



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN INGENIERÍA**

**COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE MUROS DE  
MAMPOSTERÍA ANTE CARGA CÍCLICA REVERSIBLE  
REHABILITADOS CON DIFERENTES TÉCNICAS**

**TESIS**

Que para optar por el grado de  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**P R E S E N T A**

CYPRIEN LUBIN

**DIRECTOR DE TESIS**

DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA INSTITUTO DE INGENIERÍA

Ciudad de México, diciembre de 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **DEDICATORIA**

A Dios por haberme dado la fe para creer que este trabajo es factible, la sabiduría para entender lo importante que es para mí y la valentía para terminarlo a pesar de las dificultades que se presentaron a lo largo de la trayectoria; por haberme permitido gozar de buena salud y bienestar, a pesar de las condiciones difíciles causadas por la pandemia del COVID-19.

A mis padres, Kerline y Wilner que, con sus palabras y acciones incondicionales, no dejaron de creer en mis capacidades, fortaleciendo mis motivos para seguir adelante. Se esforzaron por cambiar mi realidad, sin esperar nada a cambio; me enseñaron que todo es posible mientras quepa en mi mente. También y sobre todo me enseñaron que la única marcha atrás permitida es la del impulso para saltar los obstáculos.

Al Dr. Héctor Guerrero Babadilla, por siempre estar disponible para contestar mis dudas, sin importar el horario o el espacio; por enseñarme a hacer las cosas bien y con mucha disciplina y sobre todo por ser un ejemplo de crecimiento personal para mí.

Al Dr. Óscar López Bátiz; por siempre estar dispuesto a brindarme la ayuda y los consejos necesarios para la realización de los ensayos en el Laboratorio de Estructuras Grandes del Centro Nacional de Prevención de Desastre y para la interpretación de sus resultados.

A mis dos hermanitas y mi hermanito esperando que mi ejemplo sea un faro que los guíe en su crecimiento personal y profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por la sabiduría que me otorgó para llevar a bien este proyecto y por permitirme cumplir un sueño más.

Se agradece al Centro Nacional de Prevención de Desastre por brindarme las facilidades para realizar los ensayos experimentales. Durante este proyecto, aprendí cosas prácticas como dosificar, mezclar, colar, vibrar y curar el concreto.

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada a este estudiante para la realización de sus estudios de maestría. También se le agradece por el apoyo financiero mediante el proyecto FORDECyT No. 297246.

Se agradece al Instituto de Ingeniería de la UNAM por las facilidades otorgadas para la realización de esta tesis.

Se agradece al Dr. Héctor Guerrero Bobadilla por guiarme de la mejor manera posible.

Se agradece a mis padres por brindarme la mejor educación para siempre tomar las mejores decisiones de mi vida.

Se agradece a mis compañeros Juan, Víctor, Vladimir, Humberto, Jorge, Ileana Monsalvo y Felipe por apoyarme en la realización de las diferentes tareas necesarias para realizar este trabajo.

Se agradece a mis Sinodales y revisores los Doctores Escobar Sánchez, López Bátiz, Pozos Estrada y Rodríguez Gutiérrez por tomarse el tiempo para revisar mi trabajo y proporcionarme retroalimentación de manera iterada. Lo que me permitió llegar a la mejor versión de esta investigación.

Se agradece a la empresa Sika la donación de materiales (fibra de vidrio y fibra metálica) usados en estas pruebas.

Se agradece a la empresa Industrial Bloquera la donación de mortero StoneCrete.



## **RESUMEN**

Con objetivo de conocer mejor el comportamiento de las estructuras de mampostería rehabilitadas, en este trabajo se presentan resultados de un programa experimental de muros de mampostería, fabricados a escala natural y rehabilitados con diferentes técnicas. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Estructuras Grandes (LEG) del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Inicialmente, los especímenes se ensayaron a carga cíclica reversible con la finalidad de inducir un nivel de daño considerado como reparable. Posteriormente, fueron rehabilitados mediante técnicas diversas de aplanado con mortero reforzado usando malla electrosoldada, fibras metálicas, fibras sintéticas y malla de fibra de vidrio. Dos de los especímenes se rehabilitaron con contraventeos restringidos al pandeo. Después de ser rehabilitados, los especímenes fueron ensayados nuevamente. Los resultados experimentales obtenidos durante las pruebas muestran que se superó la capacidad original de los muros, en términos de resistencia, rigidez y deformación inelástica. Se concluye que las técnicas estudiadas son apropiadas para la rehabilitación de muros de mampostería.

## **ABSTRACT**

In order to better understand the behavior of rehabilitated masonry structures, this work presents some results of an experimental program of masonry walls, manufactured at full scale and rehabilitated with different techniques. The tests were carried out in the Large Structures Laboratory (LEG) of the Mexico's National Center for Disaster Prevention (CENAPRED). Initially, the specimens were tested under reversible cyclic loading in order to induce a level of damage considered repairable. Subsequently, they were rehabilitated using various techniques with reinforced mortar using steel wire welded mesh, metallic fibers, synthetic fibers, and fiberglass mesh. Two of the specimens were rehabilitated with buckling-restricted bracing. After being rehabilitated, the specimens were retested. The experimental results obtained during the tests show that, thanks to the rehabilitation, the original capacity of the walls was exceeded, in terms of resistance, stiffness, inelastic deformation, and energy dissipation. It is concluded that the studied techniques are suitable for the rehabilitation of masonry walls.

## CONTENIDO

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>3</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>CONTENIDO.....</b>	<b>6</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
1.2. OBJETIVOS.....	8
1.3. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES .....	8
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>9</b>
2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	9
2.2. TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN.....	11
2.3. APLANADO CON MORTERO REFORZADO.....	11
<b>3. DESARROLLO DE LOS EXPERIMENTOS .....</b>	<b>12</b>
3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE PRUEBA .....	12
3.2. ARREGLO EXPERIMENTAL.....	32
3.3. PROTOCOLO DE CARGA .....	32
3.4. INSTRUMENTACIÓN .....	34
3.5. REHABILITACIÓN DE LOS ESPECÍMENES .....	36
<b>4. RESULTADOS TEÓRICOS.....</b>	<b>45</b>
4.1. RESISTENCIA TEÓRICA A FUERZA DE COMPRESIÓN PURA.....	45
4.2. RESISTENCIA TEÓRICA A LEXOCOMPRESIÓN.....	46
4.3. RESISTENCIA TEÓRICA A FUERZA LATERAL .....	48
4.4. RIGIDEZ TEÓRICA.....	48
<b>5. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>51</b>
5.1. CURVAS DE HISTÉRESIS Y SUS ENVOLVENTES .....	51
5.2. MODELO ELASTOPLÁSTICO EQUIVALENTE .....	56
5.3. DEGRADACIÓN DE RIGIDEZ PICO A PICO.....	64
5.4. ENERGÍA DISIPADA ACUMULADA.....	69
5.5. FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE .....	74
5.6. GRIETAS EN PICO Y GRIETAS RESIDUALES.....	79
5.7. EVALUACIÓN VISUAL DE LOS DAÑOS .....	83
<b>6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>112</b>
6.1. EFECTO DE LA REHABILITACIÓN EN LA RESISTENCIA.....	112
6.2. EFECTO DE LA REHABILITACIÓN EN LA CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN.....	113
<b>7. ANÁLISIS DE COSTOS.....</b>	<b>116</b>
<b>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>127</b>

**REFERENCIAS..... 129**

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las estructuras de mampostería pueden ser altamente vulnerables ante acciones sísmicas, especialmente cuando no cuentan con elementos confinantes apropiados. Esta vulnerabilidad resulta del comportamiento frágil de la mampostería, caracterizado por una rápida degradación de resistencia y rigidez. Debido a que es muy frecuente la autoconstrucción en países como México o Haití, las pérdidas económicas y humanas son innumerables después de la ocurrencia de sismos fuertes. Dado el nivel de los daños tan grandes, observados en sismos pasados en dichas estructuras, es de vital importancia estudiar diversas técnicas de rehabilitación que permitan construir comunidades más resilientes mejorando la seguridad de las estructuras (Guerrero, 2020), especialmente aquellas de mampostería, cuya importancia es muy alta por la cantidad de edificaciones hechas a base de ese material.

## 1.2. OBJETIVOS

El objetivo general de este proyecto es estudiar el comportamiento de muros de mampostería cuando éstos son rehabilitados usando diversas técnicas, como aplanado reforzado con mallas y fibras metálicas, sintéticas o de vidrio, entre otras.

Los objetivos particulares son:

- Validar los resultados teóricos determinados a partir de las NTC-Mampostería (2020).
- Promover el uso de estas técnicas de rehabilitación en México, Haití y toda Latinoamérica.

## 1.3. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES

Como consecuencia de los daños que han sufrido algunas estructuras de mampostería ante las acciones sísmicas de diferentes terremotos, se han desarrollado esfuerzos considerables para estudiar y mejorar el comportamiento de dichas estructuras.

En el presente trabajo se estudia experimentalmente el uso de distintas técnicas de rehabilitación basadas tanto en el uso de contraventeos como de aplanado de mortero reforzado con materiales tales como malla electrosoldada, malla de fibra de vidrio, y fibras metálicas y sintéticas. Se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de estos métodos en 13 muros dañados inicialmente y reforzados con alguna de las técnicas mencionadas.

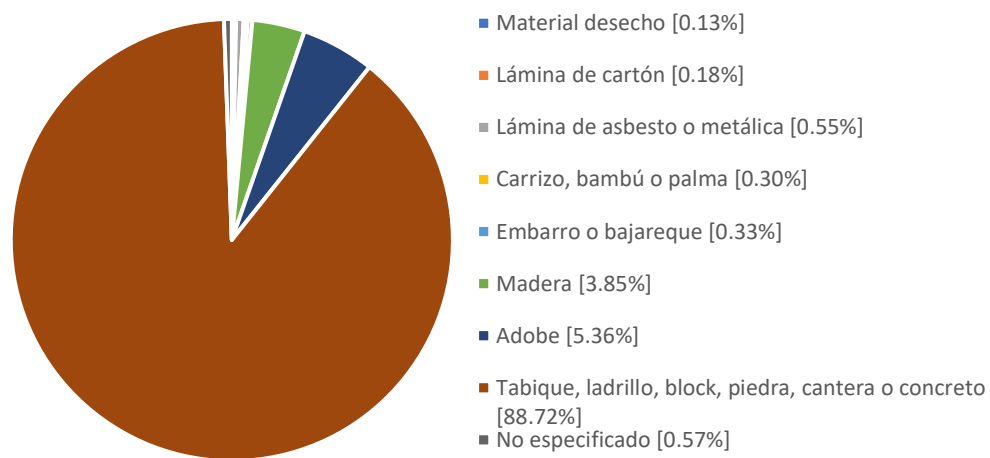
Los resultados experimentales ayudan a comprender de manera más profunda las recomendaciones de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción de la CDMX (NTC-Mampostería, 2020), ya que los ensayos se realizaron con base en éstas.

Finalmente, se compara y se discute el comportamiento de las distintas técnicas ensayadas. Esto con la intención de ayudar a los diseñadores a comprender las ventajas y desventajas de utilizar alguna de ellas, en lugares con alta vulnerabilidad sísmica, tomando en cuenta la relación entre el mejoramiento de la capacidad y el costo de la rehabilitación.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En muchos países, como México y Haití, la mampostería es uno de los materiales de construcción más usados por su bajo costo, en comparación con otros materiales como concreto, acero o madera. Además, es relativamente fácil de conseguir. Tanto las piezas, como la mano de obra para la construcción de los muros de mampostería, son insumos de fácil acceso. Como ejemplo, la encuesta 2015 del INEGI (2020) mostró que casi el 90% de las viviendas en México están hechas a base de paredes de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera o concreto (**Figura 1**). Eso demuestra la popularidad e importancia de estos materiales.



**Figura 1. Distribución porcentual de viviendas según material en paredes (INEGI, 2020).**

La **Figura 2** muestra la imagen de una estructura de mampostería que sufrió daños, por falta de elementos confinantes en el terremoto del 7 de septiembre de 2017 en Juchitán, Oaxaca. La **Figura 3** muestra una iglesia de Haití “Le Sacré-Coeur de Jésus”, después del terremoto del 14 de agosto de 2021. La estructura sufrió daños graves por falta de un diseño sismorresistente adecuado.



**Figura 2. Estructura de mampostería dañada en el sismo de México del 07/sep/17 (créditos: H Guerrero).**



**Figura 3. Daños en la iglesia “Le Sacré-Coeur de Jésus” en el sismo de Haití del 14/ago/2021 (Créditos: Ted’Actu).**

Desde el punto de vista estructural, los muros de mampostería se clasifican como muros de carga, muros no portantes, muros diafragma, muros de mampostería confinada, muros de mampostería reforzada interiormente y muros de mampostería simple no reforzada.

Después de los sismos de 1957, México ha tenido una larga historia en el estudio de la mampostería. Se han emprendido extensos programas de investigación sobre la mampostería en la UNAM. De igual manera, a partir de los sismos de 1985, se han desarrollado importantes proyectos sobre seguridad sísmica de las viviendas económicas en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

El resultado de este esfuerzo se refleja en una normatividad moderna en la que se han revisado diversos aspectos relacionados con el diseño de estas estructuras. Dicha norma ha sido la principal guía para el diseño de los modelos experimentales del presente estudio.

## **2.2. TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN**

El objetivo común de las técnicas de rehabilitación en cualquier estructura consiste en una mejora de su capacidad, tanto en términos de aumento de la resistencia y la rigidez, como en términos de su capacidad de deformación inelástica. Con esas técnicas, se busca lograr mejorar el comportamiento de la estructura original ante carga sísmica (Flores, 2012).

En América Latina y el Caribe los muros de mampostería son los elementos estructurales más utilizados para resistir tanto las fuerzas verticales como las horizontales en edificios de vivienda, sea unifamiliar o multifamiliar (Meli, 2014). A raíz de sismos importante como el del 19 de septiembre de 2017 en México, el del 12 de enero de 2010 y el del 24 de agosto de 2021 en Haití, se ha evidenciado la necesidad de emplear, en dichos sistemas estructurales, técnicas de rehabilitación eficientes y que no tengan un costo elevado, ya que son sistemas que se emplean mayoritariamente en la autoconstrucción. El principal objetivo de estas técnicas es mejorar las características estructurales originales mediante el aumento de la resistencia de la estructura (Soto, 2008).

Como parte de los esfuerzos que se han realizado para satisfacer esta necesidad, el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México preparó una guía técnica para la rehabilitación sísmica de edificios escolares de la Ciudad de México cuyo objetivo principal es proveer a los proyectistas, constructores, Directores Responsables de Obra, Corresponsables en Seguridad Estructural y propietarios de edificios escolares, reglas técnicamente sólidas y aceptadas para rehabilitar edificios escolares ante sismos (Alcocer, 2019). En esta guía se describen distintas técnicas de rehabilitación de las cuales se destacan la adición de muros de concreto, la reparación de grietas, el encamisado de vigas y columnas y el aplanado estructural de muros de mampostería. Esta última se describe a continuación.

## **2.3. APLANADO CON MORTERO REFORZADO**

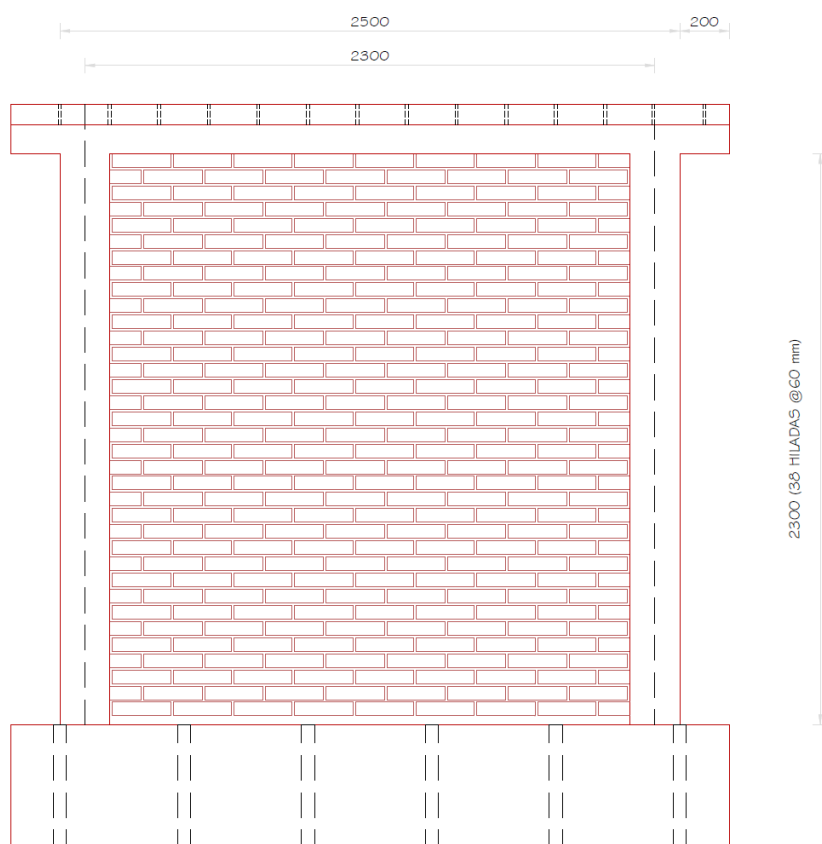
Esta técnica consiste en añadir una capa de mortero reforzado alrededor del elemento que se está rehabilitando. El aplanado puede ser total si rodea al elemento en todas sus caras o parcial. En cuanto al material de refuerzo, la norma de rehabilitación sísmica de edificios de la Ciudad de México estipula que se pueden emplear mallas metálicas o fibras metálicas o sintéticas (como fibras de carbono o de vidrio) (N-Rehabilitación, 2019). En el presente proyecto de investigación se emplean ambos aplanados total y parcial, utilizando tanto las mallas electrosoldadas como las fibras metálicas y sintéticas. Los resultados obtenidos se discuten en el capítulo 6 de este documento.



### 3. DESARROLLO DE LOS EXPERIMENTOS

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE PRUEBA

Los modelos ensayados consisten en muros de mampostería confinada de 2.5 metros por lado y 12 centímetros de espesor cuya geometría se observa en la **Figura 4**. Para la construcción de estos muros, se utilizaron piezas macizas de tabique rojo recocido y fueron desplantados sobre una viga de cimentación de concreto reforzado cuyas dimensiones son 80x50 centímetros. El confinamiento se llevó a cabo mediante una dala de concreto de 12x30 cm reforzada con 4 varillas del #3 y estribos del #2 colocados a cada 15 cm y dos castillos de concreto de 12x20 cm reforzados con 4 varillas del #4 y estribos del #2 colocados a cada 15 cm, tal como se muestra en la **Figura 5**. La dala se coló monolíticamente con una losa de 10 cm de espesor y 45 cm de ancho.



**Figura 4. Geometría de los muros ensayados**

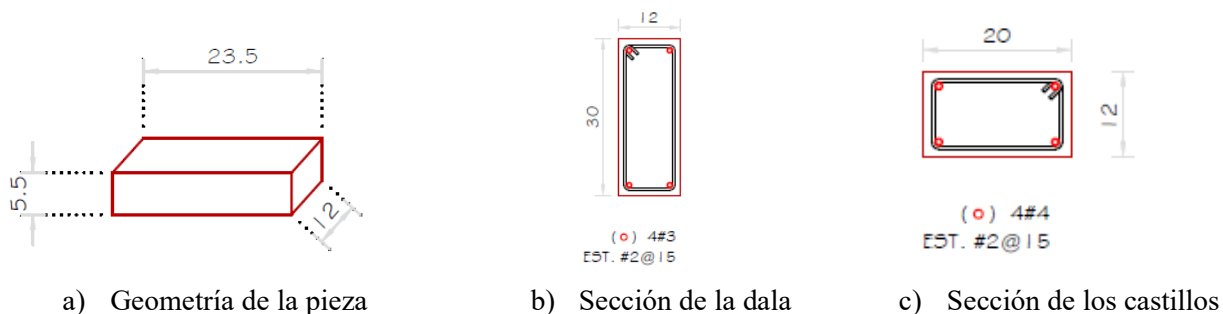
La **Tabla 1** muestra las características de los 13 especímenes ensayados. No se indujo daño inicial en los especímenes M-3 y M-4 mientras que en los demás sí. Los especímenes M-1 a M-4 se rehabilitaron por ambas caras, mientras que los demás se rehabilitaron por una sola cara. El mortero utilizado para la construcción de estos muros se dosificó con una relación volumétrica cemento-arena igual a 1:3. Para la rehabilitación con encamisado, se utilizó malla electrosoldada calibres 8 y 10 con clavos y alambrión como anclaje. Nótese que el espécimen M-8 se rehabilitó con malla de fibra de vidrio Sikawrap – 350 G Grid y los especímenes M-9 y M-10 con contraventeos restringidos al pandeo. Los especímenes M-11 y M-12 se rehabilitaron combinando dos técnicas de rehabilitación: fibras metálicas Sika FiberXorex y

malla electrosoldada. El muro M-13 se construyó con castillos a base de acero de refuerzo tipo armex y se rehabilitó con malla electrosoldada calibre 10.

**Tabla 1. Resumen de los especímenes ensayados.**

Muro	Ensayado		Caras	Mortero (2.5 cm @ cara)	Refuerzo	Anclaje
	daño inicial	Rehabilitado				
M-1	Sí	Sí	2	cemento-arena 1:3	Malla electro-soldada cal. 10	Clavos para concreto @ 45 cm
M-2	Sí	Sí	2	cemento-arena 1:3	Malla electro-soldada cal. 8	Clavos para concreto @ 45 cm
M-3	No	Sí	2	cemento-arena 1:3	Malla electro-soldada cal. 8	Clavos para concreto @ 45 cm
M-4	No	Sí	2	cemento-arena 1:3	Malla electro-soldada cal. 10	Clavos para concreto @ 45 cm
M-5	Sí	Sí	1	cemento-arena 1:3	Fibras metálicas	N/A
M-6	Sí	Sí	1	cemento-arena 1:3	Malla electro-soldada cal. 8	Alambrón @ 45 cm
M-7	Sí	Sí	1	cemento-arena 1:3	Fibras sintéticas	N/A
M-8	Sí	Sí	1	Industrializado	Malla de fibra de vidrio	4 puntos con malla de fibra de vidrio
M-9	Sí	Sí	N/A	N/A	Contraventeo restringido al pandeo	N/A
M-10	Sí	Sí	N/A	N/A	Contraventeo restringido al pandeo	N/A
M-11	Sí	Sí	1	cemento-arena 1:3	Malla electro-soldada cal. 8. Fibras sintéticas	Clavos para concreto @ 45 cm
M-12	Sí	Sí	1	cemento-arena 1:3	Malla electro-soldada cal. 8. Fibras metálicas	Clavos para concreto @ 45 cm
M-13	Sí	Sí	1	cemento-arena 1:3	Malla electro-soldada cal. 10	Clavos para concreto @ 45 cm

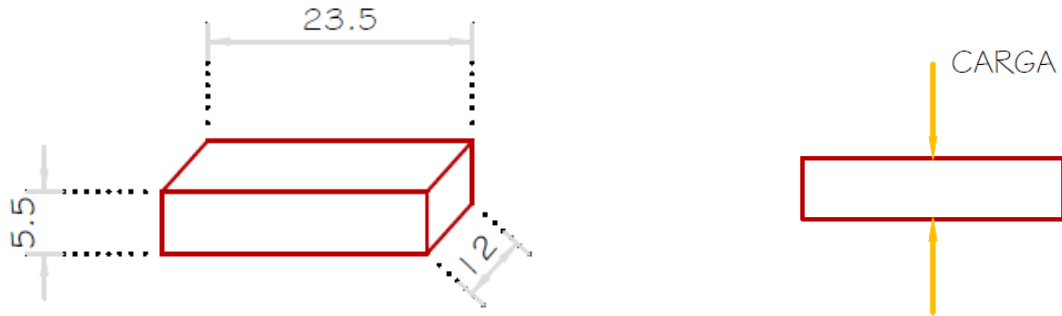
En la **Figura 5**, se muestran las dimensiones de cada uno de los elementos que conforman el muro. Las cotas están en centímetros.



**Figura 5. Elementos que conforman el muro (dimensiones en cm)**

### 3.1.1 PIEZAS DE MAMPOSTERÍA

El tipo de piezas que integran los muros son tabiques rojos recocidos macizos de barro artesanal con dimensiones de fabricación de 24 cm de largo, 6 cm de alto y 12 cm de ancho, así como se muestra en la **Figura 6**.



**Figura 6** Dimensiones de las probetas de mampostería para ensayo a compresión, cotas en cm.



**Figura 7** Ensayos a compresión de piezas de mampostería.

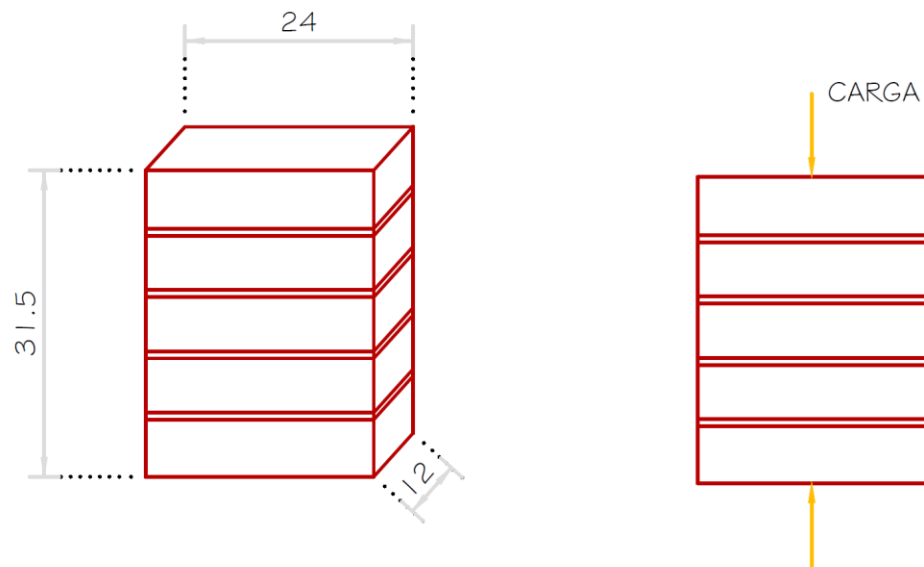
Para caracterizar los tabiques, se realizaron ensayos a compresión de 5 piezas según la norma mexicana NMX-C-036-ONNCCE (2014). En la **Figura 7**, se muestra cómo se cabecearon los tabiques con yeso especial de alta resistencia en sus dos caras de apoyo y como se aplica la carga de aplicación en dichas caras. La falla de la mampostería es frágil según la foto de la derecha. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 2** que presentan las dimensiones geométricas de las piezas, así como los valores máximos de carga y resistencia que soportaron. El valor promedio de su resistencia a la compresión es  $78.44 \text{ kg/cm}^2$

**Tabla 2. Resistencias experimentales de pieza de mampostería.**

Pieza	Ancho [cm]	Longitud [cm]	Espesor [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	12	23.5	6	282	23150	82.09
2	12	23.5	6	282	15650	55.50
3	12	23.5	6	282	25000	88.65
4	12	23.5	6	282	23300	82.62
5	12	23.5	6	282	23500	83.33
					<b>Promedio</b>	<b>78.44</b>

### 3.1.2. PILAS DE MAMPOSTERÍA

La resistencia de diseño de los muros se determinó ensayando, a compresión, 18 pilas que se construyeron con cinco piezas enteras sobrepuestas unidas con el mismo mortero con que se construyeron los muros. En la **Figura 8**, se aprecian que las dimensiones de las pilas fueron 31.5 cm de altura, 12 cm de espesor y 24 cm de largo. Los ensayos se hicieron conforme a la norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE (2010). La **Tabla 3** muestra los resultados obtenidos.



