados, este último es el que podemos ver en la mayoría de las viviendas (Pérez Gavilán, 2018). El sistema de muros de mampostería simple no es apropiado, ya que no cuenta con refuerzo ni confinamiento, sin embargo, su uso persiste principalmente en zonas rurales, donde predomina la autoconstrucción.

El sistema de muros de mampostería confinada es la más utilizada y conocida en nuestro país. Este sistema consiste en muros rodeados de castillos y dalas de concreto reforzado que funcionan como los elementos confinantes. El confinamiento aumenta en gran medida la capacidad de desplazamiento lateral e incrementa la estabilidad vertical de la estructura, además de proporcionar una mayor resistencia después del agrietamiento, comparada con muros de mampostería simple.



Figura 0.2. Sistema de muros confinados utilizados para la vivienda en México.

1. Planteamiento del problema

1.1. Antecedentes

La sismicidad es uno de los fenómenos derivados de la dinámica interna de la Tierra que ha estado presente en la historia geológica de nuestro planeta, y que continuará manifestándose.

Por su ubicación geográfica, es bien sabido que México es un país que se encuentra sujeto a diversos fenómenos naturales que pueden derivar en desastres. Entre ellos resaltan los sismos, ya que nuestro país se encuentra situado en una de las regiones sísmicamente más activas del mundo, enclavada dentro del área conocida como el Cinturón Circumpacífico donde se concentra la mayor actividad sísmica del planeta.



Figura 1.1 Cinturón Circumpacífico (Adaptado de Ciencia UNAM, 2018).

La alta sismicidad en el país es debida principalmente a la interacción entre las placas de Norteamérica, la de Cocos, la del Pacífico, la de Rivera y la del Caribe, así como a fallas locales que corren a lo largo de varios estados, aunque estas últimas son menos peligrosas (Pacheco & Kostoglodov, 1999). La Placa Norteamericana se separa de la del Pacífico, pero roza con la del Caribe y choca contra las de Rivera y Cocos, de aquí la incidencia de sismos.

En el periodo que va de 1990 a 2019, el Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2019) reportó un promedio anual de 31 sismos de magnitud entre 5 y 5.9; 3 de magnitud entre 6 y 6.9, y uno de magnitud entre 7 y 7.9 cada dos años. En ese mismo intervalo de 27 años se reportó un sismo de magnitud entre 8 y 8.9. Como es de esperarse, los sismos de magnitud entre 4 y 4.9 son aún más abundantes, suceden en promedio 991 de ellos al año.

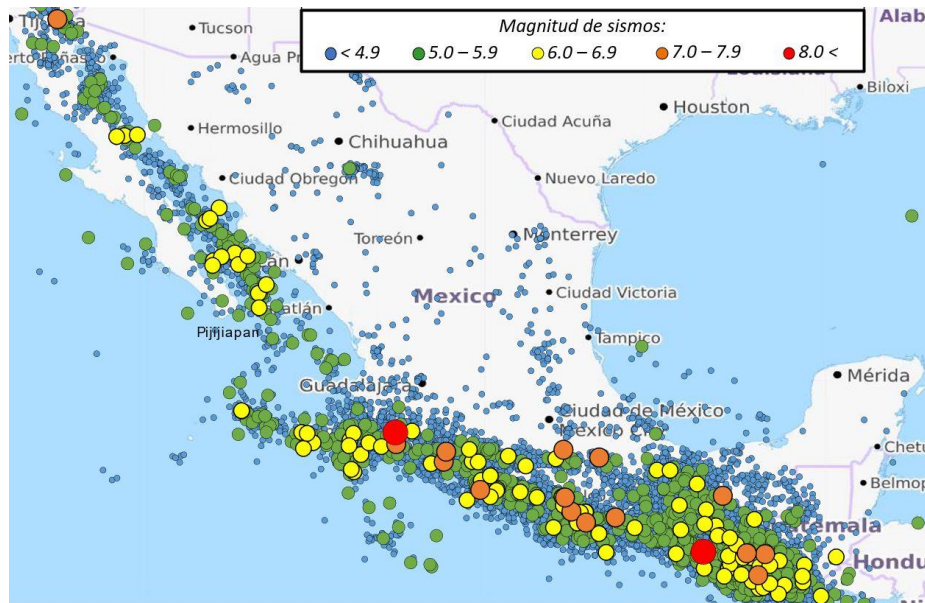


Figura 1.2. Adaptación de los epicentros de los sismos reportados por el SSN, 2020.

Tabla 1.1. Sismos reportados por el SSN (2020) de 1990 a 2019.

Año	Total de sismos	No calculable*	Magnitud						
			0 - 2.9	3 - 3.9	4 - 4.9	5 - 5.9	6 - 6.9	7 - 7.9	8 - 8.9
1990	796	1	12	247	510	24	2	0	0
1991	728	4	2	183	509	29	1	0	0
1992	614	1	4	184	398	27	0	0	0
1993	916	1	47	274	548	40	5	1	0
1994	622	0	20	192	383	24	3	0	0
1995	678	0	17	188	438	26	6	2	1
1996	789	0	8	203	543	32	2	1	0
1997	1019	13	44	388	533	34	6	1	0
1998	1024	2	11	453	532	21	5	0	0
1999	1099	1	12	542	527	11	4	2	0
2000	1052	9	28	463	531	18	2	1	0
2001	1344	9	8	704	585	32	6	0	0
2002	1688	0	4	880	760	40	4	0	0
2003	1323	0	5	728	568	18	3	1	0
2004	1346	0	2	669	639	33	3	0	0
2005	1210	0	1	678	514	17	0	0	0
2006	1356	0	0	792	544	19	1	0	0
2007	1528	0	1	728	764	33	2	0	0
2008	1958	0	7	1154	780	15	2	0	0
2009	2301	0	5	1648	610	37	1	0	0
2010	3462	0	23	2454	954	27	3	1	0
2011	4272	0	44	3357	839	27	5	0	0
2012	5244	1	21	4106	1054	50	10	2	0
2013	5361	0	57	4221	1046	33	4	0	0
2014	7608	1	238	6365	954	42	7	1	0
2015	10946	1	251	9056	1605	30	3	0	0
2016	15547	0	557	13501	1453	29	7	0	0
2017	26564	0	470	21628	4383	79	2	1	1
2018	30407	0	1584	25657	3126	37	2	1	0
2019	26443	0	308	23004	3097	32	2	0	0

Aunque las zonas epicentrales se localizan en diversos puntos del Pacífico, la Ciudad de México, aunque no se encuentre sobre la costa, se ha convertido en el receptor sísmico de todos ellos. Esto debido a que se encuentra lo suficientemente cercana para experimentar sus efectos. La causa de que éstos sean más dañinos en esta zona que en otros lugares, radica entre otras cosas, en la naturaleza de su terreno ya que fue fincada en lo que fuera un lago.

Los sismos más destructivos en la historia de la Ciudad de México alcanzaron una magnitud de 8.1 el 19 de septiembre de 1985 y de 7.6 el 19 de septiembre de 2017. Aunque el último tuvo menor magnitud, ambos dejaron ver daños similares, ya que muchas estructuras, sobre todo en las destinadas a la vivienda, presentaron daños de moderados a graves, además de comprometer su seguridad estructural y ocasionar pérdidas humanas. La Figura 1.3, algunos ejemplos de estructuras dañadas por los sismos de 2017.



a. Vivienda colapsada tras sismo de septiembre 2017



c. Acercamiento a la estructura colapsada.



b. Agrietamiento por falla a cortante en muro de mampostería.

Figura 1.3. Daños en estructuras de mampostería tras sismo de septiembre 2017.

Dados los daños observados, dentro de la ingeniería civil, la ingeniería estructural y sísmica tienen como principal meta la seguridad de las estructuras, sobre todo en una zona altamente sísmica como en la que se encuentra México. Para ello, se deben conocer las características y el comportamiento de los sistemas estructurales habitualmente usados y proporcionar información que ayude al ingeniero en el diseño y la evaluación de estructuras de mampostería en nuestro país.

1.2. Justificación

La vivienda es una de las mayores inversiones que una persona o familia hace en su vida, y es la base del desarrollo humano. Al ser la mampostería el material que se usa comúnmente en construcciones destinadas a la vivienda, las investigaciones y experimentos acerca de su comportamiento e integridad estructural tienen gran impacto para garantizar la seguridad de las personas que viven en ella.

Nuestro país se encuentra en una zona altamente sísmica, por lo que es muy susceptible a los efectos producidos por movimiento sísmicos. Después de un sismo, una de las principales secuelas es el daño de edificaciones o, en su caso extremo, su eventual demolición. Esta situación representa una pérdida económica, ya que, dependiendo del grado de daño, es necesario la rehabilitación o, en el peor de los casos, una demolición y reconstrucción total de dichas estructuras. En este rubro, las viviendas unifamiliares y multifamiliares de mampostería han resultado severamente afectadas por los sismos de los últimos años.

Por esta razón, en la presente tesis se describe la evolución de los daños en los especímenes ensayados y con los resultados obtenidos se analiza la respuesta estructural que se presenta ante la acción de un sismo con la intención de crear una metodología que ayude al ingeniero a evaluar de una manera rápida y sencilla la factibilidad de rehabilitar el sistema de muros de una estructura, en este caso de una casa-habitación.

1.3. Objetivos y alcance

Esta tesis describe el procedimiento de los ensayos realizados mostrando imágenes del agrietamiento presentado en los de muros. Se presenta el análisis de los resultados obtenidos por medio de gráficas. También, se plantean conclusiones del experimento y algunas recomendaciones para futuros estudios.

Por último, se propone una metodología para la evaluación postsísmica de muros de mampostería dañados por sismos, partiendo del tamaño de las grietas residuales que se medirán in situ por el estructurista.

El objetivo general de esta tesis es analizar el comportamiento que presentan las estructuras de mampostería ante la acción de un sismo, mediante el ensaye de modelos a escala natural en el laboratorio de estructuras del Centro Nacional de Prevención de Desastres, como parte de un proyecto experimental.

Los objetivos particulares son:

- Describir el proceso de construcción de los muros, así como el proceso experimental de las pruebas realizadas, haciendo énfasis en los detalles y características particulares de los especímenes.
- Estudiar y documentar los resultados obtenidos durante las pruebas e interpretarlos desde el punto de vista estructural.

-
- Evaluar el comportamiento de los muros según el acero de refuerzo en los elementos confinantes, comparando los resultados obtenidos entre un grupo y otro.
 - Elaborar una metodología que sea sencilla y de utilidad para el ingeniero en campo para realizar la evaluación de una estructura de mampostería dañada por un sismo y, de esta manera, contar con una herramienta útil para decidir sobre la factibilidad de una rehabilitación o una demolición de la estructura.

1.4. Descripción de la tesis

El presente trabajo se compone de siete capítulos, incluyendo una Introducción. En este primer capítulo se describe el planteamiento de la problemática a atender, así como su justificación y los objetivos, tanto general como particulares.

En el segundo capítulo se describen brevemente algunos de los trabajos que realizaron ingenieros e investigadores anteriormente y los resultados obtenidos por ellos.

En el tercer capítulo de este trabajo se hace una descripción de las pruebas realizadas para obtención de datos que incluyen las propiedades de la mampostería en conjunto, así como de los materiales que lo constituyen. Se describe el proceso constructivo de los especímenes, su instrumentación, el arreglo utilizado en las pruebas y el protocolo de carga que se siguió para los ensayos.

En el cuarto capítulo se describe comportamiento de cada muro observado durante los ensayos ante carga lateral, en términos de evolución de grietas, curvas de histéresis, degradación de la rigidez y amortiguamiento.

En el quinto capítulo se analizó la información recopilada dividiendo los modelos por grupos y se evaluó su comportamiento. Se hizo énfasis en el comportamiento de las grietas residuales y pico.

En el sexto capítulo se propuso una metodología de utilidad para el ingeniero estructurista en la evaluación de una estructura de mampostería dañada por efectos de los sismos, proporcionándole, a partir del ancho de grieta residual máximo, información con la cual pueda tomar decisiones sobre la rehabilitación de una estructura.

Finalmente, en el último capítulo se presentan las conclusiones obtenidas del presente trabajo y se realizan recomendaciones para tomar en cuenta en trabajos futuros.

2. Revisión bibliográfica

La mampostería es un material sumamente utilizado en todo el mundo en la construcción de estructuras civiles, principalmente para casas habitación de uno o dos niveles y para conjuntos habitacionales de baja y mediana altura, debido a su practicidad de construcción y por su bajo costo (Cruz, 2010). En México, las estructuras de mampostería han sido afectadas por los sismos son los fenómenos naturales que más afectan la integridad y seguridad de una estructura, es por ello que los ingenieros civiles llevan a cabo investigaciones donde buscan alternativas, métodos y técnicas, que mejoren el uso de la mampostería salvaguardando la integridad de las estructuras y con ello, la seguridad de las personas que residen en ellas.

En México, se comenzó a investigar la mampostería partir de los años sesenta, después de los daños causados por los sismos de 1957 (Olalde, 2010). La UNAM inició estas investigaciones, las cuales fueron emprendidas a través de la Facultad y el Instituto de Ingeniería. Se realizaron estudios que se enfocaron en la calidad de los elementos que conforman la mampostería, los materiales existentes en México, que van desde el adobe hasta piezas de arcilla y concreto con procesos de fabricación más industrializados; por último, ensayos a diferentes arreglos de muros ya sean confinados, reforzados interiormente y muros diafragma.

Las primeras investigaciones acerca de muros de mampostería comenzaron en 1961, donde se estudió su comportamiento ante carga vertical utilizando muros a escala (Esteva, 1961). Posteriormente se abarcaron ensayos de muros de bloque de concreto y barro, los cuales fueron probados en compresión o en voladizo, sometiéndolos a ciclos de carga lateral alternada, donde las variables principales fueron el refuerzo vertical, la amplitud de deformación en los ciclos y la carga vertical. De estas pruebas se presentaron métodos para calcular la capacidad de carga en flexión, tensión diagonal y rigidez lateral (Meli, Zeevaert, & Esteva, 1968).

Meli y Salgado (1969), efectuaron ensayos sobre muros de mampostería de diferentes materiales a escala natural sujetos a carga en una sola dirección o a repeticiones de carga lateral alternada. Las variables a destacar en estas pruebas fueron el efecto de la carga vertical, la cantidad de refuerzo y el tipo de material. Los resultados obtenidos permitieron recomendar métodos de análisis y de cálculo de capacidad para estructuras con sistema a base de muros de mampostería.

A principios de los años setenta, la mampostería y sus componentes fueron de gran interés para los investigadores, se realizaron estudios en muros con piezas de diferentes materiales usuales sujetos a carga axial, este estudio se orientó por el "Reglamento de construcción del Distrito Federal" (Mandinaveitia & Rodríguez, 1970).

Meli y Reyes (1971) realizaron estudios separando los componentes de la mampostería, para ello se realizó el ensaye de pilas y muretes a compresión diagonal con la finalidad de determinar propiedades mecánicas básicas que permitieran definir el comportamiento de la mampostería como conjunto ante distintas sollicitaciones.

Posteriormente, Madinaveitia (1971) estudió los efectos que tenían las cargas excéntricas en los muros. Los resultados fueron muy dispersos necesitando más ensayos para establecer una tendencia notable, así mismo se observaron deformaciones similares en muros cargados axialmente, haciendo suponer que los defectos en la construcción de los muros (alineamiento y heterogeneidad de los materiales) pueden considerarse como una "excentricidad accidental".

A finales de ese año, Meli y Hernández (1971) realizaron muestreos de piezas de mampostería destinadas a la construcción, estudiaron estadísticamente la variación de la resistencia a compresión, obtuvieron valores medios de resistencia y evaluaron la dispersión que hubo entre piezas de un mismo lote, entre distintos lotes y entre distintas fábricas de un mismo material.

Meli (1975), estudió el comportamiento sísmico de muros de mampostería mediante cargas laterales en una dirección y ante cargas alternadas. En el estudio se describieron los mecanismos de falla principales y se identificaron las variables que influyen en el deterioro de los muros.

Hernández y Meli (1976), estudiaron las modalidades de refuerzo para mejorar el comportamiento sísmico de los muros de mampostería, con la finalidad de aumentar su resistencia y ductilidad. El estudio se enfocó en analizar detalles constructivos que permitieran emplear menor cantidad de acero de refuerzo en los castillos y en los estribos. Se correlacionaron estos parámetros y se llegó a una expresión analítica que permitió calcular la cuantía de acero de refuerzo necesaria para que un muro resista cargas alternadas determinadas con una ductilidad adecuada.

Meli (1990), estudió el comportamiento de muros de mampostería confinada bajo fuerzas verticales y horizontales en edificios de vivienda en México. Se realizaron levantamientos e inspecciones de estructuras dañadas por sismos evaluando la calidad de los materiales y el procedimiento constructivo realizado.

Alcocer et al. (1999), estudiaron el comportamiento dinámico de estructuras de mampostería confinada a manera de representar muros de viviendas unifamiliares y multifamiliares. Se construyeron modelos a escala reducida que fueron ensayados bajo sollicitaciones de aceleración armónica en una mesa vibradora. Se estudió el efecto de la relación de aspecto de los muros. Con los resultados se identificaron los mecanismos resistentes y se evaluó la capacidad estructural en términos de resistencia, rigidez, capacidad de deformación y disipación de energía.

La importancia de estas investigaciones son sus aplicaciones en el diseño estructural y los procesos constructivos de la mampostería. Esto llevó a la normalización de las construcciones en mampostería en México, cuyas recomendaciones han sido aplicadas por diversos países para elaborar sus normas locales.

3. Descripción de las pruebas experimentales

En este capítulo se describe el procedimiento llevado a cabo para el ensaye de los muros de mampostería desde su proceso constructivo, los materiales usados en su elaboración y su dosificación, la geometría de los especímenes, así como la descripción de la instrumentación empleada para la adquisición de los datos en las pruebas. De igual manera, se describe la configuración del experimento realizado en CENAPRED.

3.1. Cálculo de la resistencia de diseño

La resistencia a cargas laterales que proporciona la mampostería se calculó según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-Mampostería, 2017), descrita con la ecuación (3.1)(3.1):

$$V_{mR} = F_R[(0.5 v'_m A_T + 0.3 P) * f] \leq 1.5 F_R v'_m A_T f \quad (3.1)$$

Donde:

F_R : factor de resistencia. Se tomará igual a 1.0 para en estos ensayos;

v_m^* = resistencia a compresión diagonal de la mampostería;

A_T = área transversal del muro (área en planta = longitud por espesor del muro, se incluyen los castillos),

$A_T = 3000 \text{ cm}^2$;

P = carga axial sobre el muro que se mantuvo constante con un esfuerzo de $\sigma = 5 \text{ kg/cm}^2$ (0.5 MPa) ó $P = 15 \text{ t}$.

De acuerdo con las NTC-Mampostería (2017), no se consideró incremento alguno de la resistencia por efecto de las dalas y castillos y se consideró un factor de resistencia unitario. Llevando a cabo dicho procedimiento se calculó una resistencia de diseño de 10.4 toneladas.

Sustituyendo los datos en la ecuación (3.1), tenemos:

$$V_{mR} = 10.40 \text{ toneladas}$$

3.2. Materiales y sus propiedades

Es muy importante conocer el comportamiento de los diferentes materiales que componen los muros de mampostería confinada, ya que cada uno de ellos se comporta de manera diferente. Es por ello que antes de llevar a cabo las pruebas, se realizaron ensayos de los materiales empleados en la construcción de los especímenes de mampostería para determinar sus propiedades. Estos ensayos se realizaron para la mampostería, el mortero y el concreto.

3.2.1. Piezas de la mampostería

Se utilizaron piezas de tabique recocido macizo, que es el comúnmente utilizado para la construcción de viviendas en nuestro país. Las dimensiones de las piezas de tabique fueron de 12 x 23.5 x 5.5 cm (ancho, largo, altura), cuya resistencia promedio fue de 78.44 kg/cm² (7.69 MPa).

Para determinar la resistencia a compresión de la mampostería se llevaron a cabo pruebas estándar con pilas, cuyas dimensiones fueron de 12x 22.5 x 31.5 cm (ancho, largo, altura), formado por 5 hiladas y juntas horizontales de 1 cm (Figura 3.1). La resistencia promedio a compresión de la mampostería fue de 12.35 kg/cm² (1.21 MPa).

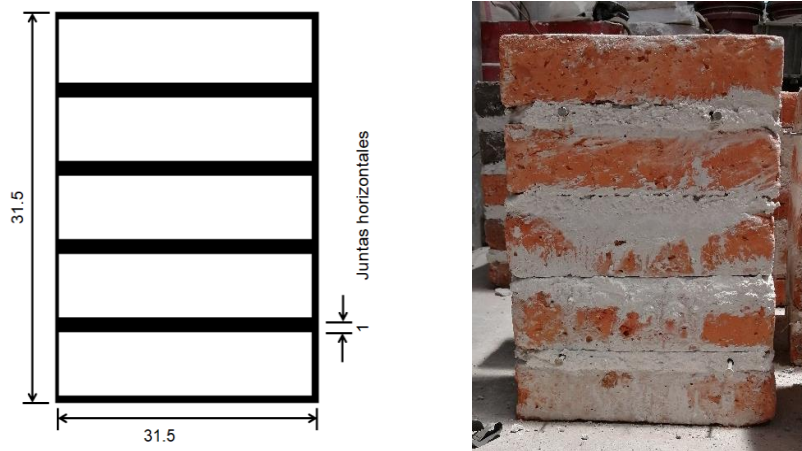


Figura 3.1. Dimensiones de pilas.

Así mismo, se construyeron muretes cuadrados con pieza y media de tabique en la base con una junta vertical de 1 cm y 5 hiladas de altura con una junta vertical de 1 cm (Figura 3.2). Las dimensiones promedio de los muretes fueron de 12 x 36.5 x 31.5 cm (ancho, largo, altura). Con estos muretes se pudo determinar la resistencia a la tensión diagonal siendo cargados en compresión sobre una de sus diagonales.

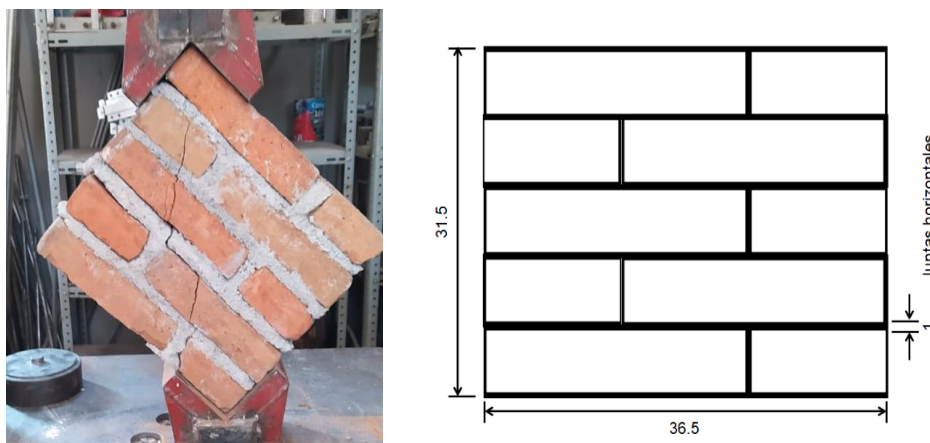


Figura 3.2. Dimensiones de muretes.

Se colocaron ángulos de acero con 2 cm de espesor en las diagonales a ensayar para asegurar la verticalidad de los muretes para que, de esta manera, la maquina universal pudiera tener una aplicación uniforme de la carga aplicada con el murete y poder obtener resultados confiables. Los muretes fueron ensayados a compresión diagonal monótona hasta la falla. La resistencia promedio a tensión diagonal de la mampostería fue de 8.79 kg/cm² (0.86 MPa).

3.2.2. Mortero

El mortero utilizado para el junteo de las piezas de los muros se dosificó con una relación volumétrica cemento: cal: arena igual a 1:1/3:3. Se tomaron muestras de mortero para formar cubos de 5 cm por lado para realizar pruebas y, de esta manera, obtener la resistencia a la compresión.



Figura 3.3. Cubos de mortero para ensaye.

Por cada muestra de mortero tomada se elaboraron 3 cubos, como lo muestra la Figura 3.3, los cuales fueron ensayados para determinar su resistencia a compresión. Al realizar las pruebas, se obtuvo una resistencia a compresión promedio de 138.33 kg/cm² (13.57 MPa).

3.2.3. Concreto

Se utilizó concreto para los elementos confinantes del muro y se realizó un muestreo por etapas de colado en serie y consistió en tomar muestras de los anclajes de los castillos a la viga de cimentación, en los castillos y en la dala - losa al momento de ser colados.

Para conocer la resistencia a compresión del concreto se ensayaron cilindros de concreto usado en el colado de los elementos del muro. Se tomaron muestras de concreto para formar 3 cilindros de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura (Figura 3.4).



Figura 3.4. Cilindros de concreto para compresión axial.

3.3. Características de los muros

3.3.1. Geometría

Los muros ensayados fueron construidos a base de mampostería confinada en sus extremos por castillos de concreto reforzado con una sección de 12 x 20 cm. En la parte superior de cada muro se construyó una dala de dimensiones de 12 x 30 cm y una losa con un espesor de 10 cm por 45 cm de ancho. Ambos elementos, dala y losa, fueron colados monolíticamente

La losa sobresalió 20 cm en cada extremo del muro, esto se hizo para replicar las condiciones de un muro interno y proporcionar un efecto de empotramiento.

La geometría del muro se muestra en la Figura 3.5.

Los muros contaron con una altura de 250 cm (incluidas la dala y losa) y 250 cm de largo. Para la conformación del muro se dispusieron 38 hiladas de tabique rojo recocido con medidas de 5.5 x 22.5 x 12 cm con juntas de 1 cm horizontal y 0.8 cm verticales de mortero en cada hilada.

La altura de la estructura, desde su desplante, era de 2.5 m, el cual corresponde a la altura de entrepiso comúnmente usada en edificios de vivienda de la Ciudad de México.

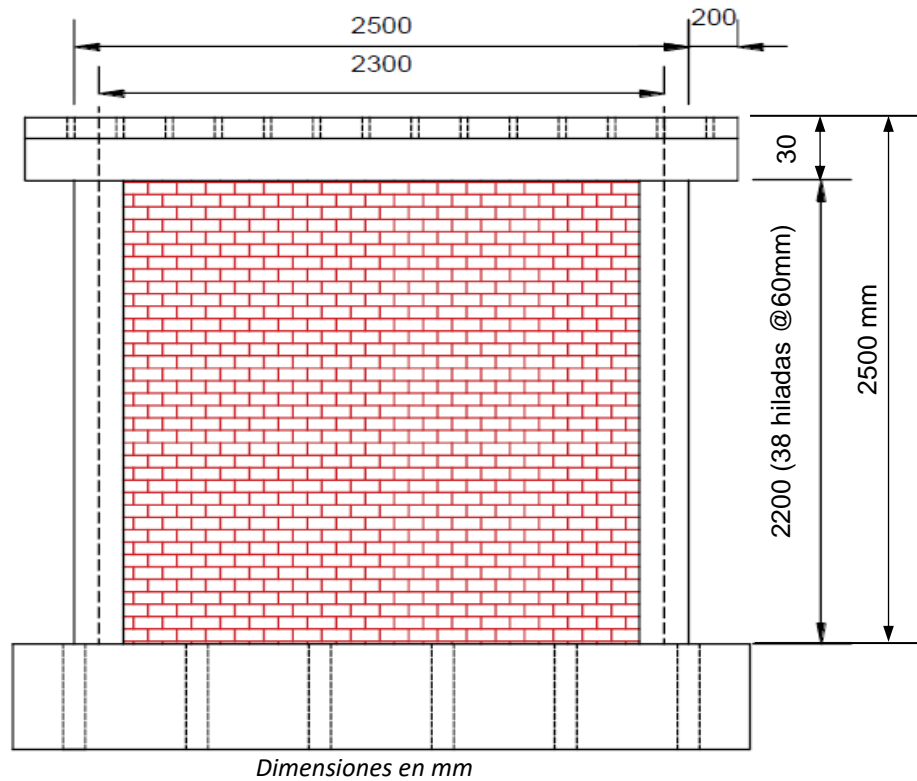


Figura 3.5. Geometría de los especímenes.

3.3.2. Cimentación

Los muros fueron construidos sobre una viga de cimentación de concreto reforzado existentes en el laboratorio de estructuras del CENAPRED, cuyas dimensiones fueron de: 80 x 50 x 300 cm. La viga de cimentación se fabricó con concreto de resistencia $f'c = 300$ kg/cm², esto con la finalidad de poseer una rigidez superior a la de los muros y proporcionar el empotramiento deseado para los castillos de cada muro (Figura 3.6).



Figura 3.6. Viga de cimentación.

3.3.3. Armado de elementos confinantes

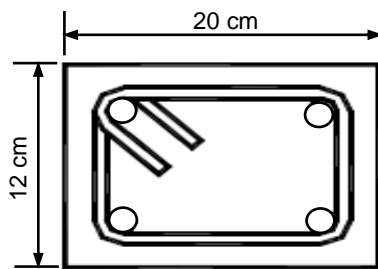
a) Armado en castillos

Los muros fueron confinados por elementos de concreto, mejor conocidos como castillos de 12 x 20 cm, que cuentan con refuerzo interior de acero. Los muros elaborados se dividieron en 2 grupos, para la construcción del primer grupo se empleó refuerzo longitudinal de 4 barras corrugadas de 12.7 mm (No. 4) y estribos lisos de alambrión del No. 2, separados a cada 15 cm; mientras que, para el segundo grupo el refuerzo longitudinal consistió en 8 barras corrugadas del No. 4 y, al igual que el primer grupo, se colocaron estribos lisos de alambrión del No. 2 a cada 15 cm. El esfuerzo nominal de fluencia de las varillas empleadas fue de $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$ (412 MPa), mientras que el del alambrión fue de $f_y = 2,530 \text{ kg/cm}^2$.

Los armados de los castillos fueron colocados en los huecos de las zapatas para que, al momento de colar el concreto, quedaran ancladas, con la idea de poder proceder a la construcción del muro (Figura 3.7).

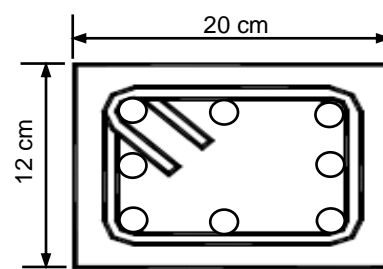


a. Castillos colocados en las zapatas de cimentación



ϕ 4 #4
E#2.5 @15 cm

b. Castillos con armado sencillo.



ϕ 8 #4
E#2.5 @15 cm

c. Castillos con armado doble.

Figura 3.7. Dimensiones de castillos.