**Figura 8 Dimensiones de las pilas de mampostería para su ensayo a compresión, cotas en cm.**

En la **Figura 9** muestra cómo se aplicó la carga de compresión sobre las caras horizontales de la pila después de su cabeceo con yeso. También se ve como aparecen gradualmente las grietas hasta que el murete llegue a su límite de resistencia a la compresión en la foto de la derecha.



Figura 9 Ensayes a compresión de pilas de mampostería.

Tabla 3. Resistencias experimentales de pilas de mampostería.

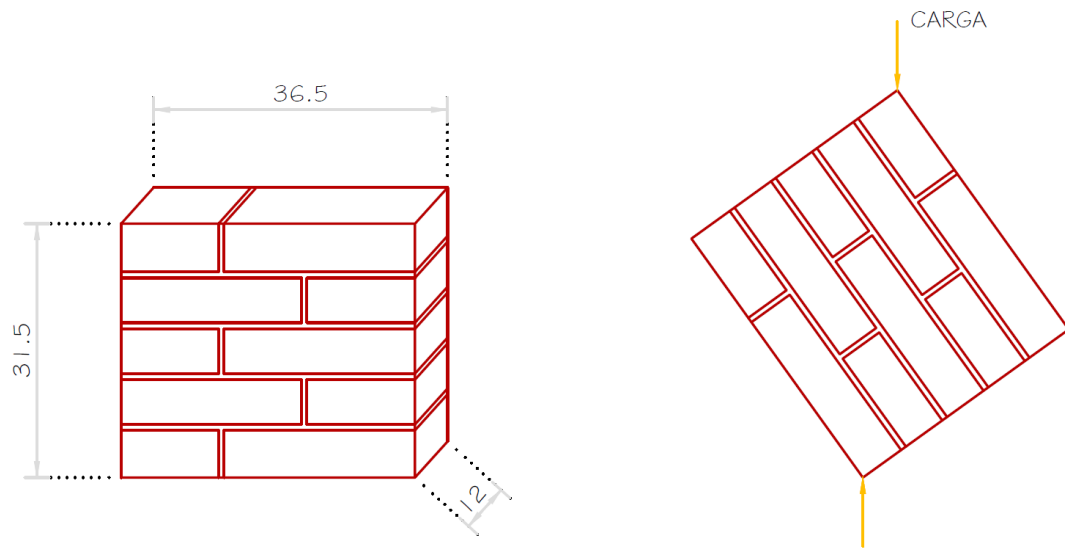
Pila	Espesor [cm]	Largo [cm]	Altura [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]	Relación esbeltez	Factor esbeltez	Resistencia corregida [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	12	23.5	31.5	282	14100	50	2.63	0.84	42.00
2	12	23.5	31.5	282	13750	49	2.63	0.84	40.96
3	12	23.5	31.5	282	14000	50	2.63	0.84	41.70
4	12	23.5	31.5	282	14150	50	2.63	0.84	42.15
5	12	23.5	31.5	282	14150	50	2.63	0.84	42.15
6	12	23.5	31.5	282	16000	57	2.63	0.84	47.66
7	12	23.5	31.5	282	12200	43	2.63	0.84	36.34
8	12	23.5	31.5	282	7500	27	2.63	0.84	22.34
9	12	23.5	31.5	282	7950	28	2.63	0.84	23.68
10	12	23.5	31.5	282	11550	41	2.63	0.84	34.40
11	12	23.5	31.5	282	11550	41	2.63	0.84	34.40
12	12	23.5	31.5	282	7700	27	2.63	0.84	22.94
13	12	23.5	31.5	282	4800	17	2.63	0.84	14.30
14	12	23.5	31.5	282	10750	38	2.63	0.84	32.02
15	12	23.5	31.5	282	10770	38	2.63	0.84	32.08
16	12	23.5	31.5	282	12500	44	2.63	0.84	37.23
17	12	23.5	31.5	282	11350	40	2.63	0.84	33.81
18	12	23.5	31.5	282	12850	46	2.63	0.84	38.28
								<b>Promedio</b>	<b>34.36</b>

### 3.1.3. MURETES DE MAMPOSTERÍA

Para determinar la resistencia a compresión diagonal de la mampostería, se realizó el ensaye de muretes de tamaño reducido, de 36.5 cm de longitud, 12 cm de espesor y 31.5 cm de altura, tal como se muestra en la **Figura 10**, sometidos a compresión a lo largo de una de sus diagonales. Los ensayes se realizaron siguiendo los requerimientos de las normas de mampostería del Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México (2020), así como de la norma mexicana de ensaye de



muretes y pilas NMX-C-464-ONNCCE (2010). En la **Figura 11**, la foto de la izquierda muestra cómo se aplicó un aplanado de 2.5 cm en una cara de los muretes para determinar la resistencia de diseño de los muros rehabilitados con encamisado. La carga se aplica diagonalmente, como se aprecia en la foto de en medio y en la foto de la derecha se muestra cómo se instrumentaron las probetas para medir las deformaciones de los muretes. Los muretes cuyos resultados se muestran en la **Tabla 4** no llevaban ningún tipo de aplanado.



**Figura 10 Dimensiones de los muretes de mampostería para su ensaye a compresión, cotas en cm.**



**Figura 11 Ensayes a compresión diagonal de muretes de mampostería.**

**Tabla 4. Resultados obtenidos en los ensayos de muretes de mampostería.**

Murete	Espesor [cm]	Longitud [cm]	Altura [cm]	Área diagonal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	12	36.5	31.5	579	3900	6.74
2	12	36.5	31.5	579	3530	6.10
3	12	36.5	31.5	579	5240	9.06
4	12	36.5	31.5	579	4160	7.19
5	12	36.5	31.5	579	3140	5.43
6	12	36.5	31.5	579	4920	8.50
7	12	36.5	31.5	579	2600	4.49
8	12	36.5	31.5	579	3080	5.32
9	12	36.5	31.5	579	3650	6.31
10	12	36.5	31.5	579	1200	2.07
11	12	36.5	31.5	579	2650	4.58
					<b>Promedio</b>	<b>5.98</b>

Para evaluar la resistencia a compresión diagonal de la mampostería con encamisado de mortero, también se realizó el ensayo de muretes con aplanado en una sola cara. Los resultados obtenidos para los distintos muretes se muestran a continuación. Los muretes cuyos resultados se muestran en la **Tabla 5** fueron encamisados con mortero tradicional tipo I en una sola cara. Mientras que los morteros empleados para los muretes de las **Tabla 6** a **Tabla 8**, fueron reforzados con malla de fibra de vidrio, fibras sintéticas y fibras metálicas respectivamente. Se aprecia que la resistencia a la compresión diagonal resultó, en promedio, superior a 10 kg/cm<sup>2</sup>, es decir, un 70% mayor a la resistencia promedio mostrada en la **Tabla 5**, por los muretes de mampostería sin mortero de recubrimiento.

**Tabla 5. Resultados de los muretes con aplanado de mortero tradicional.**

Murete	Espesor [cm]	Longitud [cm]	Altura [cm]	Área diagonal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	14.5	36.5	31.5	699	6600	9.44
2	14.5	36.5	31.5	699	7050	10.08
3	14.5	36.5	31.5	699	7840	11.21
					<b>Promedio</b>	<b>10.25</b>

**Tabla 6. Resultados de los muretes con aplanado de mortero industrializado Sika MonoTop – 722 Mur (2020).**

Murete	Espesor [cm]	Longitud [cm]	Altura [cm]	Área diagonal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	14.5	36.5	31.5	699	6980	9.98
2	14.5	36.5	31.5	699	6650	9.51
3	14.5	36.5	31.5	699	6180	8.84
					<b>Promedio</b>	<b>10.54</b>

**Tabla 7. Resultados de los muretes con aplanado de mortero reforzado con fibras sintéticas.**

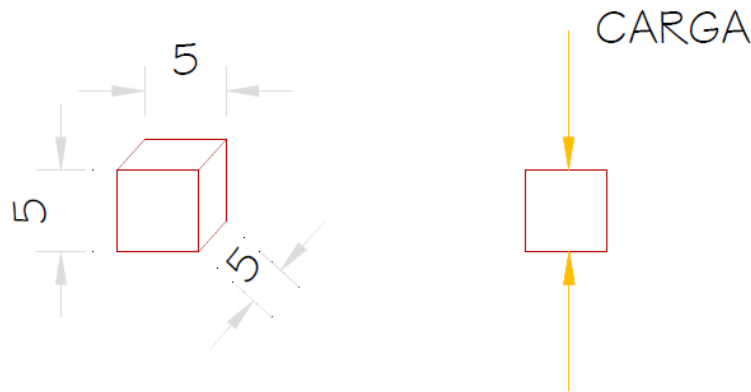
Murete	Espesor [cm]	Longitud [cm]	Altura [cm]	Área diagonal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	14.5	36.5	31.5	699	8110	11.60
2	14.5	36.5	31.5	699	5680	8.12
3	14.5	36.5	31.5	699	7540	10.79
					<b>Promedio</b>	<b>10.17</b>

**Tabla 8. Resultados de los muretes con aplanado de mortero reforzado con fibras metálicas.**

Murete	Espesor [cm]	Longitud [cm]	Altura [cm]	Área diagonal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	14.5	36.5	31.5	699	8040	12
2	14.5	36.5	31.5	699	6680	10
3	14.5	36.5	31.5	699	6500	9
					<b>Promedio</b>	<b>10.12</b>

### 3.1.4. Mortero para pegar piezas y para recubrimiento.

El mortero empleado para la junta de las piezas en los muros fue dosificado de acuerdo con la tabla 2.5.1 de las normas (NTC-DCEM, 2020) para moteros Tipo I, agregando una proporción de 1 parte de cemento por 3 partes de arena, sin cemento de albañilería ni cal hidratada. Para determinar la resistencia a compresión del mortero tradicional se ensayaron 30 cubos de 5 cm por lado, así como se muestra en la **Figura 12**, de acuerdo con las normas (NTCDCEM, 2020). La **Tabla 9** muestra los resultados obtenidos en dichos ensayos. Se observa una resistencia a compresión promedio de 132.4 kg/cm<sup>2</sup>. En la **Figura 13**, se muestra cómo se obtuvieron las probetas de mortero y como se aplica la carga de compresión sobre las caras horizontales del mortero.



**Figura 12 Dimensiones de los cubos de mortero para su ensaye a compresión, cotas en cm.**





**Figura 13 Ensayes a compresión de probetas de mortero.**

Para el aplanado en una sola cara de los muros M-11 y M-12 originales, se utilizó mortero industrializado StoneCrete (2018) y todos los especímenes a excepción del M-8, se rehabilitaron con mortero tradicional tipo I reforzado con una o dos de las tres técnicas malla electrosoldada, fibra sintética y fibra metálica. El muro M-8 se rehabilitó con mortero industrializado Sika MonoTop – 722 Mur, reforzado con malla de fibra de vidrio. Para determinar la resistencia a la compresión de dichos morteros, se realizaron ensayos a compresión sobre probetas cúbicas extraídas del mortero para cada uno de los aplanados. Los resultados se muestran en las **tablasTabla 10 aTabla 13**.

**Tabla 9. Resultados obtenidos en los ensayos de cubos de mortero tipo I para junta.**

Cubo	Espesor [cm]	Longitud [cm]	Altura [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	5	5	5	25	3230	129.2
2	5	5	5	25	3050	122.0
3	5	5	5	25	3540	141.6
4	5	5	5	25	3140	125.6
5	5	5	5	25	3615	144.6
6	5	5	5	25	3390	135.6
7	5	5	5	25	3590	143.6
8	5	5	5	25	3250	130.0
9	5	5	5	25	3610	144.4
10	5	5	5	25	3195	127.8
11	5	5	5	25	3410	136.4
12	5	5	5	25	3515	140.6
13	5	5	5	25	2000	80.0
14	5	5	5	25	3080	123.2
15	5	5	5	25	2980	119.2
16	5	5	5	25	3160	126.4
17	5	5	5	25	2000	80.0
18	5	5	5	25	3240	129.6
19	5	5	5	25	3525	141.0
20	5	5	5	25	3340	133.6
21	5	5	5	25	3200	128.0
22	5	5	5	25	2640	105.6
23	5	5	5	25	3065	122.6
24	5	5	5	25	2800	112.0
25	5	5	5	25	3900	156.0
26	5	5	5	25	3950	158.0
27	5	5	5	25	3450	138.0
28	5	5	5	25	4200	168.0
29	5	5	5	25	3750	150.0
30	5	5	5	25	4450	178.0
					<b>Promedio</b>	<b>132.4</b>

**Tabla 10. Resultados obtenidos en ensayos de cubos de mortero Sika Monotop – 722 Mur (2020).**

Cubo	Espesor [cm]	Longitud [cm]	Altura [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	1	5	5	5	25	6700
2	2	5	5	5	25	7280
3	3	5	5	5	25	7100
4	4	5	5	5	25	7400
5	5	5	5	5	25	7370
6	6	5	5	5	25	7090
					<b>Promedio</b>	<b>286.3</b>

**Tabla 11. Resultados obtenidos en los ensayos de cubos de mortero StoneCrete (2018).**

Cubo	Espesor [cm]	Longitud [cm]	Altura [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	5	5	5	25	3800	152
2	5	5	5	25	4400	176
3	5	5	5	25	4640	186
4	5	5	5	25	4425	177
5	5	5	5	25	4300	172
6	5	5	5	25	4290	172
7	5	5	5	25	4250	170
8	5	5	5	25	4120	165
9	5	5	5	25	4020	161
10	5	5	5	25	2990	120
11	5	5	5	25	4000	160
12	5	5	5	25	3720	149
13	5	5	5	25	3500	140
14	5	5	5	25	3450	138
15	5	5	5	25	2010	80
16	5	5	5	25	3300	132
17	5	5	5	25	2650	106
18	5	5	5	25	1900	76
19	5	5	5	25	3450	138
20	5	5	5	25	3050	122
21	5	5	5	25	2400	96
22	5	5	5	25	2950	118
23	5	5	5	25	3050	122
24	5	5	5	25	3100	124
25	5	5	5	25	3750	150
26	5	5	5	25	4150	166
27	5	5	5	25	4850	194
28	5	5	5	25	3850	154
29	5	5	5	25	4050	162
30	5	5	5	25	4075	163
31	5	5	5	25	3850	154
32	5	5	5	25	3800	152
33	5	5	5	25	4800	192
					<b>Promedio</b>	<b>161.25</b>

**Tabla 12. Resultados obtenidos en los ensayos de cubos de mortero tipo I reforzado con fibras sintéticas.**

Cubo	Espesor [cm]	Longitud [cm]	Altura [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	5	5	5	25	6075	243
2	5	5	5	25	5050	202
3	5	5	5	25	6550	262
4	5	5	5	25	6900	276
5	5	5	5	25	6450	258
6	5	5	5	25	6350	254
7	5	5	5	25	6675	267
8	5	5	5	25	6675	267
9	5	5	5	25	5000	200
10	5	5	5	25	7125	285
11	5	5	5	25	7000	280
12	5	5	5	25	5200	208
					<b>Promedio</b>	<b>250.17</b>

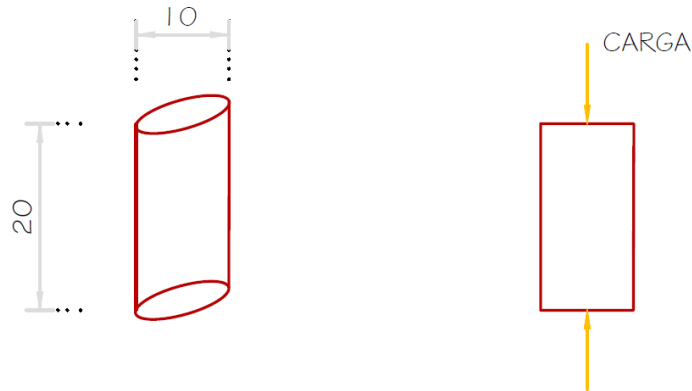
**Tabla 13. Resultados obtenidos en los ensayos de cubos de mortero tipo I reforzado con fibras metálicas.**

Cubo	Espesor [cm]	Longitud [cm]	Altura [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	5	5	5	25	4550	182
2	5	5	5	25	5375	215
3	5	5	5	25	4100	164
4	5	5	5	25	5225	209
5	5	5	5	25	4400	176
6	5	5	5	25	4900	196
7	5	5	5	25	6900	276
8	5	5	5	25	7850	314
9	5	5	5	25	5250	210
10	5	5	5	25	5775	231
11	5	5	5	25	6675	267
12	5	5	5	25	7650	306
					<b>Promedio</b>	<b>228.83</b>

### 3.1.5. CONCRETO DE DALAS Y CASTILLOS

Para determinar la resistencia a compresión del concreto de las dalas y castillos de los especímenes M-1 a M-4 se ensayaron 12 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, así como se muestra en la **Figura 14**. Se consideró un factor de corrección por esbeltez de 1.00 de acuerdo con la norma NMX-C-083-ONNCCE (2014) y las normas (NTC-DEM, 2020). La **Tabla 14** muestra los resultados obtenidos en los ensayos de cilindros de concreto. Los anillos que se aprecian en la

**Figura 15** se utilizaron para medir la deformación axial de la probeta y por consiguiente determinar el módulo de elasticidad del concreto utilizado para los experimentos.



**Figura 14** Dimensiones de los cubos de mortero para su ensaye a compresión, cotas en cm.



**Figura 15** Ensayes a compresión de probetas cilíndricas de concreto, cotas en cm.

**Tabla 14.** Resultados obtenidos de probetas de concreto en dalas y castillos de muros M-1 a M-4.

Cilindro	Diámetro [cm]	Altura [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]	Relación esbeltez	Factor de corrección esbeltez	Resistencia corregida [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	10	20	78.54	12000	153	2	1	153
2	10	20	78.54	12250	156	2	1	156
3	10	20	78.54	12200	155	2	1	155
4	10	20	78.54	12530	160	2	1	160
5	10	20	78.54	12930	165	2	1	165
6	10	20	78.54	12110	154	2	1	154
7	10	20	78.54	11350	145	2	1	145
8	10	20	78.54	12030	153	2	1	153
9	10	20	78.54	13070	166	2	1	166
10	10	20	78.54	16200	206	2	1	206
11	10	20	78.54	15500	197	2	1	197
12	10	20	78.54	15830	202	2	1	202
							<b>Promedio</b>	168

Para la rehabilitación con contraventeo del espécimen M-10, se decidió reforzar el marco con encamisado de concreto reforzado. Esa técnica se describe en el capítulo en la sección 3.5.5 del presente documento. La **Tabla 15** muestra los resultados obtenidos en esos ensayos. Se observa que la resistencia a la compresión promedio del concreto utilizado para la rehabilitación es de 400.67 kg/cm<sup>2</sup>.

**Tabla 15. Resultados obtenidos en los ensayos de probetas cilíndricas de concreto para el encamisado del marco del espécimen M-10.**

Cilindro	Diámetro [cm]	Altura [cm]	Área de la sección transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]	Relación de esbeltez	Factor de corrección por esbeltez	Resistencia corregida [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	15	30	176.71	66210	374.67	2	1	374.67
3	15	30	176.71	67550	382.25	2	1	382.25
5	15	30	176.71	87930	275	1	1	497.58
6	15	30	176.71	67270	342	1	1	380.67
8	15	30	176.71	70140	396.91	2	1	396.91
9	15	30	176.71	65730	371.96	2	1	371.96
							<b>Promedio</b>	400.67

Durante la prueba del espécimen M-8, se dañaron los castillos en su base. Se obtuvieron probetas de cilindros de concreto para obtener la resistencia a la compresión del concreto empleado para su reforzamiento. La **Tabla 16** muestra los resultados obtenidos. En promedio, el concreto para dicho reforzamiento alcanzó una resistencia de 375.18 kg/cm<sup>2</sup>

**Tabla 16. Resultados obtenidos en los ensayos de probetas cilíndricas de concreto reforzar la cimentación de los castillos.**

Cilindro	Diámetro [cm]	Altura [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm <sup>2</sup> ]	Relación de esbeltez	Factor por esbeltez	Resistencia corregida [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	15	30	176.71	58500	367	1	1	331.04
2	15	30	176.71	59400	350	1	1	336.14
3	15	30	176.71	61500	378	1	1	348.02
4	15	30	176.71	63200	260	1	1	357.64
							<b>Promedio</b>	375.18

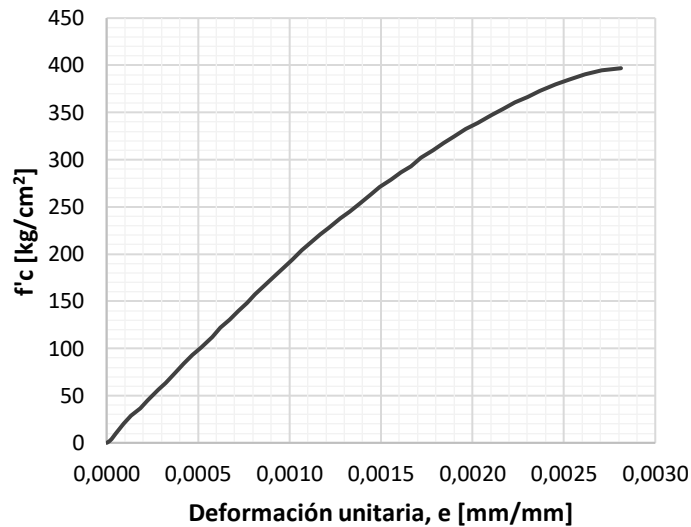
Además de la resistencia a compresión, se determinó el módulo de elasticidad para las probetas obtenidas del concreto empleado para el reforzamiento del marco de los especímenes M-9 y M-10 y la construcción de los muros M-11 a M-3. Se utilizó el procedimiento descrito en la NMX-C-128-ONNCCE (2013). A continuación, se presenta un resumen de las actividades realizadas.

Las dimensiones de la probeta, mostrada en la **Figura 16**, fueron de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto. La distancia entre centros de anillo es de 20 cm. Los instrumentos que se observan en la **Figura 16**, miden la deformación que sufre la probeta durante la aplicación de la carga de compresión sobre las caras horizontales del cilindro.



**Figura 16** Probeta de concreto después de la prueba para la determinación del módulo de elasticidad.

### Curva esfuerzo deformación



**Figura 17** Curva esfuerzo – deformación del concreto.

Después de registrar las lecturas de deformación y carga de acuerdo con lo indicado en los incisos 9.1.5 y 9.1.6 de la norma, se determinaron los esfuerzos obtenidos en cada lectura de aplicación de carga de acuerdo con el área del espécimen. Dividiendo las deformaciones registradas entre la longitud de medición, se determinó la deformación unitaria. En la curva esfuerzo-deformación del concreto que se aprecia en la **Figura 17**, muestra la gráfica de los esfuerzos de compresión en  $\text{kg/cm}^2$  en el eje vertical contra la deformación unitaria en el eje horizontal.



Posteriormente, mediante interpolación lineal, se determinó el esfuerzo S1 correspondiente a una deformación unitaria de 50 millonésimas (e1), así como la deformación unitaria (e2 correspondiente al 40% del esfuerzo máximo (S2).

$$S - S1 = \frac{S2 - S1}{e2 - e1}(e2 - e1)$$

Una vez, determinados el esfuerzo S1 = 9.49 kg/cm<sup>2</sup> correspondiente a la deformación unitaria e1 = 0.00005 y la deformación e2 = 0.00082, correspondiente al 40% del esfuerzo máximo S2 = 158.77 kg/cm<sup>2</sup>, se calculó el módulo de elasticidad:

$$E = \frac{S2 - S1}{e2 - 0.000050} = \frac{158.77 - 9.49}{0.00082 - 0.000050} = 193,870 \frac{kg}{cm^2}$$

Se aplicó el mismo procedimiento para determinar el módulo de elasticidad de otras 10 probetas obtenidas del concreto empleado en el reforzamiento del marco para los especímenes M-9 y M-11, así como en la construcción de los especímenes M-11 a M-13. Los resultados se resumen en la **Tabla 17**. Se aprecia que el módulo de elasticidad promedio fue de 201,097 kg/cm<sup>2</sup>.

**Tabla 17. Módulo de elasticidad experimental del concreto para reforzar los castillos de M-9 y M-10 y para construir los especímenes M-11 a M-13.**

	Diámetro [cm]	Altura [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Deformación unitaria máxima	Resistencia máxima [kg/cm <sup>2</sup> ]	Módulo de elasticidad [kg/cm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	15	30	176.71	66210	0.0022	374.68	238,365
<b>2</b>	15	30	176.71	63210	0.0023	357.70	261,002
<b>3</b>	15	30	176.71	67550	0.0025	382.26	219,304
<b>4</b>	15	30	176.71	87930	0.0025	497.59	190,609
<b>5</b>	15	30	176.71	67270	0.0022	380.68	196,031
<b>6</b>	15	30	176.71	61610	0.0021	348.65	195,269
<b>7</b>	15	30	176.71	60000	0.0020	339.54	217,104
<b>8</b>	15	30	176.71	46610	0.0026	263.77	172,826
<b>9</b>	15	30	176.71	48660	0.0009	275.37	142,864
<b>10</b>	15	30	176.71	70140	0.0028	396.92	194,108
<b>11</b>	15	30	176.71	65730	0.0027	372	184586
						<b>Promedio</b>	<b>201,097</b>

También se determinó el módulo de elasticidad de los distintos morteros que se utilizaron, empleando el mismo procedimiento que para el concreto. Los resultados se muestran en las **tablas Tabla 18 a Tabla 21**.