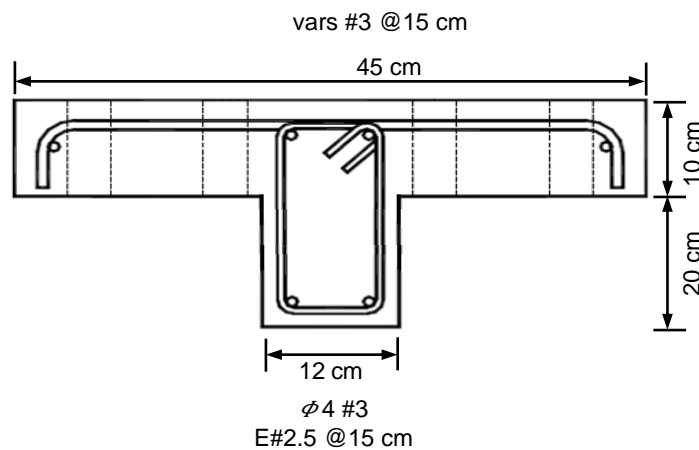
Este anclaje en la zapata tuvo como objetivo principal el desarrollar una longitud de adherencia entre el castillo y la zapata para evitar esfuerzos locales que pudieran producir fisuras o agrietamientos en el concreto. De acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTC-Concreto, 2017), la longitud de desarrollo de barras a tensión en ningún caso debe ser menor a 30 cm. La altura de la zapata de cimentación fue de 50 cm, mientras que la longitud de desarrollo de cada castillo fue de 40 cm. Con este anclaje se evitaron fallas debidas al momento flexionante en la unión del muro con la zapata de cimentación.

b) Armado de dala - losa

La Figura 3.8 muestra el confinamiento en la parte superior de los muros, las dalas tuvieron un refuerzo longitudinal constituido de 4 varillas corrugadas del No. 3 (9.5 mm) y estribos lisos de alambrión del No. 2.5, separados a cada 15 cm.



a. Cimbrado de confinamiento superior.



b. Dimensiones de dala-losa.

Figura 3.8. Armado de dala-losa.

El armado general de los especímenes se muestra en la Figura 3.9:

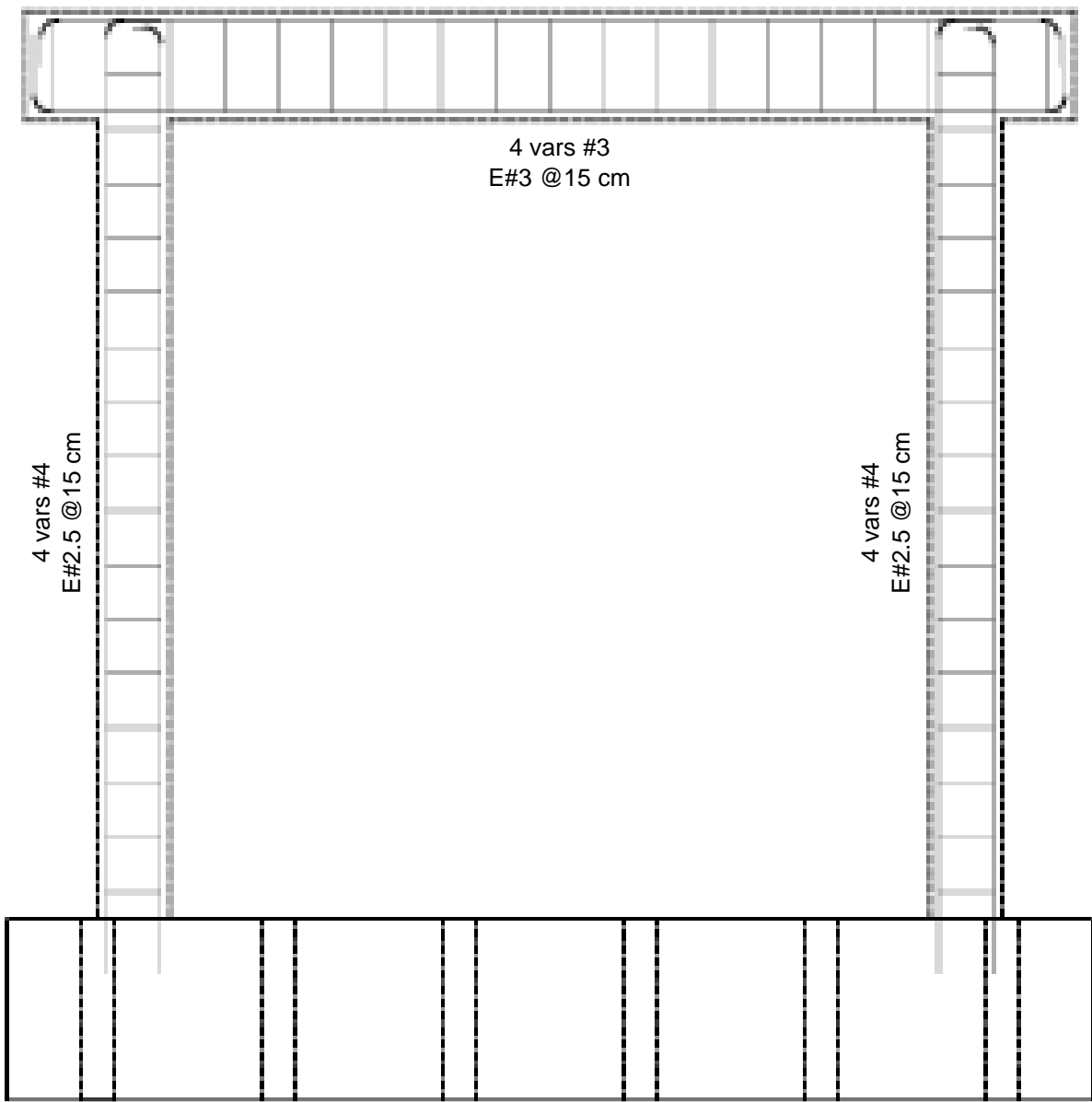


Figura 3.9. Armado de acero en los elementos de concreto.

3.4. Instrumentación

3.4.1. Instrumentación interna

La instrumentación interna fue colocada para conocer la distribución de fuerzas en los elementos estructurales, mediante deformímetros eléctricos (strain gauges) adheridos al acero de refuerzo en la parte inferior de cada castillo por muro (Figura 3.10).

El tipo de deformímetro usado fue de 2 mm de longitud, tanto en barras longitudinales como en estribos.

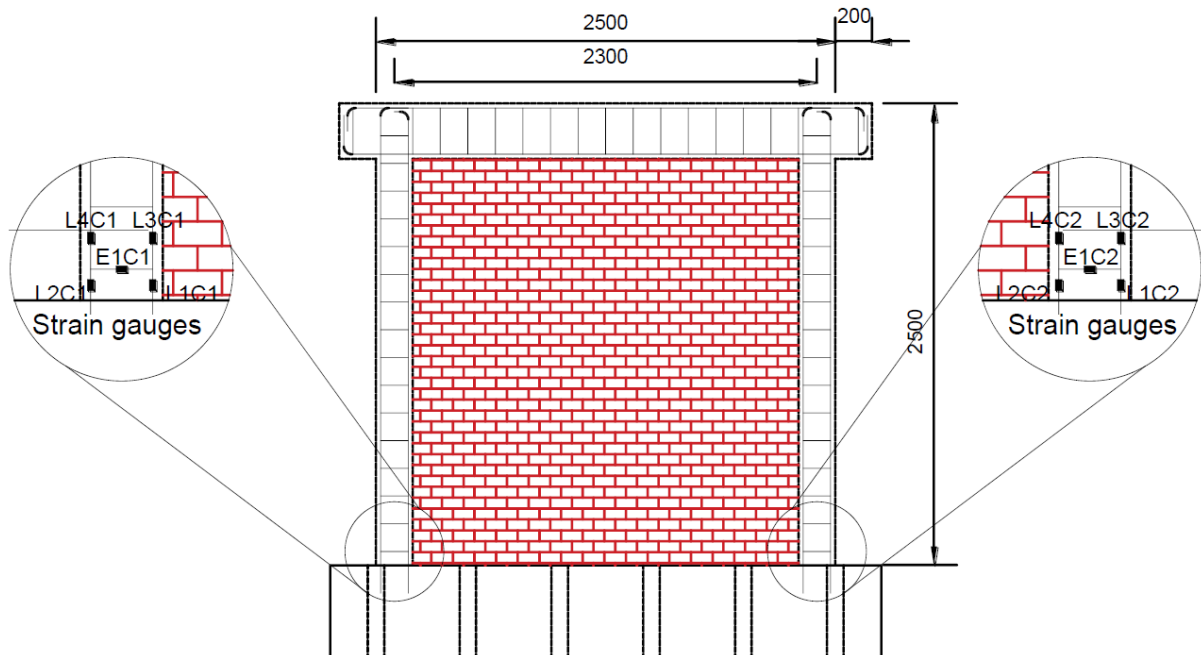


Figura 3.10. Instrumentación interna en castillos.

Cabe mencionar que, durante el proceso constructivo de los muros, principalmente en el colado de los elementos, algunos deformímetros sufrieron daños, lo que imposibilitó su funcionamiento.

3.4.2. Instrumentación externa

La instrumentación externa consistió tanto en celdas de carga, como transductores de desplazamiento (Figura 3.11). Las celdas de carga se utilizaron para medir la fuerza vertical, denominada FV, y la carga horizontal aplicada a los especímenes, denotada como FH. Los transductores se fueron colocados para medir los desplazamientos horizontales y verticales de los muros, así mismo se dispusieron transductores que midieran las deformaciones diagonales y rotaciones que pudieran presentarse durante las pruebas. También se colocaron transductores que midieran los desplazamientos fuera del plano debidos al movimiento que pudiera presentar el muro al estar siendo ensayado.

Como se puede observar en la Figura 3.11, los transductores marcados como H1 hasta H8 miden los desplazamientos horizontales del modelo, los desplazamientos verticales fueron medidos con los elementos indicados como V1 y V2, los transductores D1 y D2 midieron la deformación diagonal en el muro, la rotación del espécimen fue medida mediante R1 y R2, por último, las deformaciones fuera del plano fueron monitoreadas con los aparatos FP1 y FP2.

Los transductores H1 y H2 fueron tomados como referencia para el control por desplazamientos en el ensaye del modelo. En la Figura 3.11 se muestra la simbología utilizada y la posición del aparato de medición en el espécimen.

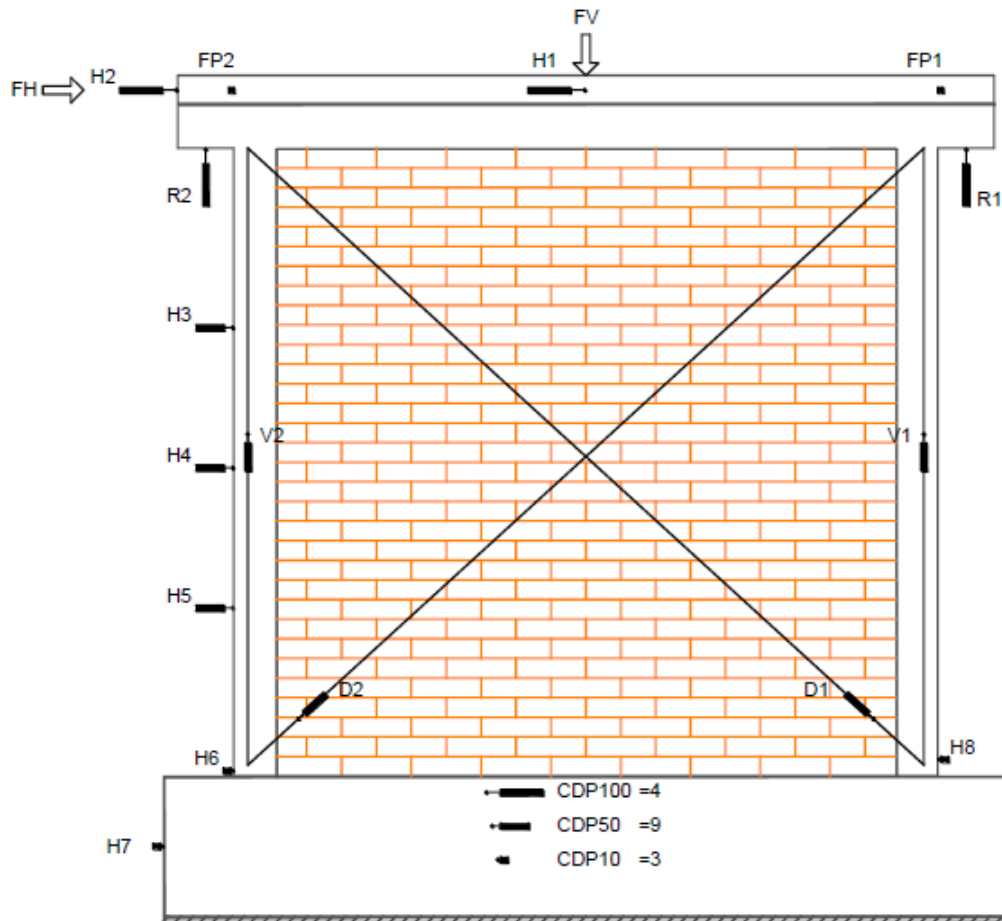


Figura 3.11. Instrumentación externa de los especímenes.

3.5. Proceso constructivo

El proceso constructivo inicio con la limpieza de las vigas de cimentación existentes en el laboratorio de estructuras del CENAPRED (Figura 3.12), puesto que se habían utilizado en pruebas anteriores, su limpieza consistió en la remoción de material adherido tanto en la parte superior como en la inferior, retirando restos de mortero y polvo que pudieran evitar una correcta disposición de la mampostería en la parte superior y discontinuidades que afectarían la adherencia a la losa de reacción.



Figura 3.12. Limpieza y disposición de la viga de cimentación.

Terminada la etapa de limpieza se procedió a la habilitación del acero de refuerzo para los castillos, colocando los estribos de alambroón a cada 15 cm. Una vez habilitados, los elementos fueron introducidos en los huecos de las vigas de cimentación. Dichos huecos fueron previamente cubiertos en el perímetro interior y base con plástico para evitar la adherencia de concreto con la base (Figura 3.13a).

Al terminar de habilitar el acero correspondiente a los castillos se colocaron deformímetros eléctricos (strain gauges) en cada varilla longitudinal, así como en un estribo en la base de cada castillo (Figura 3.13b).



a. Recubrimiento con plástico al interior de los huecos.



b. Armado de castillos sencillos.

Figura 3.13. Colocación de castillos en la cimentación.

La



a. Primera etapa de colado (castillos –cimentación).



b. Strain gauges en castillos.

Figura 3.14 muestra la primera etapa de colado de concreto dejando embebidos los castillos a la viga de cimentación.



b. Primera etapa de colado (castillos –cimentación).



c. Strain gauges en castillos.

Figura 3.14. Anclaje de castillos en las vigas de cimentación.

Posteriormente, como se muestra en la Figura 3.15, se colocaron las hiladas de tabique, los cuales fueron previamente hidratados para evitar que absorbieran el agua del mortero. Este proceso se realizó mediante el uso de manguera vertiendo agua sobre los tabiques uniformemente durante tiempo suficiente hasta que se apreciara visualmente que los elementos no absorbieran más agua. Una vez hidratadas, las piezas de tabique fueron unidas con juntas horizontales de mortero de 1.5 cm y juntas verticales de 1 cm en promedio.



a. Colocación de hiladas de las piezas.

b. Piezas de mampostería totalmente colocadas.

Figura 3.15. Colocación de piezas de mampostería para los muros.

Terminada la colocación de la mampostería se colocó la cimbra (Figura 3.16) para colar los castillos, misma que se construyó a base de madera en la cual se hicieron tres agujeros para poder insertar espárragos, con los cuales se proporcionaba rigidez a la cimbra con el fin de contener y evitar la pérdida de concreto, especialmente en la base de los castillos. La parte interior de la cimbra fue impregnada con grasa para facilitar su remoción cuando el concreto haya fraguado.



a. Colocación cimbra para castillos.

b. Desmonte de cimbra en castillos.

Figura 3.16. Colado de elementos confinantes laterales.

El siguiente paso fue el habilitado y colocación del acero de refuerzo para la dala y losa (Figura 3.17), esto se realizó al mismo tiempo que se colocaba la cimbra para dichos elementos. En la losa se dejaron provistos huecos hechos con tubos de PVC, los cuales

sirvieron para introducir tornillos que unieron a la losa con la viga metálica que distribuye uniformemente la carga vertical que se le aplicó a los especímenes.



a. Colocación de acero para dala



b. Colocación de cimbra y armado de losa

Figura 3.17. Colocación de armado y cimbra para sistema dala-losa.

Al igual que en los castillos, la cimbra fue impregnada en su parte interior con grasa para facilitar su remoción.

A continuación, se dispuso el elemento en la posición designada para ser ensayada (Figura 3.18). Para ello se colocó plástico delgado en la losa de reacción y sobre ella se colocó una capa de mortero pobre para evitar que el muro y la viga de cimentación se deslizaran sobre la losa de reacción al momento de realizar las pruebas. Adicional a esto, la viga de cimentación fue sujeta con barras de acero de alta resistencia. Estas barras fueron atornilladas de la viga de cimentación a la losa de reacción. Así mismo, una vez atornilladas fueron postensadas para asegurar que no se moviera la viga de cimentación

Una vez colocada y fijada en su posición el espécimen se pintó y se trazó una cuadrícula sobre el muro para apreciar el avance de las grietas durante las pruebas.



a. Transporte del modelo en posición para ensaye.



b. Cuadrícula para monitoreo de grietas.

Figura 3.18. Disposición del espécimen para prueba.

Posteriormente se montó una viga metálica de 3m de largo que distribuyera la carga vertical de manera uniforme sobre todo el espécimen, como se muestra en la Figura 3.19. Esta maniobra se realizó con ayuda de una grúa mecánica que posee el laboratorio del CENAPRED. Al igual que en la base, se colocó mortero pobre para unir la viga al modelo y, así, evitar el deslizamiento de esta viga durante las pruebas. Además del mortero, se colocaron tornillos de alta resistencia que unieron ambos elementos mediante los huecos dispuestos en la losa y la viga metálica.

Adicionalmente se colocó una viga de acero en posición vertical en uno de los extremos y se unió mediante tornillos a la viga horizontal. Esto se realizó para engarzar el actuador.



Figura 3.19. Colocación de viga horizontal para distribución de carga.

Teniendo ambas vigas fijadas al modelo, se procedió a colocar, como se observa en la Figura 3.20, la carga vertical sobre el muro. Para ello se situó una viga metálica en posición transversal al modelo, así como una celda de carga entre ambas vigas para medir que la carga aplicada verticalmente fuera de 13.5 toneladas. Con esas 13.5 t y el peso de las vigas metálicas se llegó a una carga vertical de 15 t, o 5 kg/cm², aplicadas axialmente en el muro.

La viga transversal también fue colocada con la ayuda de la grúa mecánica del laboratorio. Una vez en posición el mecanismo de carga fue asegurado mediante barras de acero de 6 m atornilladas desde la parte inferior de la losa de reacción, pasando a través de la viga de cimentación y sobresalían hasta la parte superior del modelo. Para asegurar la viga transversal se atornilló un yugo metálico a las barras, de modo que el yugo fungiera como "tope" y soportara tanto a la viga como a la carga vertical.

En la Figura 3.20 se puede observar la ubicación de la celda de carga entre ambos elementos metálicos.



Figura 3.20. Viga para contrapeso sobre celda de carga.

La Figura 3.21 muestra el peso colocado, de manera suspendida, en el muro.



a. Vista general del muro con carga.



b. Placas metálicas usadas como carga vertical.

Figura 3.21. Disposición de carga vertical sobre el muro.

Una vez colocada la carga vertical en el modelo, se procedió a colocar la instrumentación externa como lo muestra la Figura 3.22. Para ello se colocó un poste metálico del cual se sujetaban perfiles de aluminio donde se sujetaron los instrumentos. De igual manera, se colocaron guías metálicas verticales y diagonales en la parte posterior del modelo para medir los desplazamientos en estas direcciones durante las pruebas



a. Poste de sujeción para instrumentos.



b. Guías metálicas para medir desplazamientos.

Figura 3.22. Colocación de instrumentación externa.

3.6. Arreglo experimental

Como se mencionó anteriormente, las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de estructuras grandes del CENAPRED. Para estos ensayos se utilizó el arreglo que se muestra a continuación en la Figura 3.23. Se puede apreciar que los componentes del arreglo experimental se componen de la estructura de reacción, la que consta de un muro y losa capaces de resistir las acciones a inducir durante las pruebas. La losa cuenta con orificios circulares a cada 50 cm, a los cuales se fijó la cimentación de cada muro por medio de barras de acero.

El actuador hidráulico horizontal fue fijado al muro de reacción, el cual también cuenta con orificios, a través de una placa de acero y conectado al modelo a la altura de la losa y a su vez a un sistema de vigas de repartición de carga. El actuador fue controlado mediante una bomba hidráulica.

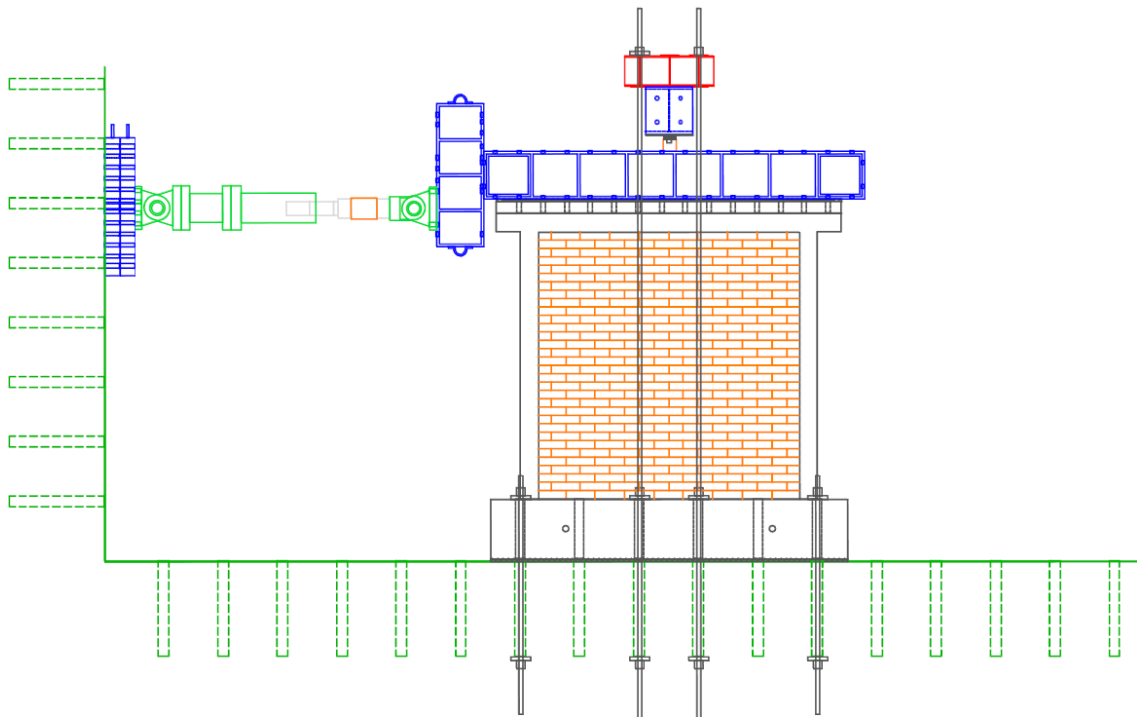


Figura 3.23. Marco de carga utilizado en las pruebas.

La carga vertical se mantuvo constante mediante el sistema mostrado en la Figura 3.24, el cual permitió aplicar una carga total de 15 toneladas. Este valor puede considerarse como típico en edificios de vivienda económica de unos cuatro o cinco niveles de altura.

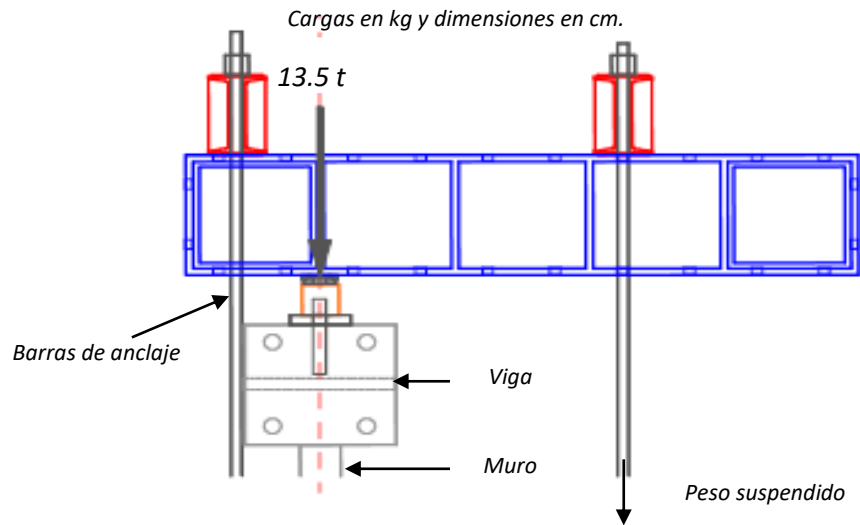


Figura 3.24. Sistema para aplicación de carga vertical.

3.7. Protocolo de carga

Se realizaron las pruebas en dos etapas:

- 1) Cargas laterales controladas por cargas y
- 2) Cargas laterales controladas por desplazamientos.

Se consideró como carga negativa cuando el actuador empujaba al muro y como carga positiva cuando el actuador jalaba al modelo. La historia de carga aplicada se muestra en la Figura 3.25, donde, en el eje de las ordenadas se tiene la fuerza lateral impuesta en la fase controlada por carga lateral, mientras que los desplazamientos aplicados en términos de distorsiones, se muestran en el resto del ensaye.

Se recuerda que la distorsión es el desplazamiento lateral impuesto entre la altura del espécimen.

3.7.1. Control por carga lateral

Los ensayos fueron cíclicos reversibles con una repetición de cada incremento. En la primera etapa de las pruebas, los ciclos se controlaron por carga lateral, con una repetición para cada nivel de carga. Esto se realizó para conocer el comportamiento de los modelos antes de la aparición de las primeras grietas.

Los dos primeros ciclos se realizaron hasta el 25% de la carga máxima teórica, es decir 2.6 t. El siguiente incremento de carga fue de 5.2 t, con su respectiva repetición.

3.7.2. Control por desplazamiento

Después de aplicar las cargas de la sección 3.7.1, se aplicaron desplazamientos laterales a los especímenes. Cada desplazamiento aplicado correspondía a una distorsión objetivo. Por ejemplo: para una distorsión de 0.0015 el desplazamiento fue 3.5 mm.

El siguiente incremento se realizó hasta llegar a un desplazamiento de 5 mm, correspondientes a una distorsión de 0.002, posteriormente se aumentó a una distorsión de 0.004 (10 mm) y, por último, a 0.005 de distorsión (12.5 mm). Este valor se determinó buscando obtener un daño moderado en los especímenes, para la posible rehabilitación posterior.

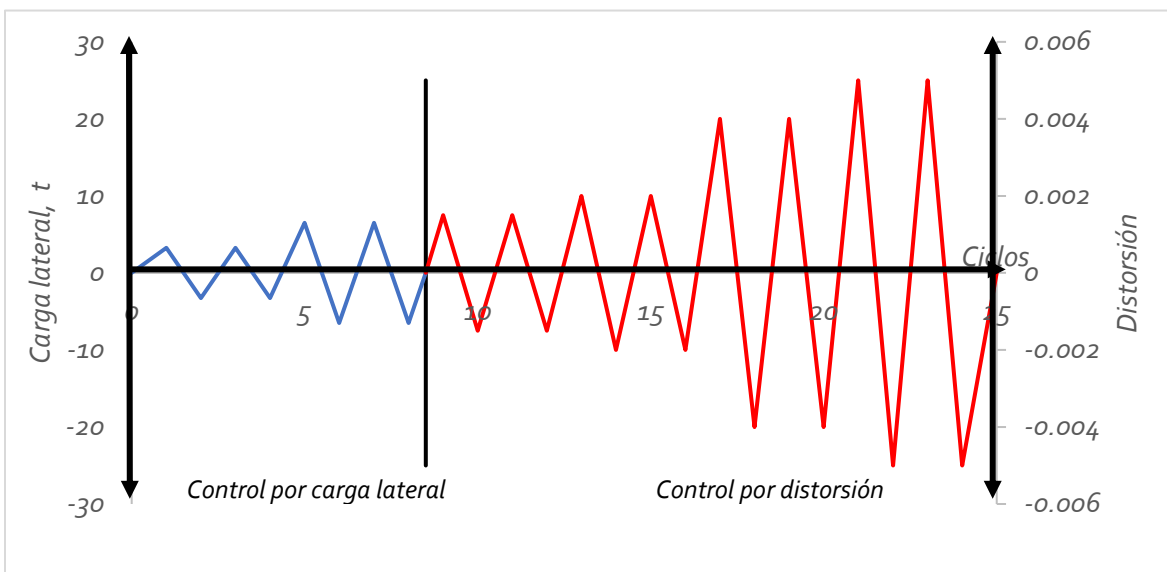


Figura 3.25. Protocolo de carga.

4. Resultados experimentales

Se describe la evolución del daño inducido a cada espécimen mediante el avance de las grietas presentes en la cuadrícula trazada en el panel de los modelos.

Después se muestran las curvas de histéresis de cada muro, así como los límites de fuerza cortante según las NTC-Mampostería ((2017).

4.1. Muro 1

En este espécimen, los primeros agrietamientos se presentaron en ambos castillos, aproximadamente a la altura donde se encontraban los estribos. Estos agrietamientos fueron de forma horizontal y se presentaron durante los ciclos controlados por carga lateral a 5.2 t (Figura 4.1).

Las grietas son claramente debidas a flexión en le muro

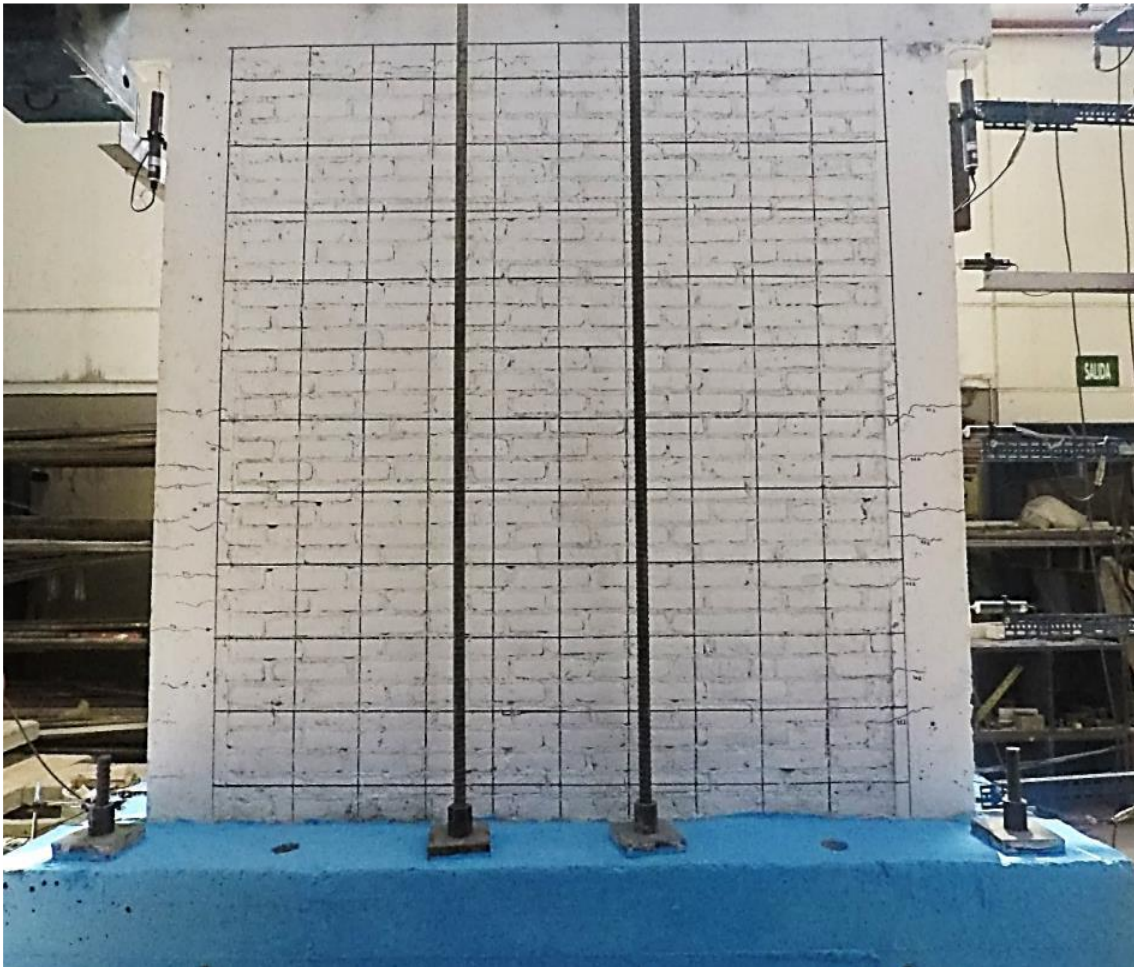


Figura 4.1. Daños en el muro 1 durante la etapa controlada por carga.

Durante la etapa controlada por distorsión, en el empuje del muro para una distorsión de 0.0015 aparecieron grietas inclinadas y se monitoreó la grieta máxima "A", la cual llegó a abrirse 1 milímetro. Cuando se invirtió el sentido de la carga aparecieron grietas inclinadas en la otra dirección y una nueva grieta a monitorear, que se denominó "1", la cual llegó a abrirse 1.5 milímetros. Estas grietas aparecieron cerca de las esquinas del muro y se extendieron hacia la parte central conforme aumentó la distorsión (Figura 4.2).

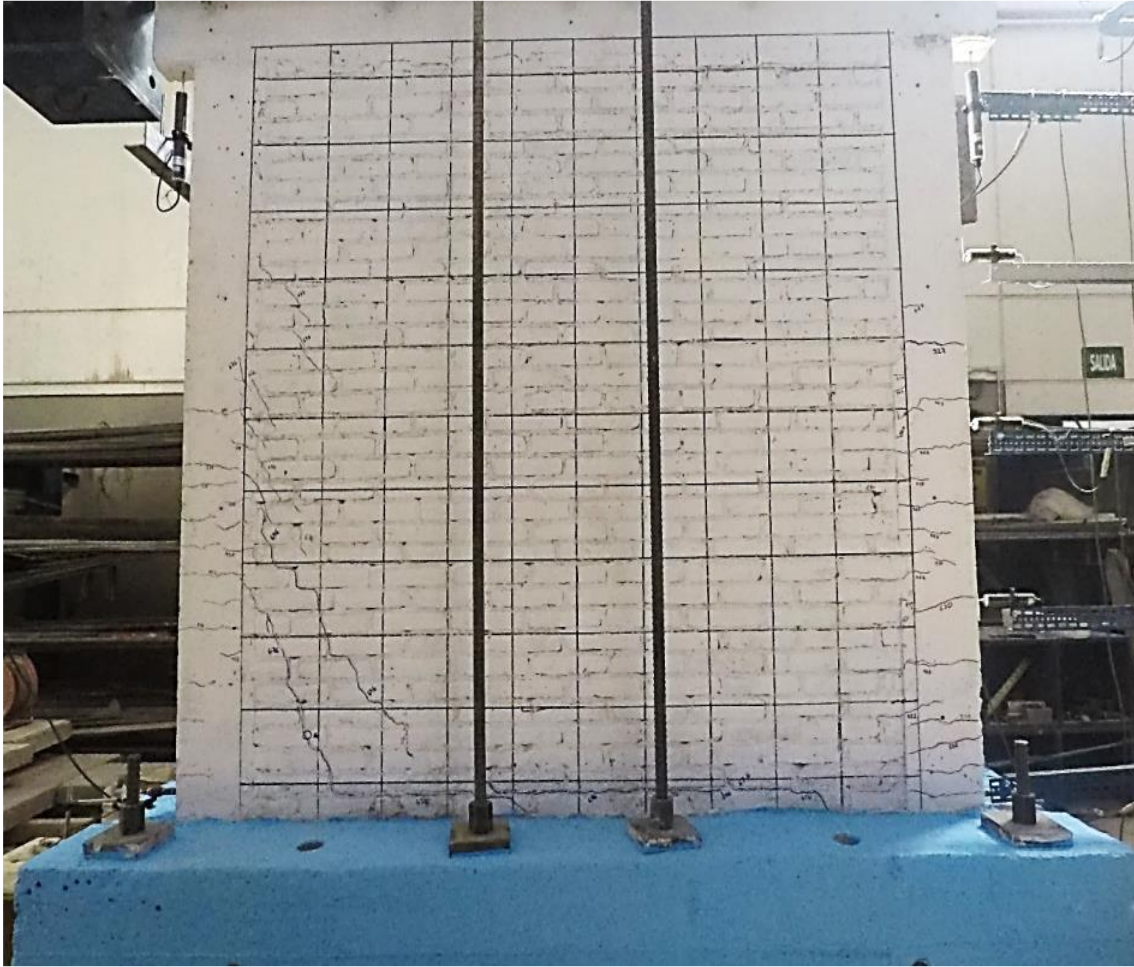


Figura 4.2. Daños en el muro 1 a una distorsión de 0.0015.

Después aparecieron más grietas inclinadas a 45° en el panel del muro y en las esquinas superiores de los castillos. En la Figura 4.3 se muestran la grieta "C", la cual fue la de mayor extensión en el muro y presentó un ancho de 8 mm.

Desde la aparición de esta grieta, las grietas "A" y "B" presentaron una reducción en su apertura, ya que se observó que los efectos producidos por la carga lateral influían prácticamente por completo en la grieta "C". El patrón de agrietamiento fue estable y durante este ensaye se realizó el monitoreo de 5 grietas (Figura 4.3).

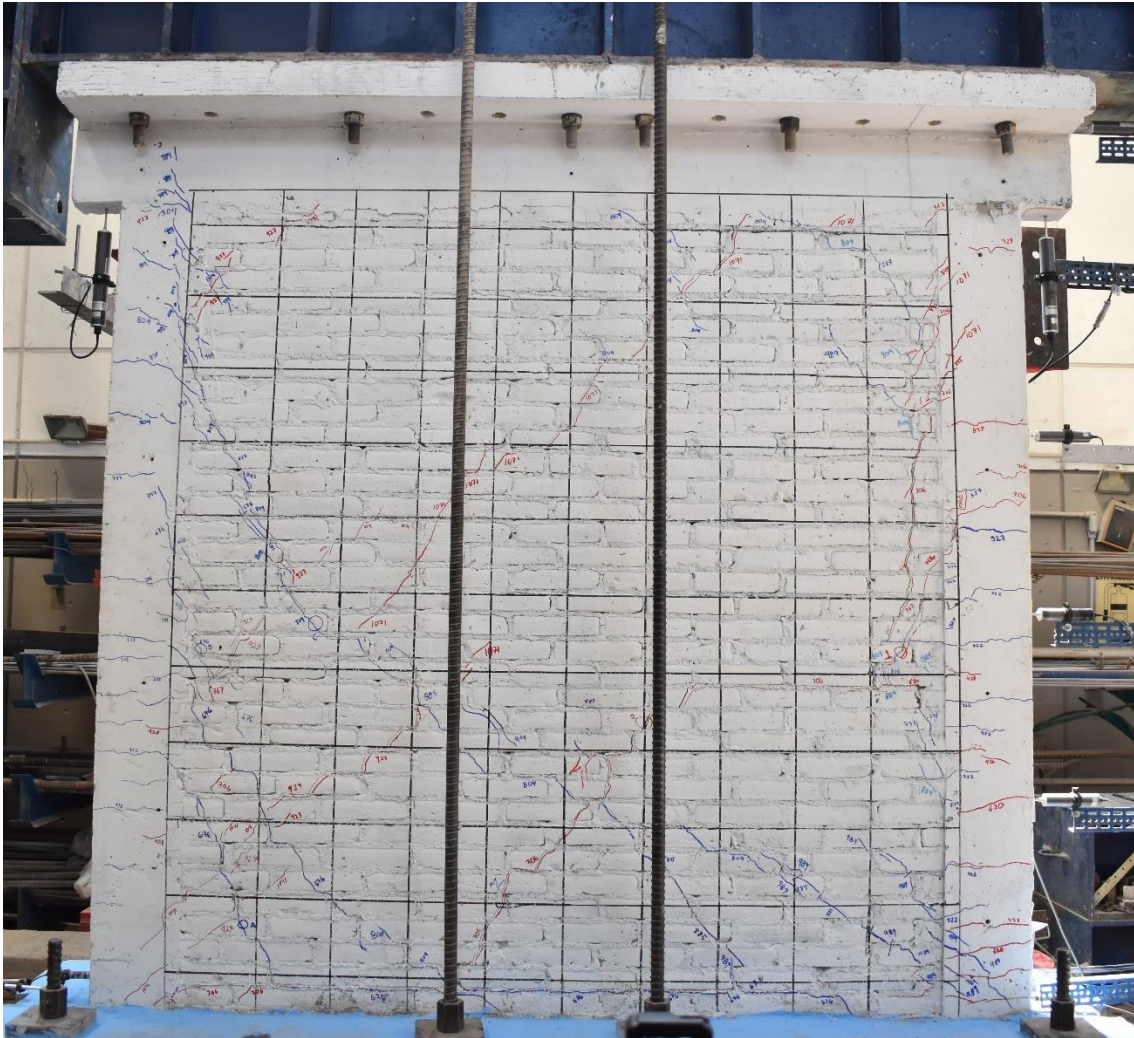


Figura 4.3. Estado final del muro 1.

Si sólo se toman en cuenta los resultados más representativos, obtenidos para las grietas 1, 2 en semiciclos positivos (jalón del muro) y C para semiciclos negativos (empujón del muro), se pudo observar como la apertura máxima fue de 5 milímetros.

También se observa que, en las tres grietas de control más representativas, al no haber carga lateral, no cerraron por completo y esta apertura residual fue incrementando durante el desarrollo de la prueba. La mayoría de las grietas se propagaron atravesando los tabiques, y en muy pocos casos, siguieron las juntas entre el mortero y el tabique en forma escalonada.

Durante el ciclo negativo del primer incremento de distorsión de 0.006 el modelo presentó falla diagonal en la base del castillo derecho, lo cual no estaba previsto que ocurriera, es por ello que el protocolo de carga fue modificado para limitar las pruebas consecuentes a una distorsión de 0.005. Durante la prueba el espécimen alcanzó la carga máxima registrada para una distorsión de 0.004 antes de la falla antes mencionada, la cual corresponde al valor de 14.7 toneladas. La carga máxima registrada durante el ciclo positivo fue de 13.8 toneladas, la cual también se obtuvo durante el primer incremento de distorsión de 0.004 (Figura 4.4).

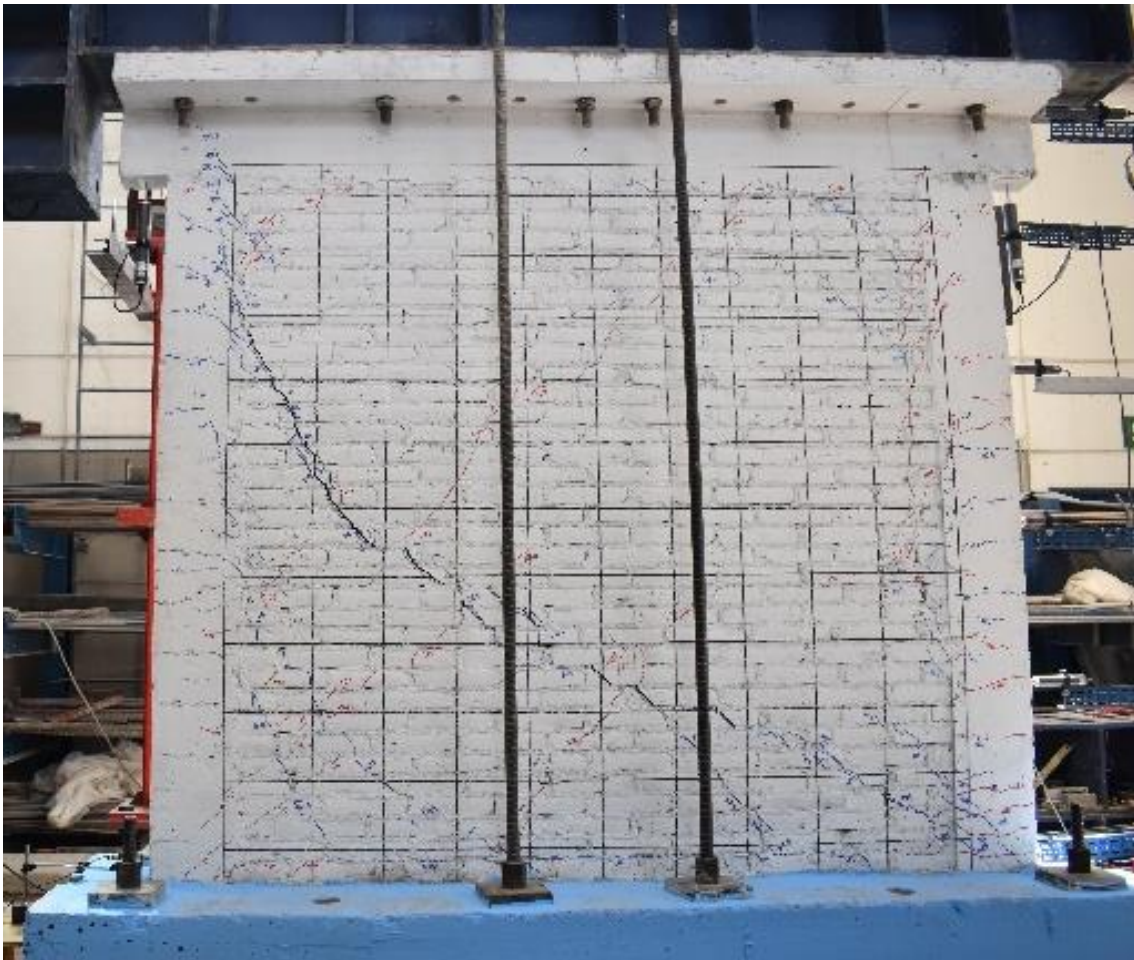


Figura 4.4. Grieta diagonal al final de la prueba del muro 1.

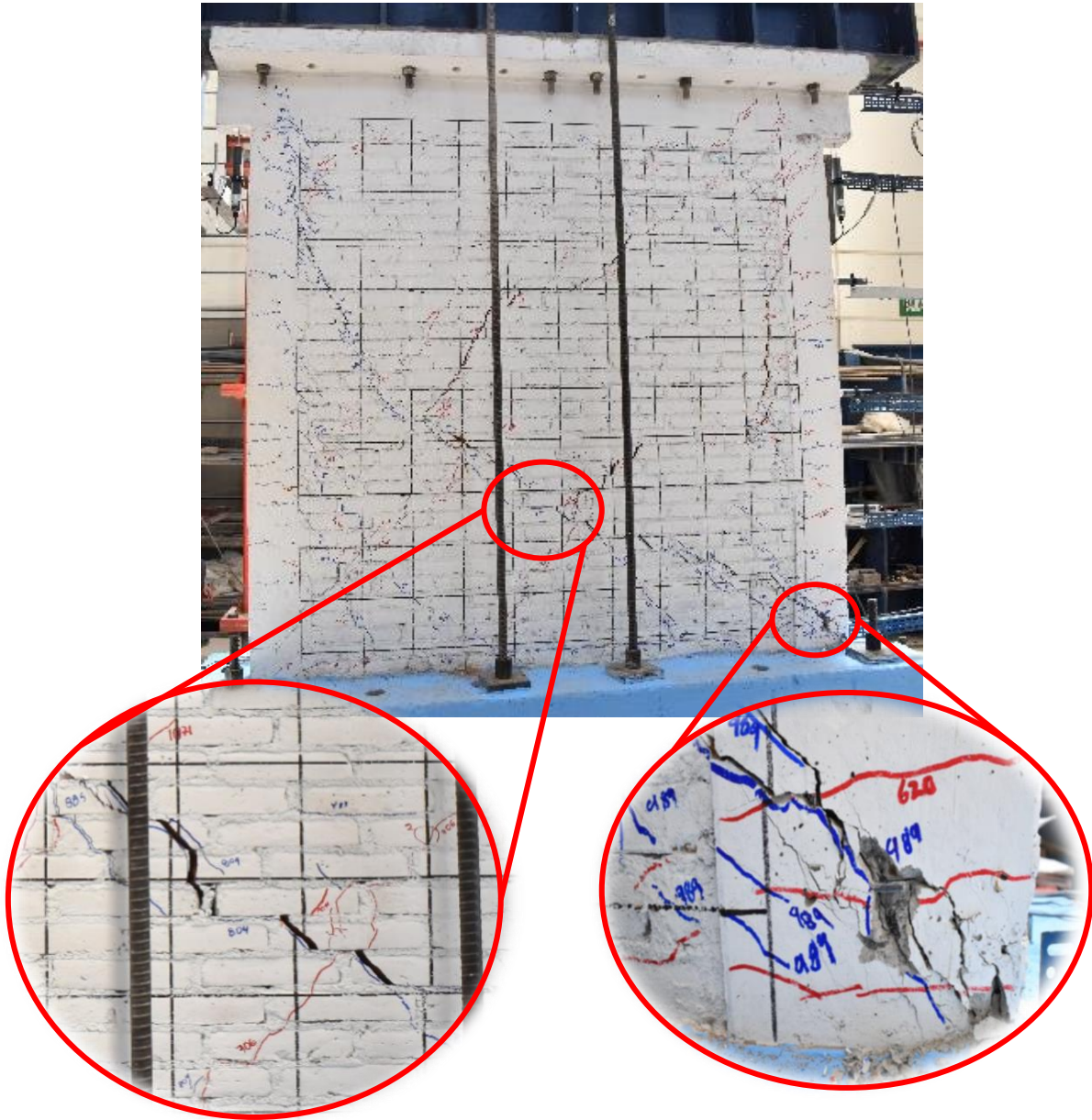


Figura 4.5. Acercamiento a daños en castillo y panel central del muro 1.

No se esperaba que el espécimen llegara a la falla, sin embargo, se presentó una ruptura del concreto en la zona inferior del castillo a tensión, es decir, el castillo de la derecha (Figura 4.5).

Este evento se presentó durante el ciclo negativo del primer incremento de distorsión de 0.006, con grietas que llegaron a abrirse hasta 13 milímetros. Es por esta razón que se optó por limitar la distorsión máxima a 0.005 para las pruebas en los modelos subsecuentes.

La Figura 4.6 muestra la evolución del ancho de las grietas monitoreadas durante los picos máximos de cada ciclo. También se agrega la envolvente de grieta máxima según la distorsión durante la prueba

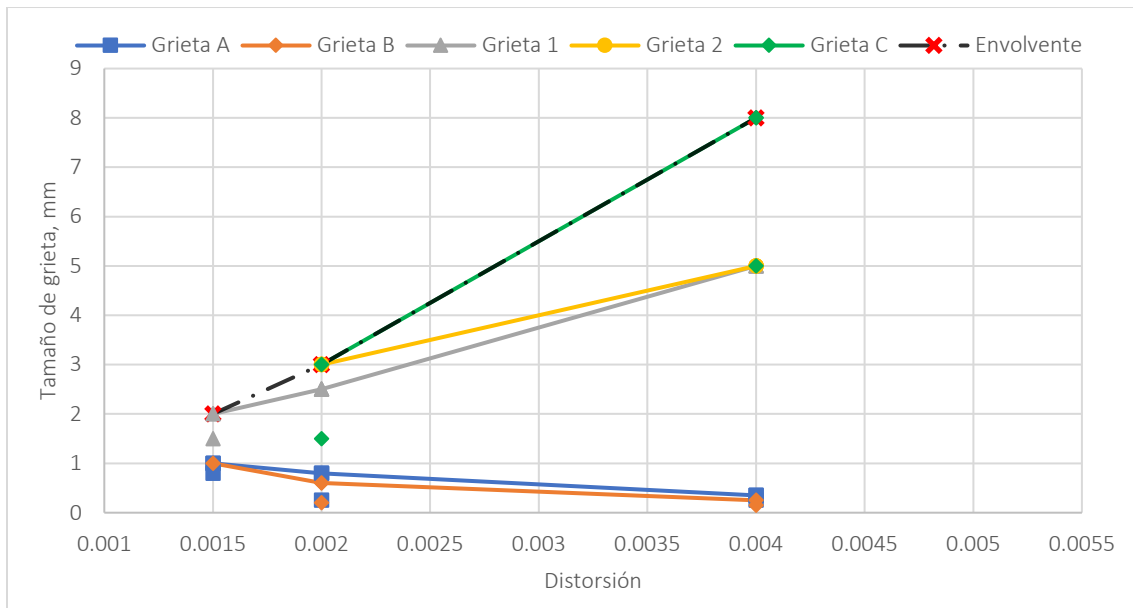


Figura 4.6. Comportamiento de las grietas en pico del muro 1.

Por otro lado, la Figura 4.7 muestra la evolución del comportamiento de las grietas monitoreadas cuando no se le aplica carga lateral al modelo (grietas residuales) con base en los datos recopilados durante las pruebas.

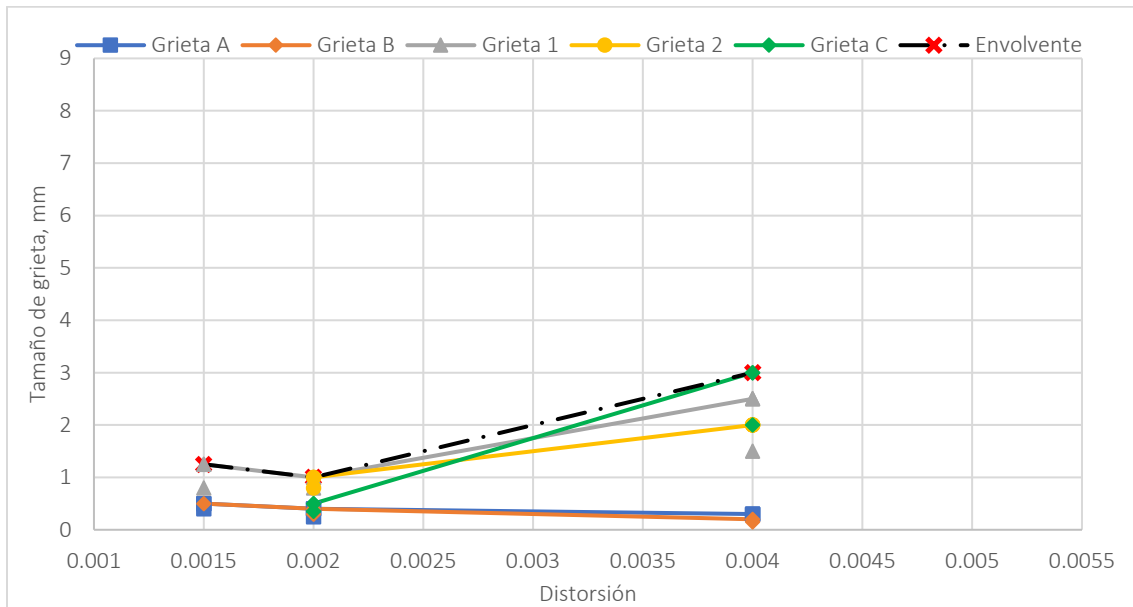


Figura 4.7. Comportamiento de las grietas residuales del muro 1.

En la curva carga lateral-distorsión, Figura 4.8, se puede observar que en los ciclos controlados por carga el modelo tuvo una respuesta histerética simétrica, sin embargo, durante los ciclos controlados por desplazamientos el espécimen demandó menos carga en los semiciclos positivos que en los negativos, esto puede ser debido al daño ocasionado durante los ciclos negativos, que ocurrían primero.

A pesar de la falla por tensión diagonal antes mencionada, este modelo logró superar en un 28% la calculada inicialmente, llegando a 13.3 toneladas. En los ciclos anteriores al agrietamiento diagonal (distorsión de 0.0015) el modelo mostró un comportamiento elástico lineal.

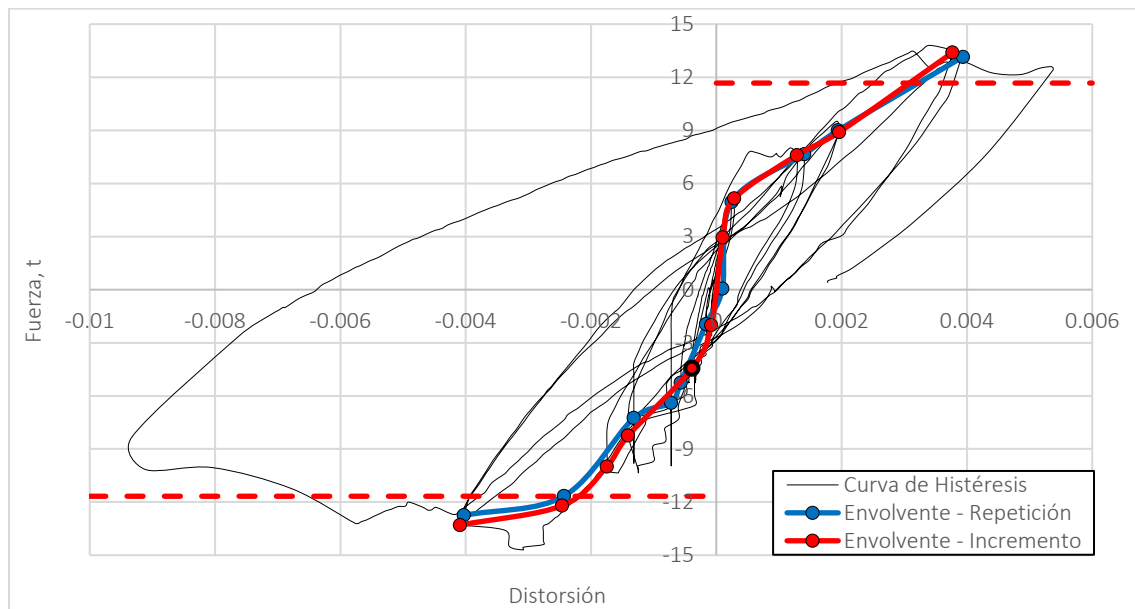


Figura 4.8. Curva de histéresis muro 1.

La Figura 4.9 muestra la distorsión aplicada al muro con respecto a su rigidez pico a pico, normalizada con respecto a la rigidez inicial. Se muestra una notable disminución en la rigidez inicial del muro durante el transcurso de la prueba, sobre todo en los ciclos controlados por carga, donde el muro perdió poco más del 80% de su rigidez respecto a la inicial.

Por otro lado, al entrar a la etapa controlada por desplazamiento se presenta una reducción de cerca del 10%. Como se observa, para este muro, con los últimos datos recopilados para una distorsión de 0.004, la rigidez final ronda el 8% de la rigidez inicial.

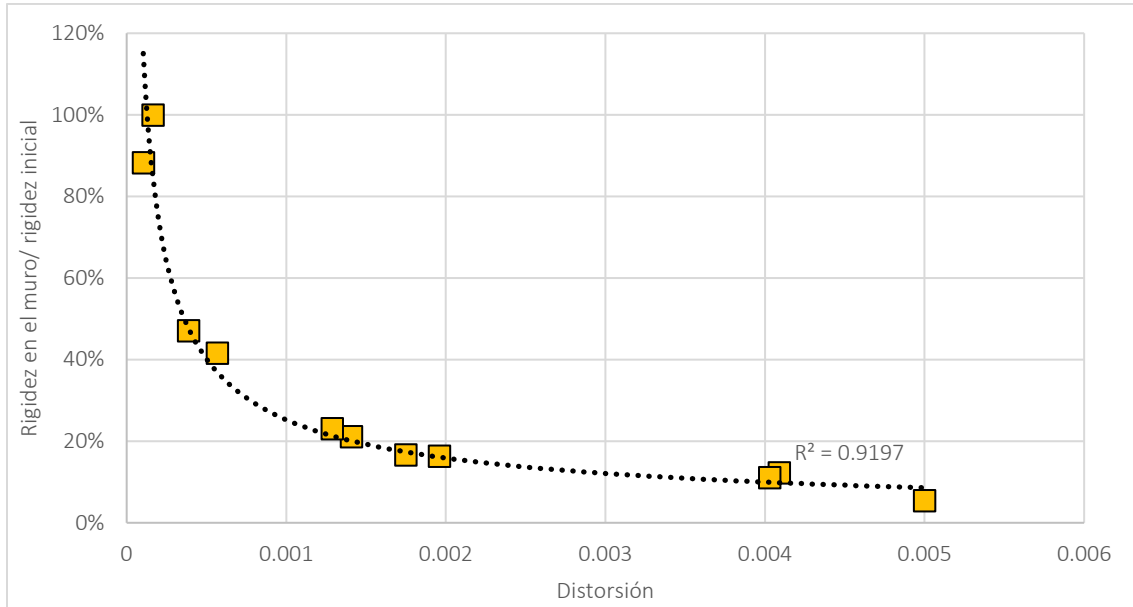


Figura 4.9. Degradación de rigidez del muro 1.

Ahora, en la Figura 4.10 se muestra el comportamiento que tuvo el amortiguamiento viscoso equivalente del muro 1. Se puede observar que el amortiguamiento es superior al 5% del crítico y presenta una tendencia en aumento muy marcada.