**Tabla 18. Módulo de elasticidad experimental del mortero tradicional sin refuerzo.**

	Diámetro [cm]	Altura [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Deformación unitaria máxima	Resistencia máxima [kg/cm <sup>2</sup> ]	Módulo de elasticidad [kg/cm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	15	30	177	64000	0.0376	362	11369
<b>2</b>	15	30	177	60000	0.0468	340	12730
						<b>Promedio</b>	<b>12050</b>



**Tabla 19. Módulo de elasticidad experimental del mortero tradicional con fibras sintéticas.**

	Diámetro [cm]	Altura [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Deformación unitaria máxima	Resistencia máxima [kg/cm <sup>2</sup> ]	Módulo de elasticidad [kg/cm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	15	30	177	49000	0.0373	277	12922
<b>2</b>	15	30	177	47000	0.0383	266	14183
						<b>Promedio</b>	<b>13553</b>

**Tabla 20. Módulo de elasticidad experimental del mortero tradicional con fibras metálicas.**

	Diámetro [cm]	Altura [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Deformación unitaria máxima	Resistencia máxima [kg/cm <sup>2</sup> ]	Módulo de elasticidad [kg/cm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	15	30	177	41000	0.0330	232	18034
<b>2</b>	15	30	177	46000	0.0340	260	10215
						<b>Promedio</b>	<b>14125</b>

**Tabla 21. Módulo de elasticidad experimental del mortero StoneCrete.**

	Diámetro [cm]	Altura [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Deformación unitaria máxima	Resistencia máxima [kg/cm <sup>2</sup> ]	Módulo de elasticidad [kg/cm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	10	20	79	28000	0.0101	357	40368
<b>2</b>	10	20	79	28000	0.0050	357	39956
<b>3</b>	10	20	79	30000	0.0093	382	41860
						<b>Promedio</b>	<b>40728</b>

### 3.1.6. Acero de refuerzo de dalas y castillos

Para el refuerzo longitudinal de las dalas y castillos, se utilizaron varillas corrugadas con esfuerzo de fluencia nominal  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$  mientras que para el refuerzo transversal se usó alambrcn de 60 mm de diámetro a base de acero con esfuerzo de fluencia  $f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ . Para controlar la fluencia del acero de los castillos, estos últimos se instrumentaron con strain-gauges que midieron la deformación del acero durante los ensayos. En la **Figura 18**, se muestra la aplicación de los strain-gauges en las barras longitudinales de acero.



**Figura 18 Instrumentación del acero de refuerzo de los castillos.**

### 3.1.7. Malla electrosoldada

En el caso de la malla electrosoldada usada en la rehabilitación de los muros, se empleó acero con esfuerzo de fluencia nominal  $f_y = 5000 \text{ kg/cm}^2$ . Para determinar el valor experimental de dicho esfuerzo, se realizó la prueba a tensión de 3 muestras obtenidas de la malla de calibre 10. En la **Figura 19**, se muestra cómo se aplicó la fuerza de tensión a la probeta y cómo se rompió esta última al llegar a su límite de resistencia. Además, en la **Figura 20** se muestra un diagrama esfuerzo deformación que representa el comportamiento elasto-plástico de la malla con el esfuerzo de tensión en  $\text{kg/cm}^2$  en el eje vertical y la deformación unitaria axial en el eje horizontal. En la

**Tabla 22** se observan los valores de resistencia obtenidos. La resistencia a esfuerzo de tensión promedio siendo de  $4934.67 \text{ kg/cm}^2$ .



**Figura 19 Ensayo a tensión de probetas de la malla electrosoldada.**

## Curva esfuerzo deformación

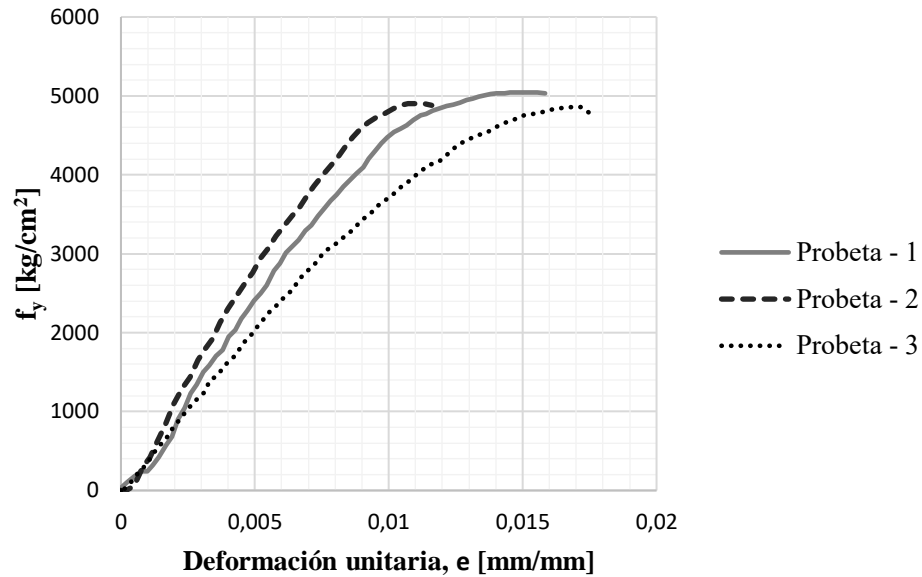


Figura 20 Diagrama Esfuerzo-Deformación de las probetas de malla electrosoldada.

Tabla 22. Resistencia a tensión de la malla electrosoldada.

	Diámetro [cm]	Altura [cm]	Área transversal [cm <sup>2</sup> ]	Carga máxima [kg]	Deformación unitaria máxima	Resistencia máxima [kg/cm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	0.34	30	0.092	451	0.0126	4902
<b>2</b>	0.34	30	0.092	464	0.0174	5043
<b>3</b>	0.34	30	0.092	447	0.0182	4859
					<b>Promedio</b>	<b>4934.67</b>

En la

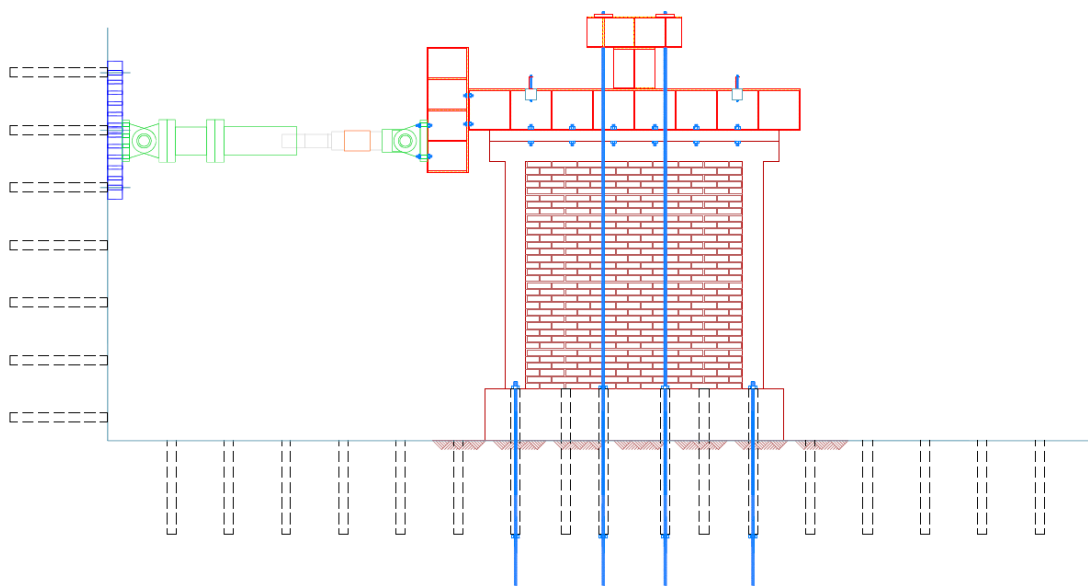
**Tabla 22**, se resumen los resultados obtenidos en los diferentes ensayos descritos anteriormente. Se presentan las dimensiones principales de las probetas, así como la resistencia promedio que se obtuvo para cada tipo de probeta.

**Tabla 23 Resumen de los resultados en ensayos de los diferentes materiales.**

<b>Descripción</b>	<b>Tamaño de probeta</b>	<b>Resistencia promedio, kg/cm<sup>2</sup></b>
Tabique	Pieza de 23.5x12x6	78.44
Pilas	Pilas de 12x23.5x31.5 cm	34.36
Murete sin refuerzo	Muretes de 12x36.5x31.5 cm	5.98
Murete reforzado con mortero convencional	Muretes de 14.5x36.5x31.5 cm	10.25
Murete reforzado con malla de fibra de vidrio	Muretes de 14.5x36.5x31.5 cm	10.54
Murete reforzado con fibra sintética	Muretes de 14.5x36.5x31.5 cm	10.17
Murete reforzado con fibra metálica	Muretes de 14.5x36.5x31.5 cm	10.12
Mortero convencional tipo I para junta.	Cubos de 5x5x5 cm	132.4
Mortero Sika para aplanado.	Cubos de 5x5x5 cm	286.3
Mortero StroneCrete para aplanado	Cubos de 5x5x5 cm	161.3
Mortero para aplanado reforzado con fibra sintética	Cubos de 5x5x5 cm	250.17
Mortero para aplanado reforzado con fibra metálica	Cubos de 5x5x5 cm	228.83
Cilindro de concreto para dalas y castillos.	Cilindros de 10x20 cm	167.6
Cilindro de concreto para encamisado de marco.	Cilindros de 15x30 cm	400.67
Cilindro de concreto para reforzar cimentación	Cilindros de 15x30 cm	375.18
Módulo de elasticidad del concreto	Cilindros de 15x30 cm	201097
Módulo de elasticidad del mortero tradicional	Cilindros de 15x30 cm	12050
Módulo de elasticidad del mortero con fibra sintética	Cilindros de 15x30 cm	13553
Módulo de elasticidad del mortero con fibra metálica	Cilindros de 15x30 cm	14125
Módulo de elasticidad del mortero StoneCrete	Cilindros de 10x20 cm	40728
Límite de fluencia de la malla electrosoldada	Probeta de 0.34x300 cm	4935

### 3.2. Arreglo experimental

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras Grandes (LEG) del CENAPRED. Las **Figura 21** y **Figura 22** muestran el arreglo experimental para el ensayo de los especímenes. El muro se ancla a la losa de cimentación y la carga se aplica mediante un actuador de 100 t. La transferencia del actuador al muro se logra a través de una trabe metálica de acero muy rígida que pesaba 1.5 t. Sobre la trabe, se colocó un peso de 13.5 t, lo que sumó una carga de 15 t. El área transversal del muro fue de 3000 cm<sup>2</sup>, por lo que la carga por área fue de 5 kg/cm<sup>2</sup>.



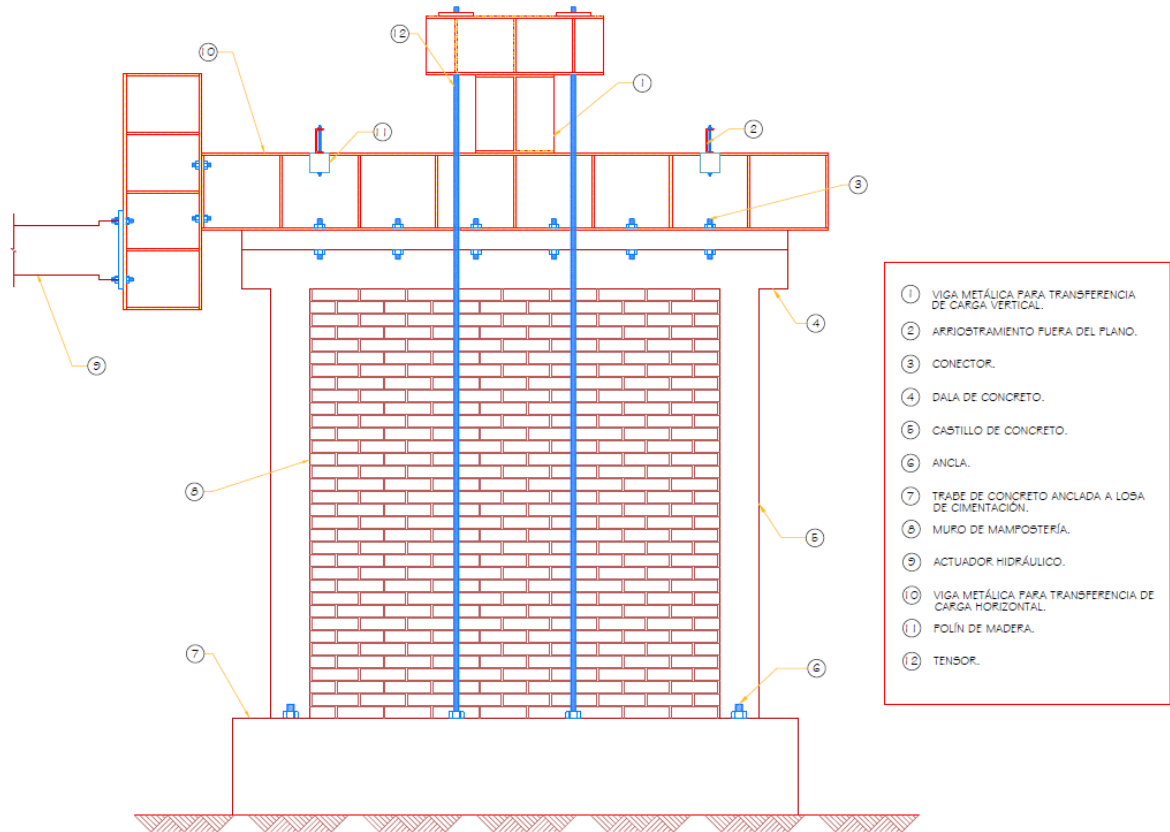
**Figura 21. Arreglo experimental para el ensayo de los especímenes.**

### 3.3. Protocolo de carga

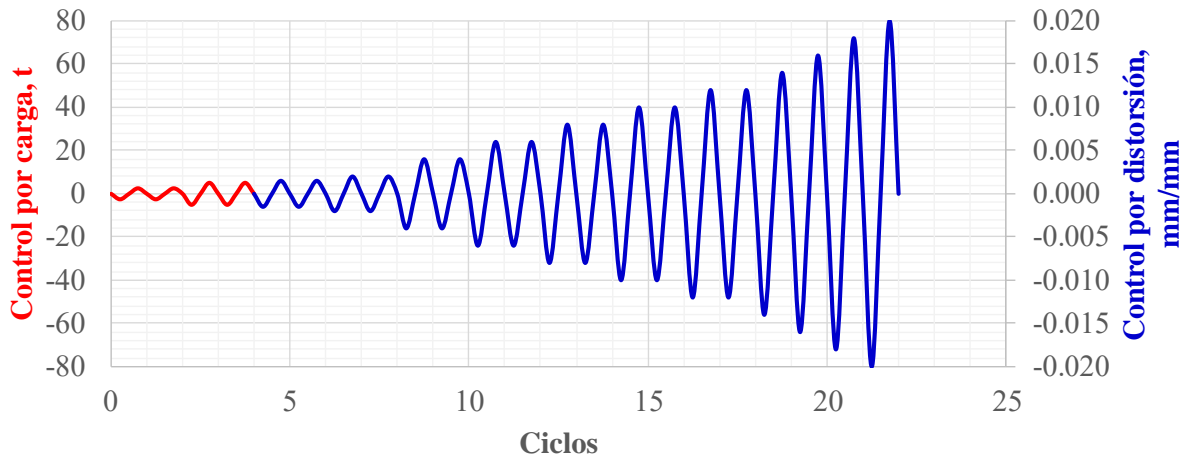
Las pruebas fueron cíclicas reversibles siguiendo las recomendaciones del apéndice A de las NTC-Mampostería (2020), como se aprecia en la **Figura 23**. A continuación, se describen las etapas de aplicación de los ciclos de carga.

- Primero se aplican dos ciclos de carga (Carga 1) de magnitud equivalente al 20% de la capacidad de carga teórica de los muros (es decir: a 2.6 t).
- Luego se aplican dos ciclos de carga (Carga 2) al 40% de la capacidad (5.2 t).
- Finalmente se aplican los ciclos de carga controlados por distorsión lateral.

La distorsión lateral se define como el desplazamiento lateral aplicado entre la altura del muro. En los muros originales (es decir, sin rehabilitación) se aplicaron sucesivamente distorsiones 0.0015, 0.002, 0.004 y 0.005. Para el caso de los muros rehabilitados se aplicaron distorsiones de 0.0015, 0.002, 0.004, 0.006, 0.008, 0.010, 0.012, y así sucesivamente con incrementos de 0.002 hasta lograr la falla del espécimen. Cabe mencionar que se intentó hacer llegar el muro M-1, sin rehabilitación, a una distorsión de 0.006. Sin embargo, antes de llegar a dicha distorsión se presentó una falla súbita en la base del castillo opuesto al actuador. Lo que generó una distorsión de 0.008. Como consecuencia de este incidente, los siguientes muros se limitó la distorsión máxima a 0.005.



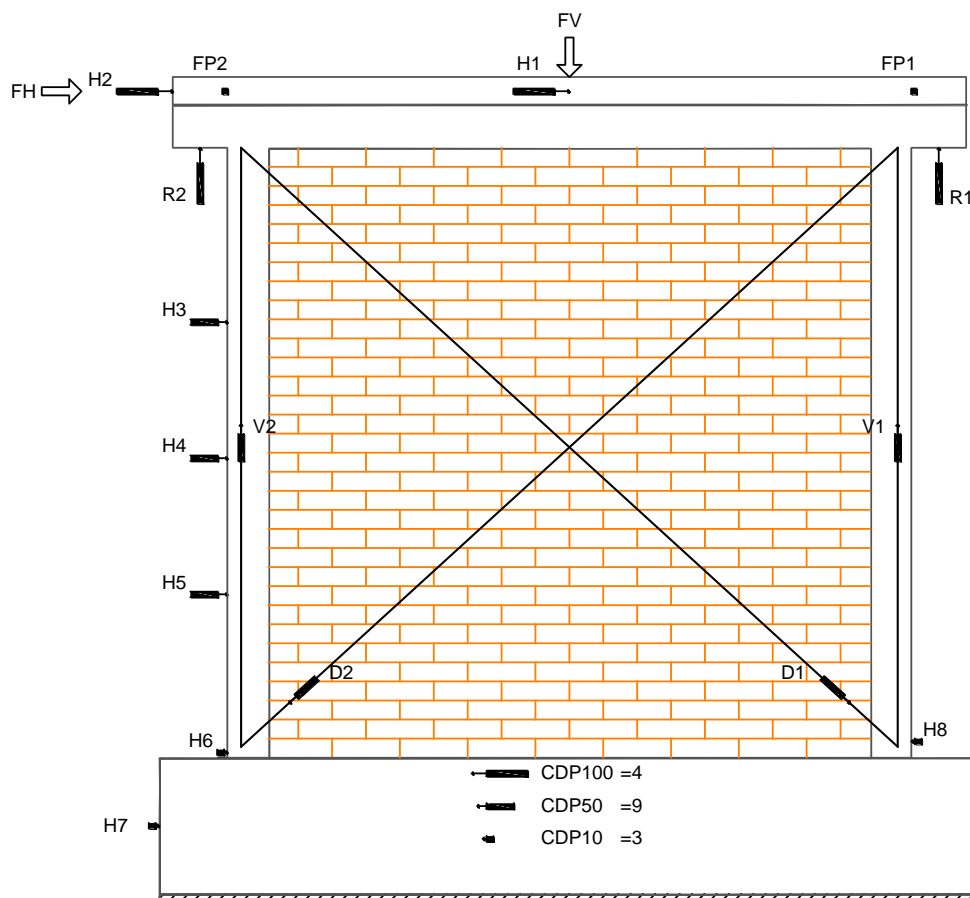
**Figura 22. Espécimen con viga metálica para transferencia de carga vertical.**



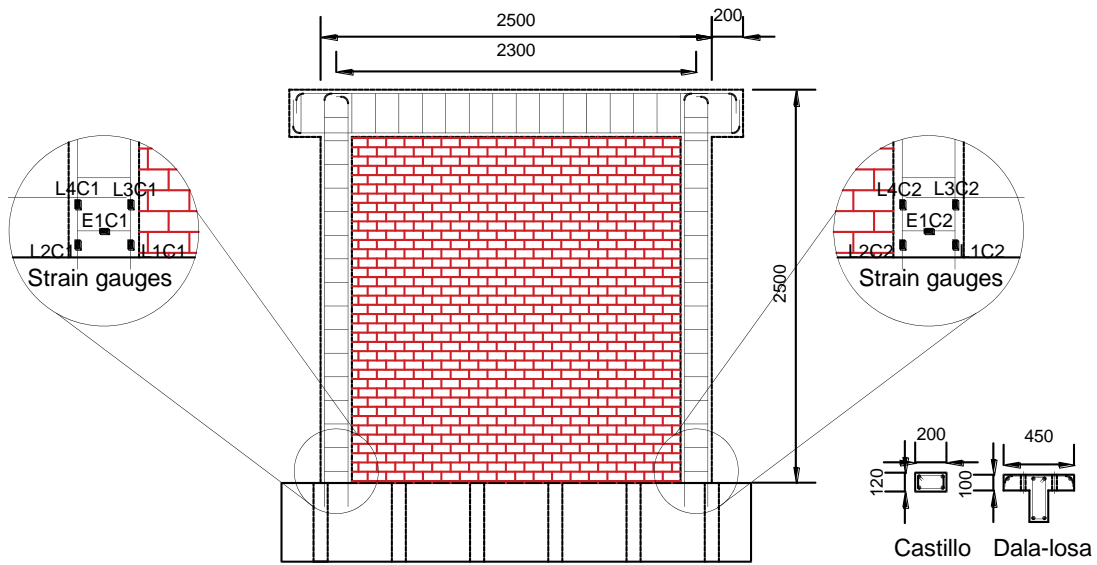
**Figura 23. Protocolo de carga según las NTC-Mampostería (2020).**

### 3.4. INSTRUMENTACIÓN

Para el análisis de este espécimen se colocó instrumentación interna y externa, cuya distribución se encuentra en las **Figura 24** y **Figura 25**, respectivamente. La instrumentación externa consistió tanto en celdas de carga como transductores de desplazamiento. La celda de carga para medir la fuerza vertical aparece como FV, mientras que la celda de carga para medir la carga horizontal aparece como FH. De acuerdo a la **Figura 24** los transductores marcados como H1 hasta H8 miden los desplazamientos horizontales del modelo. Las denominaciones V1 y V2 indican medición de desplazamientos verticales. Los transductores D1 y D2 miden 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. Cabe mencionar que H1 y H2 sirvieron de referencia para el control por desplazamientos en el ensaye del modelo. En cada figura se muestra la simbología utilizada y la posición del aparato de medición en el espécimen.



**Figura 24. Instrumentación externa.**



**Figura 25. Instrumentación interna. (Créditos: Ileana)**

La instrumentación interna fue colocada para conocer la distribución de fuerzas en los elementos estructurales, mediante deformímetros eléctricos (strain gauges) adheridos a barras de refuerzo (**Figura 25**). El tipo de deformímetro usado fue de 2 mm de longitud, tanto en barras longitudinales como en estribos. De los deformímetros colocados, únicamente funcionaron el L1C1, L2C1, L3C1 y L4C1 los otros se dañaron desde la construcción del modelo.



### 3.5. REHABILITACIÓN DE LOS ESPECÍMENES

Los muros fueron rehabilitados mediante técnicas diversas como aplanado con mortero reforzado con mallas electrosoldadas, fibras metálicas, fibras sintéticas, fibras de vidrio, malla de fibra de vidrio y contraventeos restringidos al pandeo. El objetivo principal de dichas técnicas de rehabilitación fue alcanzar y/o superar la capacidad original de resistencia y deformación de los muros. A continuación, se describe cada una de las técnicas.

#### 3.5.1. Construcción de los muros

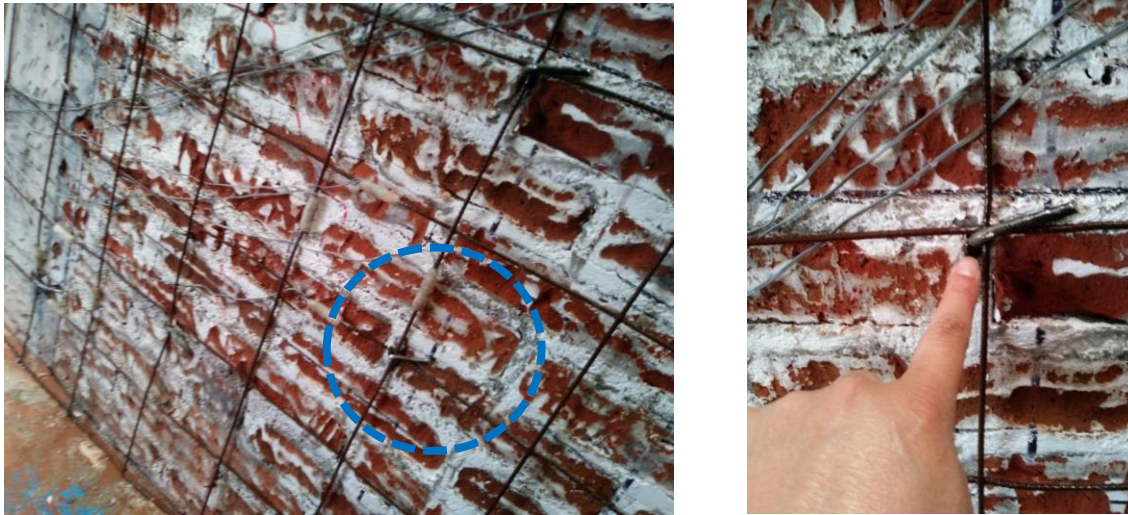
En la **Figura 26**, se muestra el proceso constructivo de los especímenes. Primero se ancló el armado de los castillos en una viga de cimentación previamente construida y las piezas de tabique rojo recocido se pegaron con mortero convencional tipo I. Se levantó completamente el muro de tabique antes de colar los castillos. Posteriormente, se cimbró y se coló monóticamente la losa y la dala de cerramiento.