Es importante aclarar que el amortiguamiento viscoso equivalente se puede calcular usando la ecuación (4.1), según Chopra (2001), como:

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{S0}} \quad (4.1)$$

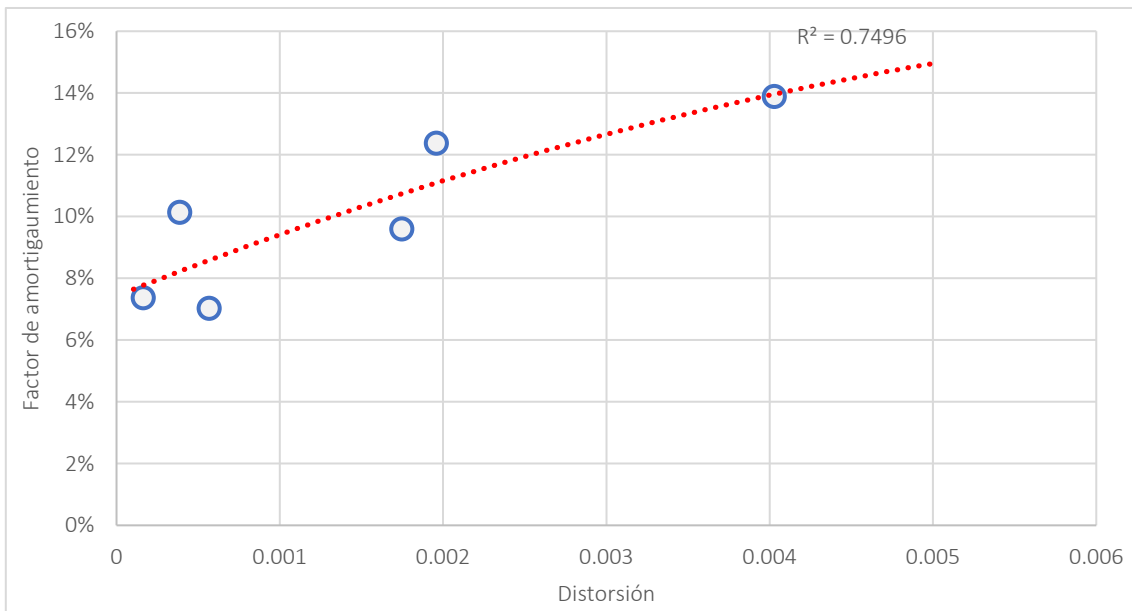


Figura 4.10. Amortiguamiento del muro 1 durante la prueba.

4.2. Muro 2

Al igual que el muro 1, en este espécimen las primeras señales de agrietamiento se presentaron con forma horizontal a la altura de los estribos en los castillos. Estas se presentaron durante la etapa controlada por carga lateral, en el primer incremento correspondiente al 50 por ciento de la carga de agrietamiento, en esta ocasión las grietas aparecieron al aplicar una carga de 4.7 toneladas en carga lateral (Figura 4.11).

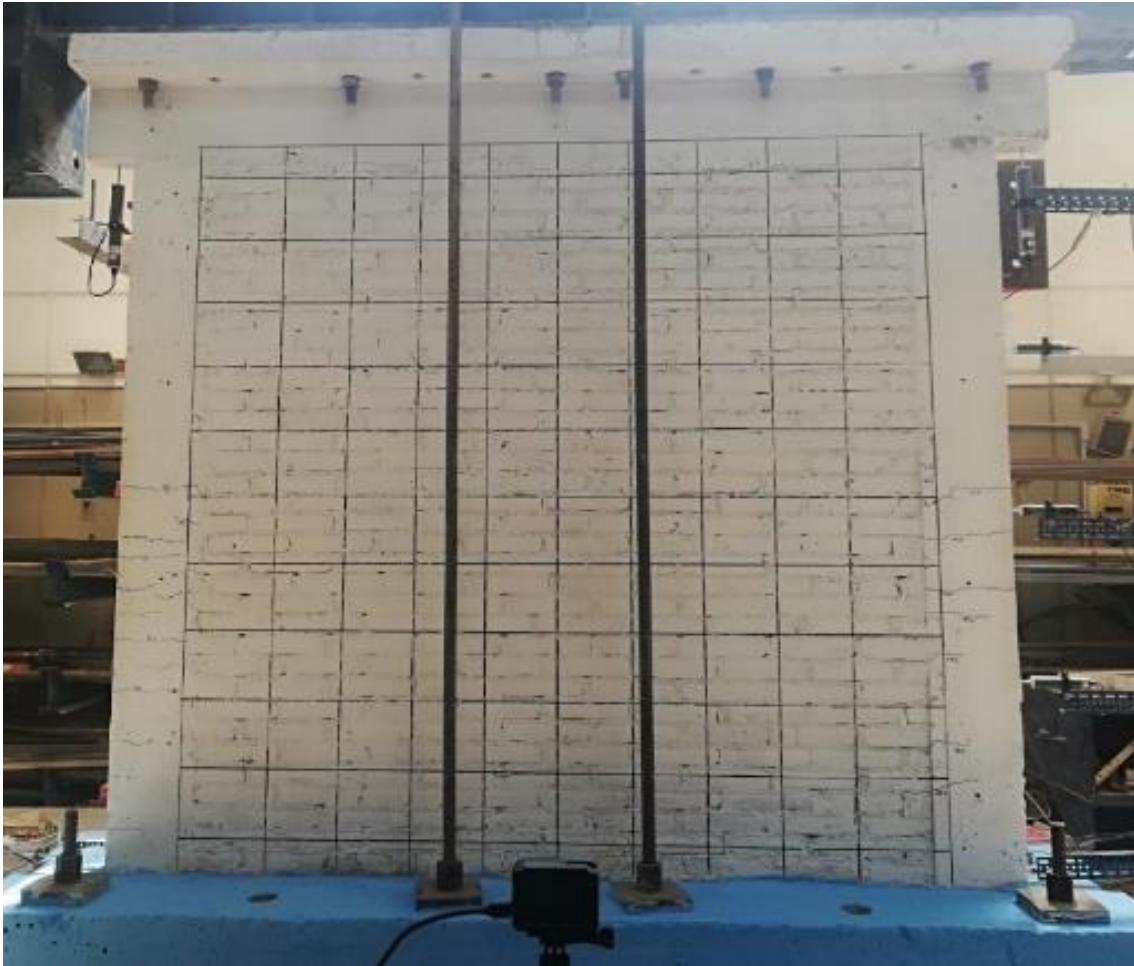


Figura 4.11. Daños en el muro 2 durante la etapa controlada por carga.

Durante esta prueba se monitorearon tres grietas, de las cuales "A" y "1" aparecieron durante el primer incremento de la etapa controlada por distorsión de 0.0015, ambas presentaron un ancho de 1.5 mm. Estas dos grietas aparecieron cerca de las esquinas del muro y se extendieron hacia la parte central conforme aumentó la distorsión (Figura 4.12), cabe mencionar que ambas siguieron una tendencia hacia el centro de la parte inferior del muro. Posteriormente, surgió la grieta "B", la cual pasaba justo por el centro del panel y al encontrarse con "1" presentó una bifurcación, estas ramas tendían a llegar a la esquina contraria hasta tocar el castillo.



Figura 4.12. Daños en el muro 2 a una distorsión de 0.0015.

Después aparecieron más grietas en el perímetro de los castillos hacia el centro de muro, sobre todo en las cercanías de las esquinas superiores de los castillos, también se aprecia el incremento en el ancho de grietas, como se observa en la Figura 4.13.

Otro punto a destacar en este modelo es que las grietas horizontales en los castillos no tuvieron un incremento notable en su anchura, permanecieron uniformes con un ancho promedio de 0.25 mm.

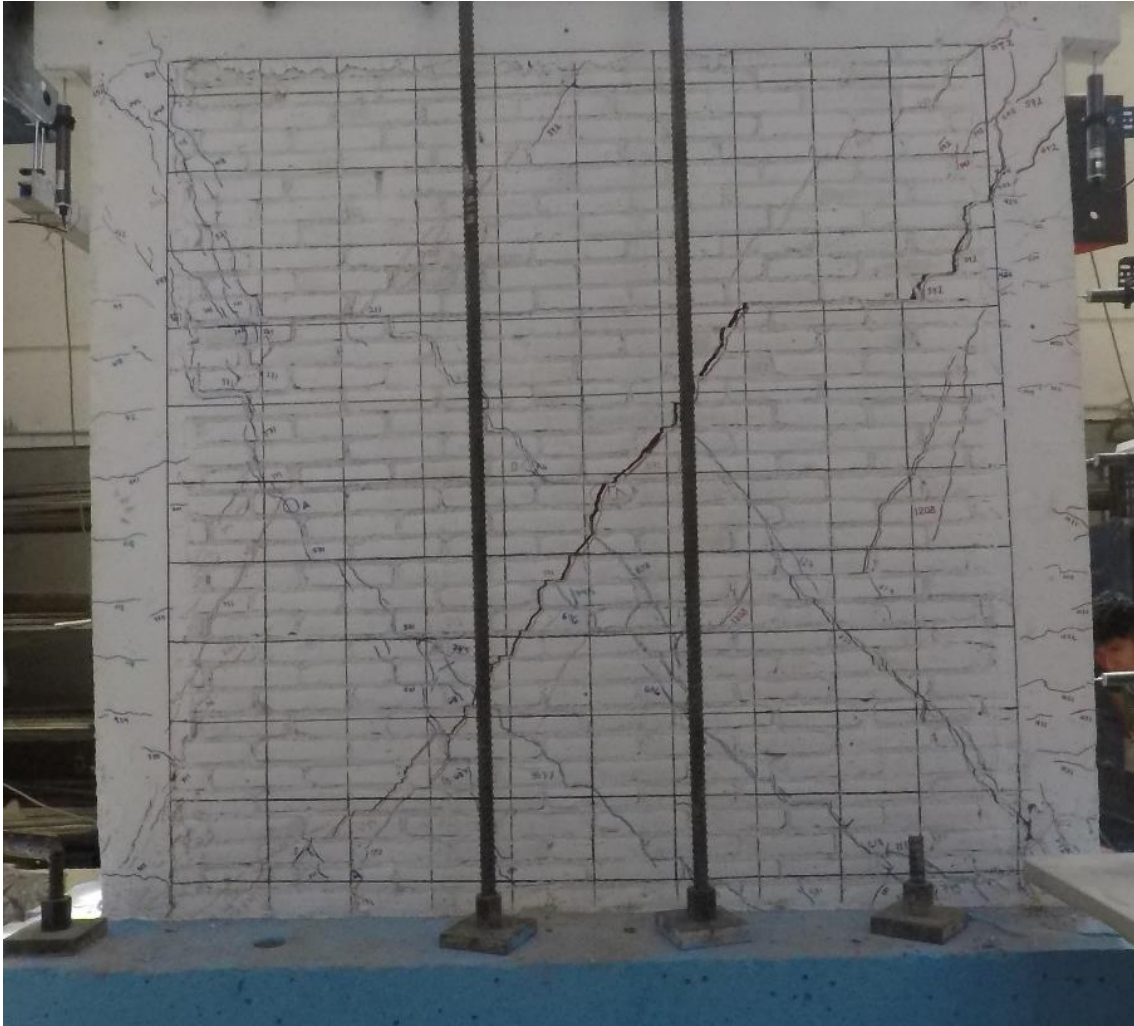


Figura 4.13. Estado final del muro 2.

Tomando en cuenta a las grietas "B" y "1" como los resultados más representativos obtenidos para las grietas, tanto en semiciclos positivos como negativos, se puede observar como la apertura promedio máxima fue de 10 milímetros. La grieta "A" presentó su ancho máximo a un nivel de distorsión de 0.002 con 4 mm y con el paso de la prueba fue cerrándose hasta terminar con un ancho de 2 mm. También se observa que las tres grietas, no cerraron por completo, lo que dejó una grieta residual que fue incrementando su anchura durante el desarrollo de la prueba.

La mayoría de las grietas se propagaron atravesando los tabiques, y en muy pocos casos, siguieron las juntas entre el mortero y el tabique en forma escalonada. También se aprecia un notorio desplazamiento en la cuadrícula del muro, debido a las grietas y la aplicación del actuador, este desfase no llegó a impactar en los castillos, pero si en el panel central, como se muestra en la Figura 4.14.

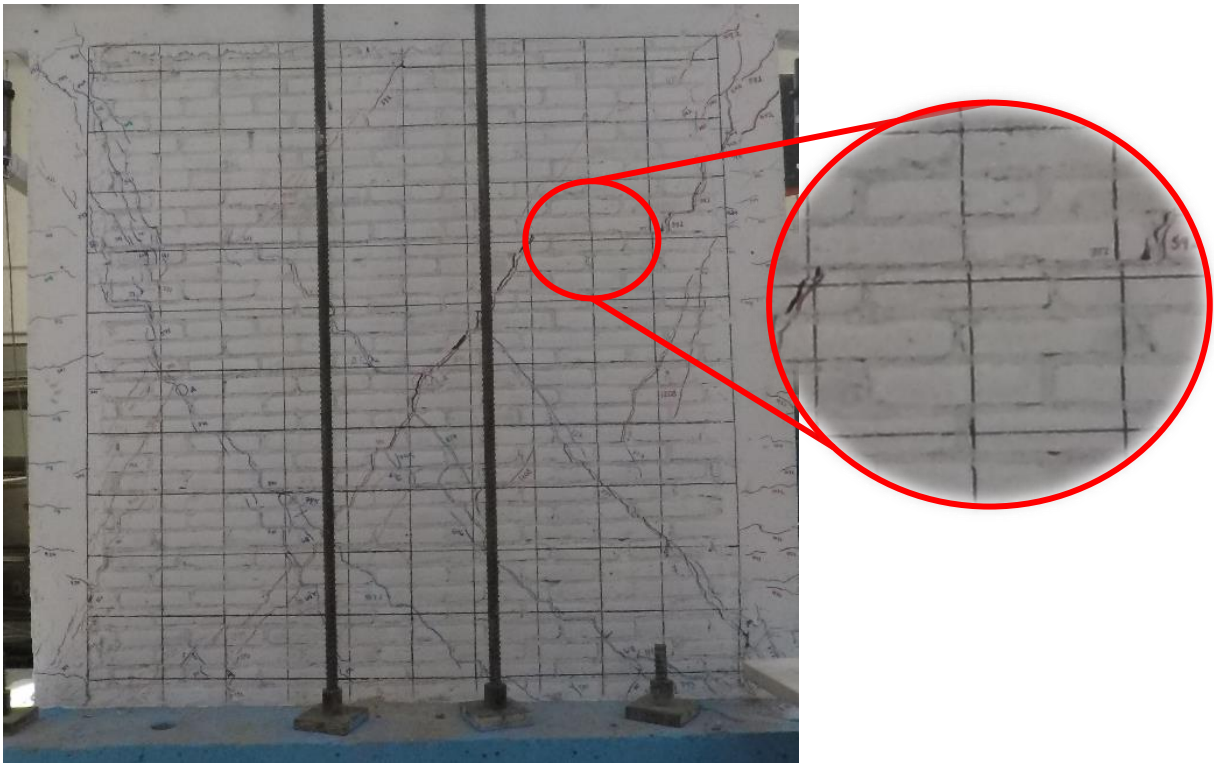


Figura 4.14. Acercamiento al desplazamiento en el panel del muro 2.

La Figura 4.15 muestra la evolución del ancho de las grietas, siendo la grieta "1" la que presentó el ancho de mayor magnitud, seguida de la grieta "B" según los datos registrados.

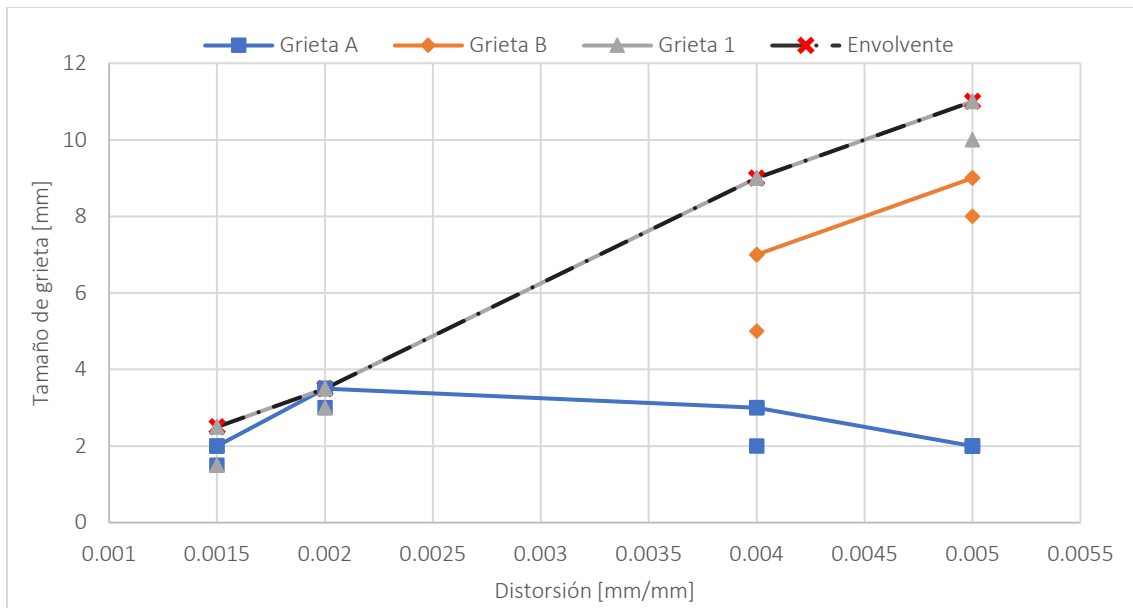


Figura 4.15. Comportamiento de grietas en pico del muro 2.

La Figura 4.16 muestra la evolución del comportamiento de las grietas residuales, donde se observa que la grietas "1" y "B" son las de mayor magnitud, mientras que "A" tiene una anchura mucho menor, cayendo hasta 1.50 mm.

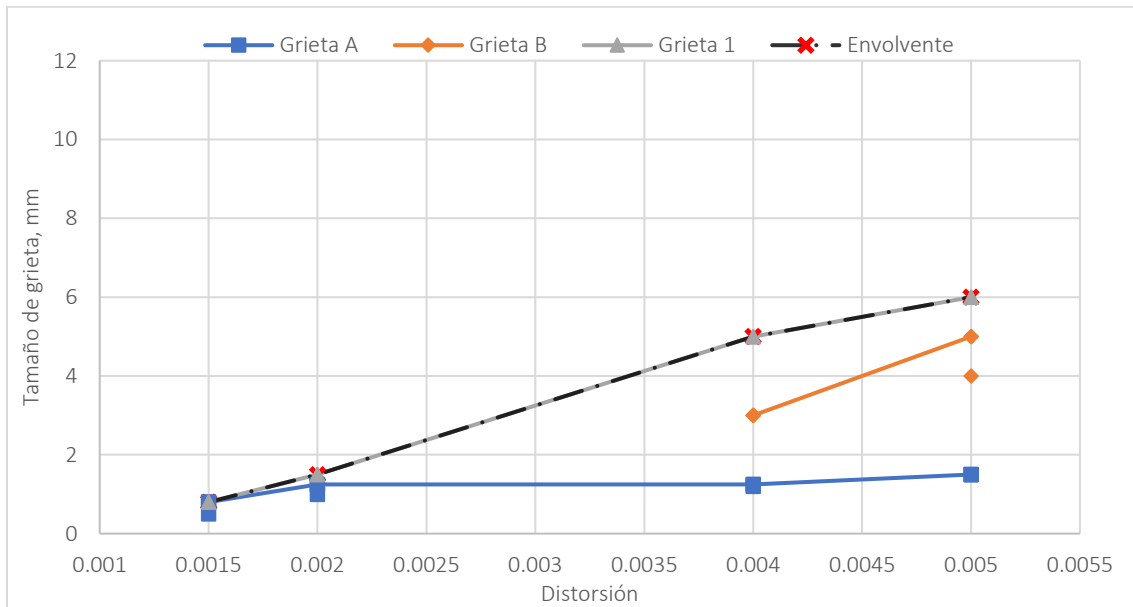


Figura 4.16. Comportamiento de grietas residuales del muro 2.

En la curva carga lateral-distorsión, Figura 4.17, al igual que en el modelo anterior se observa una respuesta histerética simétrica durante los ciclos controlados por carga lateral.

Durante los ciclos controlados por distorsión, el espécimen mostró una demanda de carga lateral menor para provocar distorsiones mayores en los semiciclos negativos, donde no llegó a la fuerza cortante calculada. Por otro lado, en la rama de los semiciclos positivos la fuerza cortante aplicada superó ligeramente a la calculada.

Durante el último ciclo de carga, para una distorsión de 0.005, el espécimen alcanzó la carga máxima registrada, en ambos semiciclos, las cuales corresponden a valor de 12.2 toneladas en el semiciclo positivo, donde rebaso por 17% la carga calculada inicialmente, y de 9.8 toneladas en el negativo, donde estuvo 6% por debajo de la fuerza esperada.

En términos generales, se puede decir que el modelo tuvo un comportamiento uniforme y cumpliría con las normas para mampostería (NTC-Mampostería, 2017).

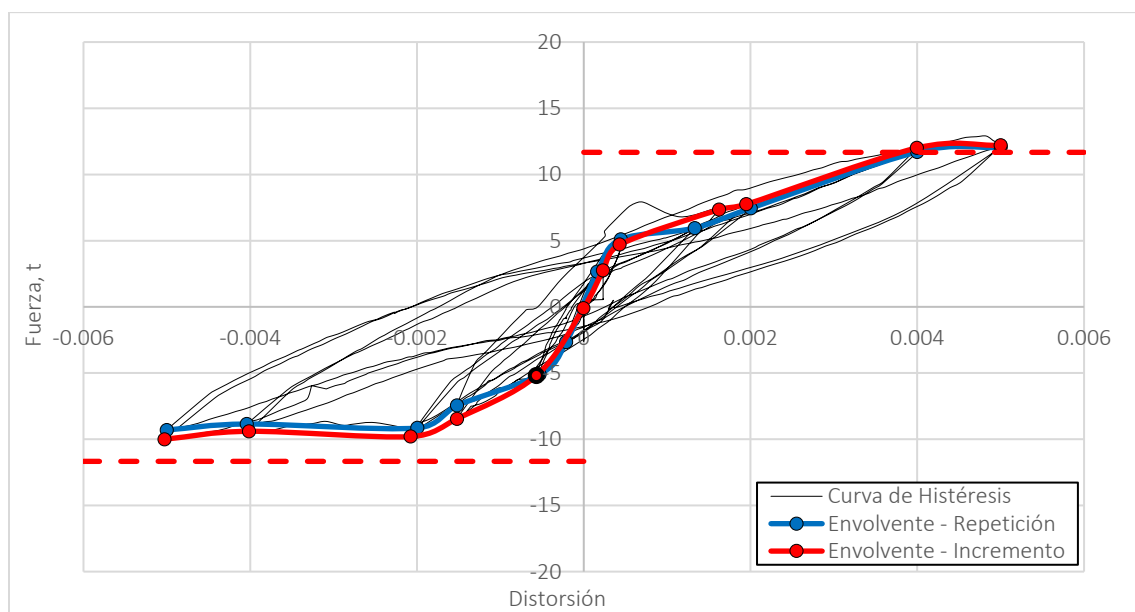


Figura 4.17. Curva de histéresis muro 2.

Al igual que en el muro 1, la Figura 4.18 la disminución en la rigidez pico a pico decrece rápidamente durante la etapa controlada por carga, reduciéndose cerca de un 70%.

Mientras que, en la etapa controlada por desplazamiento la reducción en la rigidez es menor. Como se aprecia, al término de la prueba para una distorsión de 0.005, el espécimen 2 finaliza con un 18% con respecto de su rigidez inicial.

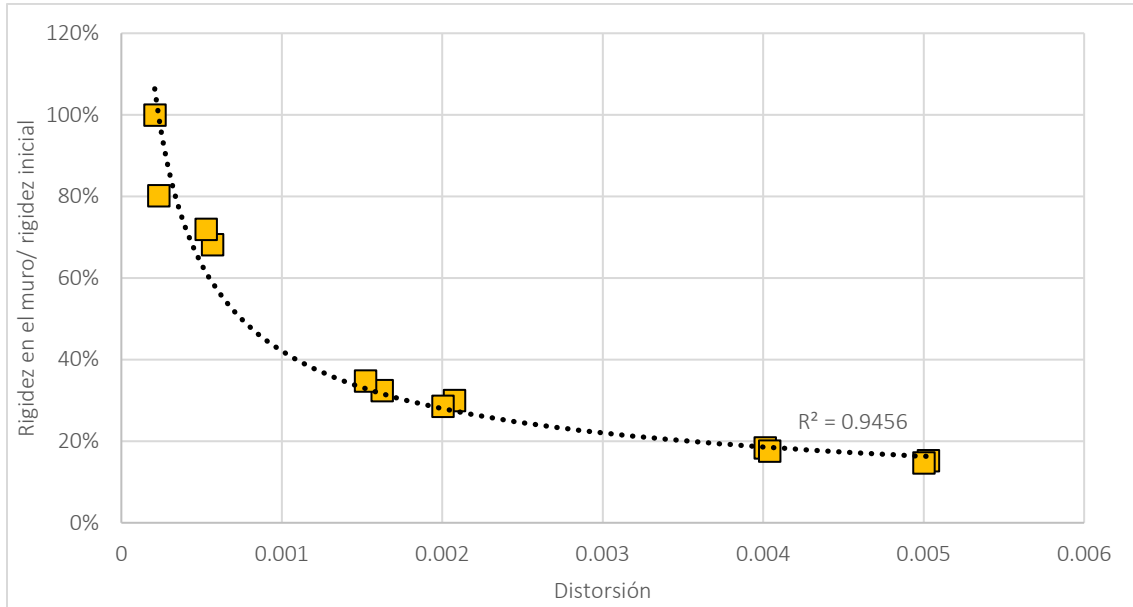


Figura 4.18. Degradación de rigidez del muro 2.

Para el amortiguamiento viscoso equivalente, La Figura 4.19 muestra comportamiento que tuvo el muro 2. Se puede ver que los datos tienen un rango de entre el 6% y 12%, superior al 5% y una menor dispersión en los datos, aunque la tendencia horizontal cercana al 10%.

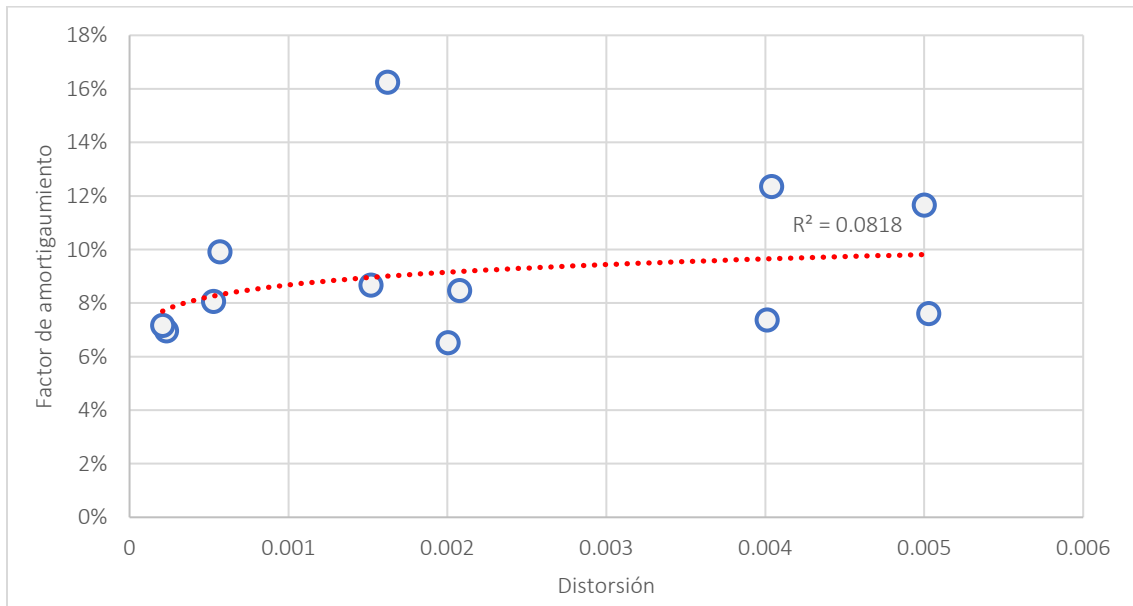


Figura 4.19. Amortiguamiento del muro 2 durante la prueba.

4.3. Muro 3

En el espécimen 3 durante la etapa controlada por carga no se presentaron señales de agrietamiento considerables debidos a la influencia del actuador, tampoco hubo grietas

horizontales en los castillos debidas a flexión, esto presumiblemente fue debido al cambio en el armado de los castillos.

Cabe mencionar que antes de iniciar el ensaye de este muro, se percató la existencia de una grieta en forma vertical justamente en la parte central del panel, la cual partía de la parte inferior del modelo y llegaba a poco más de la mitad de la cuadrícula trazada, este desperfecto se asume ocurrió durante la colocación del espécimen en se posición de prueba. (Figura 4.20).



Figura 4.20. Muro 3 al final de la etapa controlada por carga.

En este modelo las grietas de control aparecieron en el primer ciclo de la etapa controlada por desplazamiento a una distorsión de 0.0015, la grieta "A" durante el

semiciclo negativo y la grieta "1" en el semiciclo positivo; ambas presentaron una abertura de 1 mm.

La grieta "A", apareció en la parte central del modelo donde se encontraba la fisura vertical y siguió esa tendencia. Por otro lado, la grieta "1" se presentó de forma diagonal partiendo del centro del muro en la parte superior. (Figura 4.21).

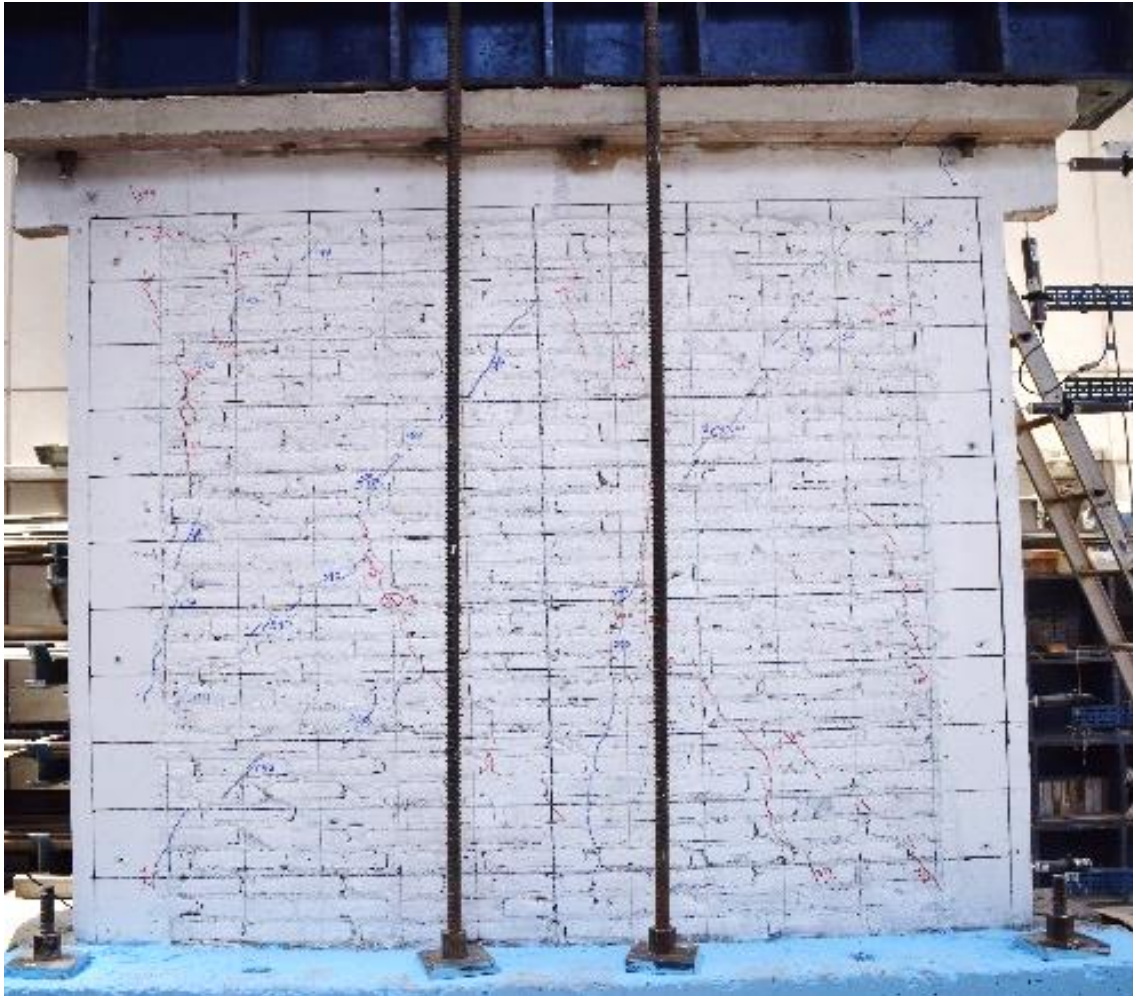


Figura 4.21. Daños en el muro 3 a una distorsión de 0.0015.

Después aparecieron más grietas inclinadas tanto en las esquinas de los castillos, como en la parte central. La Figura 4.22, muestra la aparición de las grietas "B", en el lado

izquierdo de la parte central del muro y la grieta "2", la cual apareció en sentido contrario de la grieta "A". Las aberturas fueron de 2 mm y 1.5 mm, respectivamente.

El patrón de agrietamiento observado fue peculiar, ya que las grietas producidas en los semiciclos negativos llegaban a la mitad del modelo, como si se tratase de 2 paneles, mientras que la grieta "2" logró extenderse de esquina a esquina. Durante este ensaye se realizó el monitoreo de 4 grietas.



Figura 4.22. Estado final del muro 3.

Tomando en cuenta los resultados, se pueden establecer como las aberturas máximas de 6.5 mm, en pico negativo (empujón del muro) y 4 mm en pico positivo (jalón del muro). Al igual que los modelos anteriores, hubo grietas residuales en el modelo sin la aplicación de carga lateral.

En este ensaye hubo grietas muy notorias que siguieron las juntas entre el mortero y el tabique a manera de escalones. Este espécimen no presentó daños en los castillos de concreto, únicamente pequeños agrietamientos que no penetraron de manera

importante en dichos elementos (Figura 4.23). Al final de la prueba el estado del muro presentaba un daño menor, por lo cual podía rehabilitarse sin problema alguno.

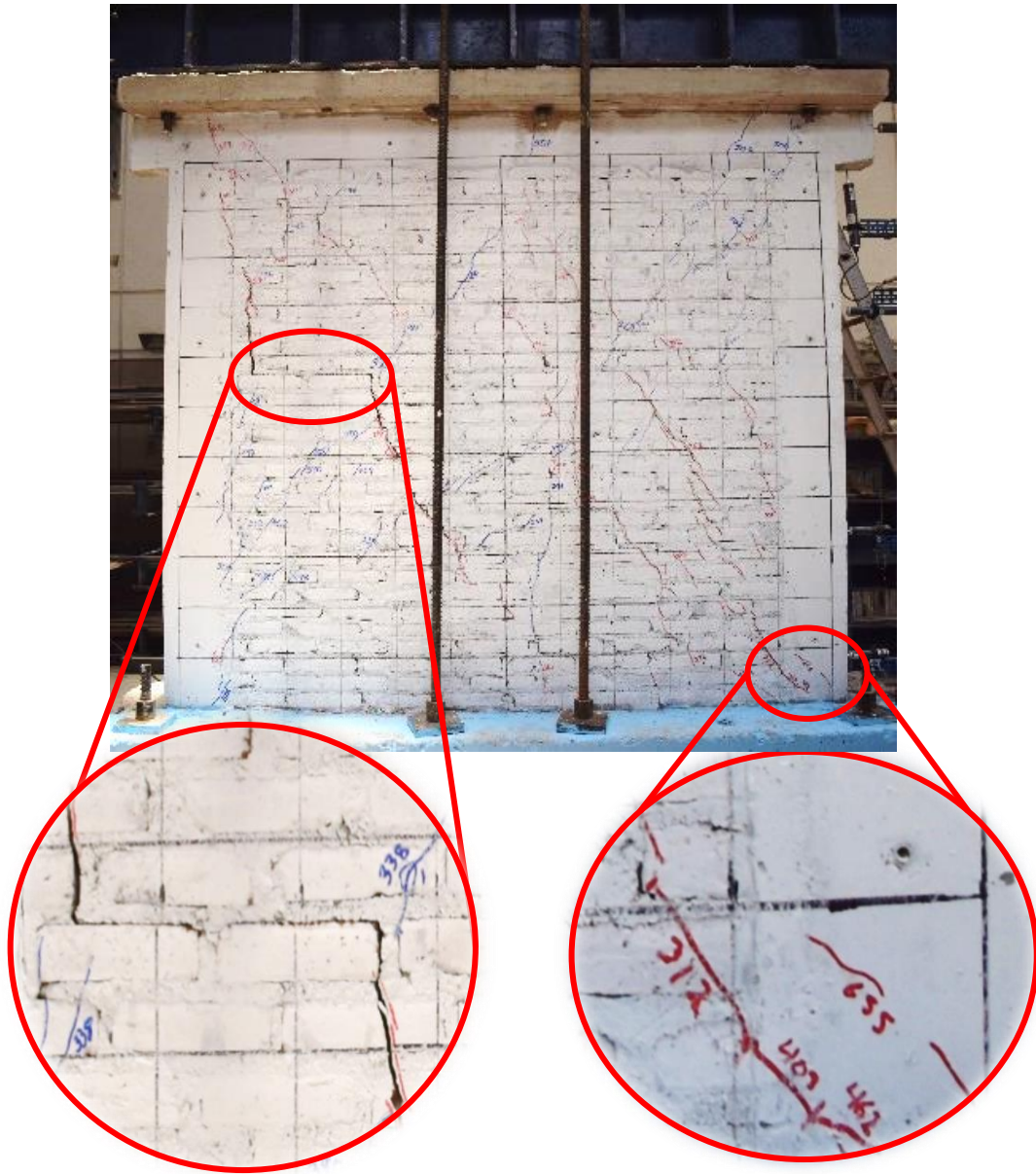


Figura 4.23. Acercamiento a daños del muro 3.

La Figura 4.24 muestra la evolución del comportamiento de las grietas monitoreadas, siendo la grieta "A" la que presentó el ancho de mayor magnitud, también se observa que los anchos entre grietas son de 1 mm.

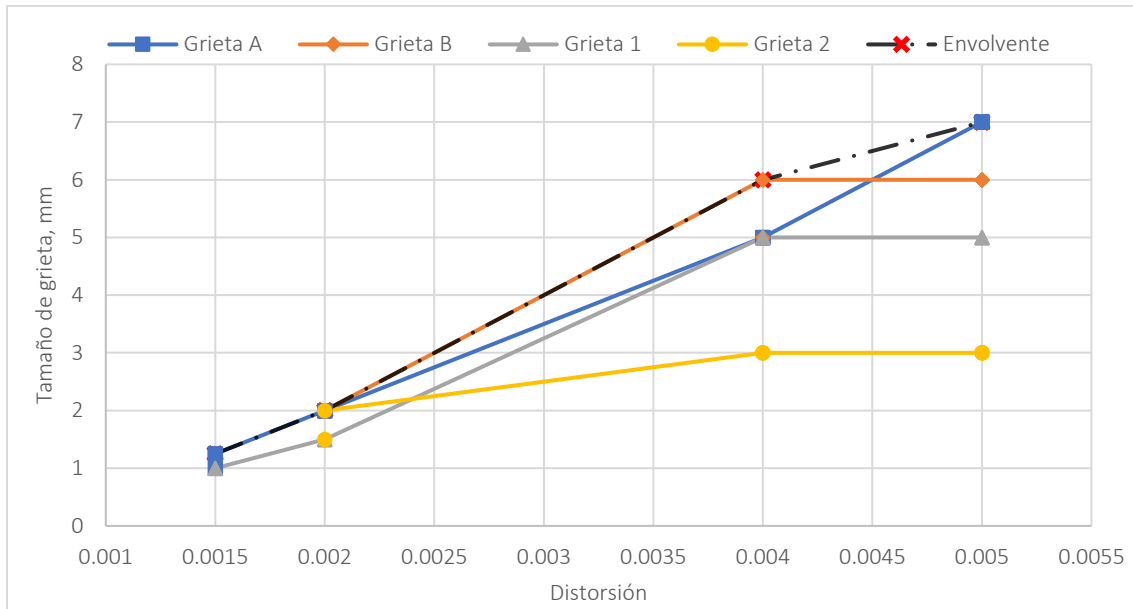


Figura 4.24. Comportamiento de grietas en pico del muro 3.

La Figura 4.25 muestra la evolución de las grietas residuales, donde se observa que, la grieta "1" es la única que alcanza 2.50 mm, mientras que las demás registraron una magnitud de 2 mm al término de la prueba.

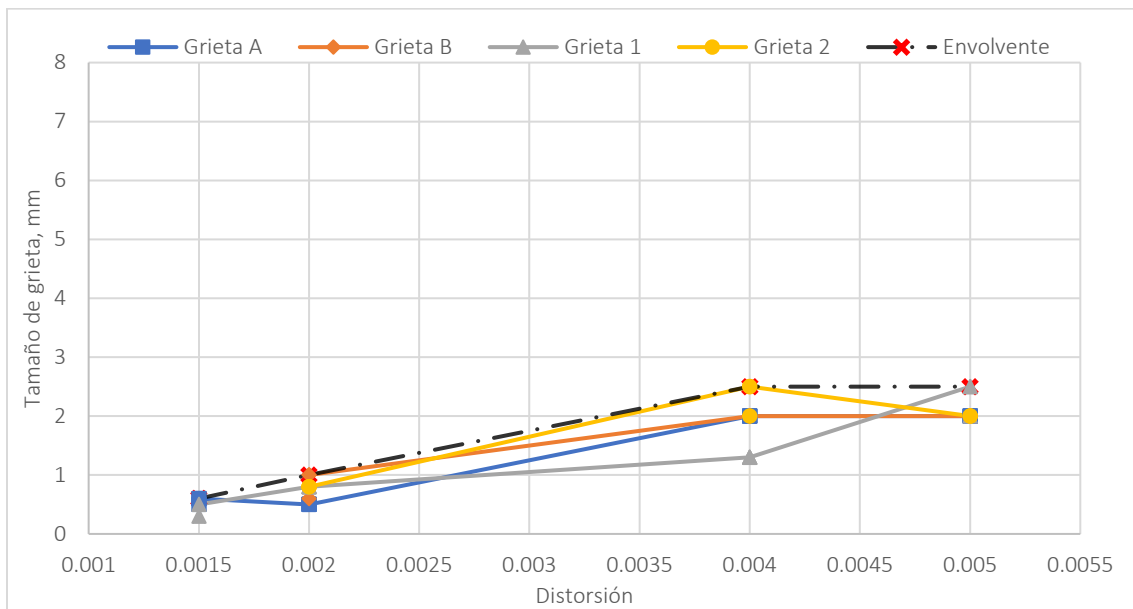


Figura 4.25. Comportamiento de grietas residuales en el muro 3.

La curva carga lateral-distorsión mostrada en la Figura 4.26, también muestra una respuesta histerética simétrica durante los ciclos controlados por carga, mientras que, en los ciclos controlados por desplazamiento, mostró una demanda de carga lateral menor para provocar distorsiones mayores.

Cabe mencionar que este espécimen, la fuerza cortante aplicada durante la prueba superó a la calculada.

Durante el último ciclo de carga, llegando a una distorsión de 0.005, el espécimen superó en un 73% la fuerza cortante calculada, alcanzando una carga máxima de 18.05 toneladas, registrada en el semiciclo negativo. Por otro lado, para los semiciclos positivos, la carga máxima fue de 16.65 toneladas, 60% más que la calculada, este valor fue alcanzado para una distorsión de 0.004; para una distorsión de 0.005 la carga aplicada llegó a 16.35 toneladas.

Para este modelo, podemos decir que el modelo tuvo un comportamiento satisfactorio y cumple con las normas para mampostería (NTC-Mampostería, 2017)

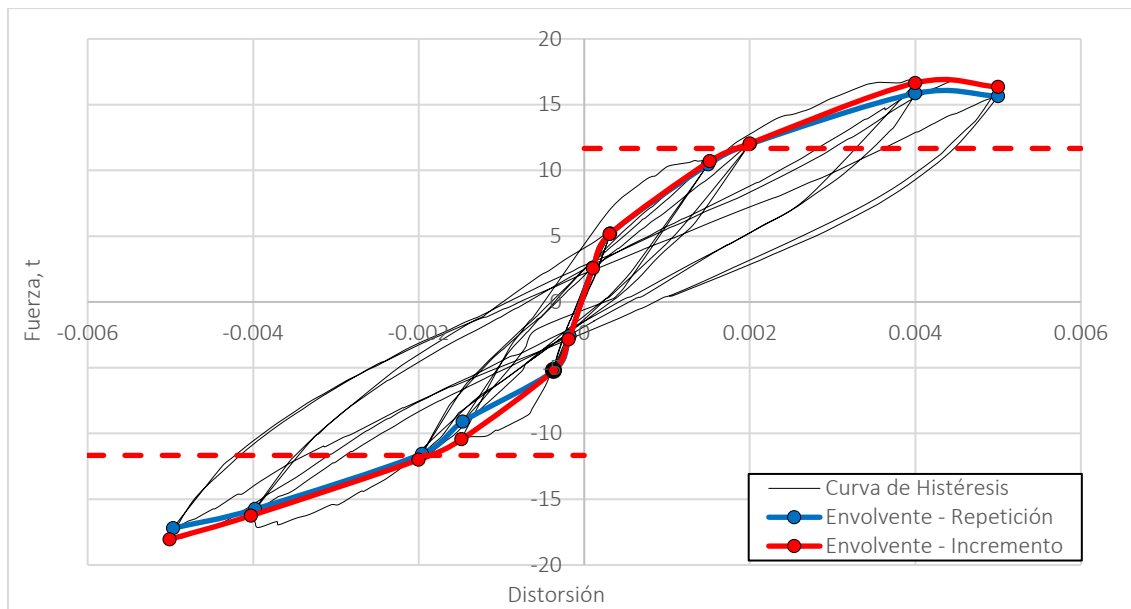


Figura 4.26. Curva de histéresis muro 3.

Al igual que los modelos anteriores, la Figura 4.27 se presenta una disminución bastante notable en la rigidez del muro durante los ciclos controlados por carga, donde se perdió cerca del 65% de la rigidez con respecto de la inicial.

Durante la etapa controlada por desplazamiento se presenta una reducción menor, con una reducción de cerca del 15%, que tiende a la horizontalidad durante los últimos ciclos. El muro 3 finalizó el ensayo con un 20% de la rigidez inicial.

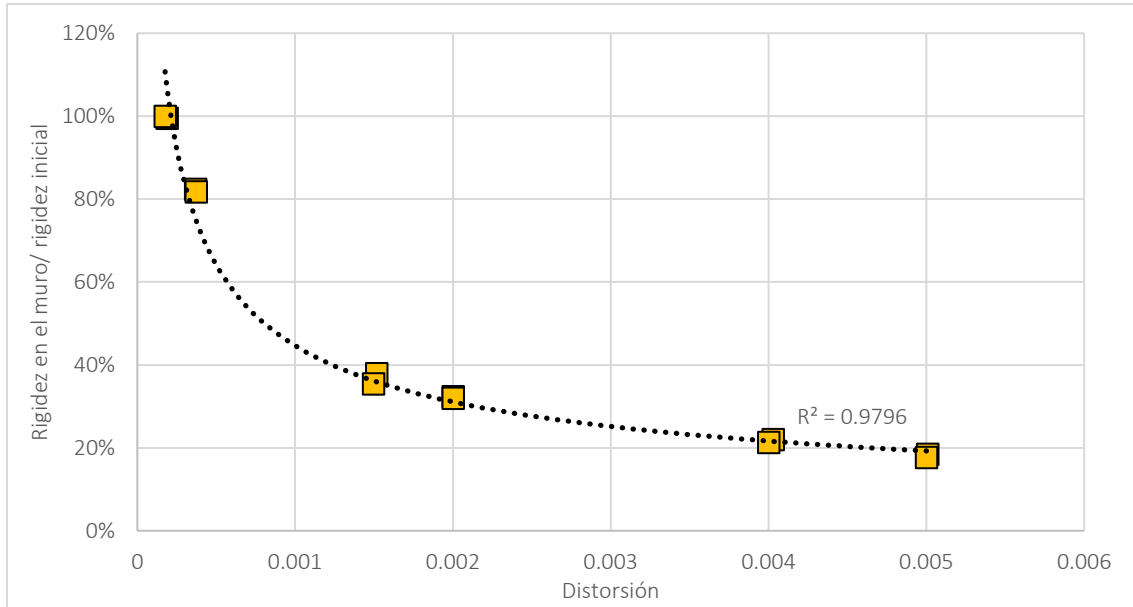


Figura 4.27. Degradación de rigidez del muro 3.

La Figura 4.28 muestra el comportamiento que tuvo el amortiguamiento viscoso equivalente en el muro 3, donde se puede apreciar que el espécimen inicia con un 2% y aumenta considerablemente durante los ciclos controlados por carga. También se observa que supera el 5% con facilidad con una tendencia en aumento más marcada que en los modelos anteriores.

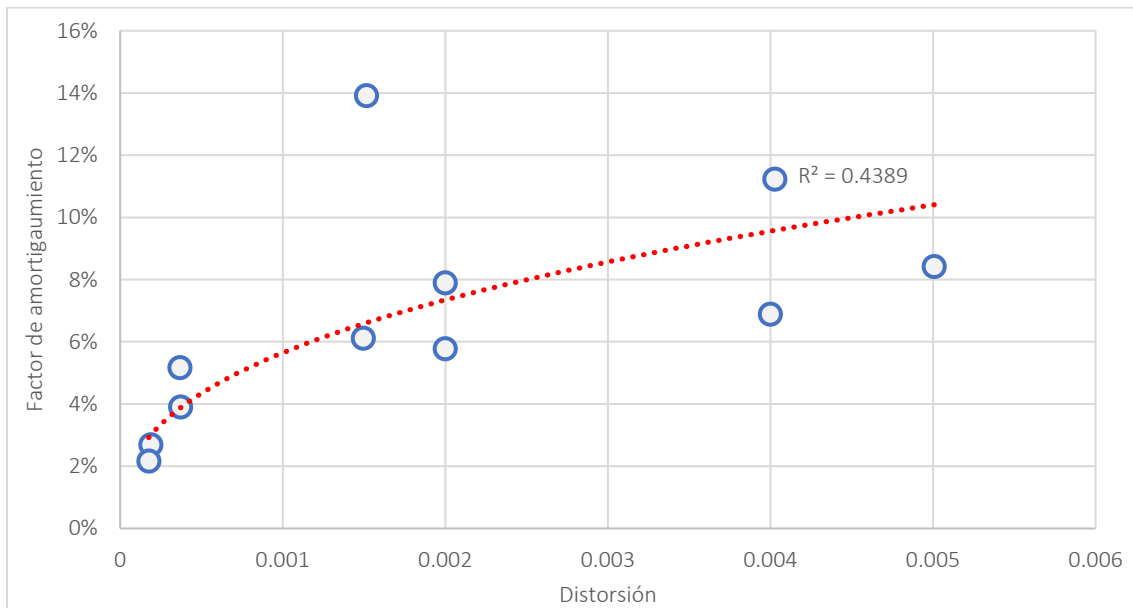


Figura 4.28. Amortiguamiento del muro 3 durante la prueba.

4.4. Muro 4

Al igual que el espécimen anterior, durante la etapa controlada por carga el muro 4 no presentó agrietamiento tanto en el panel del muro como en los castillos. Durante la prueba se tuvo que repetir el primer ciclo controlado por carga, ya que el cable que controlaba al actuador proporcionaba lecturas erróneas, posiblemente se aplicaron 4 toneladas en vez de 2.6 toneladas. (Figura 4.29).



Figura 4.29. Muro 4 al final de la etapa controlada por carga.

En este espécimen desde el primer ciclo controlado por desplazamiento (distorsión de 0.0015) aparecieron dos grietas a monitorear, las grietas "A" y "B" durante el semiciclo negativo con un ancho de 1.25 y 0.50 mm, respectivamente. Las grietas "1" y "2", del semiciclo positivo presentaron un ancho de 1.50 y 0.50 mm, respectivamente.

Las grietas "B" y "1" aparecieron en las esquinas superiores del modelo, mientras que las grietas "A" y "2" aparecieron prácticamente a la mitad de la parte superior en panel del muro. Cabe mencionar que la grieta "2" siguió una tendencia vertical al llegar al castillo. (Figura 4.30)



Figura 4.30. Daños en el muro 4 a una distorsión de 0.0015.

Al seguir con el protocolo de carga, las grietas monitoreadas se extendieron. La grieta "1" prácticamente llegó de esquina a esquina dentro del panel, mientras que en la grieta "B" se observó una bifurcación en la que una de sus ramas llegó a la mitad de inferior y otra rama mostraba la tendencia de llegar a la contra esquina para formar una cruz a la mitad del muro, pero no logró desarrollarse (Figura 4.31).

Este espécimen presentó desprendimiento de material de mampostería en su parte central, en el cruce de las grietas "B" y "1", las cuales llegaron a mostrar anchos máximos de 8.00 y 9.00 mm, respectivamente, mientras que "A" y "2" presentaron anchos máximos prácticamente de la mitad. Al igual que los modelos anteriores, hubo aberturas residuales en el modelo cuyo promedio fue de 3 mm.



Figura 4.31. Estado final del muro 4.

En este caso, las grietas se propagaron atravesando los tabiques, y en muy pocos tramos, siguieron las juntas entre el mortero y el tabique en forma escalonada. En la esquina inferior izquierda aparecieron fisuras que llegaron al castillo sin mostrar desprendimiento de material o deslizamiento que dificultara su rehabilitación. En el centro del modelo se aprecia una oquedad causada por el desprendimiento de material en las piezas de mampostería (Figura 4.32).

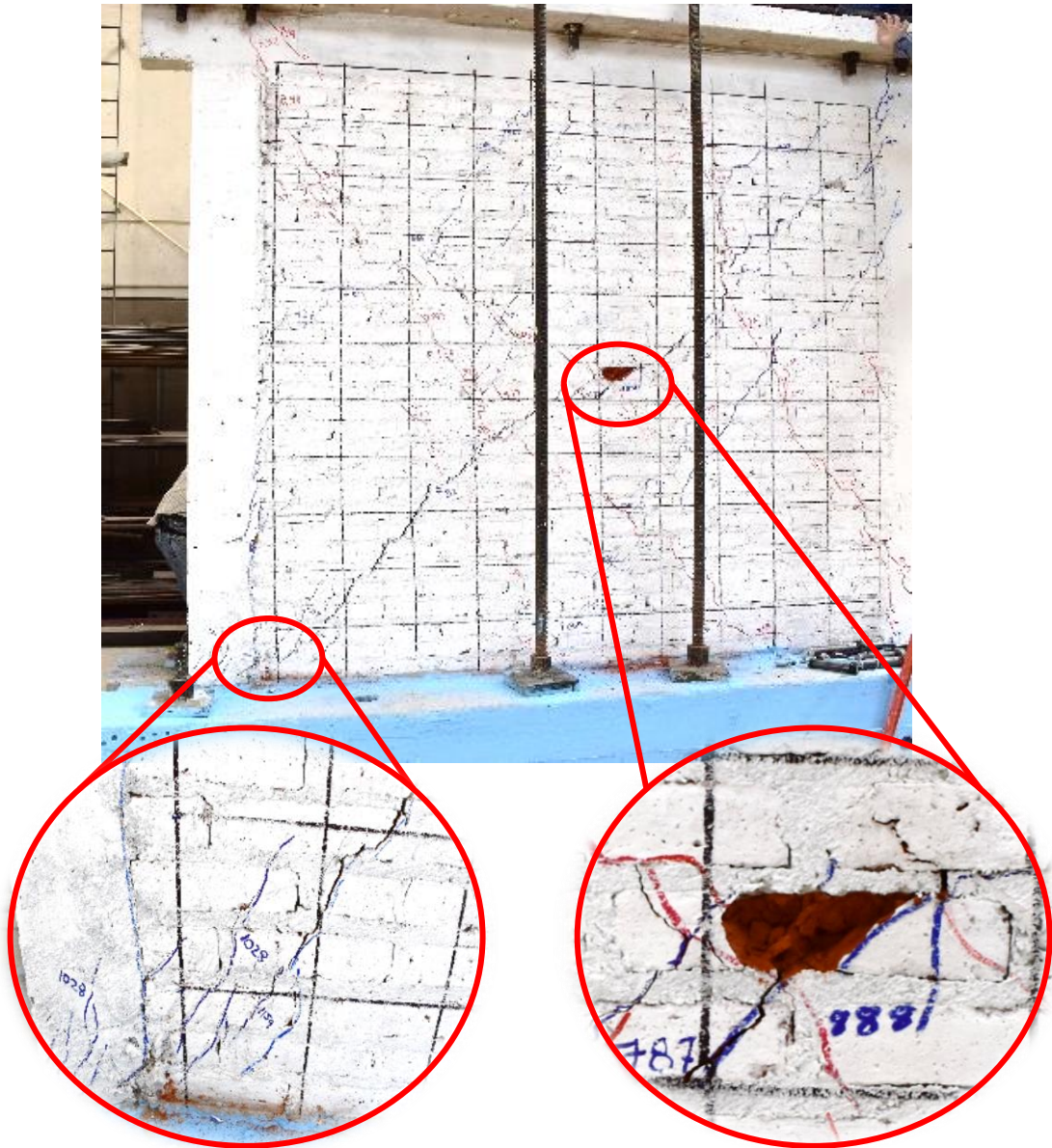


Figura 4.32. Acercamiento a daños en el muro 4.

La Figura 4.33 muestra el comportamiento de las grietas en pico monitoreadas, siendo las grietas "1" y "A" las que presentaron el ancho de mayor magnitud, con 9.00 y 8.00 mm, respectivamente. También se observa que hay una diferencia de 1 mm entre las grietas "B" y "2".

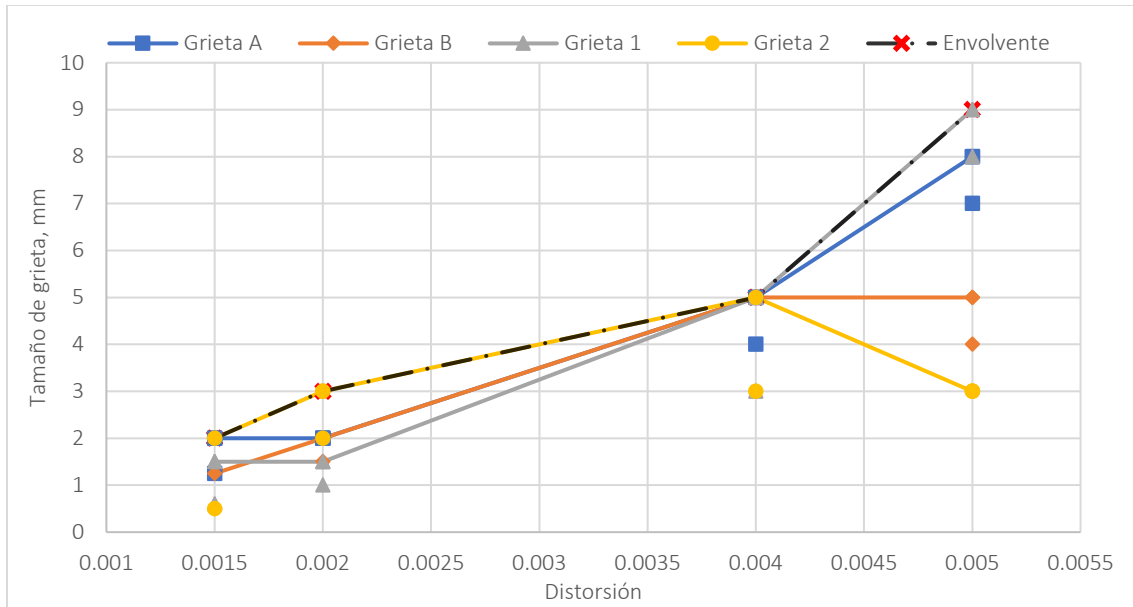


Figura 4.33. Comportamiento de grietas en pico del muro 4.

La Figura 4.34 muestra la evolución de las grietas residuales, donde se observa que, el ancho de la grieta "2" se encuentra por encima de las demás grietas, siendo la única que alcanza 5.00 mm, mientras que las demás tienen un ancho de 2.50 mm en promedio.