**Figura 26. Construcción de los especímenes.**

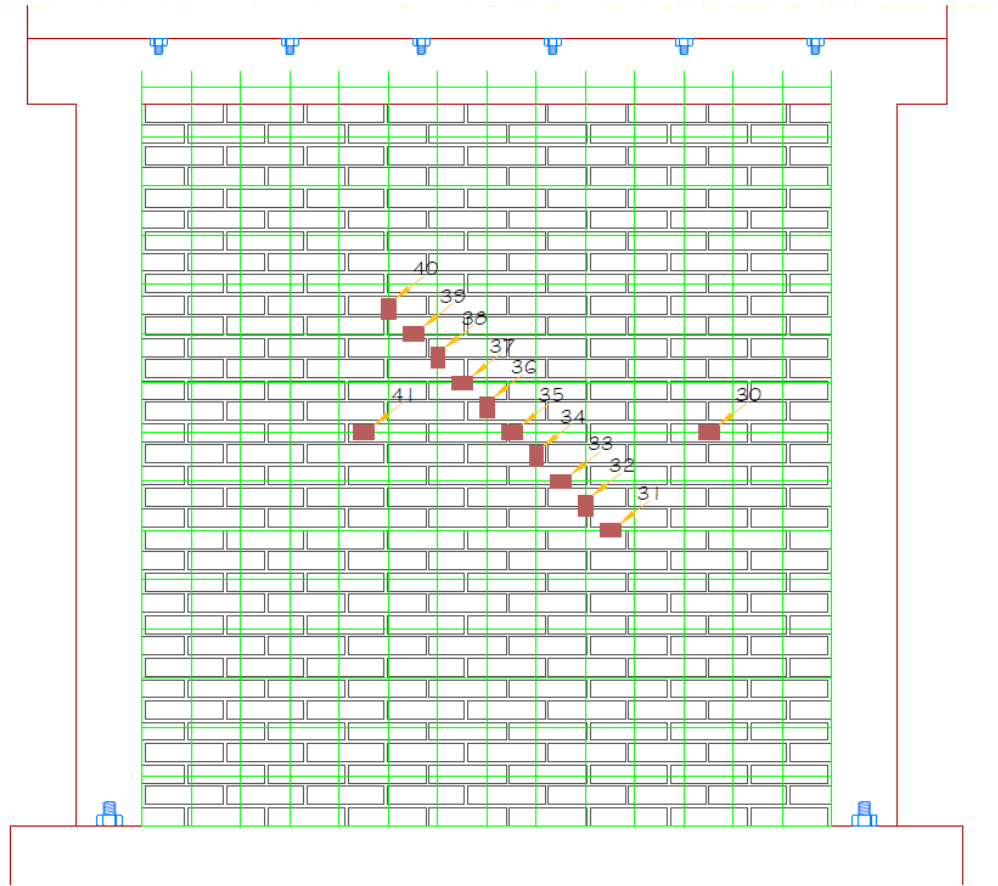
### 3.5.2. Encamisado con Malla electrosoldada

Los especímenes M-1 a M-4, M-6 y M-11 a M-13 fueron rehabilitados con esta técnica. Después de escarificar la mampostería para volver rugosa la superficie, se ancla la malla al muro mediante alambión o clavos para concreto @45 cm según sea el caso (**Figura 27**). Para poder medir el desempeño de la malla, se colocaron Strain Gauges en diferentes puntos según el esquema mostrado en la **Figura 28**. En los especímenes rehabilitados en una sola cara, para lograr un anclaje eficiente de la malla al muro, ésta, además de ser aplicada completamente en la cara rehabilitada, se aplica hasta un ancho de 45 cm en cada esquina de la cara no rehabilitada tal como se aprecia en las **Figura 29** y **Figura 30**. Una vez terminada el encamisado se puede realizar la prueba después de los primeros 28 días, tiempo necesario para que el mortero alcance su resistencia de diseño.



**Figura 27.** Anclaje con alambión o con clavo para concreto que debe aplicarse a cada 45 cm.





**Figura 28. Instrumentación de la malla con Strain Gauge.**



**Figura 29. Aplicación de la malla completamente en la cara rehabilitada.**



**Figura 30. Aplicación de la malla (solo en las esquinas) de la cara no rehabilitada.**

### **3.5.3. Aplanado con mortero reforzado con fibras.**

Al igual que para la rehabilitación con la malla, es necesario escarificar la mampostería para una mejor adhesión del aplanado. La fibra metálica (**Figura 31**, a la izquierda) o la fibra sintética (**Figura 31**, a la derecha) se utiliza como agregado adicional al mortero además del cemento, la arena y el agua. Los muros M-5 y M-12 se rehabilitaron con mortero reforzado con fibras metálicas (proporción 20 kg/m<sup>3</sup>) y los muros M-7 y M-11 se rehabilitaron con mortero reforzado con fibras sintéticas (proporción 10 kg/m<sup>3</sup>). La **Figura 32** muestra cómo se agrega la fibra al mortero y en la **Figura 33** se aprecia como se confinan las esquinas con la malla electrosoldada (solo 45 cm en cada cara).



**Figura 31. Fibra metálica a la izquierda y fibra sintética a la derecha.**





**Figura 32. Mezclado del mortero con la fibra.**



**Figura 33. Muro rehabilitado con fibra.**

#### 3.5.4. Aplanado con malla de fibra de vidrio y mortero industrializado.

En la **Figura 34**, se muestra cómo se prepara el espécimen para su rehabilitación con encamisado con malla de fibra de vidrio. Se escarifica la mampostería como en las técnicas anteriores para lograr una perfecta adhesión entre el aplanado y el muro. Se coloca primero una capa de 0.5 cm de mortero sobre la que se aplica la malla para luego colocar otra capa de 0.5 cm sobre la misma (**Figura 35**). Al finalizar, se agregaron cuatro puntos de anclaje con fibra de vidrio (**Figura 36**). En la **Figura 37** se observa cómo queda el muro recién rehabilitado.

Para poder determinar la aportación de la malla a la resistencia lateral del muro rehabilitado, se construyeron tres muretes de mampostería cuya una cara se aplanó con la misma técnica de rehabilitación del espécimen 8 (**Figura 38**).



**Figura 34. Preparación del muro para la rehabilitación.**





**Figura 35. Aplicación de la malla de fibra de vidrio con mortero industrializado (Sika).**



**Figura 36. Anclaje del aplanado con fibra de vidrio.**





**Figura 37. Muro rehabilitado con malla de fibra de vidrio.**



**Figura 38. Aplanado de muretes con malla de fibra de vidrio para prueba a compresión diagonal.**



### 3.5.5. Encamisado del marco con concreto reforzado.

Se rehabilitó el marco M-10 con encamisado de los castillos y de la cadena. Las nuevas dimensiones de los castillos siendo 35 por 35 cm. En la **Figura 39**, se muestra el proceso de rehabilitación. Primero se escarificó el concreto de los castillos y de la cadena para obtener una superficie rugosa y asegurar una adecuada adhesión entre el concreto viejo y el nuevo. Posteriormente, se procedió a colocar el armado del encamisado para luego cimbrar dejando un espacio en la parte superior para poder colar primero los castillos y posteriormente la cadena.



**Figura 39. Rehabilitación del marco de M-10 con encamisado.**

#### 4. RESULTADOS TEÓRICOS

Con la finalidad de comparar los resultados experimentales con las recomendaciones del capítulo 5 de la NTC-Mampostería (2020), a continuación, se presentan los procedimientos para el cálculo de las resistencias teóricas a fuerza cortante, a compresión pura y a flexo compresión de los muros ensayados, considerando sus propiedades geométricas, así como las propiedades mecánicas de los materiales que los conforman. Se realizan los cálculos para el espécimen 1 y se resumen los resultados para todos los especímenes en la **Tabla 26**. En la misma tabla, se presentan los valores de la rigidez para cada muro.

En la **Tabla 24**, se resumen las propiedades mecánicas y geométricas del espécimen M-1. Se usan estos valores para calcular las resistencias teóricas del muro de mampostería confinada siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 5 de la NTC-Mampostería (2020).

**Tabla 24. Propiedades mecánicas y geométricas**

Resistencia a compresión del concreto	$f'_c = 155.9 \text{ kg/cm}^2$
Acero de refuerzo longitudinal	$f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$
Resistencia a compresión diagonal de la mampostería	$f'_m = 5.98 \text{ kg/cm}^2$
Malla electrosoldada	$f_{yh} = 5,000 \text{ kg/cm}^2$
Espesor de muro	$t = 12 \text{ cm}$
Ancho de castillo	$b_c = 12 \text{ cm}$
Peralte de castillo	$h_c = 20 \text{ cm}$
Acero transversal en castillos	$A_s = 0.63 \text{ cm}^2$
Separación de esfuerzo transversal en castillo	$s = 15 \text{ cm}$
Altura de muro	$H = 250 \text{ cm}$
Longitud de muro	$L = 250 \text{ cm}$
Área en planta de muro	$A = 3,000 \text{ cm}^2$
Peso	$P = 15t$

##### 4.1. RESISTENCIA TEÓRICA A FUERZA DE COMPRESIÓN PURA

Para el cálculo de la resistencia a compresión del muro, se usará la expresión 5.3.1 de las NTC-Mampostería (2020):

$$P_R = F_R F_E \left( f'_m A_T + \sum A_s f_y \right)$$

Donde:

$F_R$ es el factor de reducción a compresión	$F_R = 0.6$
$F_E$ es el factor de esbeltez del muro	$F_E = 0.7$
$f'_m$ es la resistencia a compresión de la mampostería	$f'_m = 34.36 \text{ kg/cm}^2$
$A_T$ es el área total de la sección transversal	$A_s = 3000 \text{ cm}^2$
$A_s$ es el área de acero en la sección transversal	$A_s = 10.16 \text{ cm}^2$
$f_y$ es el módulo de fluencia del acero	$f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

Realizando los cálculos, se obtiene que el espécimen puede soportar una fuerza pura de compresión de:

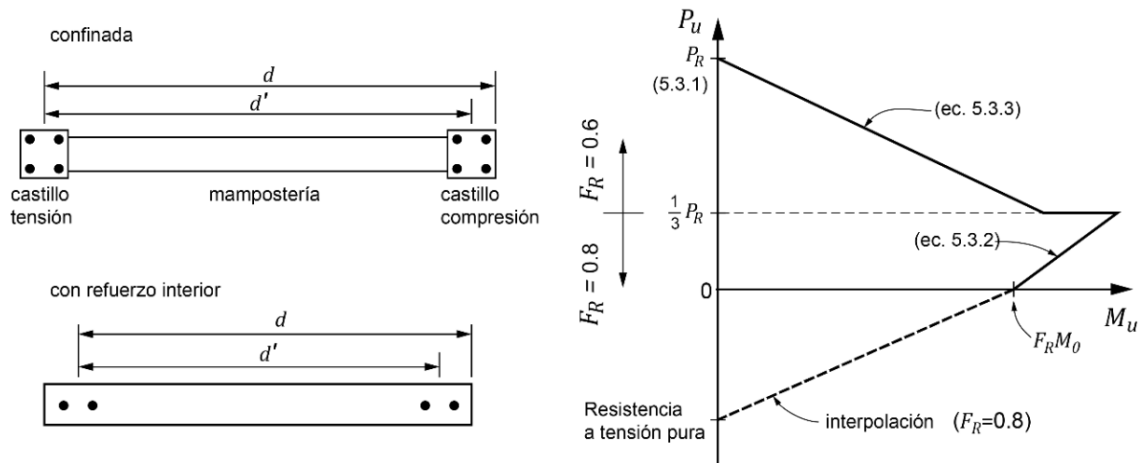
$$P_R = 61.22 t$$

## 4.2 RESISTENCIA TEÓRICA A LEXOCOMPRESIÓN

Para calcular la resistencia teórica a flexo compresión del muro, se obtendrá el diagrama de interacción carga axial-momento flexionante resistente tal como se muestra en la **Figura 40** usando las expresiones 5.3.2 y 5.3.3 de las NTC-Mampostería (2020):

$$M_R = F_R M_0 + P_u d \quad \text{si } 0 \leq P_u \leq \frac{P_R}{3}$$

$$M_R = (1.5 F_R M_0 + 0.15 P_R d) \times \left(1 - \frac{P_u}{P_R}\right) \quad \text{si } P_u > \frac{P_R}{3}$$



**Figura 40.**Diagrama de interacción carga axial – momento según las NTC-Mampostería (2020).

Donde:

$M_0$  es la resistencia a flexión pura del muro

$A_s$  es el área de acero en un castillo

$d'$  es la distancia entre los centroides del acero de los castillos.

$d$  es la distancia entre el centroide del acero de tensión y la fibra a compresión máxima

$P_u$  es carga axial de diseño a compresión

$F_R$  es el factor de reducción de la fuerza de flexo compresión.

tomará igual a 0.8, si  $P_u \leq \frac{P_R}{3}$  e igual a 0.6 en caso contrario.

$$M_0 = A_s f_y d'$$

$$A_s = 5.04 \text{ cm}^2$$

$$d' = 238 \text{ cm}$$

$$d = 244 \text{ cm}$$

$$\begin{cases} 0.8 & \text{si } P_u \leq \frac{P_R}{3} \\ 0.6 & \text{si } P_u > \frac{P_R}{3} \end{cases}$$

Realizando los cálculos, se obtiene que el momento resistente a flexión pura y la resistencia a tensión pura son respectivamente:

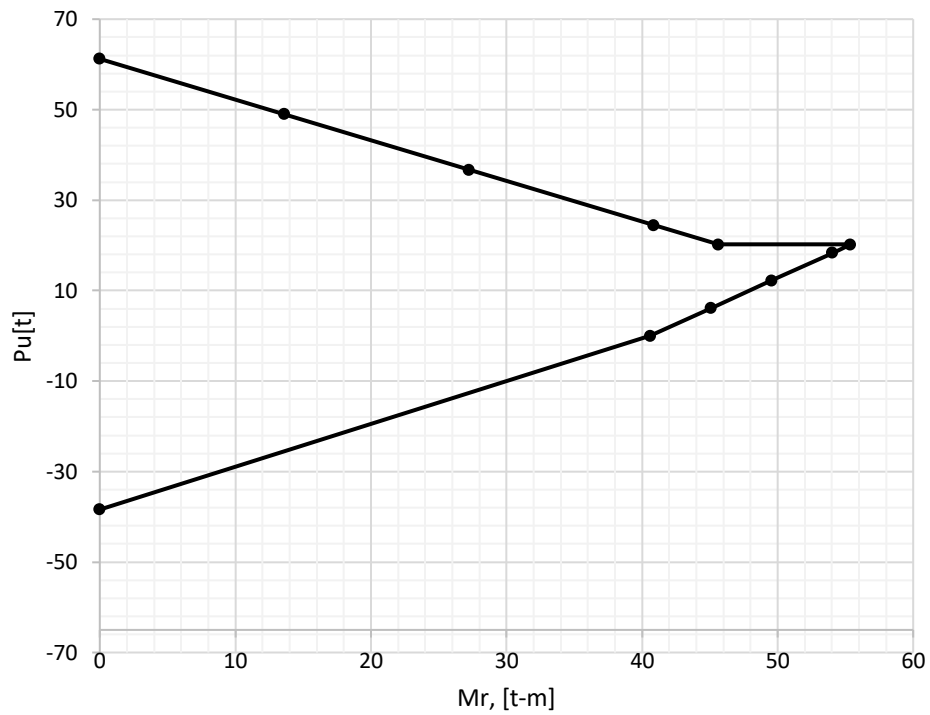
$$M_0 = 50.78 \text{ t} - \text{m}$$

$$P_{Rt} = -m$$

Tabulando las expresiones 5.3.2 y 5.3.3 de las NTC-Mampostería (2020), se obtienen los resultados que se muestran en la **Tabla 25**. Con dichos resultados, se graficó el diagrama de interacción del muro en la **Figura 41**.

**Tabla 25. Cálculos para construcción del diagrama de interacción.**

$\frac{P_u}{P_R}$	$P_u$	$M_R$
0.00	0.00	40.62
0.10	6.12	45.10
0.20	12.24	49.59
0.30	18.36	54.07
0.33	20.20	55.41
<b>0.33</b>	<b>20.20</b>	<b>45.63</b>
<b>0.40</b>	<b>24.49</b>	<b>40.86</b>
<b>0.60</b>	<b>36.73</b>	<b>27.24</b>
<b>0.80</b>	<b>48.97</b>	<b>13.62</b>
<b>1.00</b>	<b>61.22</b>	<b>0.00</b>



**Figura 41. Diagrama de interacción carga axial – momento para el muro M-1.**

### 4.3 RESISTENCIA TEÓRICA A FUERZA LATERAL

1) Cálculo de  $V_{mR}$ :

$$\begin{aligned} \frac{H}{L} = 1 & \Rightarrow f = 1 \\ V_{mR} & = F_R f (0.5v'_m A + 0.3P) \\ & = 11.55t \\ V_{mRmax} & = 1.5F_R v'_m A f \\ & = 9.43t \\ V_{mR} & = 9.43t \end{aligned}$$

2) Cálculo de  $V_{sr}$

$$\begin{aligned} \rho_h & = 0.001 \\ \frac{H}{L} = 1 & \Rightarrow k_0 = 1.3 \\ \eta_s & = 0.50 \\ \alpha & = 0.045 \frac{cm^2}{kg} \\ k_1 & = 1 - \alpha \rho_h f_{yh} \\ & = 0.77 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta & = \frac{V_{mR}}{F_R \rho_h f_{yh} A} (k_0 k_1 - 1) + \eta_s \\ V_{SR} & = F_R \eta \rho_h f_{yh} A \\ & = 4.112t \end{aligned}$$

3) Cálculo de  $V_r$ :

$$\begin{aligned} V_R & = V_{mR} + V_{SR} \\ & = 9.43t + 4.112t \\ & = 13.54t \end{aligned}$$

### 4.4 RIGIDEZ TEÓRICA

Con base en las características de los especímenes, se determinó la Rigidez teórica de los muros de mampostería. Cabe aclarar que la normativa no reconoce el aporte de rigidez que podría generar el recubrimiento de mortero colocado en los muros rehabilitados, ni el daño inicial, por lo que la Rigidez teórica es la misma en todos los casos. A continuación, se muestra el cálculo de la Rigidez original teórica de los muros:

Propiedades mecánicas de la mampostería:

Resistencia a compresión	$f'_m = 24.78 \text{ kg/cm}^2$
Resistencia a compresión diagonal	$v_m = 7.88 \text{ kg/cm}^2$
Módulo de elasticidad: $E = 600f'_m$	$E_m = 20,442 \text{ kg/cm}^2$
Módulo de cortante: $G = 0.2E'_m$	$G_m = 4,088.4 \text{ kg/cm}^2$

Propiedades mecánicas del concreto:

Resistencia a compresión	$f'_c = 155.9 \text{ kg/cm}^2$
Módulo de elasticidad: $E = 8,000\sqrt{f'_c}$	$E_c = 99,887.9 \text{ kg/cm}^2$
Relación modular: $\eta = \frac{E_c}{E_m}$	$\eta = 4.89 \text{ kg/cm}^2$

Geometría:

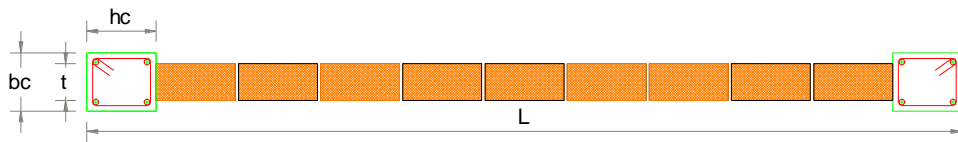


Figura 42. Sección original de muro.

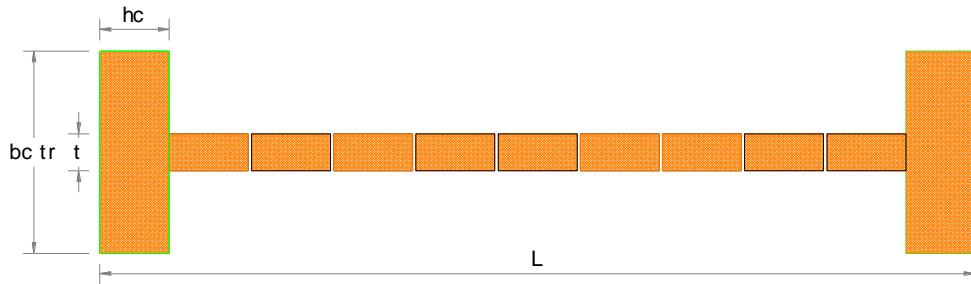


Figura 43. Sección transformada de muro.

Espesor del muro	$t = 12 \text{ cm}$
Longitud del muro	$L = 250 \text{ cm}$
Altura del muro	$H = 250 \text{ cm}$
Ancho de castillo original	$b_c = 12 \text{ cm}$
Ancho de castillo transformado: $b_{ctr} = \eta b_c$	$b_{ctr} = 58.68 \text{ cm}$
Peralte de castillo,	$h_c = 20 \text{ cm}$

Rigidez lateral a cortante del muro:

Considerando un factor de cortante:  $k = \frac{6}{5}$

Área de cortante: $A_v = Lt$	$A_v = 3,000 \text{ m}^2$
Rigidez a cortante: $k_v = \frac{G_m A_v}{kH}$	$k_v = 40,884 \text{ t/cm}$

Rigidez lateral a flexión del muro:

Considerando que el muro está en voladizo:  $\beta = 0$

$$\text{Momento de inercia del muro original: } I = \frac{tL^3}{12} \quad I = 15,625,000 \text{ cm}^4$$

Momento de inercia del muro transformado:

$$I_{tr} = \frac{b_{ctr}L^3}{12} - \frac{(b_{ctr} - t)(L - 2hc)^3}{12} \quad I_{tr} = 40,380,960 \text{ cm}^4$$

$$\text{Rigidez lateral a flexión del muro: } k_f = \frac{12E_m I_{tr}}{(4-3\beta)H^3} \frac{k_f k_v}{k_f + k_v} \quad k_f = 158.5 \frac{t}{cm}$$

Considerando el trabajo en serie de la rigidez lateral a cortante y a flexión del muro.

$$k_m = \frac{k_f k_v}{k_f + k_v} = 32.50 \frac{t}{cm}$$

En la **Tabla 26** se resumen los valores en el cálculo de las resistencias a cortante, a tensión y a compresión de los diferentes muros ensayados. Además, se muestra el valor teórico de la rigidez lateral. En la columna 1 de la Tabla 26, la R después del número de muro significa rehabilitado.

**Tabla 26. Resumen de resistencia y rigidez de los especímenes.**

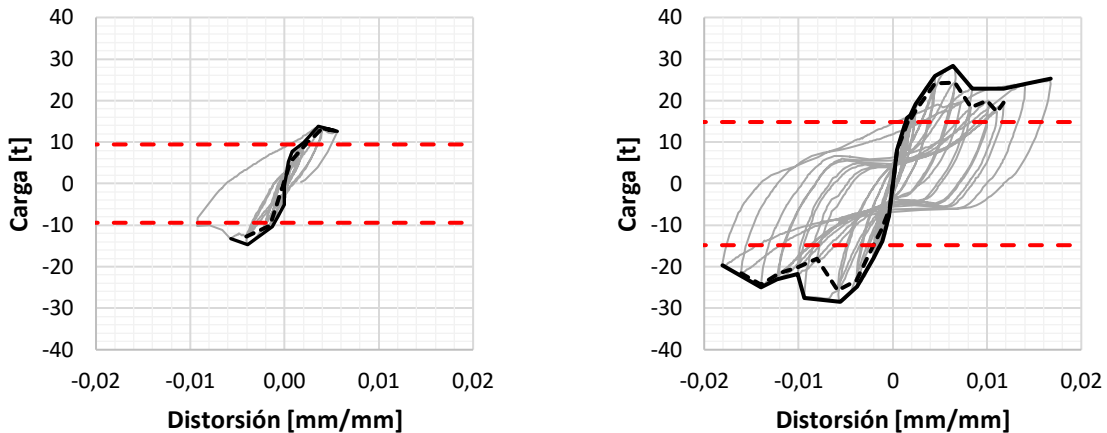
Muro	Resistencia a cortante [t]	Resistencia a compresión pura [t]	Resistencia a tensión pura [t]	Valor teórico de la rigidez lateral [t/cm]
M-1	9.43	61.22	38.40	32.50
M-1R	14.83	61.22	38.40	32.50
M-2	9.43	61.22	38.40	32.50
M-2R	15.94	61.22	38.40	32.50
M-3R	15.94	61.22	38.40	32.50
M-4R	14.83	61.22	38.40	32.50
M-5	9.43	61.22	38.40	32.50
M-5R	19.55	61.22	38.40	32.50
M-6	9.43	61.22	38.40	32.50
M-6R	14.10	61.22	38.40	32.50
M-7	9.43	61.22	38.40	32.50
M-7R	19.60	61.22	38.40	32.50
M-8	9.43	61.22	38.40	32.50
M-8R	19.97	61.22	38.40	32.50
M-9	13.81	67.39	38.40	54.6
M-10	50.23	67.39	38.40	196.6
M-11	9.43	61.22	38.40	32.50
M-11R	19.60	61.22	38.40	32.50
M-12	9.43	61.22	38.40	32.50
M-12R	10.12	61.22	38.40	32.50
M-13	9.43	61.22	38.40	32.50
M-13R	14.83	61.22	38.40	32.50

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los ensayos de los muros se realizaron con pruebas cuasi-estáticas en las cuales las fuerzas y desplazamientos laterales se aplicaron de forma cíclica reversible. De estas pruebas, se obtuvo una cantidad importante de información sobre el comportamiento no lineal de los muros: curvas de histéresis y sus envolventes, energía disipada, factor de amortiguamiento equivalente, grietas pico y grietas residuales, degradación de resistencia y de rigidez. En las secciones siguientes, se muestran los resultados obtenidos.