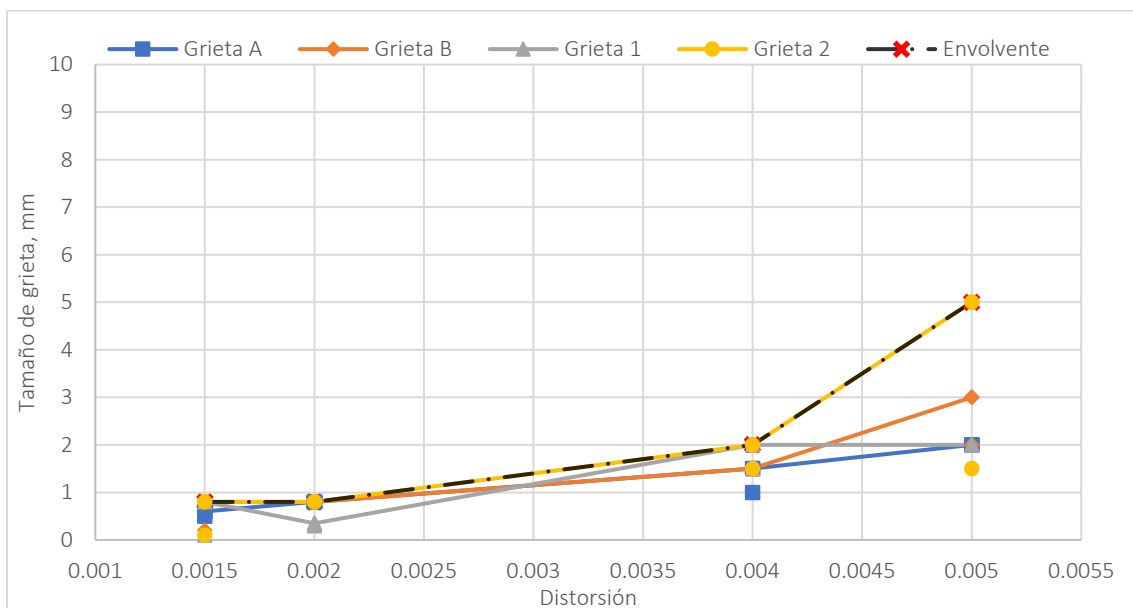


Figura 4.34. Comportamiento de grietas residuales en el muro 4.

La curva carga lateral-distorsión mostrada de la Figura 4.35, al igual que los modelos anteriores, durante los ciclos controlados por carga presenta una respuesta histerética simétrica; en los ciclos controlados por desplazamiento, demandó una carga lateral menor para provocar distorsiones mayores.

Durante el penúltimo ciclo de carga, para una distorsión de 0.004, el espécimen soportó una carga lateral de 17.95 toneladas registrada en el semiciclo negativo (empujón), mientras que, en el semiciclo positivo (jalón del muro), la carga máxima fue de 16.00 toneladas (72% y 53% mayores a la calculada, respectivamente).

Para el último ciclo correspondiente a una distorsión de 0.005, las cargas en ambos semiciclos fueron menores, lo que indica una pérdida en la rigidez del modelo. En este espécimen, al igual que el muro 3, la fuerza cortante aplicada durante la prueba superó a la calculada.

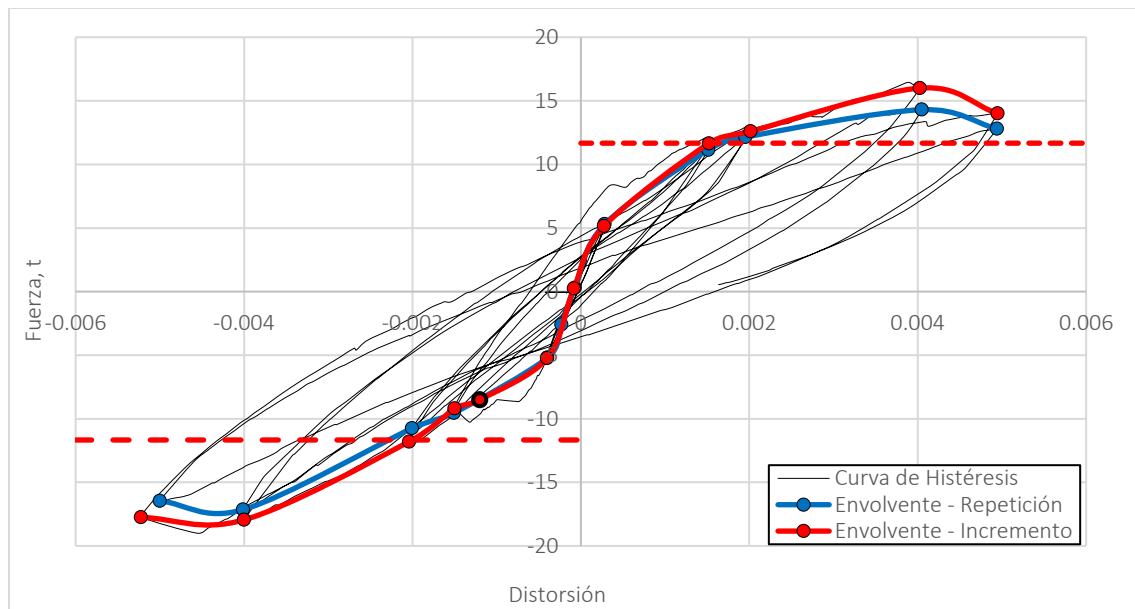


Figura 4.35. Curva de histéresis muro 4.

Al igual que los modelos anteriores, la Figura 4.36 presenta una disminución en la rigidez del muro muy agresiva durante la etapa controlada por carga, reduciéndose cerca de un 65%.

Por otro lado, en la etapa controlada por desplazamiento la reducción en la rigidez es menor con solo 16% de la reducción. Como se aprecia, al término de la prueba para una distorsión de 0.005, el muro 4 finaliza con un 19% con respecto de su rigidez inicial.

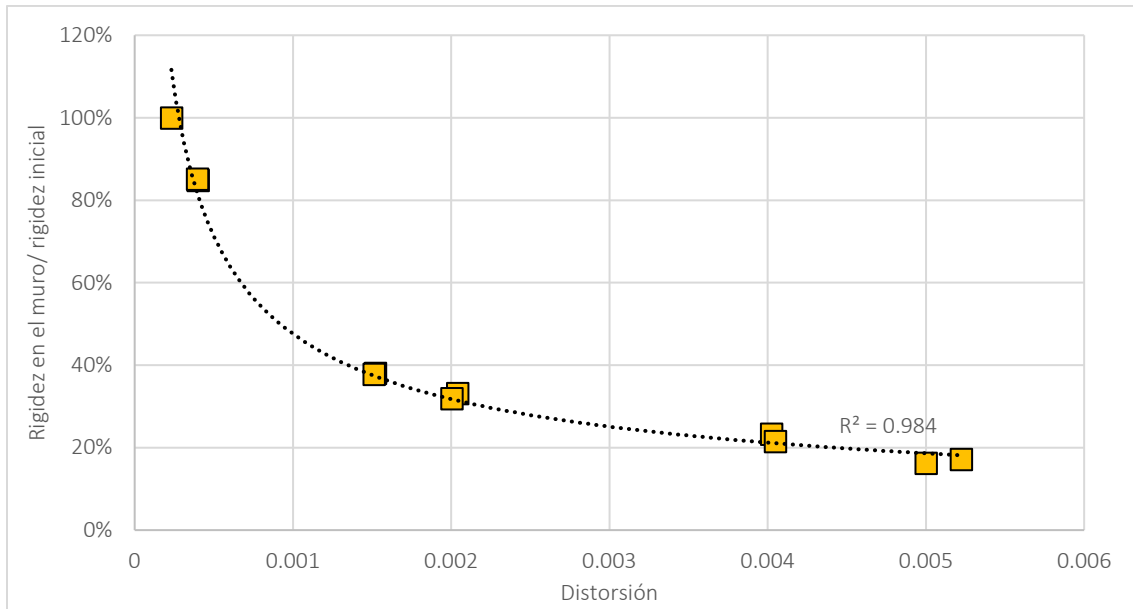


Figura 4.36. Degradación de rigidez del muro 4.

Para el amortiguamiento viscoso equivalente, la Figura 4.37 muestra que el muro 4 tuvo un rango de datos muy abierto durante las pruebas. Iniciando con un 2% y terminando con 12%, siguiendo una tendencia que aumenta aún más, comparado con los modelos anteriores y asemejándose a un comportamiento potencial.

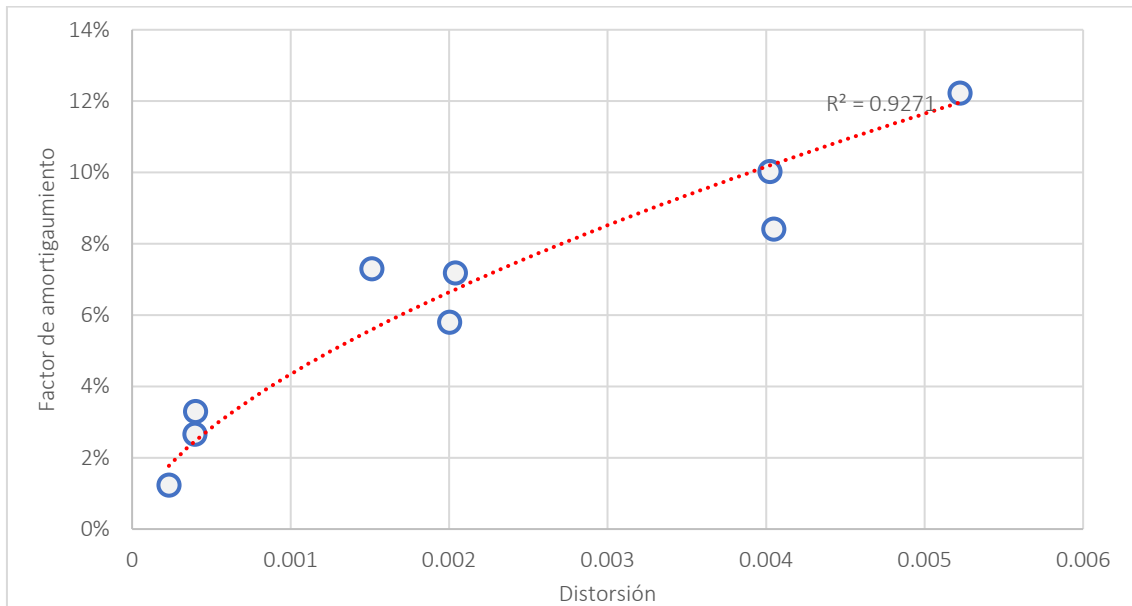


Figura 4.37. Amortiguamiento del muro 4 durante la prueba.

4.5. Muro 5

Durante los ciclos controlados por carga, este espécimen no presentó agrietamiento. Fue hasta la etapa controlada por desplazamiento, para una distorsión de 0.0015, aparecieron dos grietas en el semiciclo negativo (empujón del muro) que se monitorearon, las grietas "A" y "B" con un ancho de 1.50 y 1.25 mm, respectivamente. Mientras que, en el semiciclo positivo (jalón del muro), apareció únicamente la grieta "1", que tuvo un ancho de 0.80 mm (Figura 4.38).

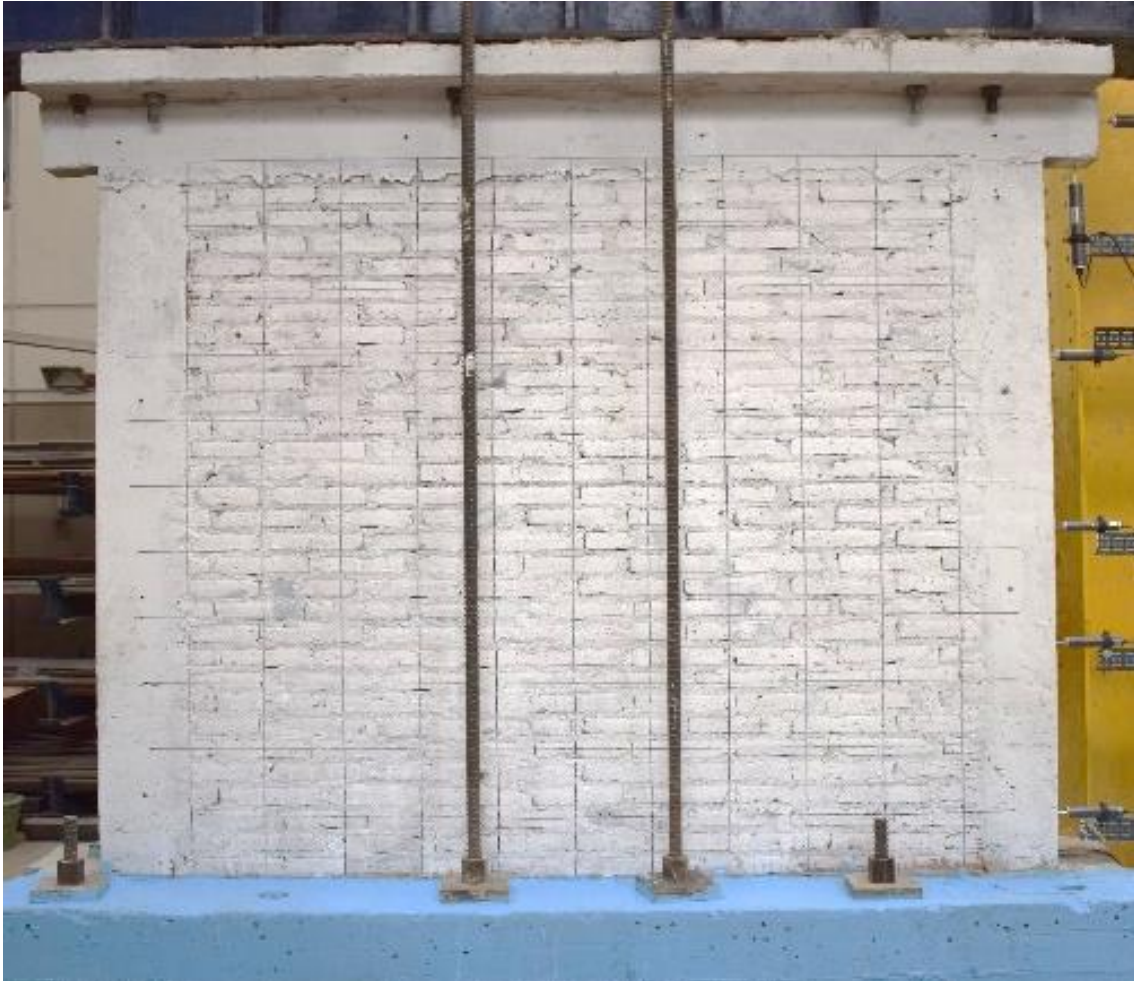


Figura 4.38. Muro 5 al final de la etapa controlada por carga.

En este espécimen sólo se tuvieron 3 grietas a monitorear. La grieta "A" apareció en la parte central del panel, mientras que la grieta "B" partió cercana del castillo izquierdo arriba de la mitad del panel. Por otro lado, la grieta "1" inició en la esquina superior derecha del muro, prácticamente atravesó el panel hasta llegar al castillo izquierdo en su parte media, a partir de ese punto siguió una tendencia vertical sin dañar al castillo, como se puede apreciar en la Figura 4.39.

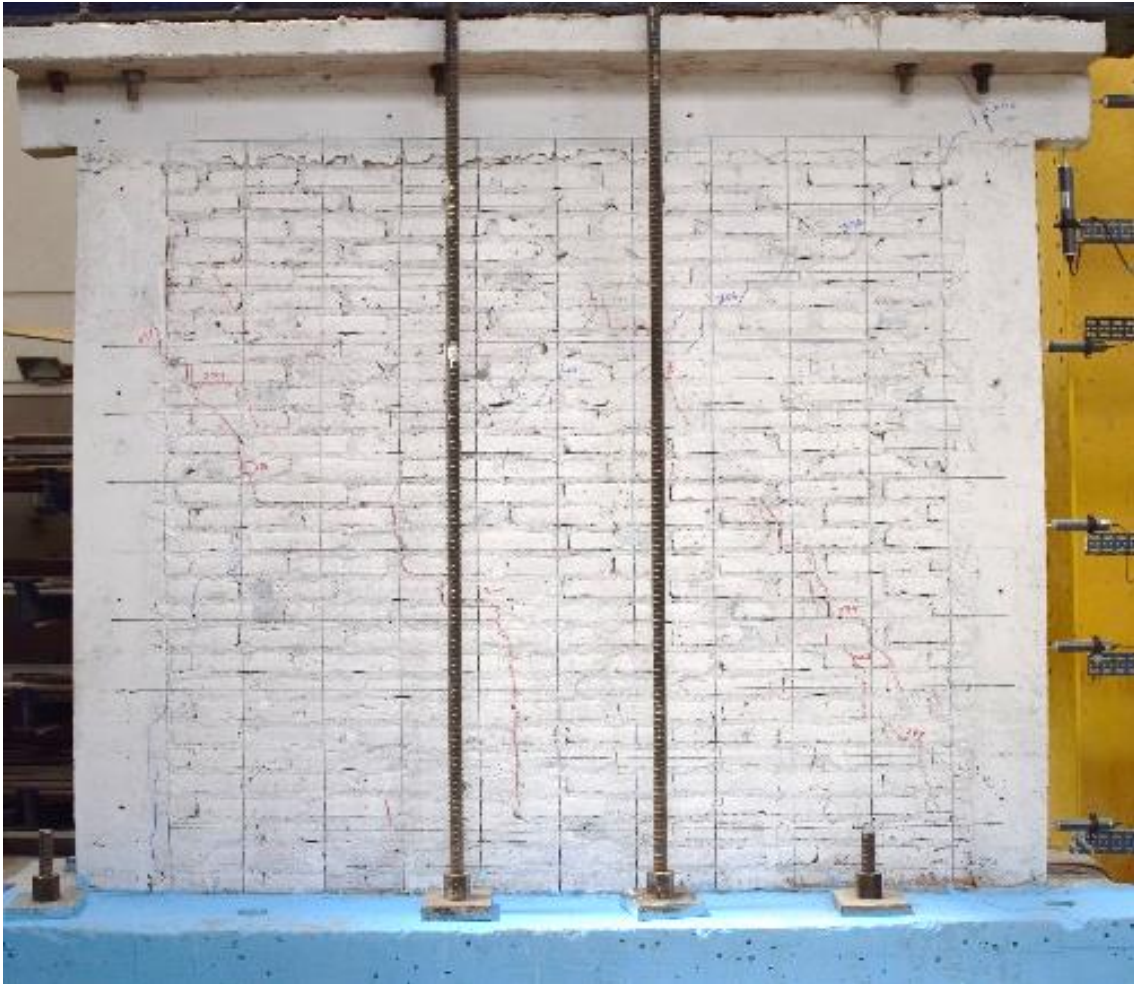


Figura 4.39. Daños en el muro 5 a una distorsión de 0.0015.

Al seguir con el protocolo de la prueba las grietas monitoreadas se extendieron. También apareció una grieta en la esquina superior izquierda, la cual presentaba una tendencia similar a la grieta "B" y prácticamente ambas se unían a la mitad del panel, es por ello que ambas se consideraron como la grieta "B" (Figura 4.40).

La grieta "A" siguió prolongándose hasta llegar a la mitad de la parte superior del panel. El ancho de la grieta "1" presentó un aumento progresivo, el cual incrementaba conforme avanzaba con el protocolo de carga.

Se observó la aparición de grietas en la parte central del modelo tanto en los semiciclos negativos como positivos, pero sin ser de tamaño considerable.



Figura 4.40. Estado final del muro 5.

Durante los últimos ciclos controlados por desplazamiento se observó un leve desprendimiento de material de mampostería en la trayectoria de la grieta "1" en su parte superior y media.

Las grietas producidas en los semiciclos negativos "A" y "B" llegaron a mostrar anchos máximos de 9.00 y 3.50 mm, respectivamente. A partir del desplazamiento correspondiente a 10 mm (distorsión de 0.004), la grieta "B" tuvo una disminución en su ancho, ya que la grieta "A" era la que recibía los efectos del actuador continuando su incremento hasta llegar a su ancho máximo.

La grieta "1" fue la que presentó el ancho de mayor magnitud en esta prueba llegando a 11 mm, como se muestra en la Figura 4.41. Al igual que los modelos anteriores, hubo aberturas residuales en el modelo cuyo promedio fue de 5 mm.

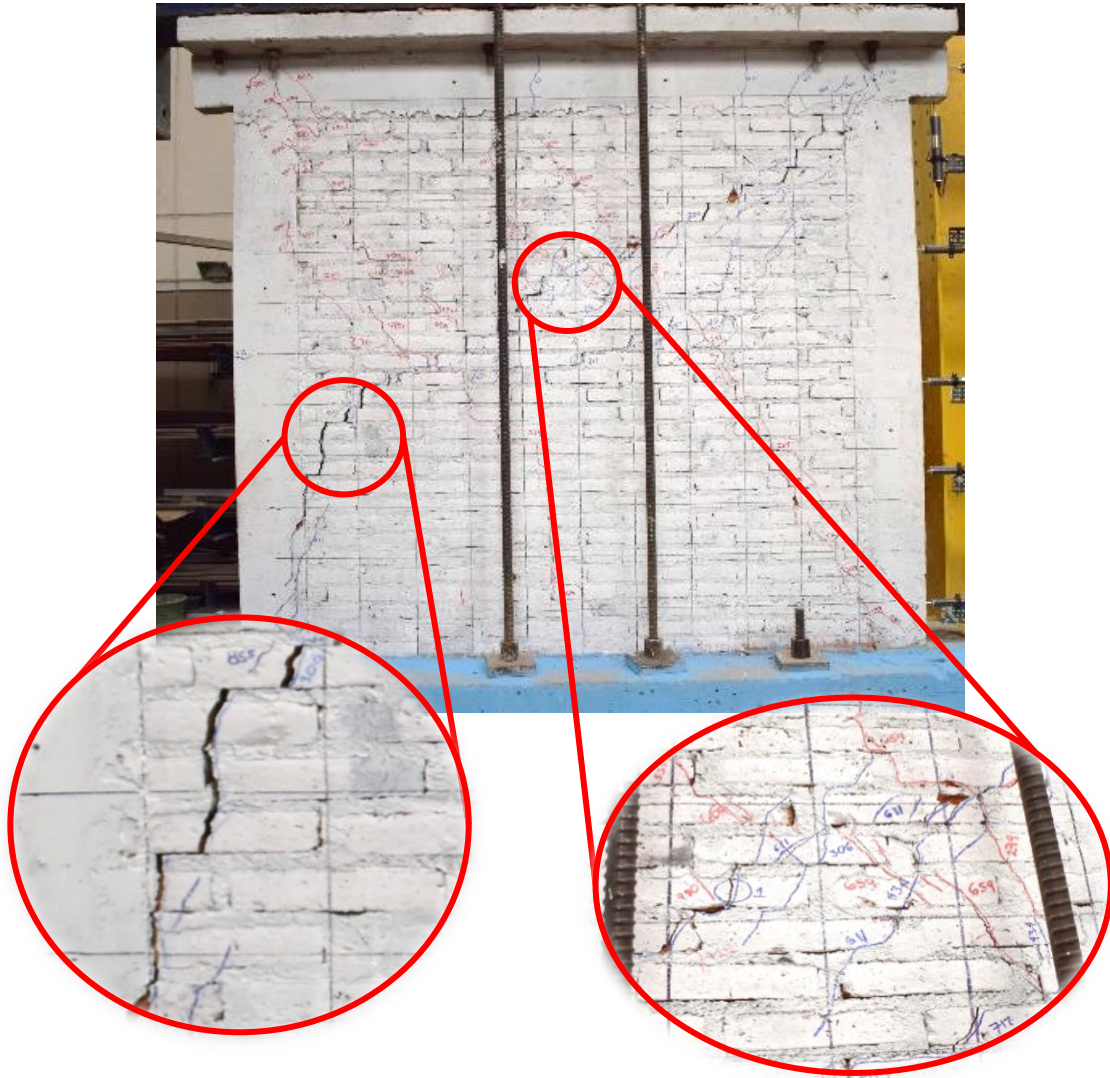


Figura 4.41. Acercamiento a daños en el muro 5.

Este espécimen presentó grietas que se prolongaban atravesando tabiques y en las juntas de mortero de forma escalonada, también daños menores en la parte central del panel, sin llegar a que hubiera desprendimiento de material de mampostería, por lo que puede ser rehabilitado sin inconvenientes.

La Figura 4.42 muestra la evolución del comportamiento de las grietas monitoreadas, siendo las grietas "1" y "A" las que presentaron el ancho de mayor magnitud en su estado pico, con 11.00 y 9.00 mm, respectivamente. También se observa que la grieta "B" termina con un ancho de 2 mm.

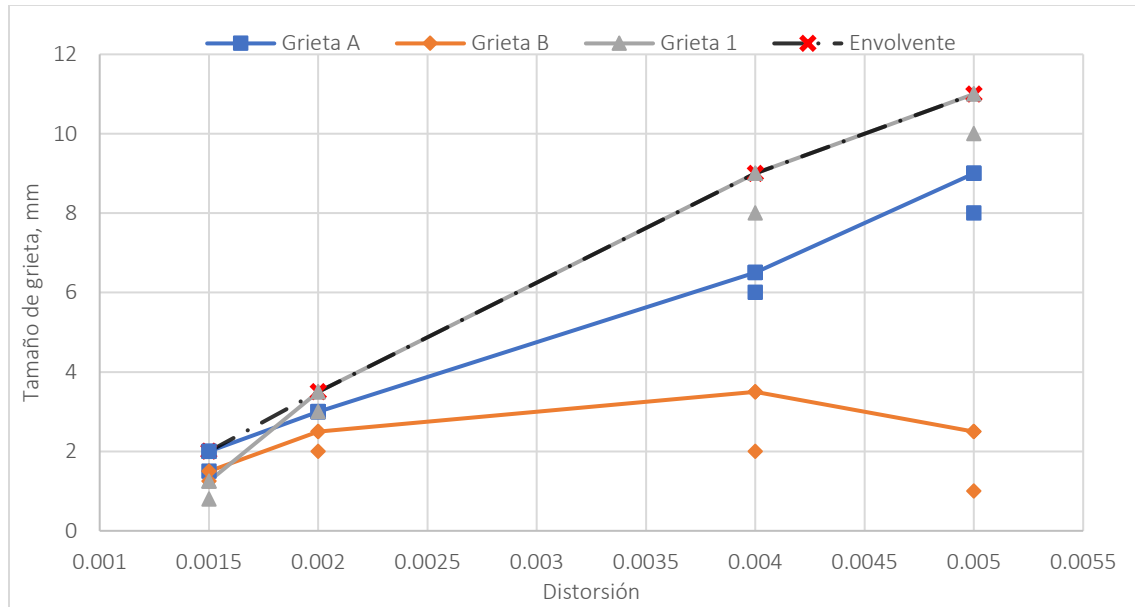


Figura 4.42. Comportamiento de grietas en pico del muro 5.

La Figura 4.43 muestra el comportamiento de las grietas residuales, donde, al igual que en la gráfica de los picos, se observa que el ancho de la grieta "1" es el mayor con 6.00 mm, seguido de la grieta "A" con 4.00 mm, mientras la grieta "B" termina con 0.50 mm.

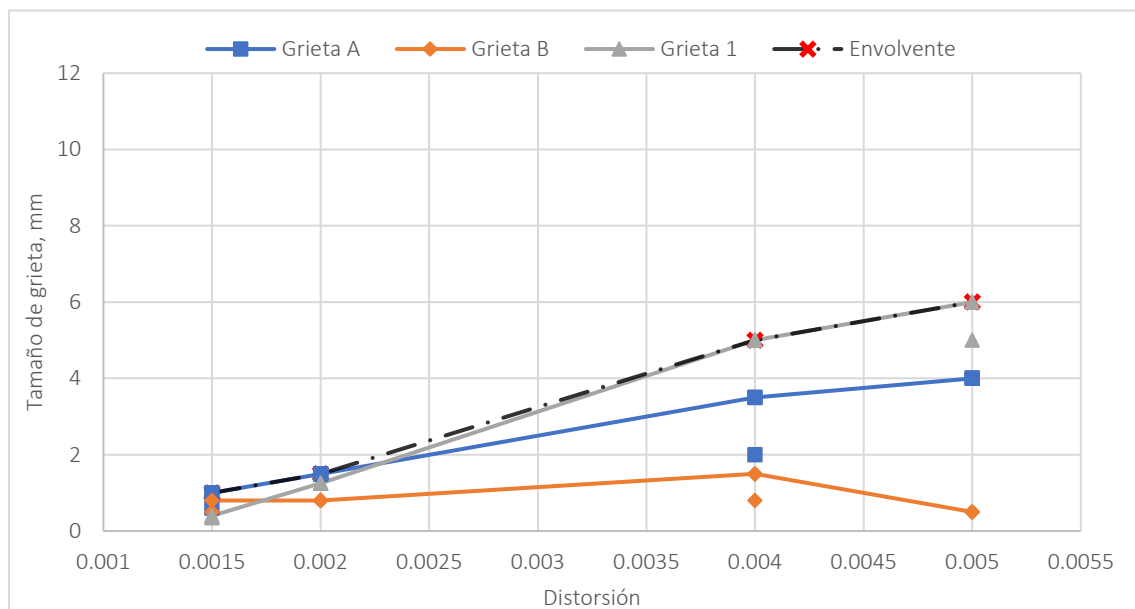


Figura 4.43. Comportamiento de grietas residuales en el muro 5.

La curva carga lateral-distorsión mostrada en la Figura 4.44, al igual que los modelos anteriores con el cambio en el armado de los castillos, tuvo una respuesta histerética simétrica durante los ciclos controlados por carga.

En los ciclos controlados por desplazamiento, mostró una demanda de carga lateral menor para provocar distorsiones mayores. La fuerza cortante aplicada durante la prueba superó a la calculada.

Durante el penúltimo semiciclo positivo de carga (jalón del muro), para una distorsión de 0.004, el espécimen alcanzó la carga lateral máxima siendo de 13.40 toneladas, mientras que, en el semiciclo negativo (empujón), la carga máxima aplicada fue de 16.10 toneladas, durante el último incremento para una distorsión de 0.005.

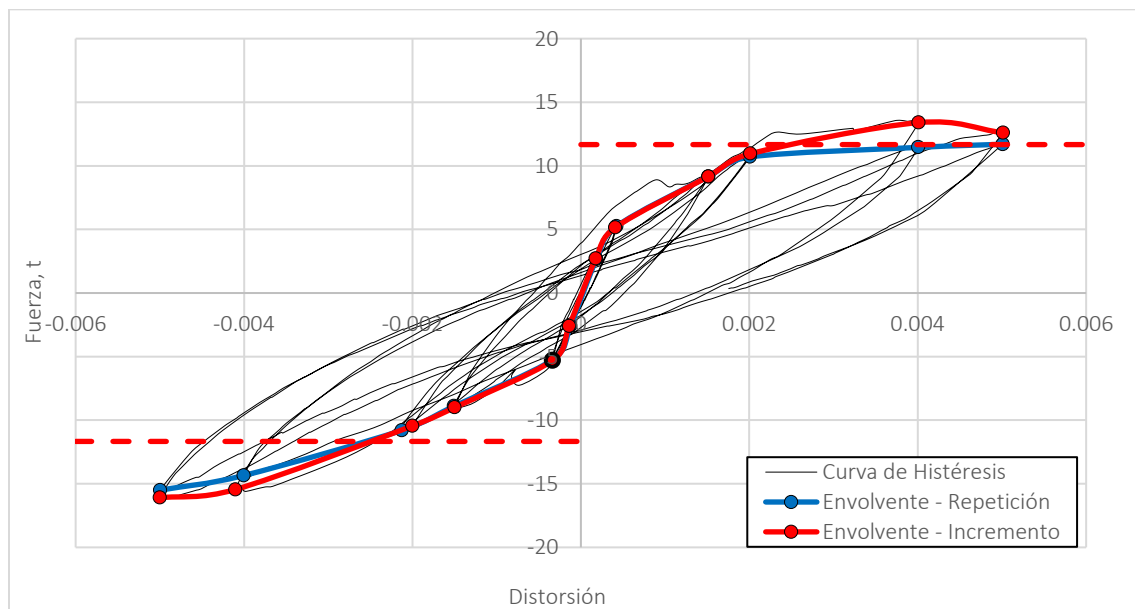


Figura 4.44. Curva de histéresis muro 5.