### 5.1. CURVAS DE HISTÉRESIS Y SUS ENVOLVENTES

Cuando los muros son sometidos a carga cíclica reversible, se obtiene una curva de histéresis que representa el comportamiento no lineal en ambas direcciones del muro. En las **Figura 44** a **Figura 54**, se muestran las curvas de histéresis de los especímenes originales y rehabilitados. En línea gris se ven las curvas de histéresis. En línea negra continua se muestra la envolvente del primer ciclo de carga, mientras que la línea negra discontinua muestra la envolvente de la repetición. Las líneas discontinuas rojas, horizontales, muestran la resistencia teórica según las (NTC-DCEM, 2020). Se puede apreciar que, salvo el espécimen 13 que fue construido con armex, todos los especímenes tuvieron capacidades de resistencia y deformación superior a los valores teóricos calculados con base en las (NTC-DCEM, 2020). Además, las capacidades de los modelos rehabilitados con las diversas técnicas se incrementaron de manera muy importante.

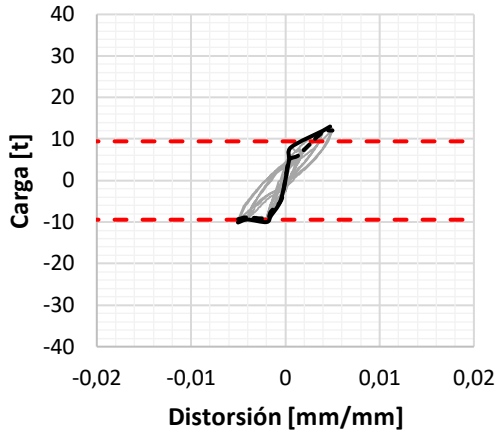


a) M-1

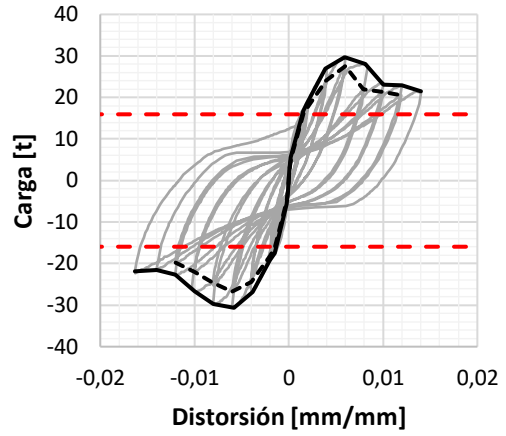
b) M-1R

**Figura 44. Curvas de histéresis de los especímenes M-1 y M-1R.**



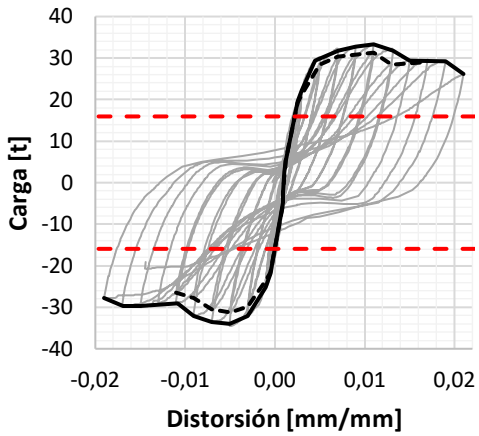


a) M-2

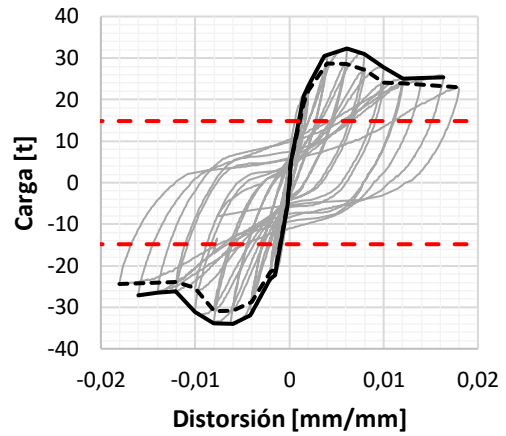


b) M-2R

**Figura 45. Curvas de histéresis de los especímenes M-2 y M-2R.**

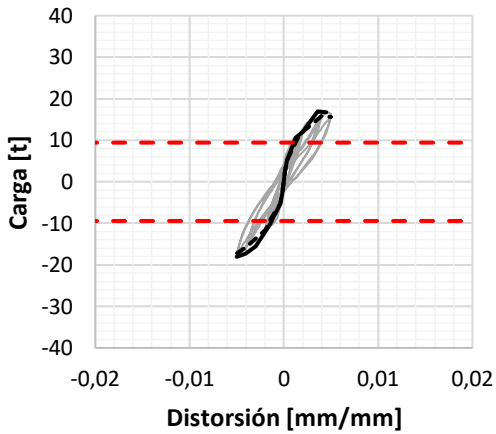


a) M-3R

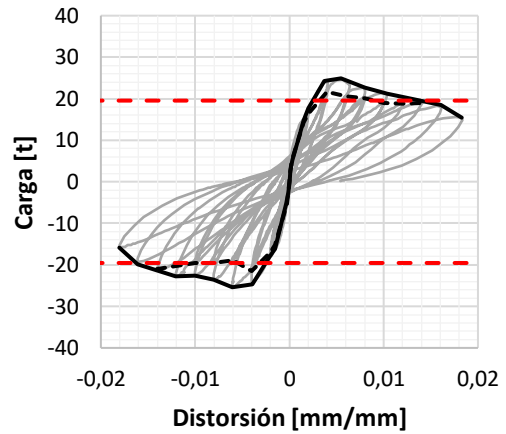


b) M-4R

**Figura 46. Curvas de histéresis de los especímenes M-3R y M-4R.**

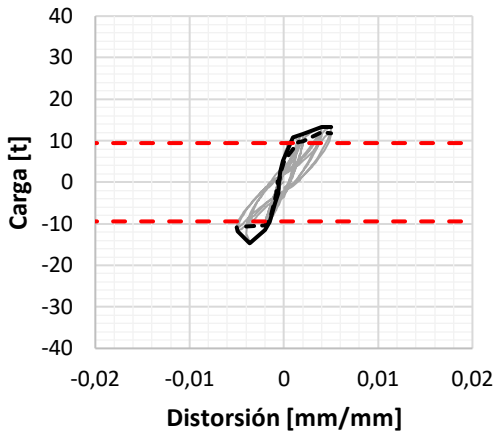


a) M-5

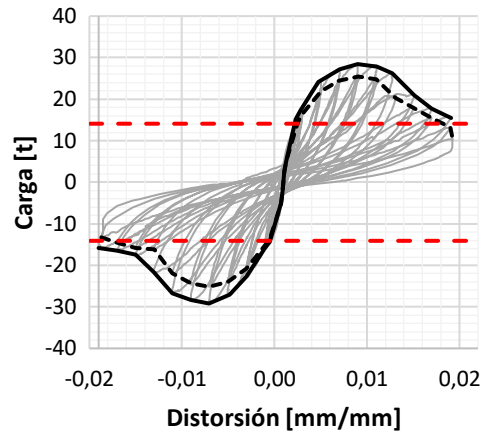


b) M-5R

**Figura 47. Curvas de histéresis de los especímenes M-5 y M-5R.**

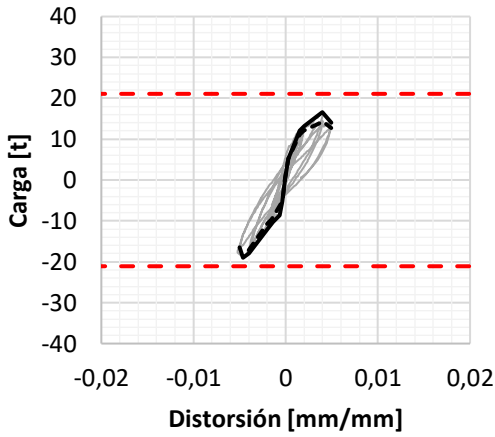


a) M-6

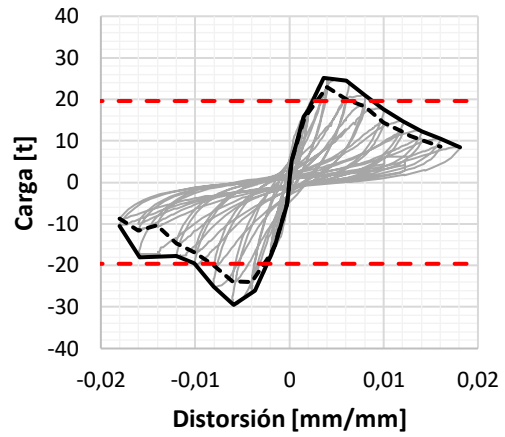


b) M-6R

**Figura 48. Curvas de histéresis de los especímenes M-6 y M-6R.**

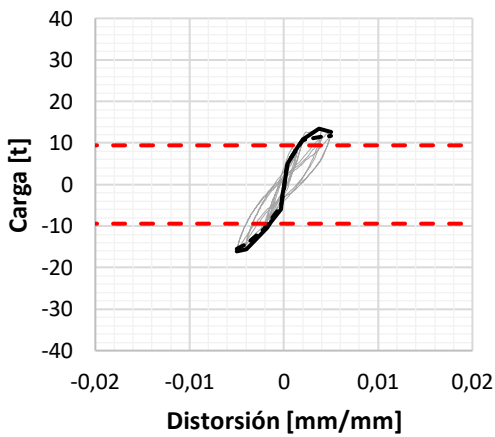


a) M-7

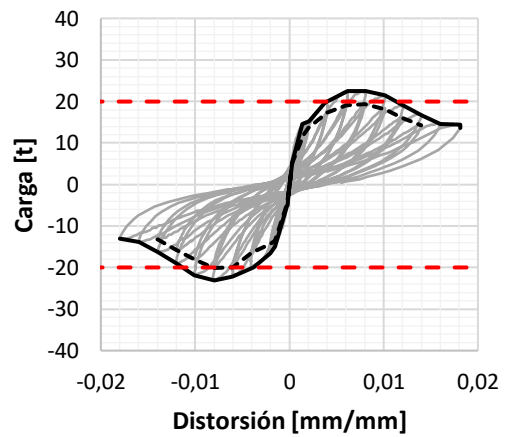


b) M-7R

**Figura 49. Curvas de histéresis de los especímenes M-7 y M-7R.**

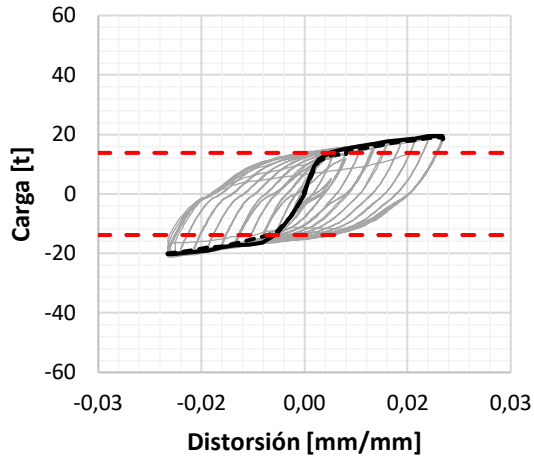


a) M-8

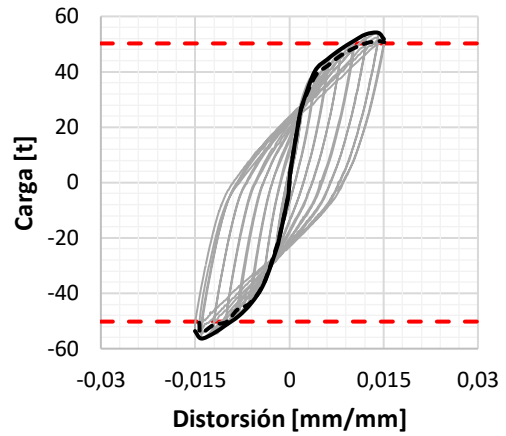


b) M-8R

**Figura 50. Curvas de histéresis de los especímenes M-8 y M-8R.**

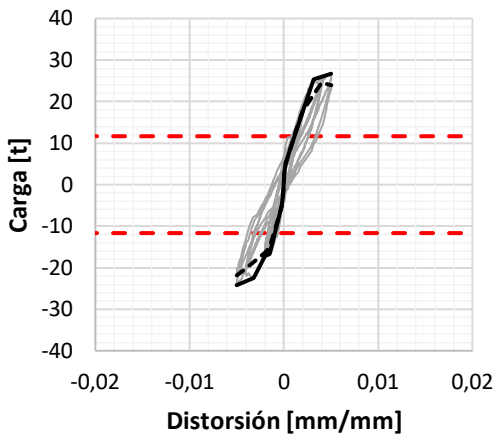


a) M-9

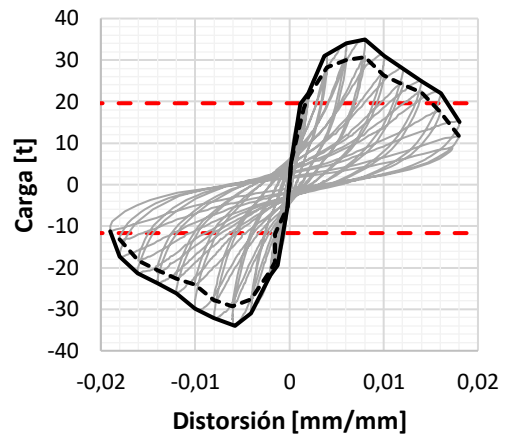


b) M-10

**Figura 51. Curvas de histéresis de los especímenes M-9 y M-10.**

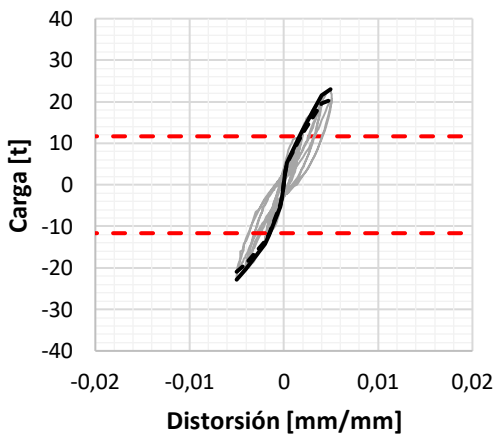


a) M-11

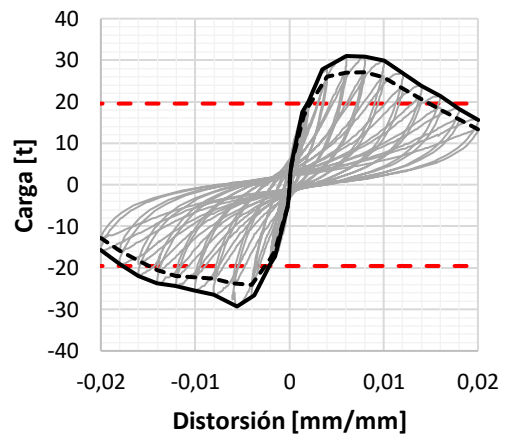


b) M-11R

**Figura 52. Curvas de histéresis de los especímenes M-11 y M-11R.**

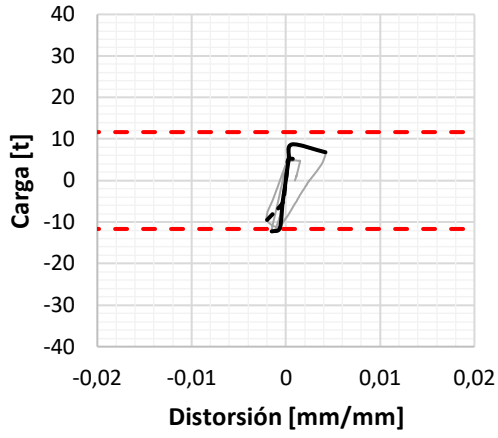


a) M-12

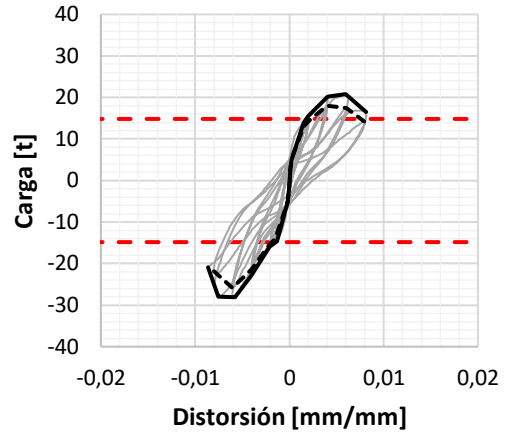


b) M-12R

**Figura 53. Curvas de histéresis de los especímenes M-12 y M-12R.**



a) M-13



b) M-13R

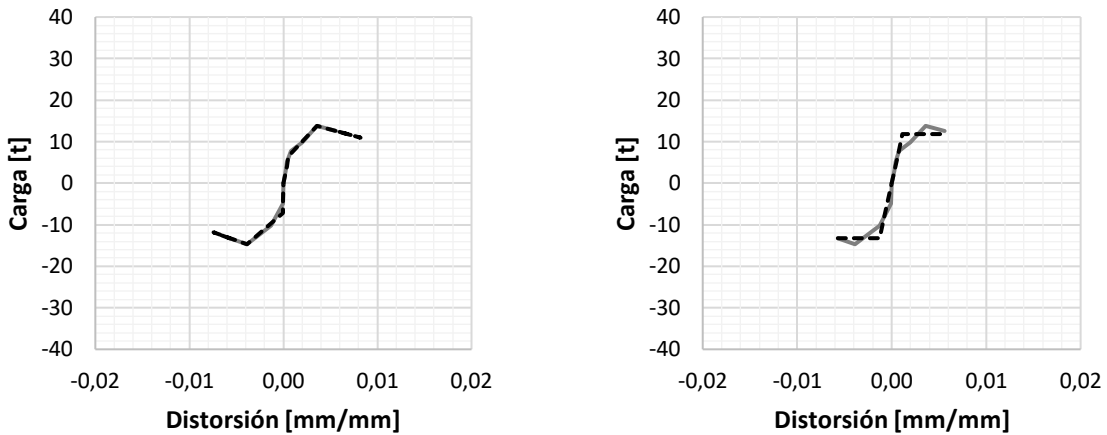
**Figura 54. Curvas de histéresis de los especímenes M-13 y M-13R.**

## 5.2. MODELO ELASTOPLÁSTICO EQUIVALENTE

Se determinaron dos modelos elasto-plásticos, uno trilineal y otro bilineal. Ambos modelos se calcularon con base en el Apéndice A de las (NTC-DCEM, 2017), que especifica que:

- El área bajo la curva del modelo elasto-plástico equivalente es igual al área bajo la curva de la envolvente de la curva fuerza lateral contra distorsión obtenida experimentalmente considerada hasta la distorsión última  $\theta_u$ ; y
- La ordenada de la intersección de la rama ascendente del modelo elasto-plástico equivalente con la envolvente experimental es  $0.6 R_y$ .

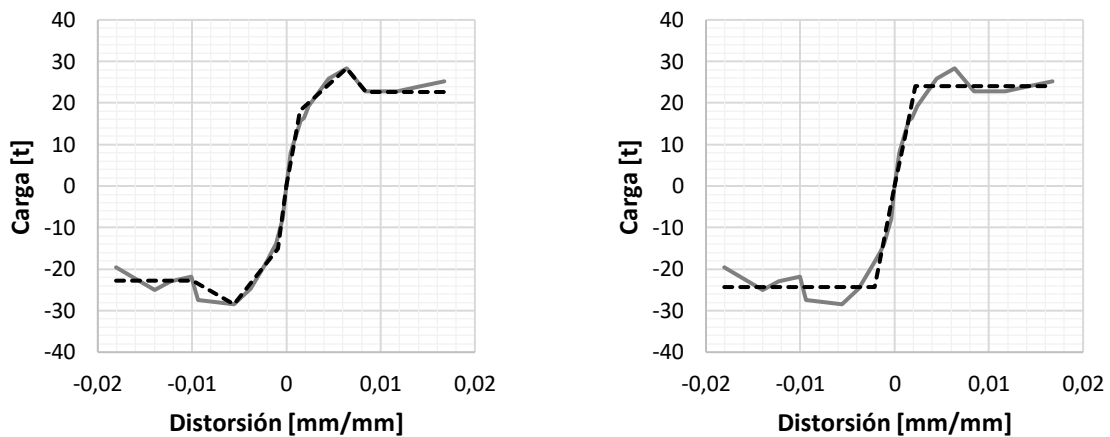
Se calcularon los parámetros  $\theta_y$  trilineal  $R_y$  con base en estos requisitos. Los resultados para cada espécimen se muestran a continuación en las **Figura 55** a **Figura 76**. Se decidió usar ambos modelos porque, aunque la norma recomienda el modelo bilineal, el trilineal se adapta mejor a la envolvente del diagrama de histéresis. Nótese que, después de una caída del 20% de la resistencia, se consideró que la curva era horizontal (o constante).



a) Modelo trilineal

b) Modelo bilineal

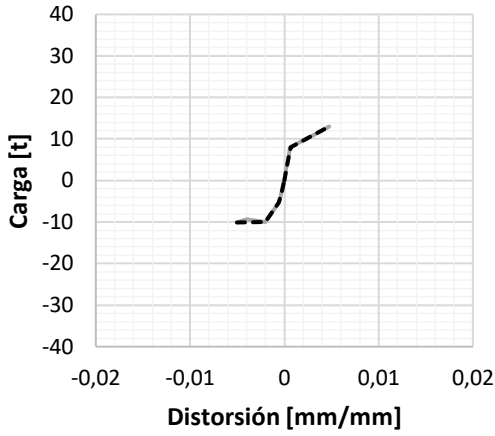
**Figura 55. Modelo elasto-plástico equivalente de M-1.**



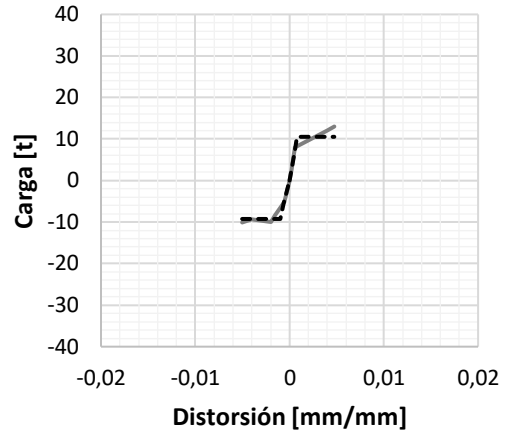
a) Modelo trilineal

b) Modelo bilineal

**Figura 56. Modelo elasto-plástico equivalente de M-1R.**

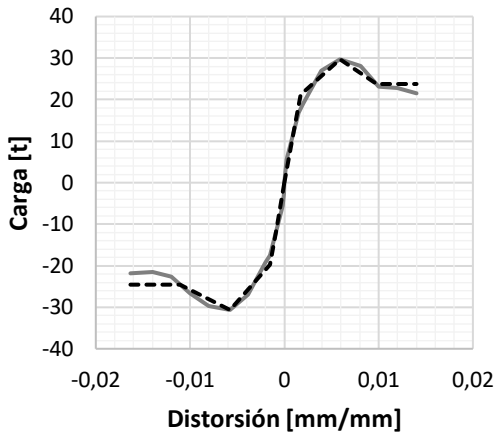


a) Modelo trilineal

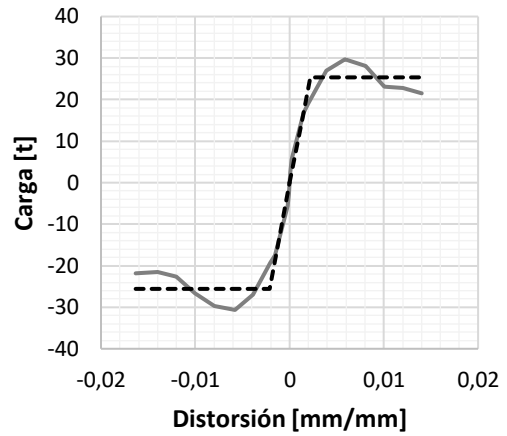


b) Modelo bilineal

**Figura 57. Modelo elastoplástico equivalente de M-2.**

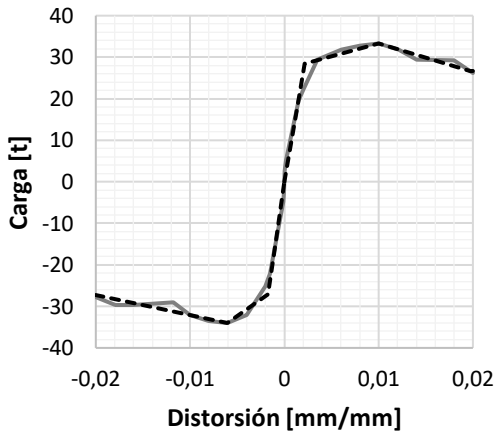


a) Modelo trilineal

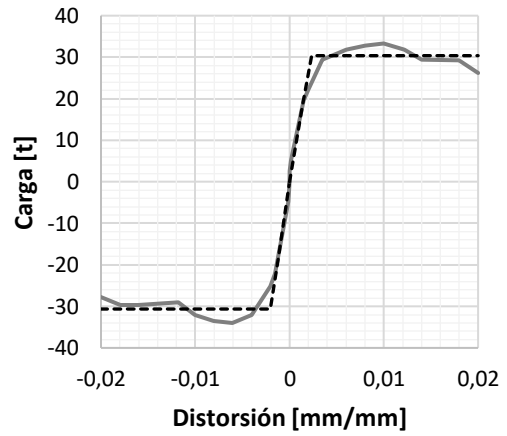


b) Modelo bilineal

**Figura 58. Modelo elastoplástico equivalente de M-2R.**

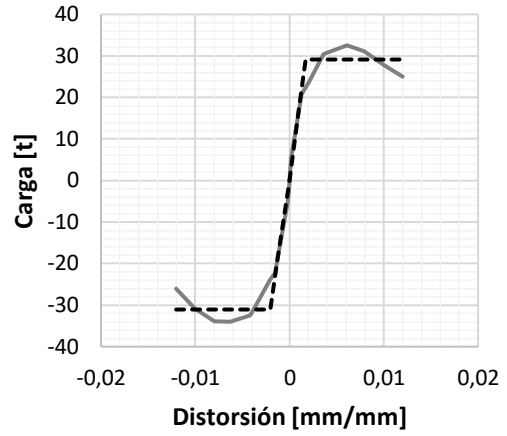
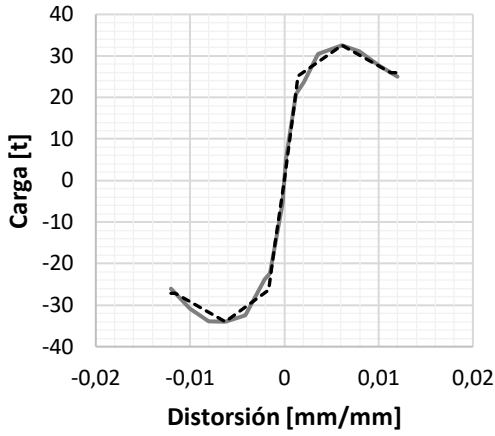


a) Modelo trilineal



b) Modelo bilineal

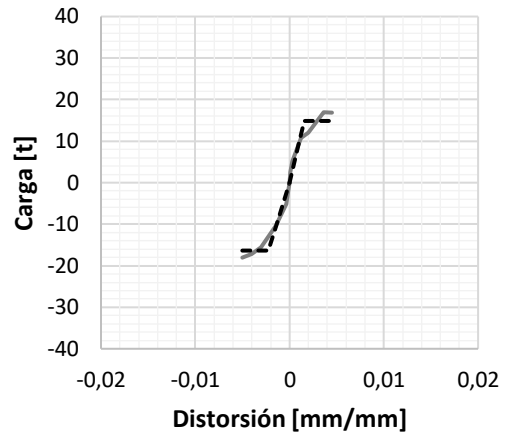
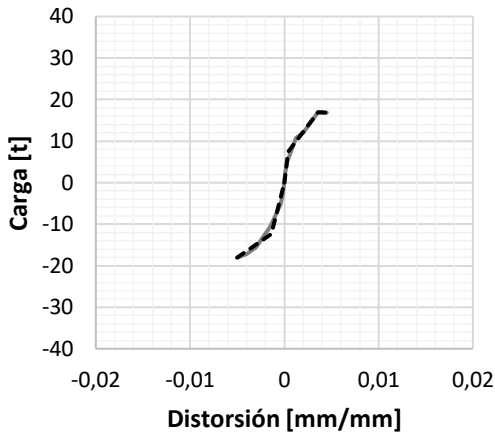
**Figura 59. Modelo elastoplástico equivalente de M-3R.**



a) Modelo trilineal

b) Modelo bilineal

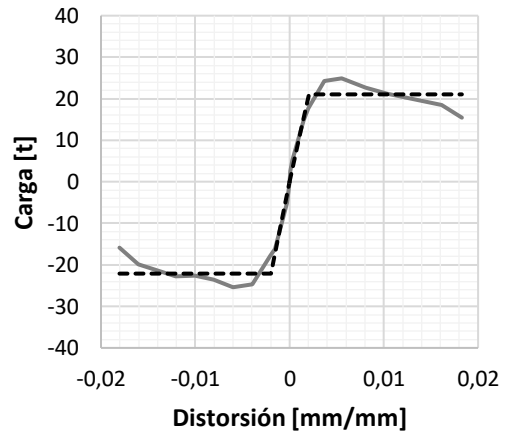
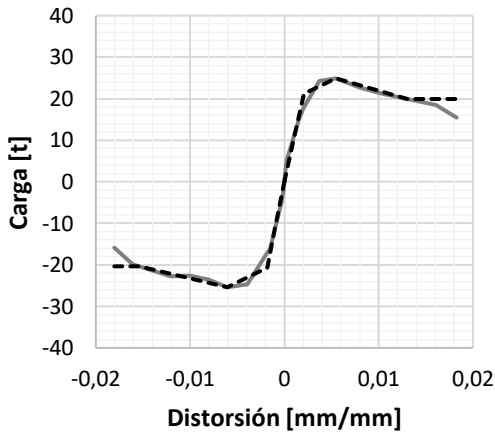
**Figura 60. Modelo elastoplástico equivalente de M-4R.**



a) Modelo trilineal

b) Modelo bilineal

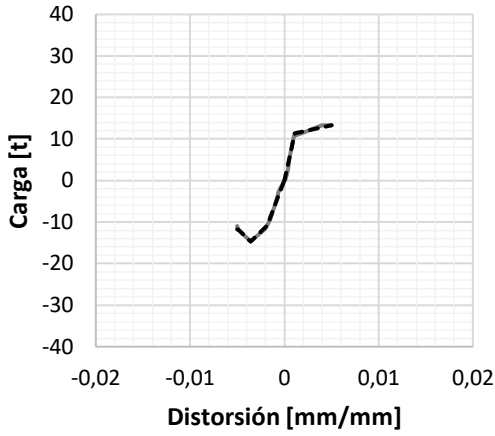
**Figura 61. Modelo elastoplástico equivalente de M-5.**



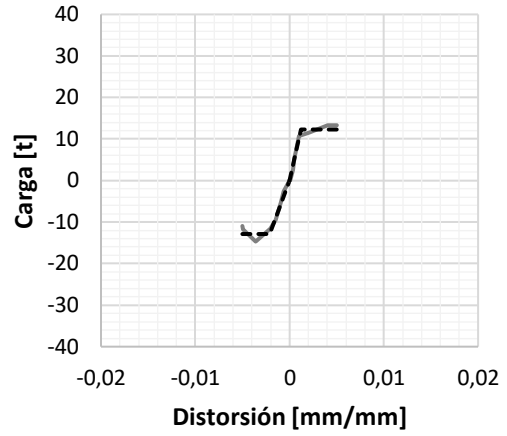
a) Modelo trilineal

b) Modelo bilineal

**Figura 62. Modelo elastoplástico equivalente de M-5R.**

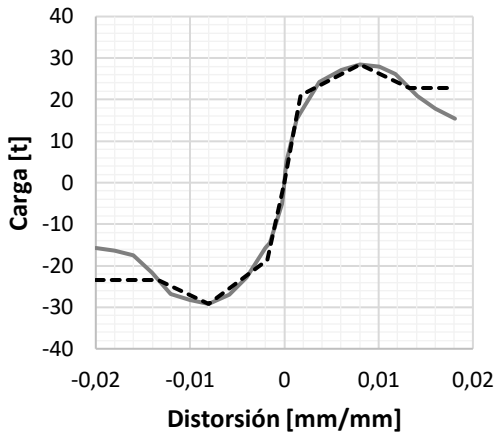


a) Modelo trilineal

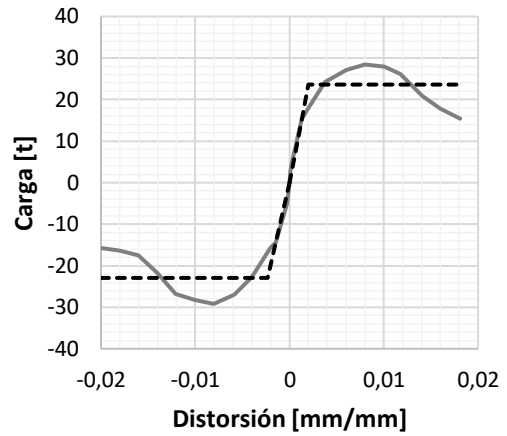


b) Modelo bilineal

**Figura 63. Modelo elastoplástico equivalente de M-6.**

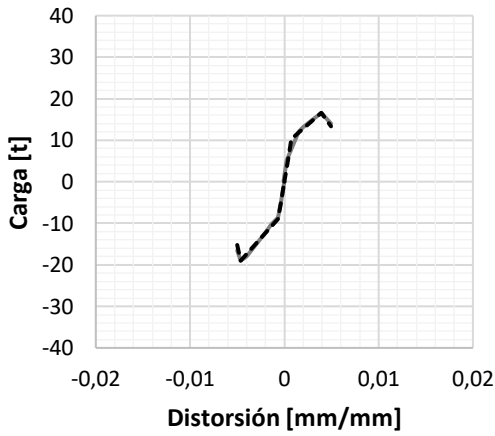


a) Modelo trilineal

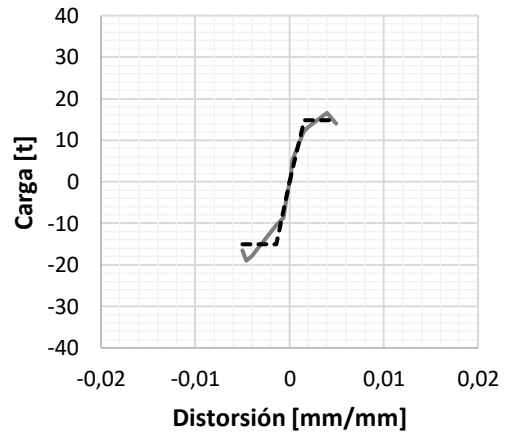


b) Modelo bilineal

**Figura 64. Modelo elastoplástico equivalente de M-6R.**



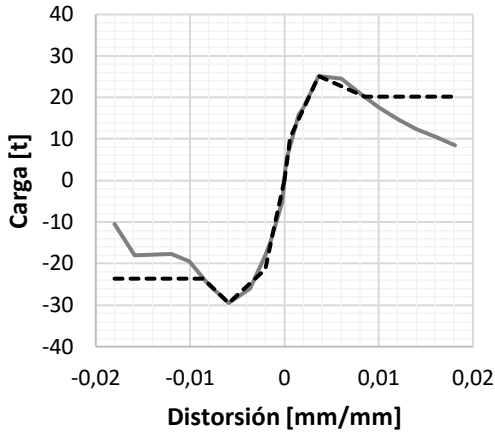
a) Modelo trilineal



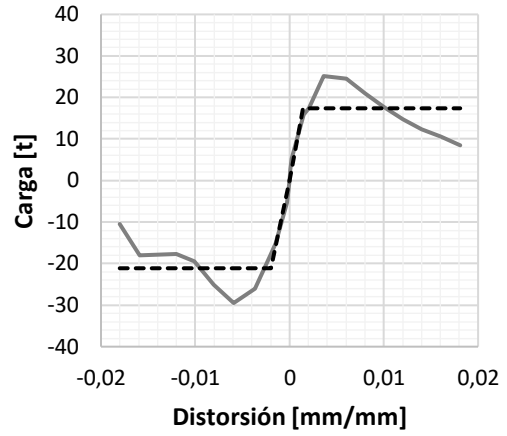
b) Modelo bilineal

**Figura 65. Modelo elastoplástico equivalente de M-7.**



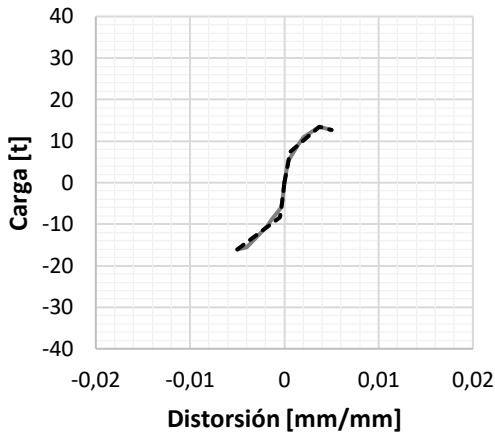


a) Modelo trilineal

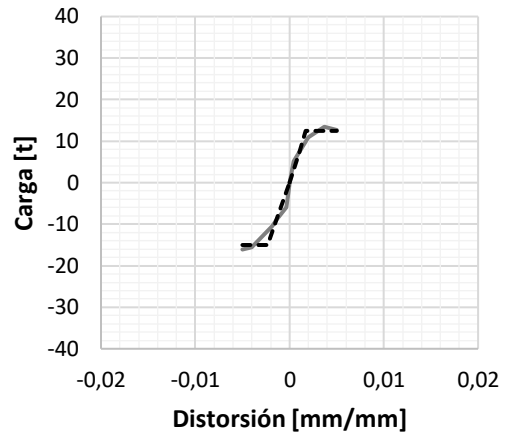


b) Modelo bilineal

**Figura 66. Modelo elastoplástico equivalente de M-7R.**

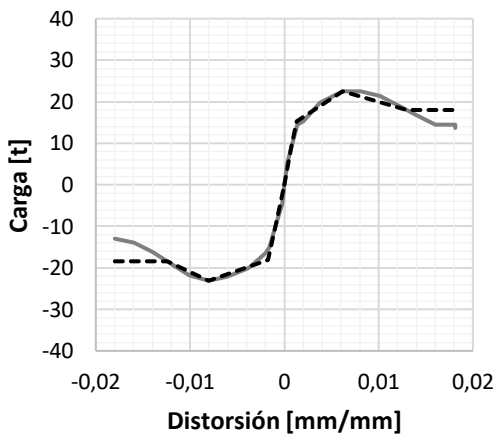


a) Modelo trilineal

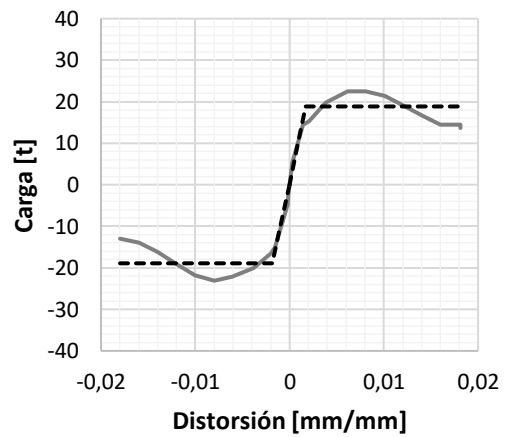


b) Modelo bilineal

**Figura 67. Modelo elastoplástico equivalente de M-8.**

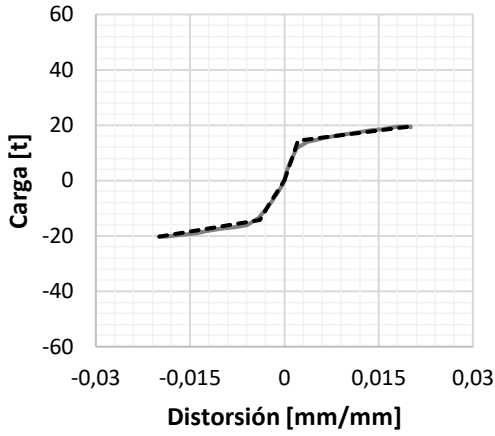


a) Modelo trilineal

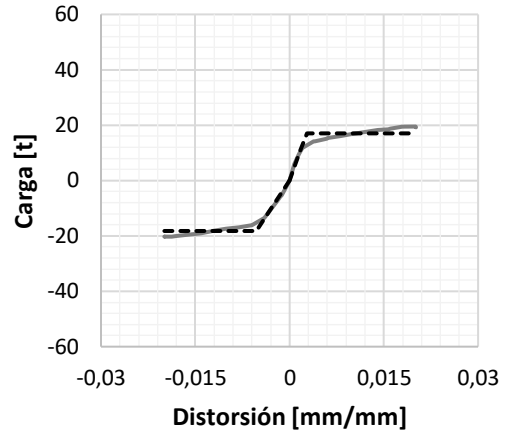


b) Modelo bilineal

**Figura 68. Modelo elastoplástico equivalente de M-8R.**

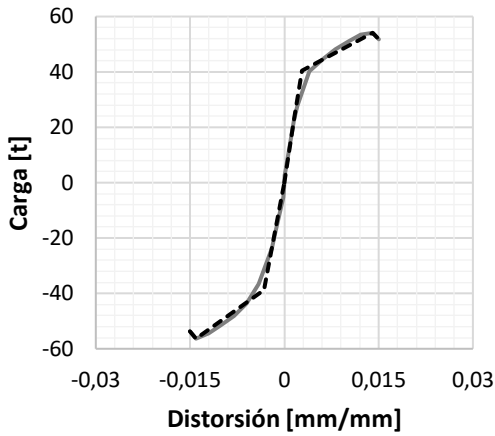


a) Modelo trilineal

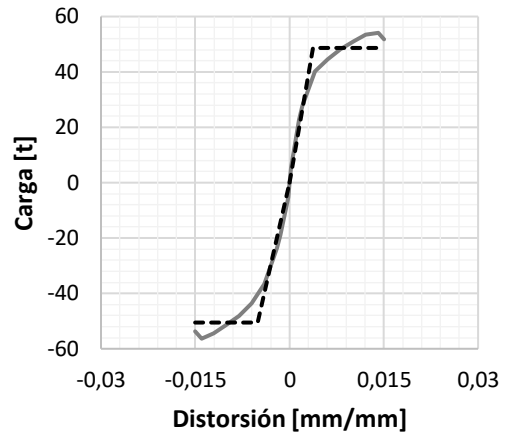


b) Modelo bilineal

**Figura 69. Modelo elastoplástico equivalente de M-9.**

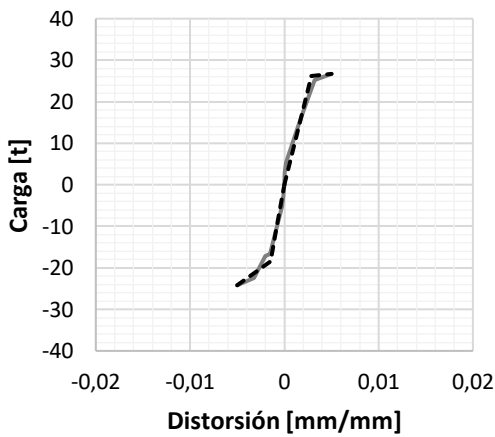


a) Modelo trilineal

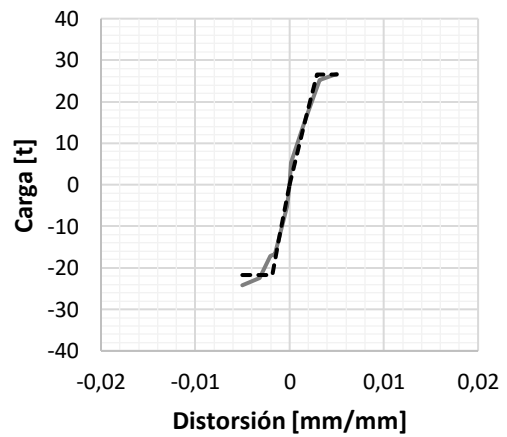


b) Modelo bilineal

**Figura 70. Modelo elastoplástico equivalente de M-10.**

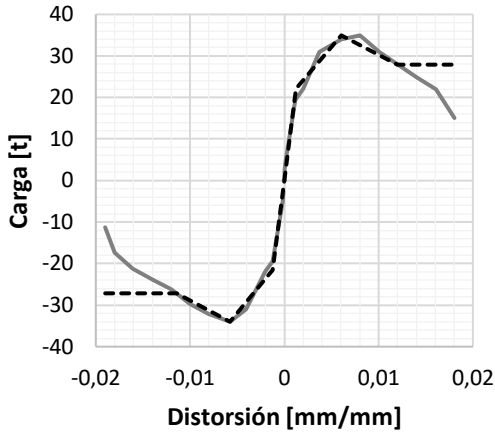


a) Modelo trilineal

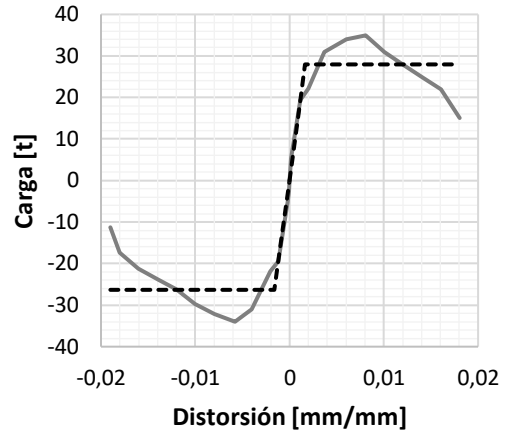


b) Modelo bilineal

**Figura 71. Modelo elastoplástico equivalente de M-11.**

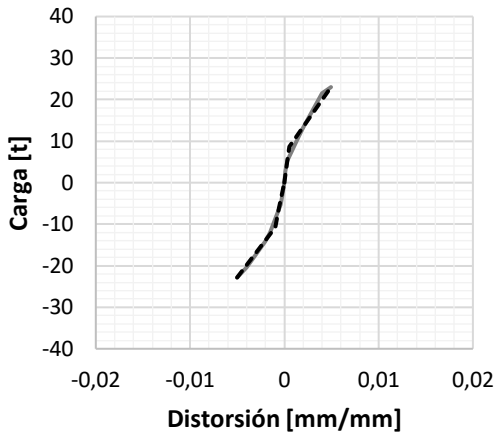


a) Modelo trilineal

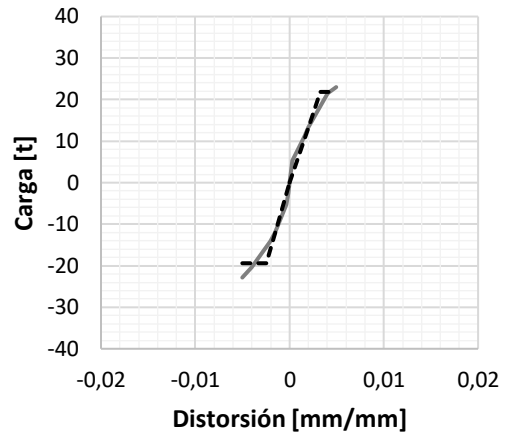


b) Modelo bilineal

**Figura 72. Modelo elastoplástico equivalente de M-11R.**

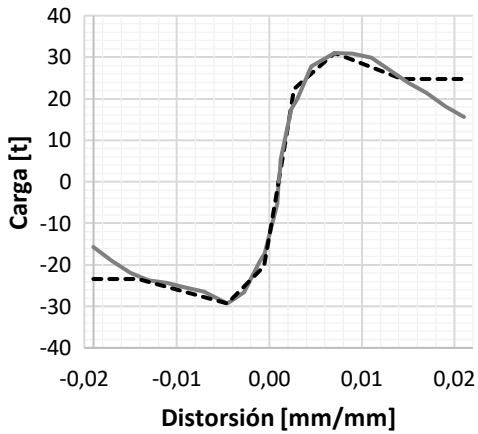


a) Modelo trilineal

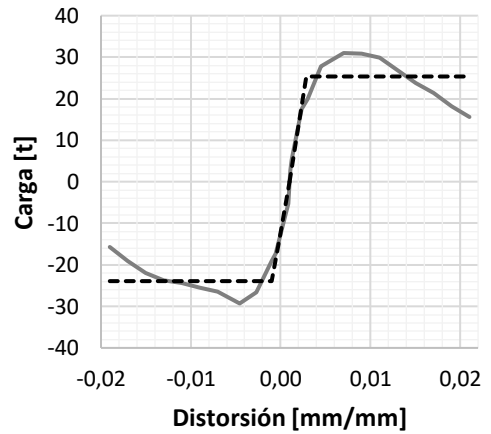


b) Modelo bilineal

**Figura 73. Modelo elastoplástico equivalente de M-12.**

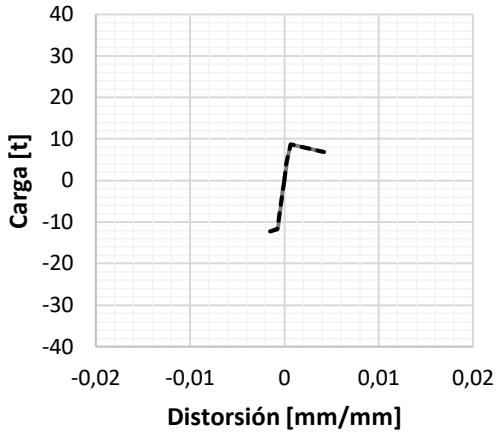


a) Modelo trilineal

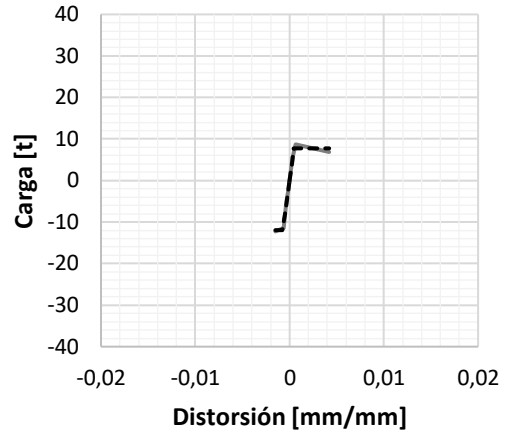


b) Modelo bilineal

**Figura 74. Modelo elastoplástico equivalente de M-12R.**

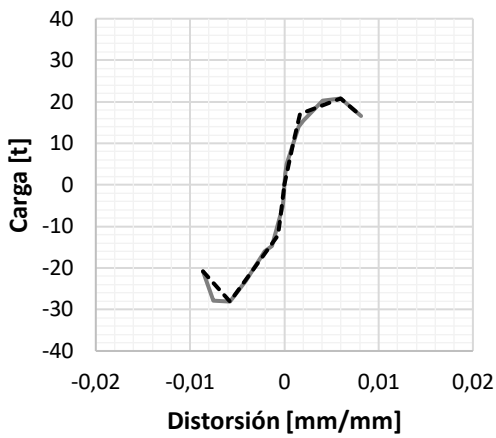


a) Modelo trilineal

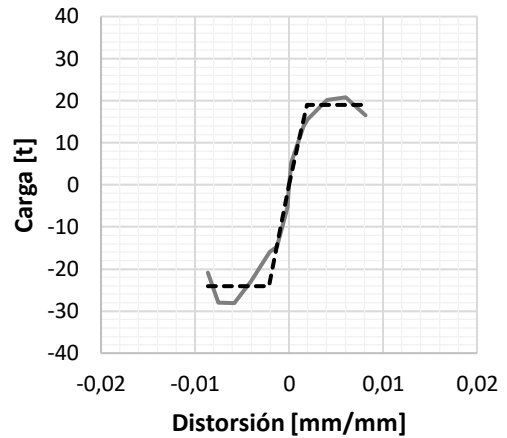


b) Modelo bilineal

**Figura 75. Modelo elastoplástico equivalente de M-13.**



a) Modelo trilineal

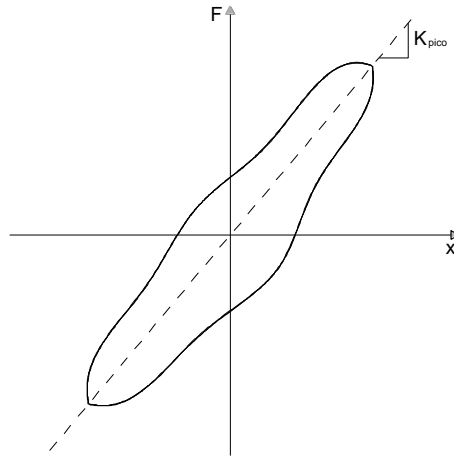


b) Modelo bilineal

**Figura 76. Modelo elastoplástico equivalente de M-13R.**

### 5.3. DEGRADACIÓN DE RIGIDEZ PICO A PICO

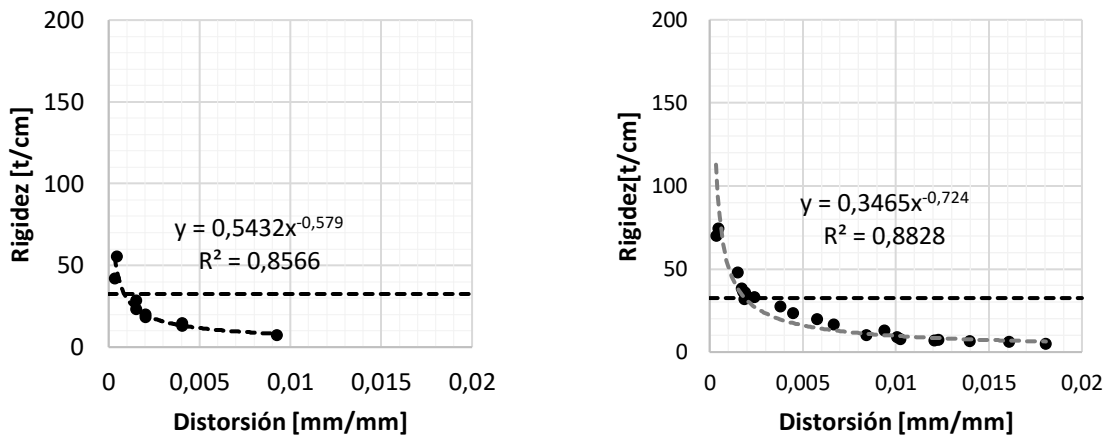
Una de las principales formas de establecer el grado de degradación de la rigidez consiste en el cálculo de la rigidez pico a pico de cada ciclo de carga. Es decir, obteniendo una línea secante que une el origen con los puntos de corte máximo y distorsión máxima en cada ciclo de carga, así como se muestra en la **Figura 77**.