Al igual que los modelos anteriores, la Figura 4.45 presenta una disminución en la rigidez del muro considerable durante la etapa controlada por carga, reduciéndose cerca de un 70%.

Mientras que, en la etapa controlada por desplazamiento la reducción en la rigidez es menor con solo 10% de la reducción. Como se aprecia, al término de la prueba para una distorsión de 0.005, el muro 5 finaliza con un 20% con respecto de su rigidez inicial.

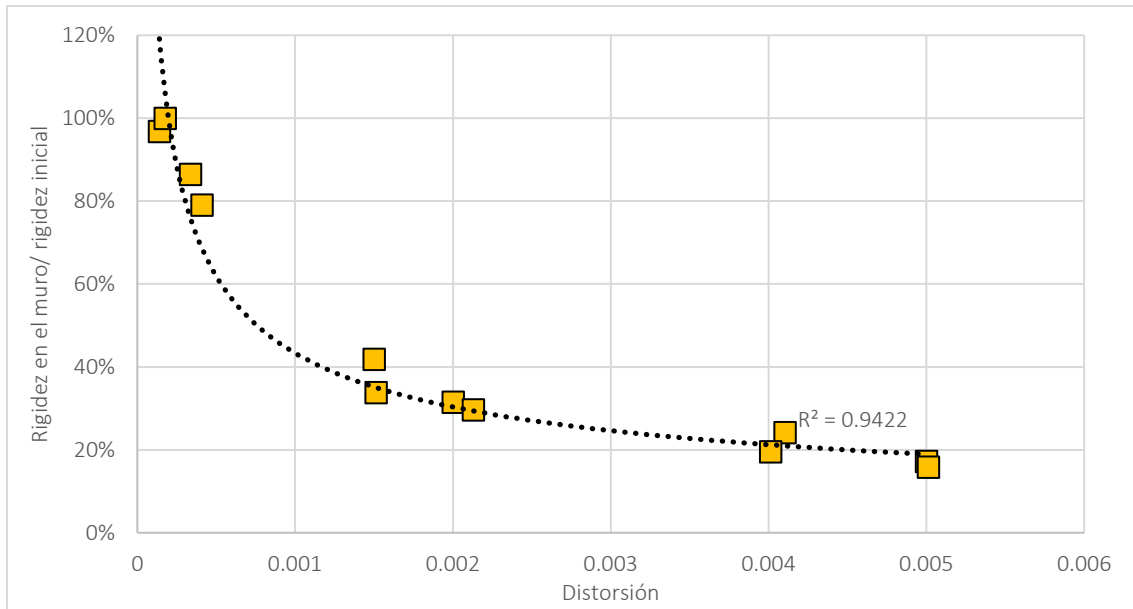


Figura 4.45. Degradación de rigidez del muro 5.

Para el amortiguamiento viscoso equivalente, la gráfica de la Figura 4.46 muestra el comportamiento que tuvo muro 5 durante las pruebas, partiendo del 4% de amortiguamiento y llegando hasta el 9%. Se puede apreciar una menor dispersión de los datos, comparado con los modelos anteriores y ahora la tendencia es mucho más notable a una potencial

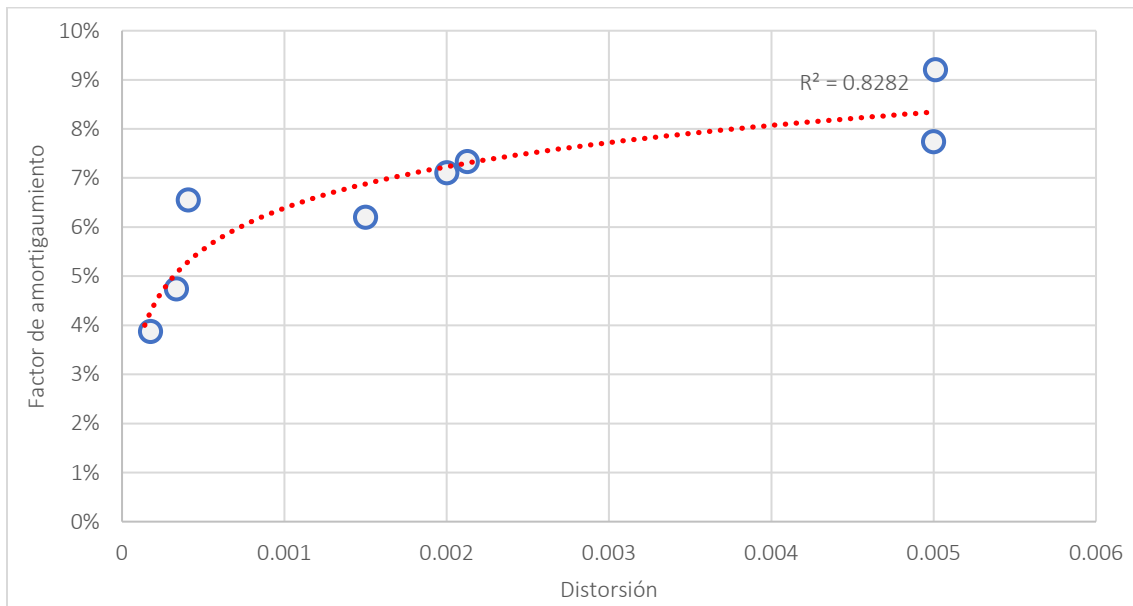


Figura 4.46. Amortiguamiento del muro 5 durante la prueba.

5. Análisis de los resultados

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos de las pruebas descritas en los capítulos anteriores realizadas en el laboratorio del CENAPRED, comparando el comportamiento histerético de los modelos de manera general y dividiéndolos según el armado de los castillos. Así mismo se comparará el comportamiento en la degradación de la rigidez experimentada por cada muro durante las pruebas.

5.1. Envoltentes carga-distorsión

Para evaluar y comparar la resistencia de los modelos de mampostería ensayados se agruparon las envoltentes obtenidas a partir de las curvas de histéresis de cada espécimen presentadas en el capítulo anterior. En la Figura 5.1 se muestran las envoltentes de todos los muros.

Como puede observarse, todos los modelos presentan un comportamiento prácticamente lineal, hasta una distorsión de 0.1%. Posteriormente se presenta un comportamiento no lineal (con diferente pendiente), para finalmente llegar a la resistencia máxima e iniciar una disminución de la resistencia.

La grafica engloba los resultados de las envoltentes de todos los muros ensayados dejando ver una diferencia sustancial entre los modelos con armado convencional (muros 1 y 2) y los modelos con mayor cantidad de varillas en los castillos (muros 3, 4 y 5).

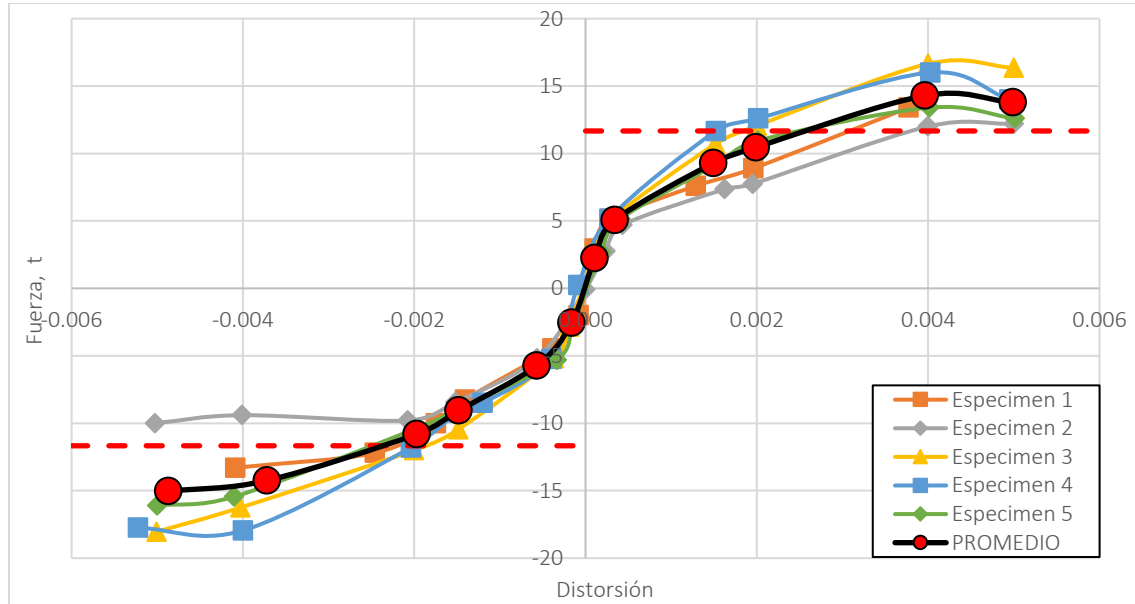
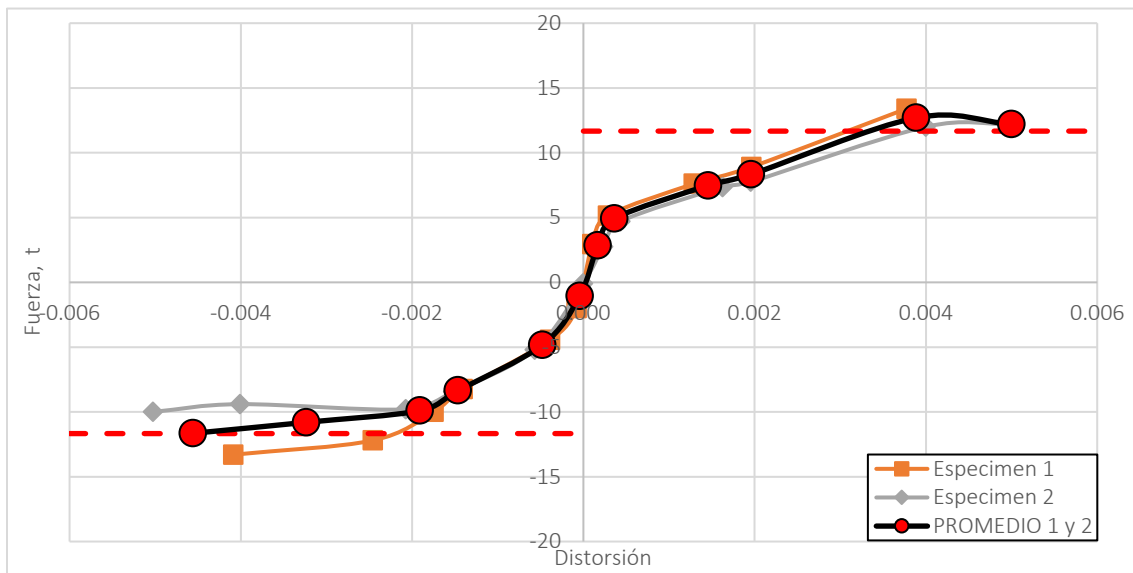


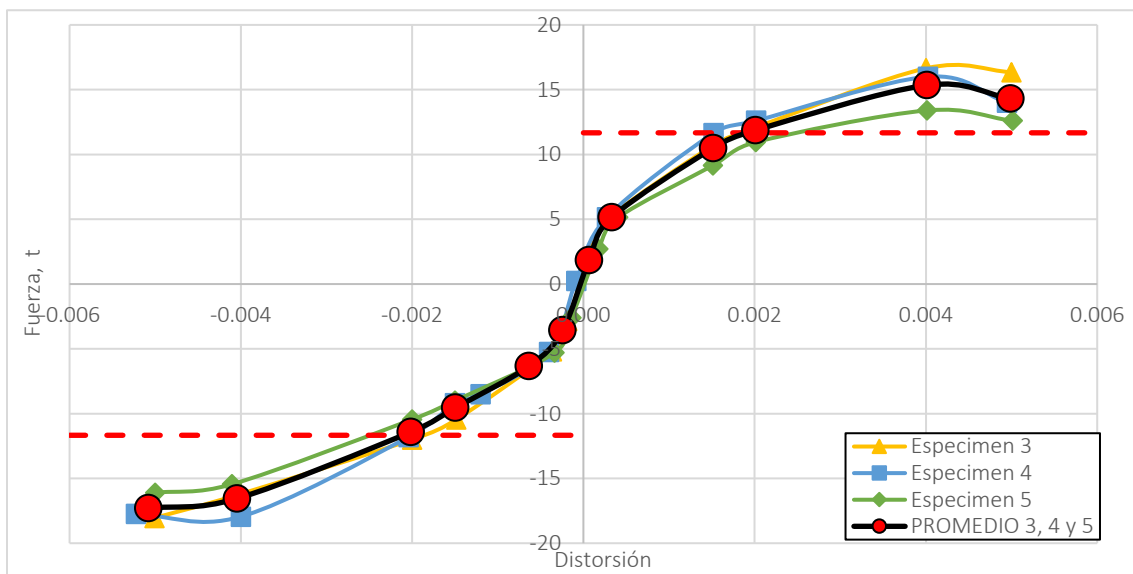
Figura 5.1. Envoltentes histeréticas.

En la Figura 5.2 se separaron las envolventes de las curvas carga-deformación para los dos tipos de armados en castillos. En la Figura 5.2a se muestran los modelos con armado convencional en los castillos, donde ambos tienen un comportamiento similar y el promedio de estos modelos resulta prácticamente la resistencia a cortante calculada inicialmente según las NTC-Mampostería (2017).

Por otro lado, el segundo grupo con mayor acero en los castillos presenta una resistencia mayor, ya que los tres modelos superan la fuerza cortante calculada cerca de un 30% alcanzando las 15 toneladas. Al igual que el otro grupo, se observa un comportamiento prácticamente simétrico en las ramas histeréticas y su promedio supera la resistencia a cortante calculada (Figura 5.2b).



a. Envolventes histeréticas grupo 1.



b. Envolventes histeréticas grupo 2.

Figura 5.2. Envolventes histeréticas por grupos.

5.2. Degradación de la rigidez

La mampostería muestra gran resistencia inicial ante cargas externas, sin embargo, presenta agrietamientos ante cargas progresivas, este comportamiento se conoce como degradación de rigidez en la estructura. Esta degradación en rigidez depende de las características de la estructura, como las propiedades de las piezas de mampostería, la geometría, así como de la historia de carga, la intensidad en cada ciclo y el número de ciclos (Escobar, 2014).

Como puede observarse en la Figura 5.3, al comparar todos los resultados obtenidos de los modelos se aprecia una tendencia exponencial en la degradación de la rigidez pico a pico. Cabe resaltar que la tendencia muestra un decaimiento significativo durante la etapa controlada por carga, llegando hasta un 45% de su rigidez inicial. Posteriormente la tendencia se atenúa distribuyendo la pérdida de rigidez conforme la distorsión aumenta. Al término de los ensayos, la mayoría de los modelos perdieron prácticamente el 80% de su rigidez inicial.

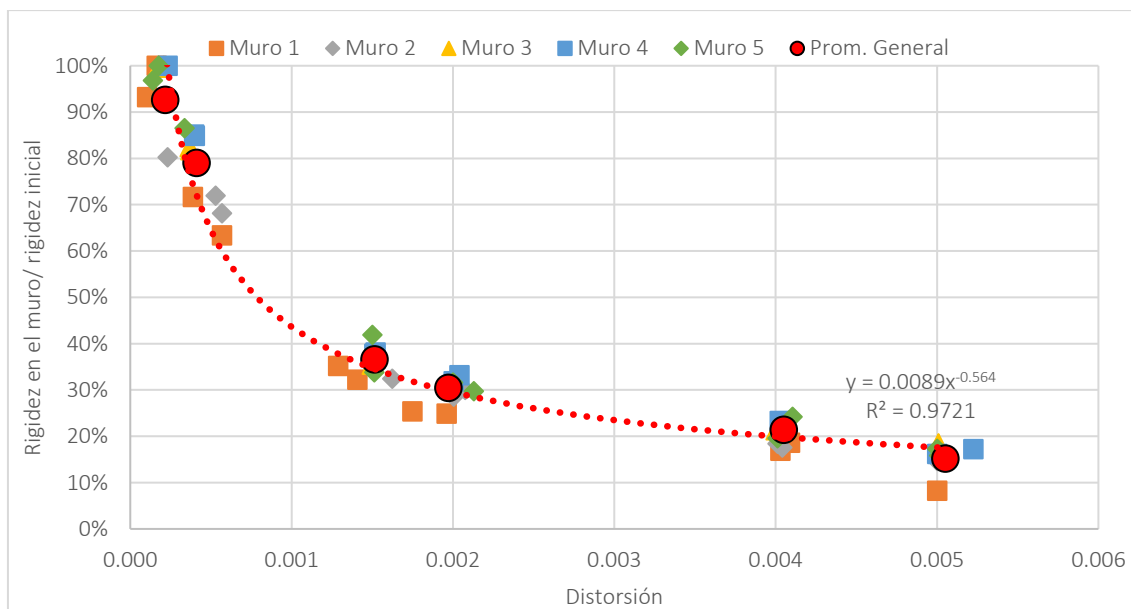


Figura 5.3. Degradación de rigidez en los especímenes.

En la Figura 5.4 se presentan las curvas de rigidez normalizada de los modelos separados por grupos para hacer una comparación. En términos de la degradación de rigidez se puede observar que la rigidez final es ligeramente mayor en los modelos con más acero en el armado de los castillos, al tiempo que soportaron mayor carga aplicada que los modelos con armado convencional.

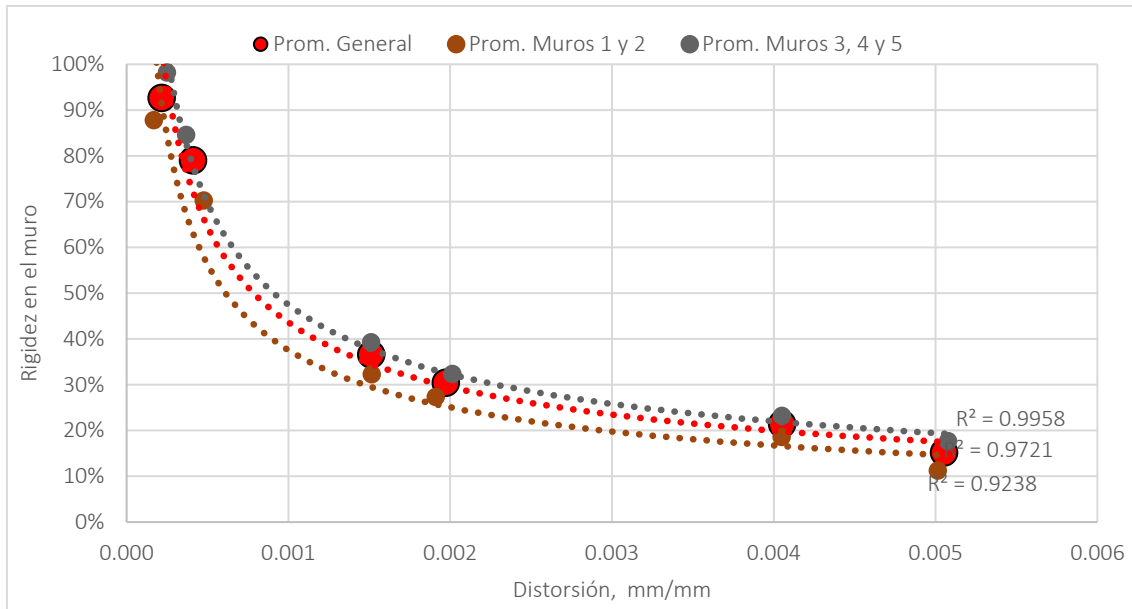


Figura 5.4. Comparación de las curvas de degradación de la rigidez.

5.3. Amortiguamiento

Como puede observarse en la Figura 5.5, al comparar todos los resultados obtenidos durante las pruebas de los modelos, se aprecia un comportamiento creciente con mucha dispersión. Se inicia con un valor promedio cercano a 5% y se termina con un valor aproximado a 10%.

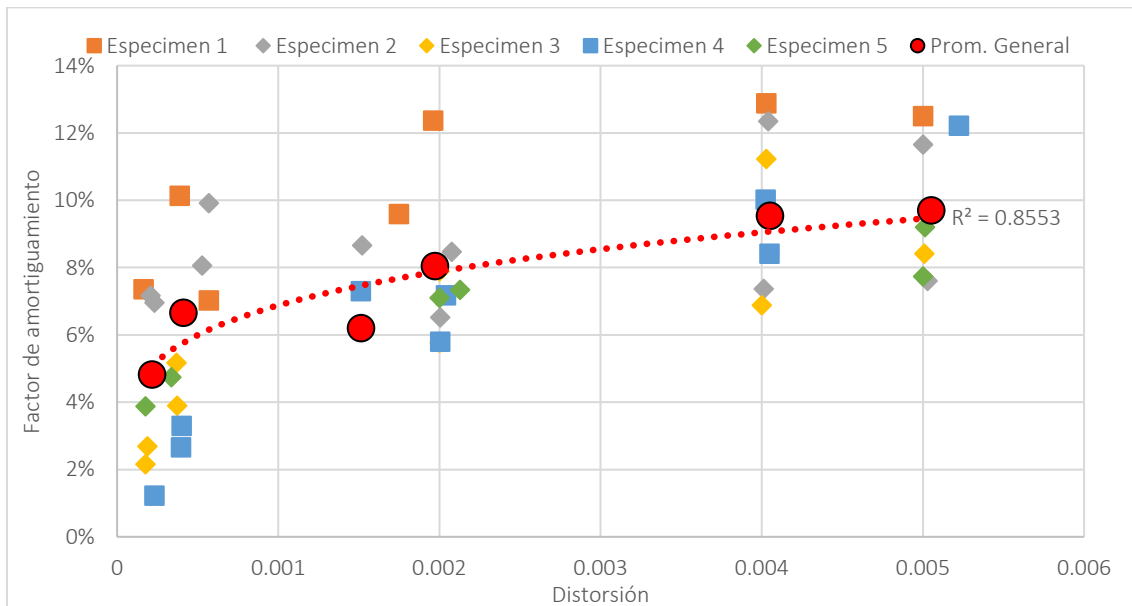


Figura 5.5. Factor de amortiguamiento en los especímenes.

Para evaluar y comparar el comportamiento que presentaban los modelos en cuanto al amortiguamiento equivalente, los resultados obtenidos se dividieron por grupos

dependiendo de su armado, como se ha realizado anteriormente obtenidas de cada espécimen presentadas en el capítulo anterior.

En la Figura 5.6 se comparan las curvas promedio de amortiguamiento viscoso equivalente de los modelos separados por grupos. Se puede observar que el grupo 1 (muros 1 y 2) presentan un nivel mayor de amortiguamiento equivalente.

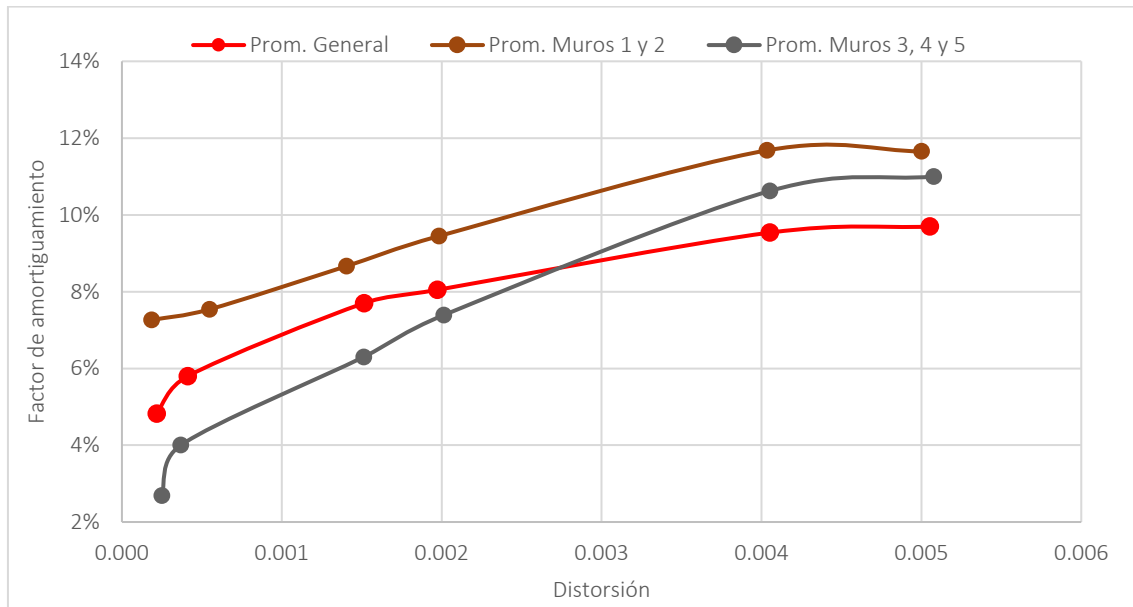


Figura 5.6. Comparación de las curvas del factor de amortiguamiento.

5.1. Agrietamiento

El comportamiento en el ancho de las grietas en los muros es variable, es por ello que resulta de interés evaluar y comparar el comportamiento que presentaron las grietas durante los ensayos dependiendo del armado en el acero de los castillos, tanto en los picos máximos al aplicar carga lateral al modelo, como el tamaño residual de las grietas al dejar de aplicar la carga.

En las siguientes secciones se presentan las envolventes de las grietas para cada muro, estas envolventes corresponden al ancho máximo de grieta registrado en cada nivel de distorsión. Para efectos de este trabajo se tomó el ancho máximo de los semiciclos positivo (jalón del muro) o negativo (empujón del muro).

5.1.1. Ancho de grietas en pico

En la gráfica de la Figura 5.7 se muestran las envolventes de las grietas en los muros cuando se encuentran en su deformación máxima, es decir, cuando se aplica la fuerza máxima requerida para llegar al nivel de distorsión siguiendo el protocolo de carga. Como se observa hay un comportamiento creciente con la distorsión de manera casi lineal. También se observa que los muros 1, 2 y 5 presentan agrietamientos mayores.

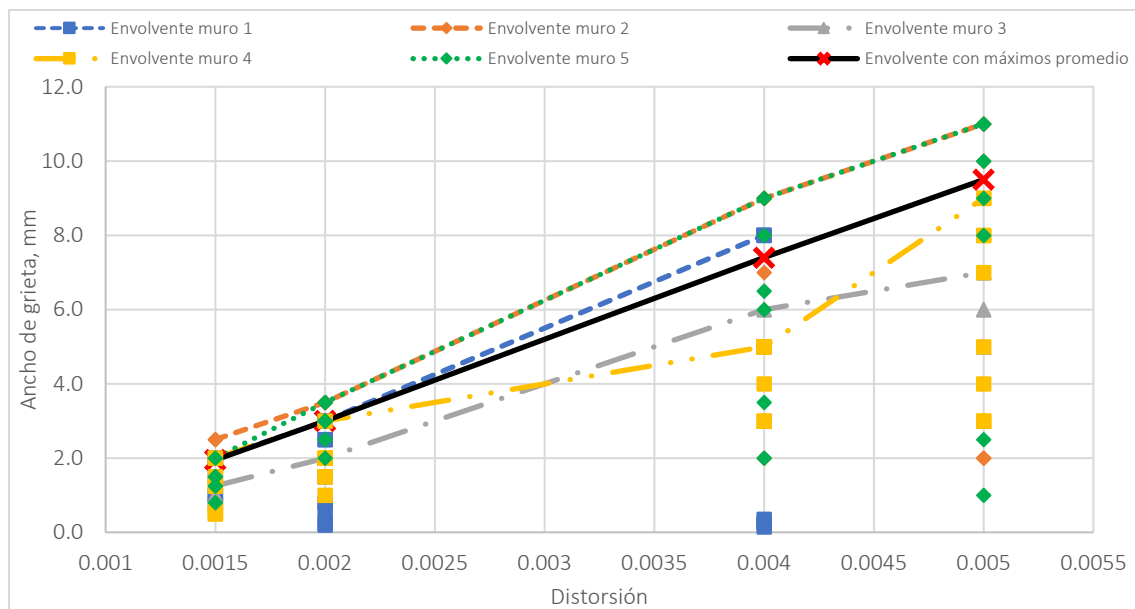


Figura 5.7. Comportamiento de grietas en pico de los modelos ensayados.

Se realizó un promedio general de los anchos máximos de grietas por grupos. La Figura 5.8 muestra los promedios. Se puede observar que el grupo 1 presenta grietas mayores.

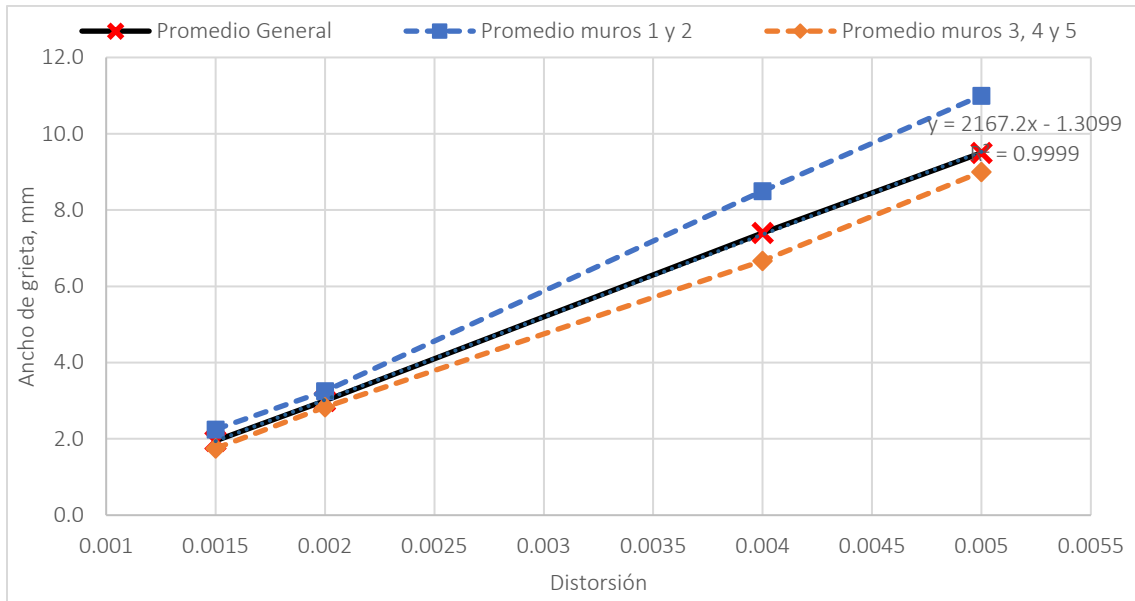


Figura 5.8. Promedio de ancho de grietas en pico por grupo.