**Figura 77. Diagrama de cálculo de la rigidez pico a pico.**

En las **Figura 78 a Figura 88**, se grafica la degradación de rigidez de cada espécimen junto con una curva de tendencia y el valor de rigidez teórico previamente calculado. En el eje vertical de esas gráficas se representa el valor de la rigidez en t/cm y en el eje horizontal se representa el valor adimensional de la distorsión.

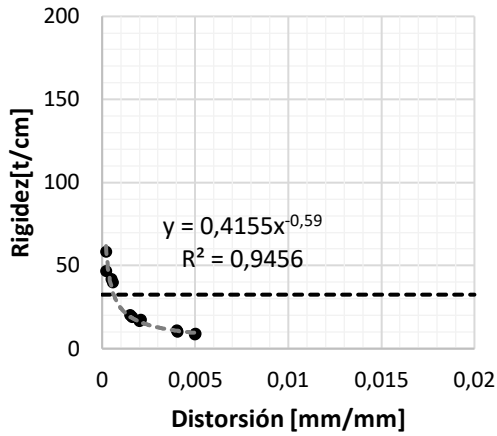
Se observa que al principio de las pruebas la rigidez es significativamente alta. Sin embargo, conforme la demanda de deformación aumenta, ésta se decae drásticamente llegando incluso a ser menor que el valor teórico.



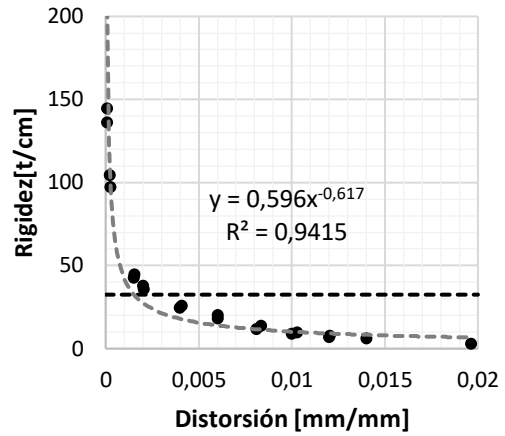
a) M-1

b) M-1R

**Figura 78. Degradación de rigidez de M-1 y M-1R.**

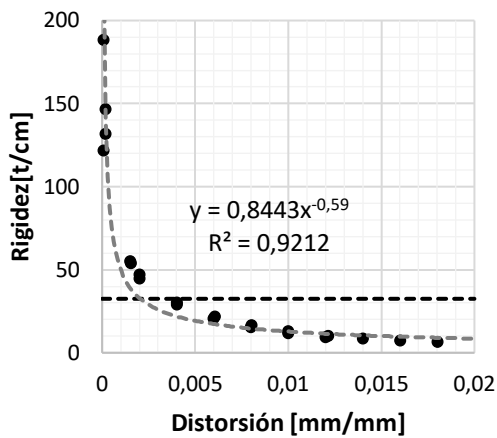


a) M-2

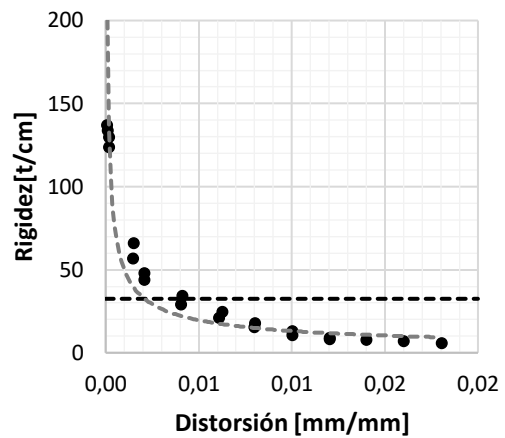


b) M-2R

**Figura 79. Degradación de rigidez de M-2 y M-2R.**

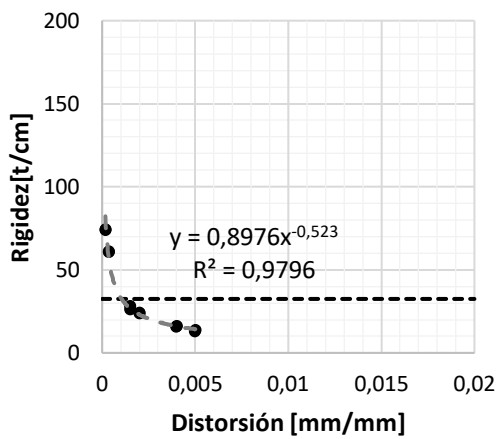


a) M-3R

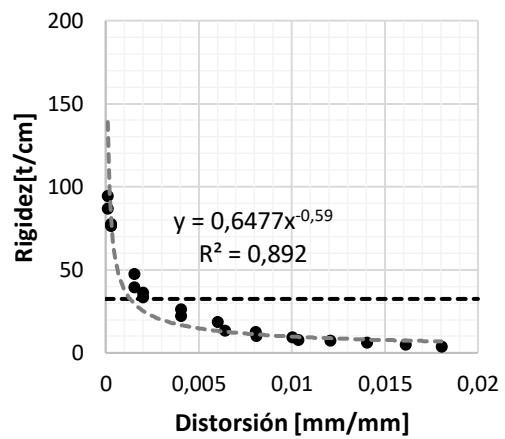


b) M-4R

**Figura 80. Degradación de rigidez de M-3R y M-4R.**

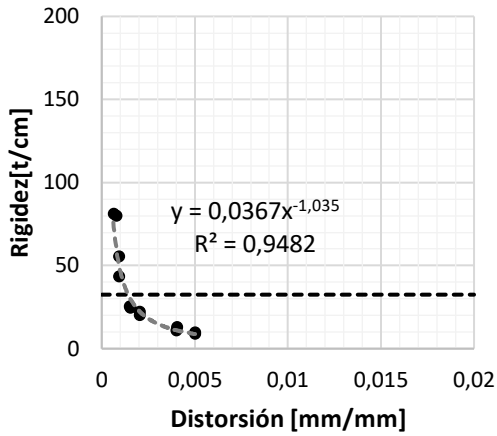


a) M-5

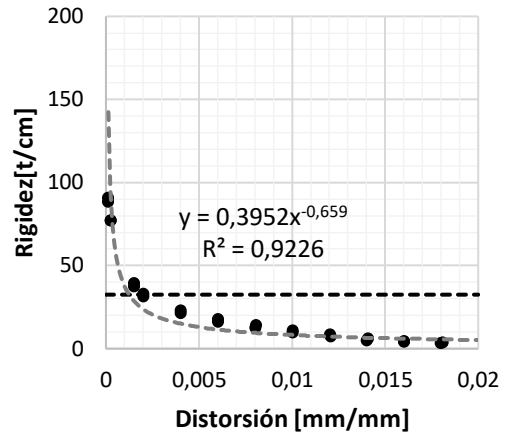


b) M-5R

**Figura 81. Degradación de rigidez de M-5 y M-5R.**

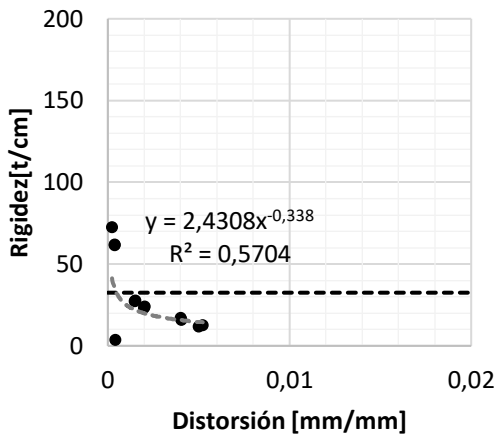


a) M-6

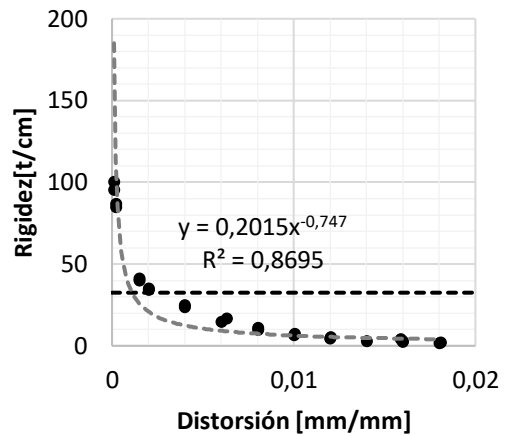


b) M-6R

**Figura 82. Degradación de rigidez de M-6 y M-6R.**

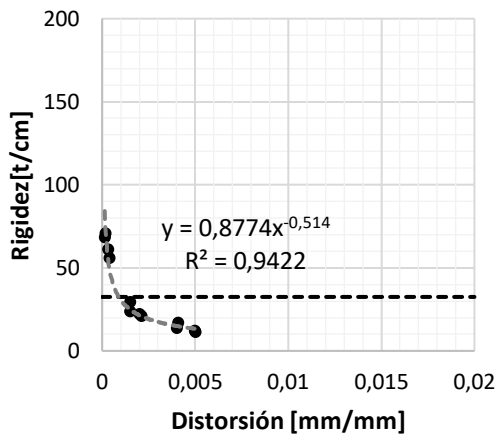


a) M-7

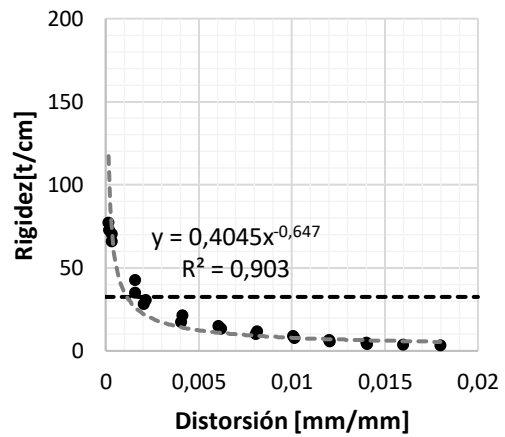


b) M-7R

**Figura 83. Degradación de rigidez de M-7 y M-7R.**

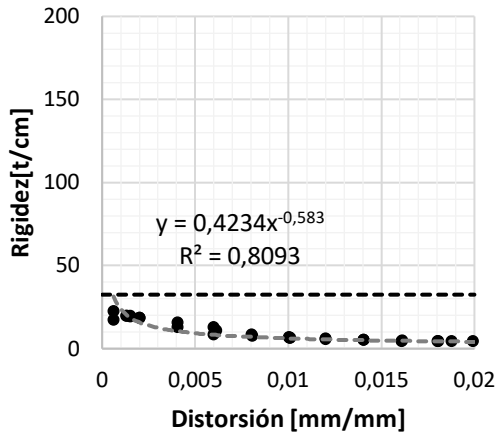


a) M-8

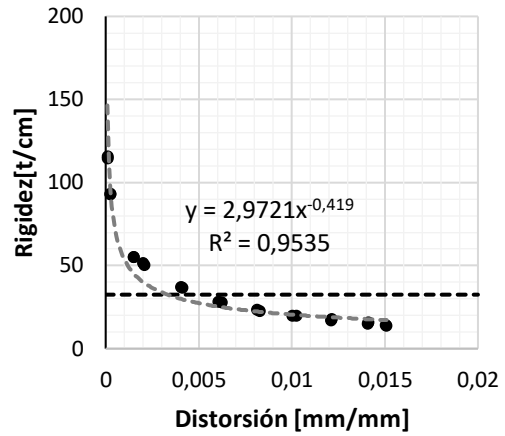


b) M-8R

**Figura 84. Degradación de rigidez de M-8 y M-8R.**

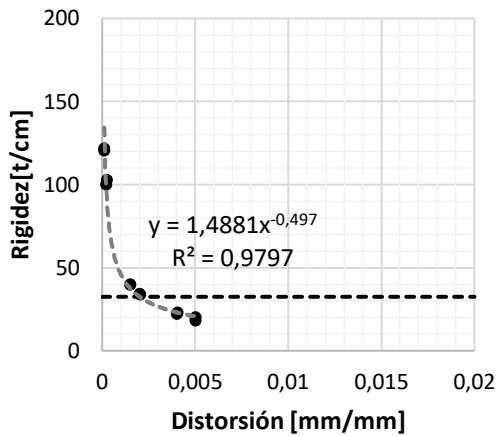


a) M-9

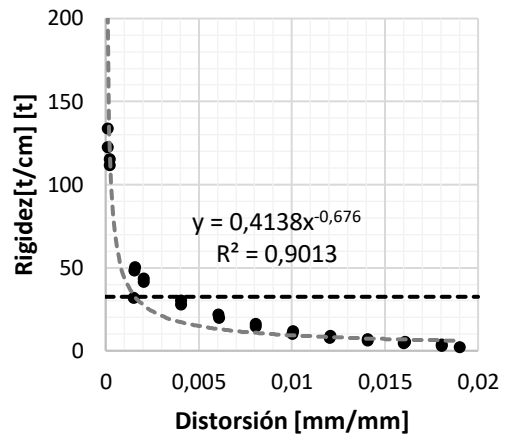


b) M-10

**Figura 85. Degradación de rigidez de M-9 y M-10.**

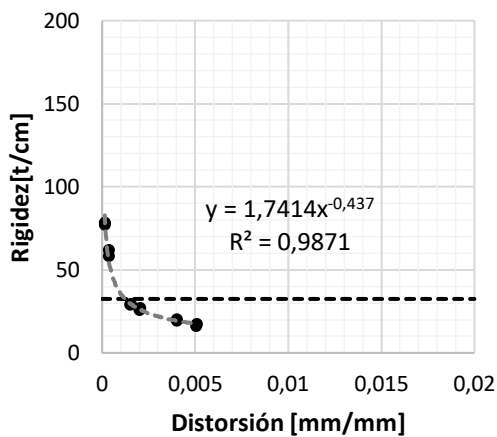


a) M-11

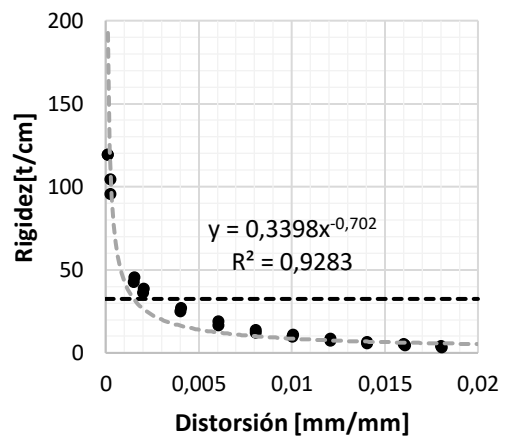


b) M-11R

**Figura 86. Degradación de rigidez de M-11 y M-11R.**



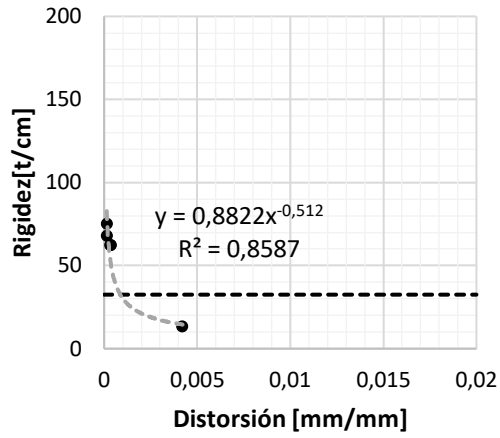
a) M-12



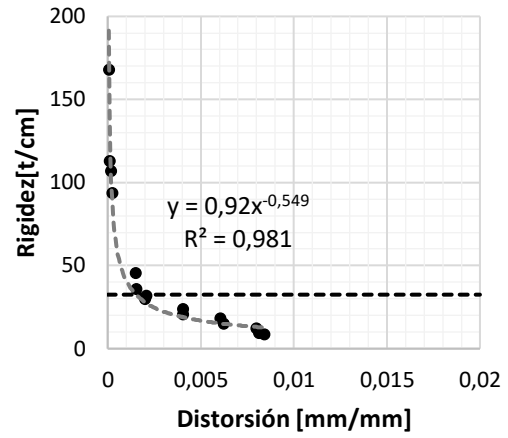
b) M-12R

**Figura 87. Degradación de rigidez de M-12 y M-12R.**





a) M-13

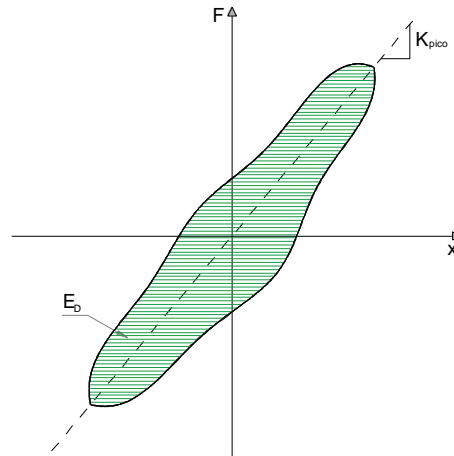


b) M-13R

**Figura 88. Degradación de rigidez de M-13 y M-13R.**

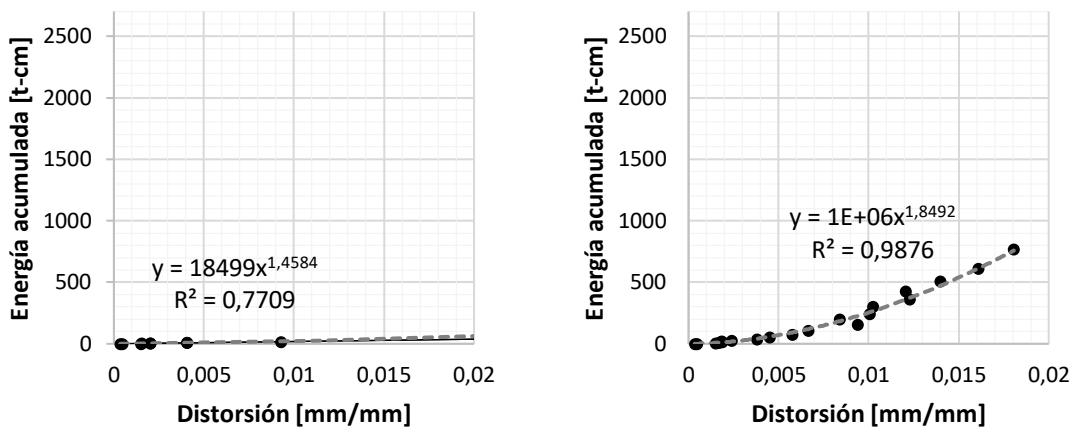
#### 5.4. ENERGÍA DISIPADA ACUMULADA

Las estructuras, dependiendo del material que las constituyan, tienen la capacidad para disipar energía mediante distintos mecanismos. Para estructuras de mampostería, se pueden considerar los mecanismos siguientes: agrietamiento, fricción generada a lo largo de las grietas y el deslizamiento relativo de las piezas. Los resultados experimentales permiten calcular la capacidad de disipación de energía para cada espécimen. Dicha energía corresponde al área dentro de un ciclo de histéresis de la curva fuerza – deformación. En la **Figura 89** se representa de forma esquemática, mediante un área sombreada, la energía disipada en un ciclo de carga.



**Figura 89. Diagrama de cálculo de la energía disipada.**

A continuación, en las **Figura 90** a **Figura 100**, se grafica la energía histerética de cada espécimen junto con una curva de tendencia de los resultados. Se puede apreciar que la energía acumulada de los muros rehabilitados es mucho mayor que la de los muros originales. Los especímenes M-9 y M-10 tuvieron los mayores valores de energía acumulada, 2641 t-cm y 2130 t-cm respectivamente.