5.1.2. Ancho de grietas residuales

En la Figura 5.9 se muestran las envolventes de las grietas residuales, es decir, cuando no se aplica la fuerza al modelo. En esta gráfica se observa que el muro 1 se encuentra por debajo del promedio, a diferencia de su comportamiento en pico y que el muro 5, correspondiente al segundo grupo, volvió a registrar anchos residuales similares al muro 2. Se realizó un promedio general de los anchos máximos de grietas (línea negra en la gráfica), el cual también mostró una tendencia lineal.

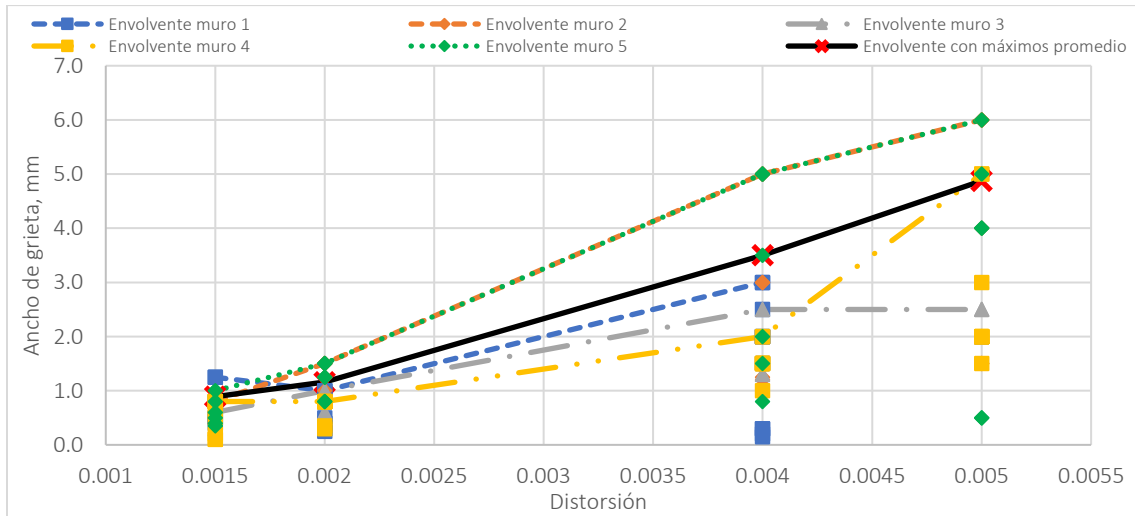


Figura 5.9. Comportamiento de grietas residuales de los modelos ensayados.

Se obtuvieron los promedios de las grietas residuales para cada grupo, donde se observa que, al igual que en pico, siguen una tendencia lineal, donde el promedio del ancho de grietas del grupo dos (muros 3, 4 y 5) es menor a aquel del grupo uno.

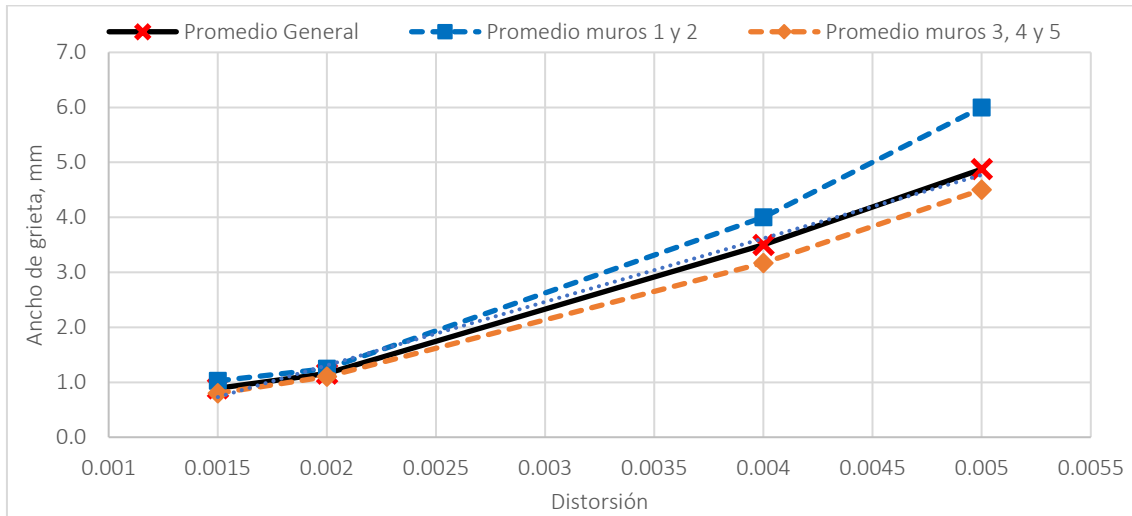


Figura 5.10. Promedio de ancho de grietas residuales por grupo.

5.1.3. Relación de grieta residual entre pico

Partiendo del supuesto de que el comportamiento de las grietas en pico y residuales guardan una estrecha relación entre sí, se realizó el cociente del ancho de las grietas residuales y las pico. Como se observa en la Figura 5.11, la mayoría de los especímenes mostró que el ancho las grietas residuales oscilan entre el 30 y 55% del ancho registrado en pico.

Al igual que para el ancho en pico y residual de las grietas, se promediaron los cocientes obtenidos para cada muro. Este promedio varía entre el 40% y 50%.

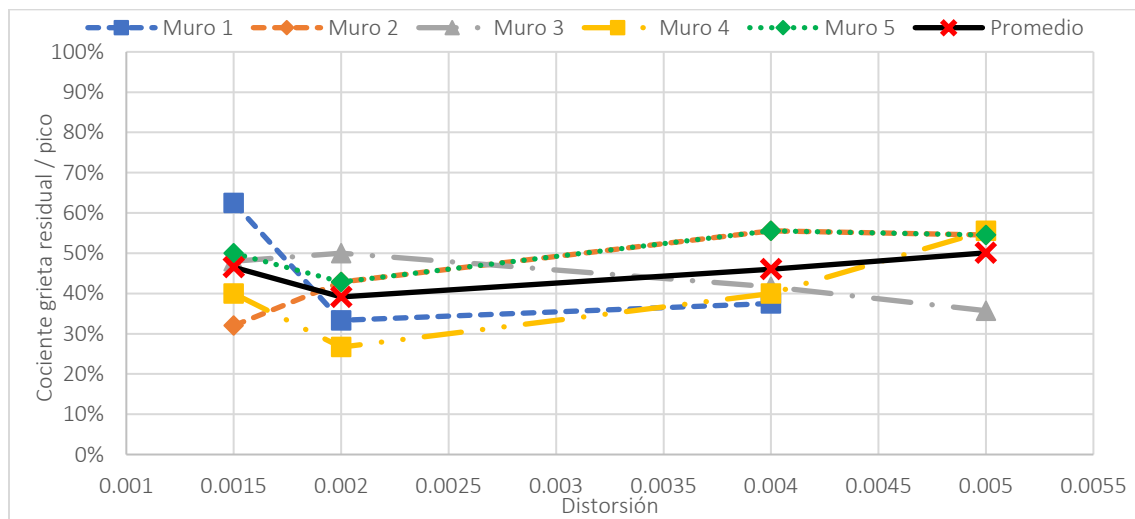


Figura 5.11. Relación de grieta residual – grieta pico.

6. Propuesta de metodología para la evaluación post-sísmica

Se propone una metodología evaluar daños causados por sismos en edificaciones de mampostería confinada. Esta metodología puede ayudar a decidir si es factible la rehabilitación de una estructura, o bien, se opte por una demolición. La metodología se describe a través de una serie de pasos con el apoyo de la Figura 6.1

1) Inspección visual y evaluación de daños en el espécimen

Se realiza una inspección visual y se clasifican las grietas que pueden haberse generado por esfuerzos de cortante o flexión.

2) Obtención de ancho de grieta residual

Se procede a medir el tamaño de la grieta residual más ancha, la cual debe ser medida con un grietómetro. Con este dato se entrará a la Figura 6.2 donde se identificará al nivel de distorsión al que llegó el muro según el ancho de grieta residual.

3) Obtención de cociente entre grieta residual / pico

Con el nivel de distorsión identificado se entrará a la Figura 6.3, con el fin de dimensionar qué porcentaje representa la grieta residual con respecto del ancho de la grieta en pico.

4) Cálculo de grieta pico

Teniendo el porcentaje al que equivale la grieta residual, se procede a calcular el tamaño que alcanzó la grieta en pico, dividiendo el tamaño de la grieta residual entre el porcentaje obtenido.

5) Determinación de rigidez remanente en el muro

Con la distorsión del paso 2 se determina la rigidez remanente en el muro. Para ello se entrará a la Figura 6.4 con el dato de distorsión que intersecará la curva de manera vertical, posteriormente se leerá el porcentaje de rigidez con respecto de la inicial de manera horizontal.

6) Evaluación de integridad estructural del muro

Con este porcentaje de rigidez remanente en el muro se ponderará si la integridad del elemento es la suficiente para seguir en funcionamiento y quedará sujeto a criterio del ingeniero la factibilidad de rehabilitar el muro empleando el método de su elección, o bien, la demolición y/o reconstrucción de dicho elemento.

7) Evaluar la demanda en el muro

En la Figura 6.5 se entra con la distorsión para evaluar la demanda de capacidad en el muro. El proceso se debe repetir para todos los muros de la estructura. Cabe resaltar que, debido a la variabilidad observada en las pruebas, los datos que se obtengan tendrán variación. El ingeniero debe estar consciente de ello.

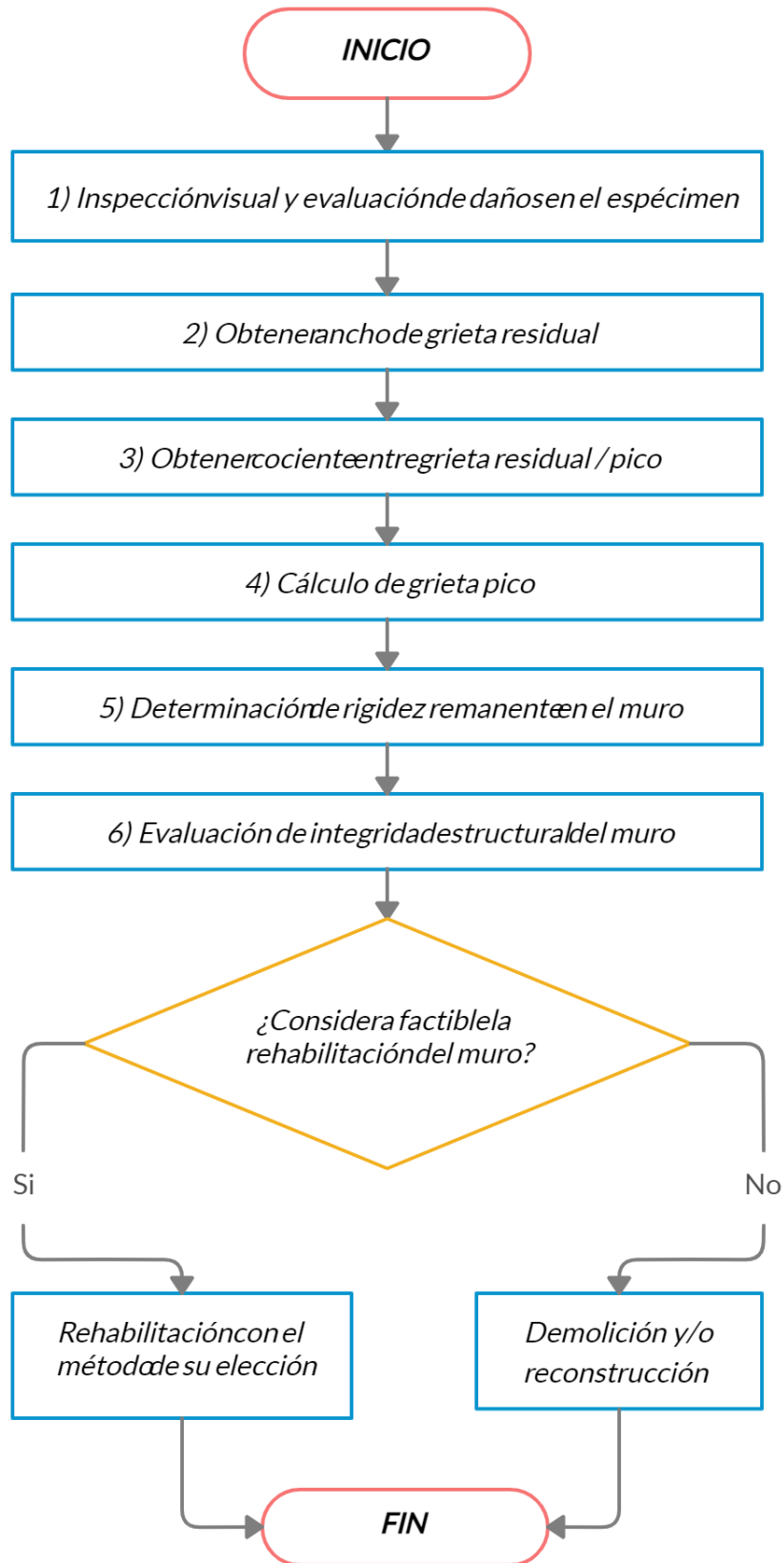


Figura 6.1. Diagrama de flujo para la propuesta de metodología de evaluación.

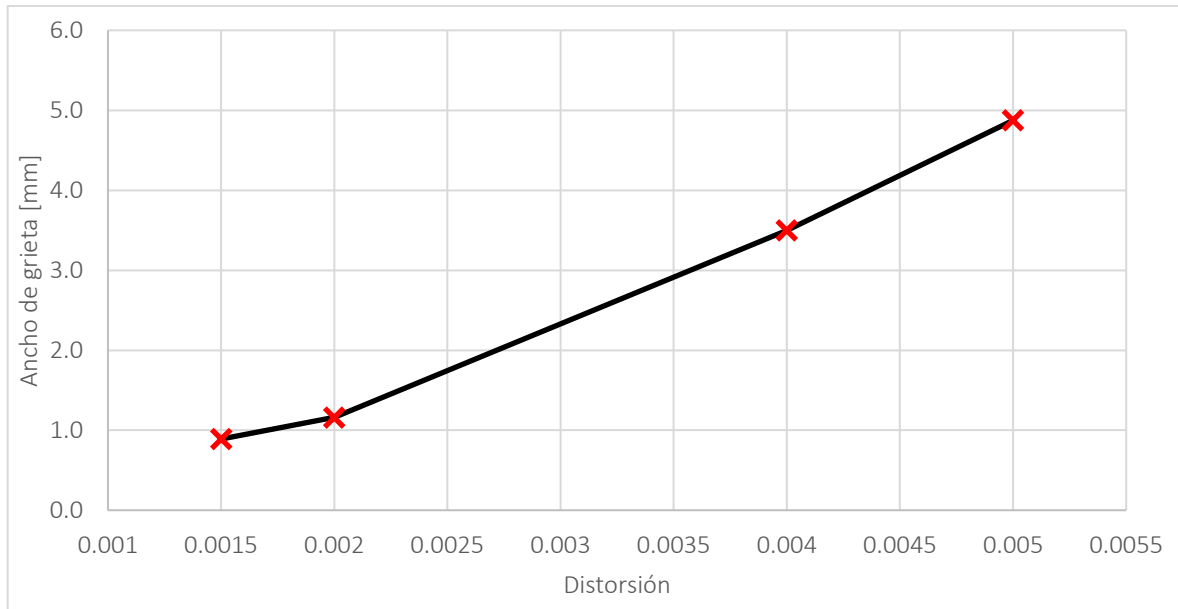


Figura 6.2. Tamaño de grieta residual.

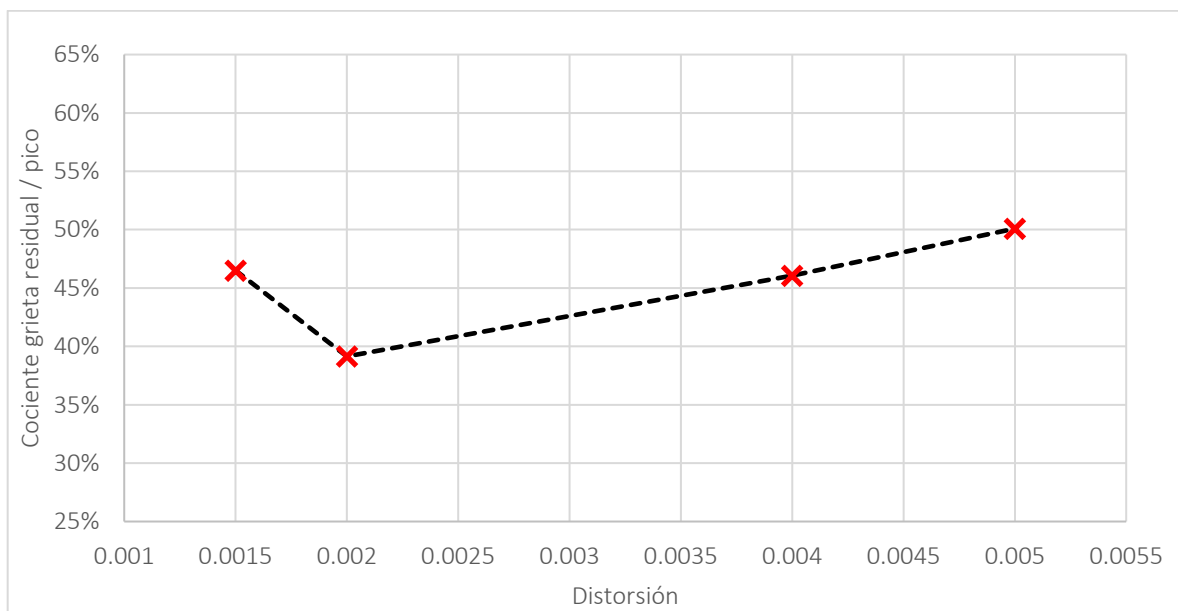


Figura 6.3. Cociente grieta residual/ grieta pico.

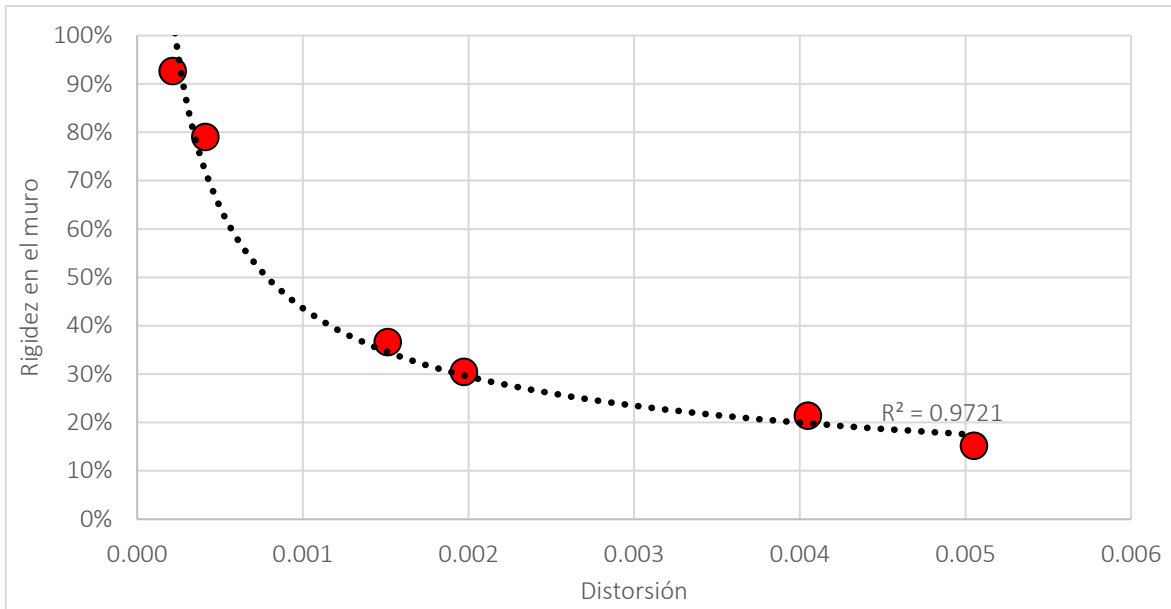


Figura 6.4. Rigidez remanente en el muro.

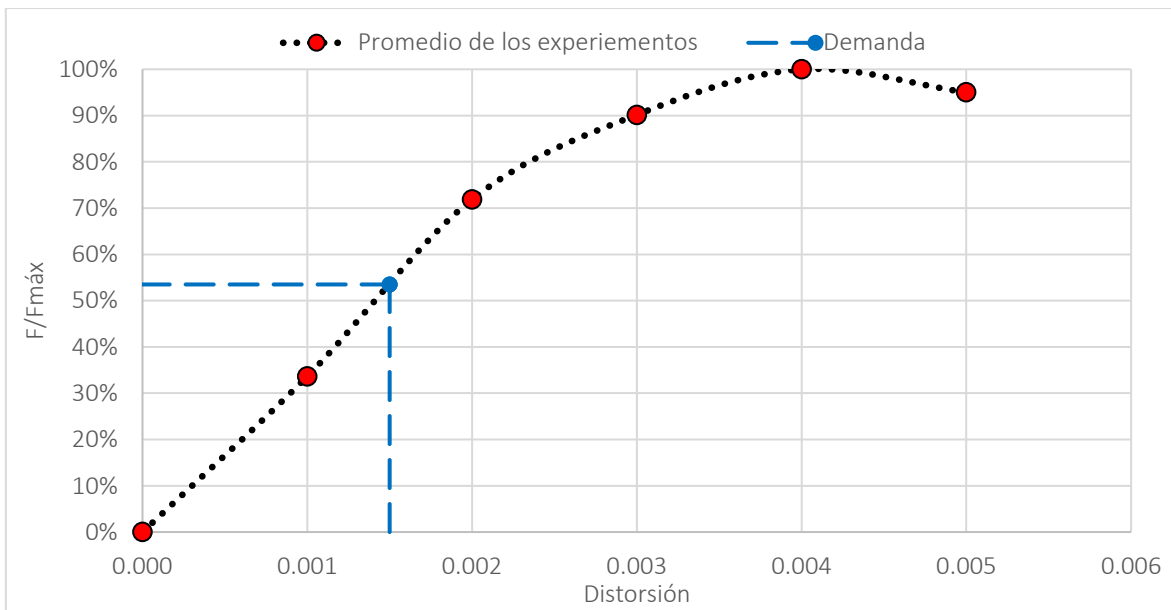


Figura 6.5. Curva Resistencia - Distorsión

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

En la presente tesis se describió el procedimiento de construcción y ensaye de cinco muros de mampostería. También se documentaron y analizaron los resultados obtenidos. Para ello los modelos se dividieron en dos grupos como se mencionó, el primero con armado convencional y el segundo con una mayor cantidad en el acero de refuerzo en los castillos. Los muros ensayados se llevaron a una distorsión final del 0.5%. Los daños exhibidos en los especímenes fueron moderados con la intención de realizar su posterior rehabilitación y estudio en trabajos posteriores. Con los datos recopilados se construyeron envolventes histeréticas, curvas de degradación de la rigidez, curvas de amortiguamiento equivalente y ancho de grietas. Finalmente se propuso una metodología para la evaluación de la integridad de muros de mampostería confinada.

Con base en los resultados obtenidos, se ofrecen las siguientes conclusiones:

- Primeramente, comparando las cargas aplicadas durante las pruebas, los muros pertenecientes al segundo grupo (con armado mayor en los castillos) superaron cerca de un 30% la fuerza cortante calculada, alcanzando las 15 toneladas en promedio y conservando un comportamiento prácticamente simétrico en las ramas histeréticas.
- La degradación de la rigidez para ambos grupos sigue una tendencia exponencial, donde los especímenes del segundo grupo finalizaron con una rigidez del 20% con respecto a la inicial, mientras que el grupo con armado convencional conservaron solo un 10% de la rigidez inicial.
- El amortiguamiento mostró una tendencia creciente con la distorsión.
- Las grietas, tanto en pico como residuales, de los muros 1 y 2 (de armado convencional) presentaron anchos 24% mayores, en promedio, con respecto a los especímenes del segundo grupo.
- Analizando los resultados obtenidos de los muros 3, 4 y 5, con mayor cantidad de acero de refuerzo en los castillos, se concluye que tienen un mejor comportamiento, que los modelos con armado sencillo; ya que soportaron la aplicación de fuerzas mayores, conservaron mayor rigidez al final de la prueba, mostraron anchos menores de grietas. Eso es muy favorable para una posterior rehabilitación post-sísmica.

7.2. Recomendaciones

En el desarrollo de esta tesis se observó que los modelos con mayor cantidad de acero de refuerzo en los castillos ofrecen un mejor comportamiento y una gran oportunidad para una exitosa rehabilitación. Esto debido a que sufren un daño menor, comparado con el grupo 1. A continuación, se plantean algunas recomendaciones:

- Se recomienda continuar con estudios de este tipo para observar el efecto que tiene el acero de refuerzo en el armado y evaluar su comportamiento en la capacidad de carga, degradación de la rigidez y los anchos de grietas, esto para poder entender su comportamiento a mayor profundidad, ya que es imposible generalizar con el ensayo de tan solo 5 especímenes.
- Se recomienda estudiar el comportamiento que tendrían los modelos con un armado mayor, sin llegar a saturar los castillos confinantes.
- Finalmente, se sugiere estudiar el comportamiento que tendrían los modelos sin recibir daño inicial contra los modelos rehabilitados e, inclusive, con diferentes técnicas de rehabilitación.

Referencias

- Alcocer, S., Meli, R., Sánchez, T., & Flores, L. (1994). "*Compostamiento ante cargas laterales de sistemas de muros de mampostería confinada con diferentes grados de acoplamiento a flexión*". Cuadernos de Investigación No. 17. CENAPRED. México: pp 53-76.
- Alcocer, S., Muñia, D., & Peña, I. (1999). "*Comportamiento dinámico de muros de mampostería confinada*". Publicación No. 616. IINGEN. UNAM: México.
- Chopra, A. (2001). "*Dynamics of structures - Theory and applications to earthquake engineering*". Segunda edición. Editorial Prentice-Hall: New Jersey. USA.
- Cruz, O. (2010). "*Ensayos de 7 muros de mampostería confinada a escala natural, de distinta longitud y con piezas multiperforadas de arcilla*". Tesis de maestría. Instituto de Ingeniería, UNAM: México.
- Escobar, J. (2014). "*Efecto sísmico de tres modelos histeréticos para muros de mampostería confinada en los espectros de respuesta inelásticos*". Nuevo León, México: Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Esteva, L. (1961). "*Comportamiento de muros de mampostería sujetos a carga vertical*". Publicación No. 46. IINGEN. UNAM: México.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2017). "*Normas Técnicas Complementarias para diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*". Gaceta Oficial de la Ciudad de México: México.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2017). "*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto*". Gaceta Oficial de la Ciudad de México: México.
- Hernández, G., & Meli, R. (1976). "*Modalidades de refuerzo para mejorar el comportamiento sísmico de muros de mampostería*". Publicación No. 382. IINGEN. UNAM: México.
- Madinaveitia, M. (1971). "*Ensayo de muros de mampostería con cargas excentricas*". Publicación No. 296. IINGEN. UNAM: México.
- Madinaveitia, M., & Rodríguez, G. (1970). "*Resistencia a carga vertical de muros fabricados con materiales usuales en el Distrito Federal*". Publicación No. 261. IINGEN. UNAM: México.
- Meli, R. (1975). "*Comportamiento sísmico de muros de mampostería*". Publicación No. 352. IINGEN. UNAM: México.
- Meli, R. (1990). "Diseño sísmico de edificios de muros de mampostería. La práctica actual y el comportamiento observado". *Ingeniería Sísmica No. 40. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. México*, pp 7-28.

-
- Meli, R., & Hernández, Ó. (1971). "*Propiedades de piezas para mampostería producidas en el Distrito Federal*". Publicación No. 297. IINGEN. UNAM: México.
- Meli, R., & Reyes, A. (1971). "*Propiedades mecánicas de la mampostería*". Publicación No. 288. IINGEN. UNAM: México.
- Meli, R., & Salgado, G. (1969). "*Comportamiento de muros de mampostería sujetos a carga lateral. Segundo Informe*". Publicación No. 237. IINGEN. UNAM: México.
- Meli, R., Zeevaert, L., & Esteva, L. (1968). "*Comportamiento de muros de mampostería hueca ante carga lateral alternada*". Publicación No. 156. IINGEN. UNAM: México.
- Olalde, P. (2010). "*Ensayo de muros de mampostería confiada con diferente longitud y uso de piezas multiperforadas de arcilla*". Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM: México.
- Pacheco, J., & Kostoglodov, V. (1999). "*Cien años de sismicidad en México*". Obtenido de <http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html>
- Pérez Gavilán, J. J. (2018). "Cambios en la NTC para el diseño y construcción de estructuras de mampostería para la CDMX". *Revista IC, Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C. México, pp. 20-24. Disponible en: https://issuu.com/cicm_oficial/docs/ic583_final/26*, Consultado el 2 de septiembre de 2020.
- SSN. (2019). "*Estadísticas de los sismos reportados por el SSN*". Obtenido de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/estadisticas/> fecha de consulta: septiembre 2020
- Tomazevic, M. (1999). "*Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings Vol. 1 Series on Innovation in Structures and Construction*". Londres: Imperial College Press.
- CEMEX Concretos, "Manual del constructor", México, CEMEX S.A de C.V.
- Flores, L y S. Alcocer (2001), "Estudio Analítico de Estructuras de Mampostería confinada", Informe de tesis de maestría, Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED, México.
- Fundación ICA, A.C. (2003), "Edificaciones de mampostería para la vivienda", 3° Edición, México.
- Meli R., Bazán E. (2013), "Diseño sísmico de edificios", México, Limusa
- Rodríguez M. y Castrillón E. (1995), "Manual de evaluación post-sísmica de la seguridad estructural de edificaciones", Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Sánchez T.A. (1998), "Comportamiento de estructuras de mampostería confinada sujetas a cargas laterales", Facultad de Ingeniería, UNAM, México.