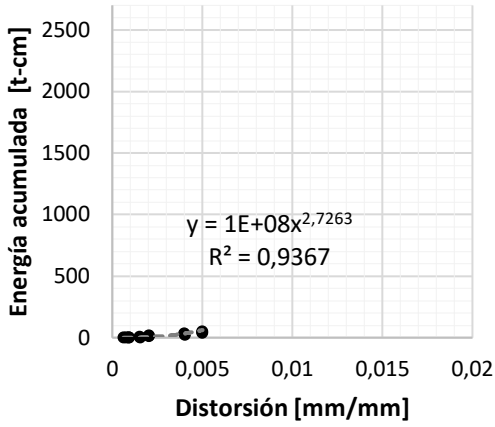


a) M-1

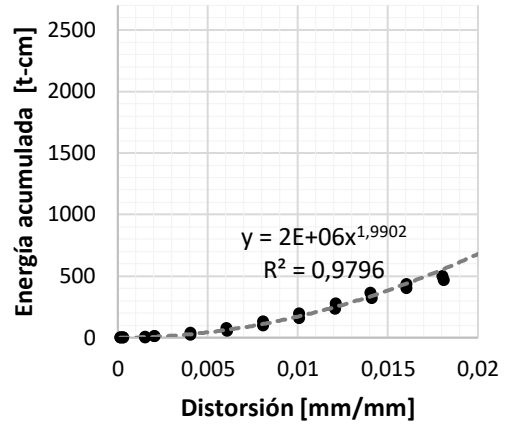
b) M-1R

**Figura 90. Energía disipada acumulada de M-1 y M-1R.**



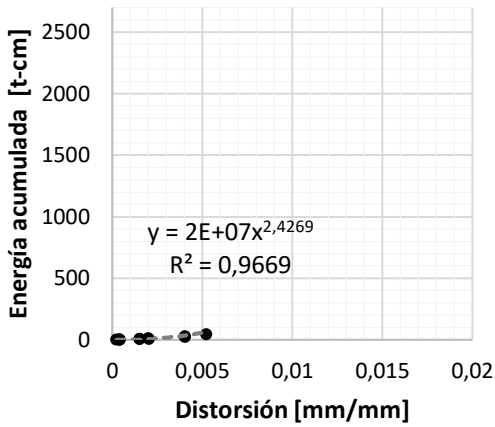


a) M-6

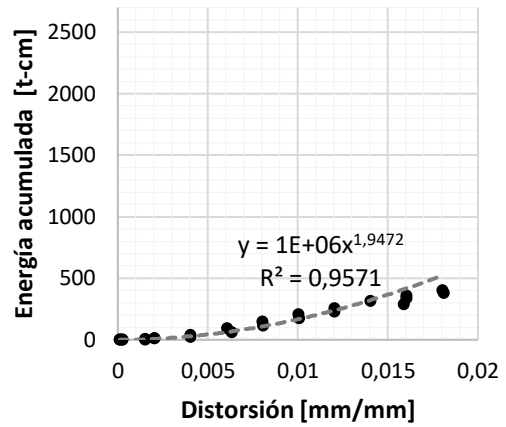


b) M-6R

**Figura 94. Energía disipada acumulada de M-6 y M-6R.**

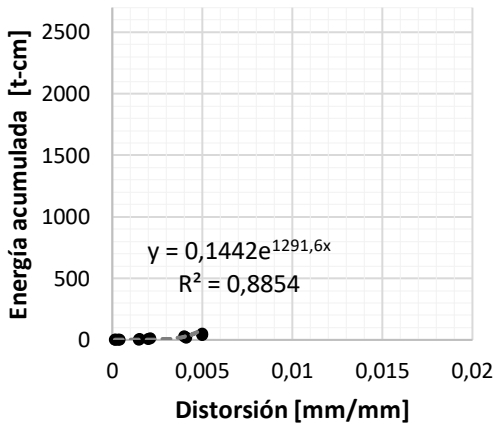


a) M-7

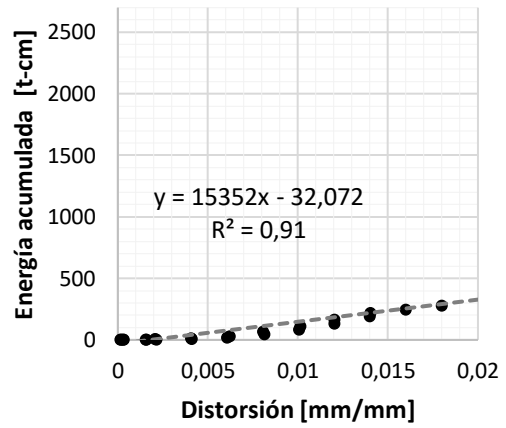


b) M-7R

**Figura 95. Energía disipada acumulada de M-7 y M-7R.**

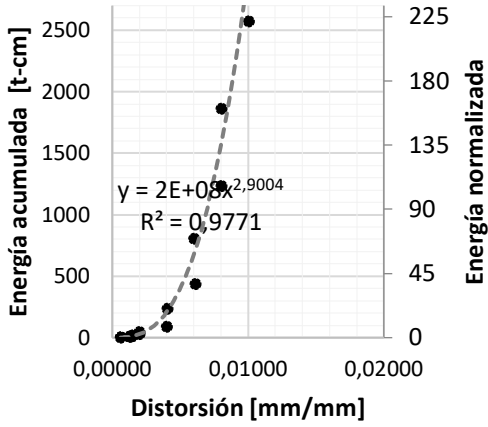


a) M-8

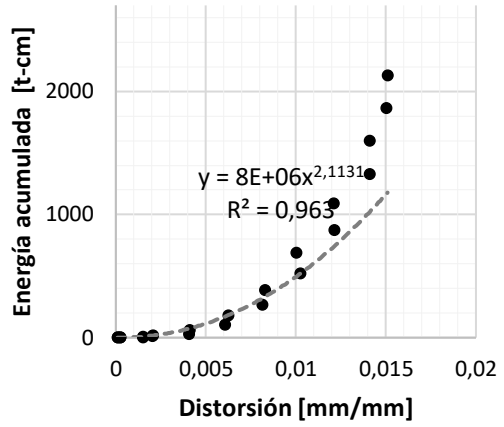


b) M-8R

**Figura 96. Energía disipada acumulada de M-8 y M-8R.**

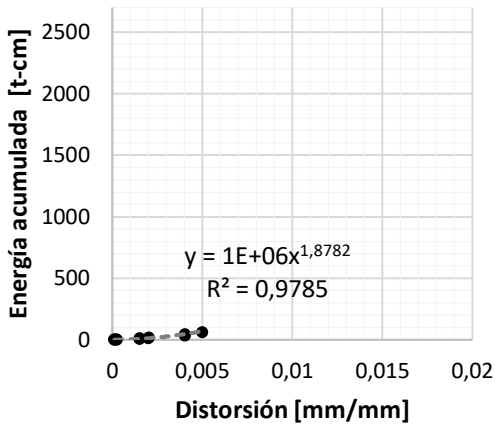


a) M-9

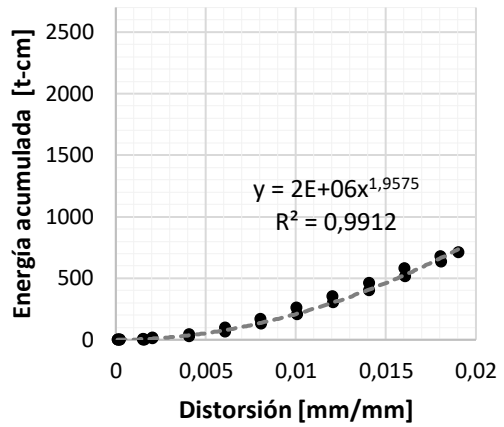


b) M-10

**Figura 97. Energía disipada acumulada de M-9 y M-10.**

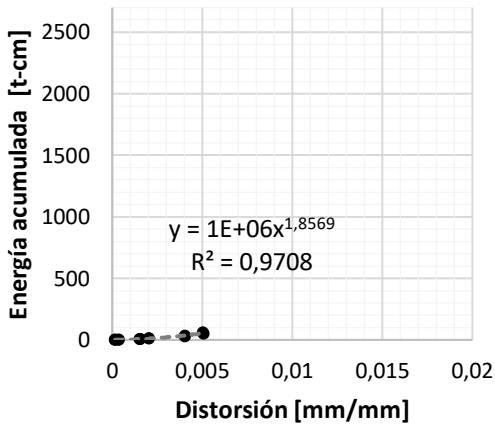


a) M-11

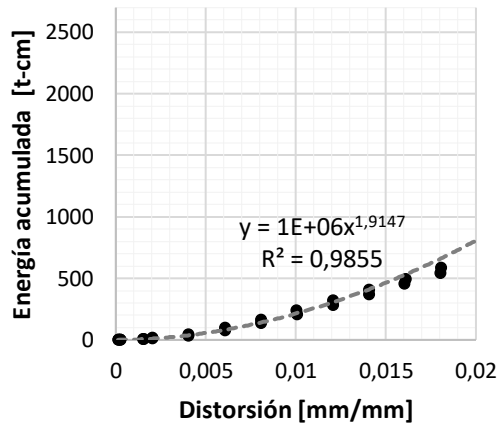


b) M-11R

**Figura 98. Energía disipada acumulada de M-11 y M-11R.**

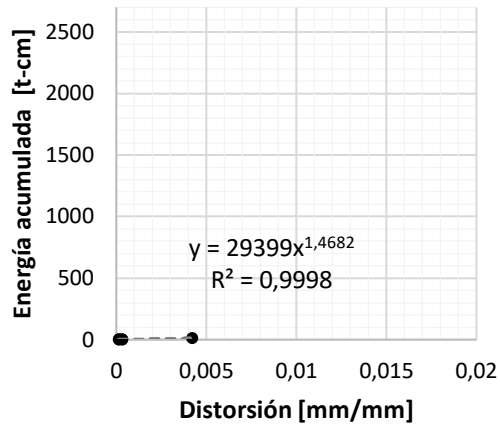


a) M-12

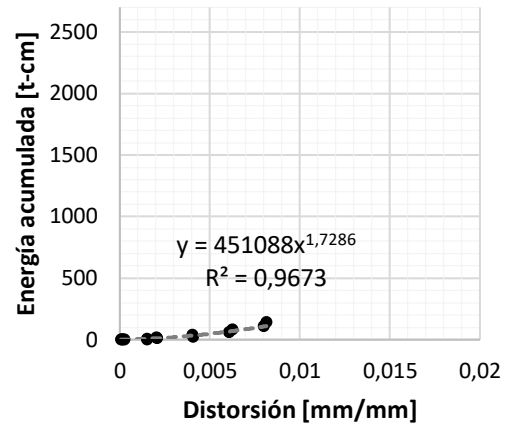


b) M-12R

**Figura 99. Energía disipada acumulada de M-12 y M-12R.**



a) M-13

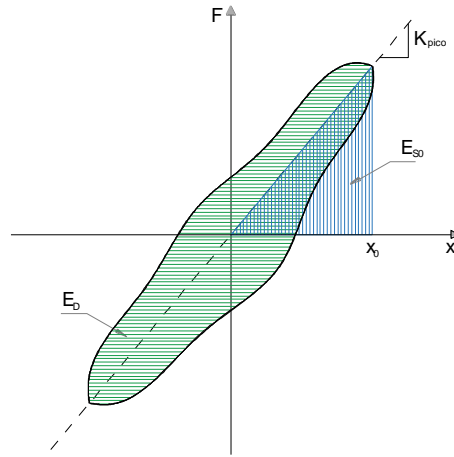


b) M-13R

**Figura 100. Energía disipada acumulada de M-13 y M-13R.**

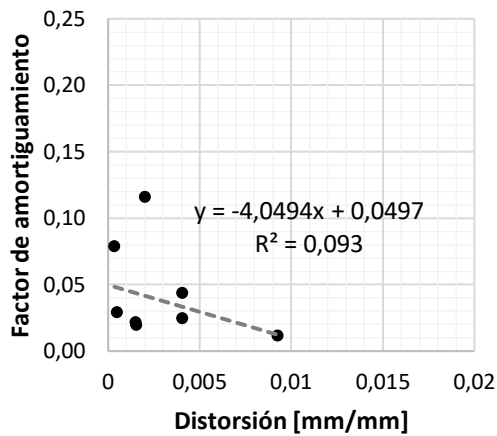
### 5.5. FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE

Es posible calcular de forma aproximada el factor de amortiguamiento utilizando el método derivado a partir del cálculo de la energía disipada (ED) y la energía de deformación (ESO) para una respuesta elástica arbitraria

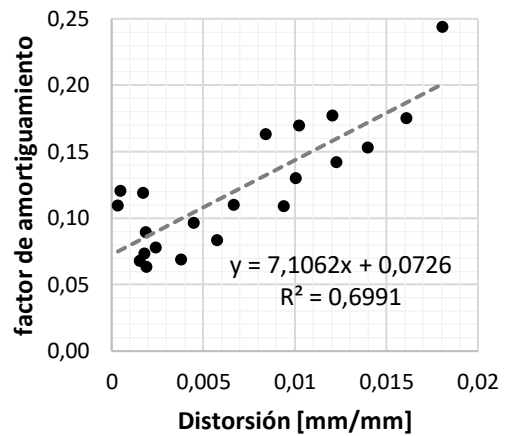


**Figura 101. Cálculo de amortiguamiento equivalente**

En las **Figura 102** a **Figura 112**, se gráfica el amortiguamiento de cada espécimen junto con una curva de tendencia de los resultados.



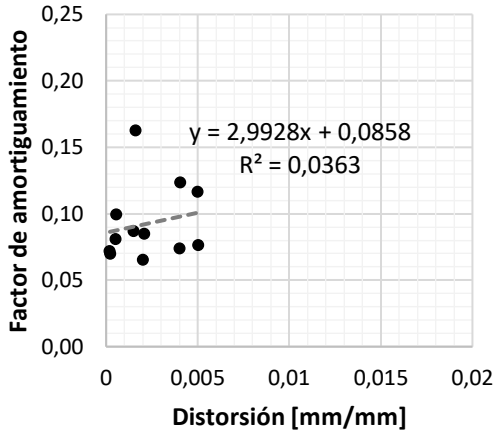
a) M-1



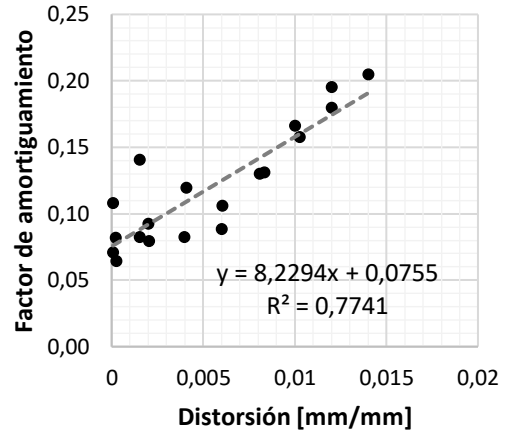
b) M-1R

**Figura 102. Factor de amortiguamiento equivalente de M-1 y M-1R.**



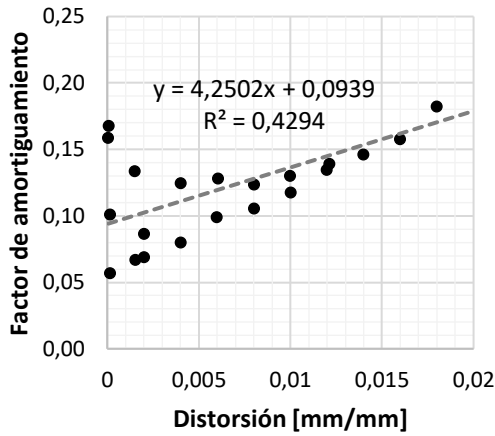


a) M-2

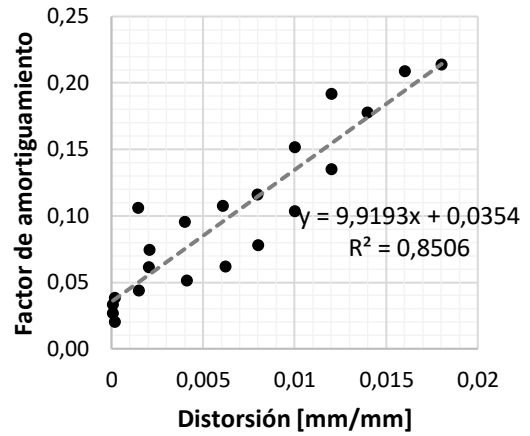


b) M-2R

**Figura 103. Factor de amortiguamiento equivalente de M-2 y M-2R.**

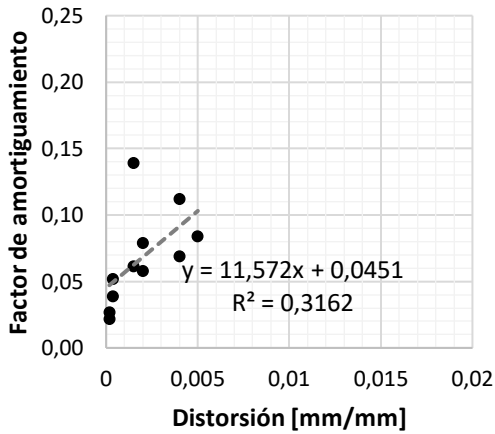


a) M-3R

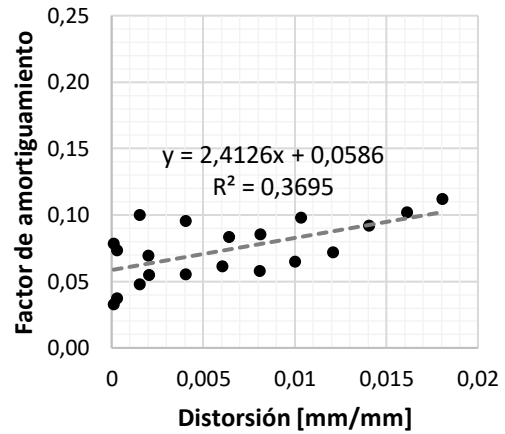


b) M-4R

**Figura 104. Factor de amortiguamiento equivalente de M-3R y M-4R.**

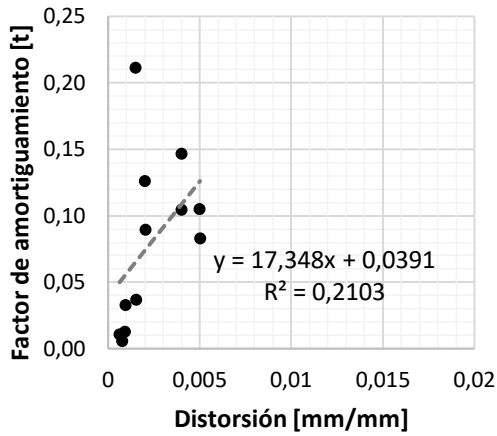


a) M-5

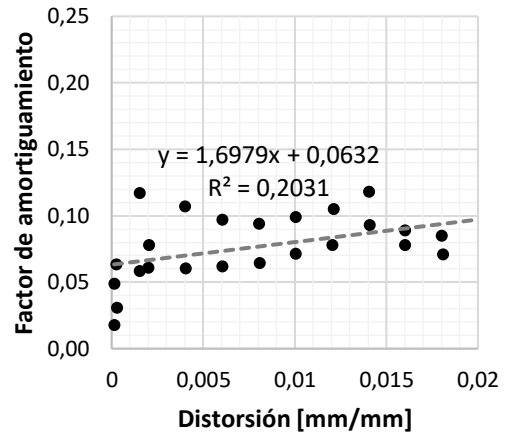


b) M-5R

**Figura 105. Factor de amortiguamiento equivalente de M-5 y M-5R.**

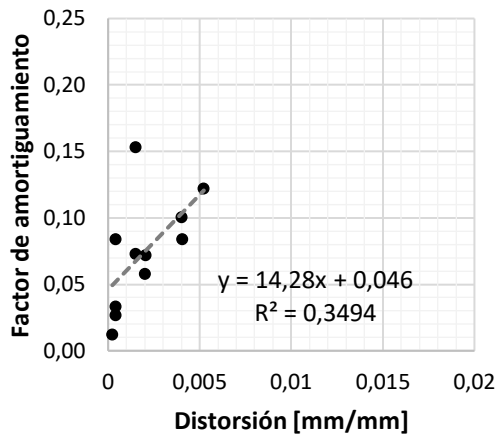


a) M-6

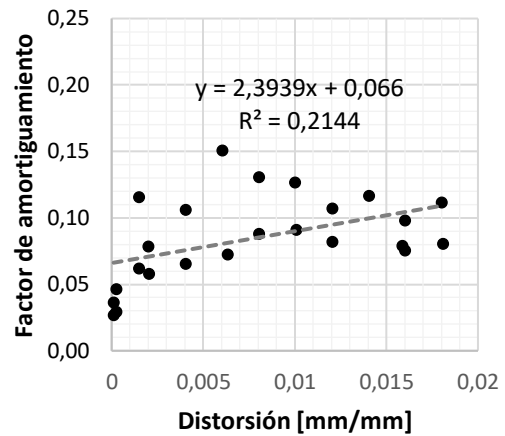


b) M-6R

**Figura 106. Factor de amortiguamiento equivalente de M-6 y M-6R.**

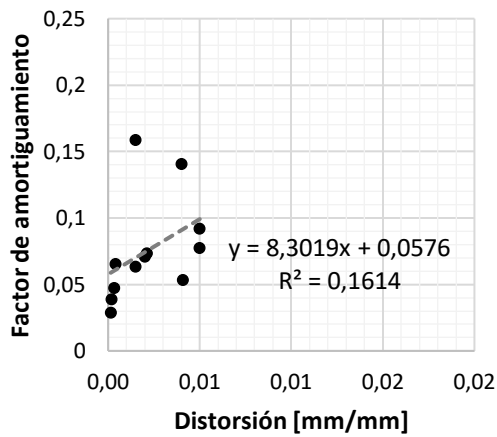


a) M-7

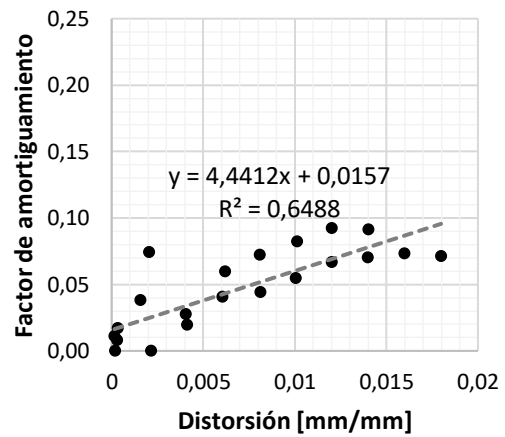


b) M-7R

**Figura 107. Factor de amortiguamiento equivalente de M-7 y M-7R.**

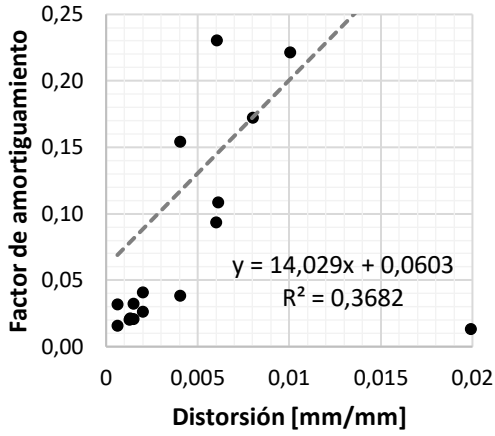


a) M-8

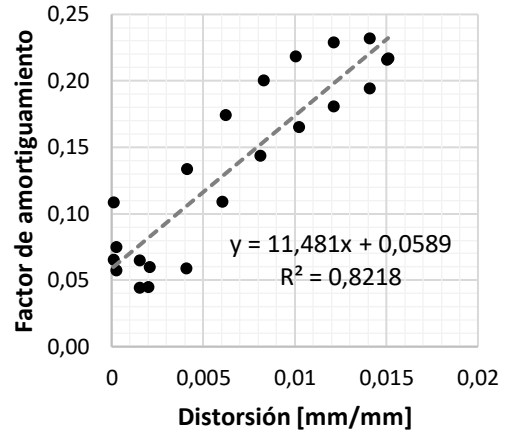


b) M-8R

**Figura 108. Factor de amortiguamiento equivalente de M-8 y M-8R.**

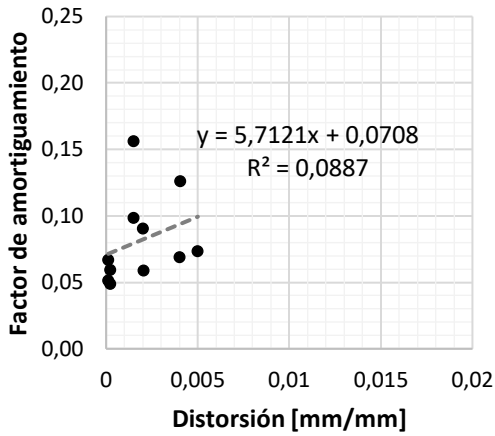


a) M-9

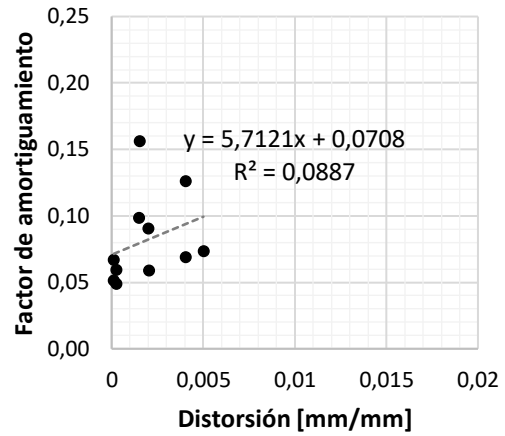


b) M-10

**Figura 109. Factor de amortiguamiento equivalente de M-9 y M-10.**

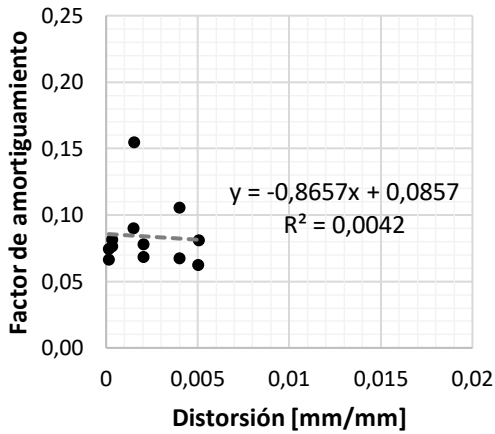


a) M-11

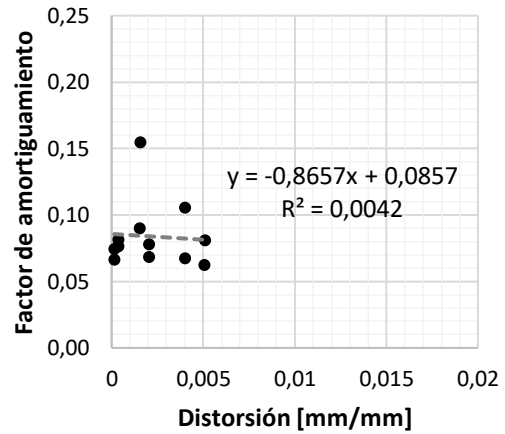


b) M-11R

**Figura 110. Factor de amortiguamiento equivalente de M-11 y M-11R.**

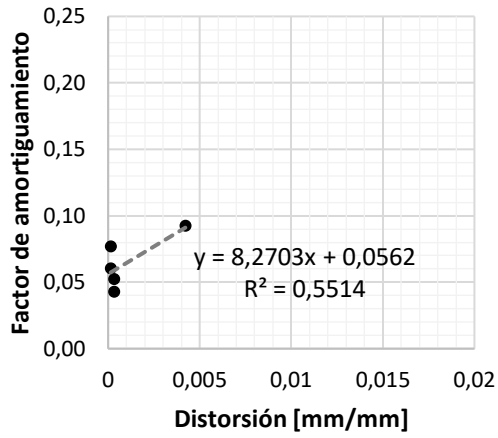


a) M-12

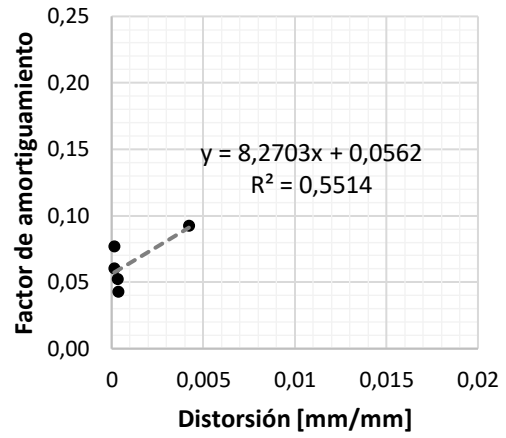


b) M-12R

**Figura 111. Factor de amortiguamiento equivalente de M-12 y M-12R.**



a) M-13

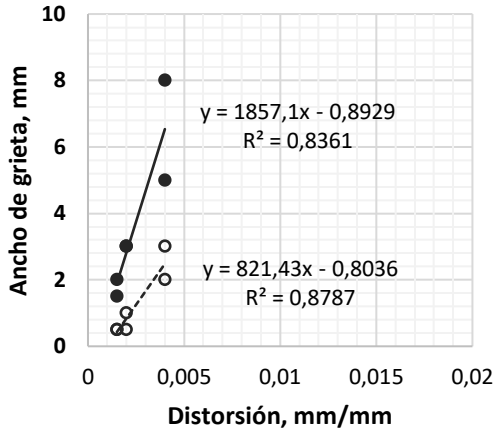


b) M-13R

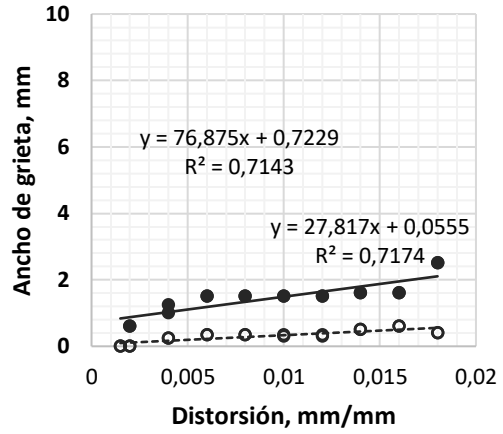
**Figura 112. Factor de amortiguamiento equivalente de M-13 y M-13R.**

### 5.6. GRIETAS EN PICO Y GRIETAS RESIDUALES

Se midieron las grietas pico y residuales correspondientes a cada semiciclo de incremento y repetición de carga. En las figuras **Figura 113** a **Figura 122**, se grafican los resultados con círculos rellenos para las grietas pico y círculos vacíos para las grietas residuales.

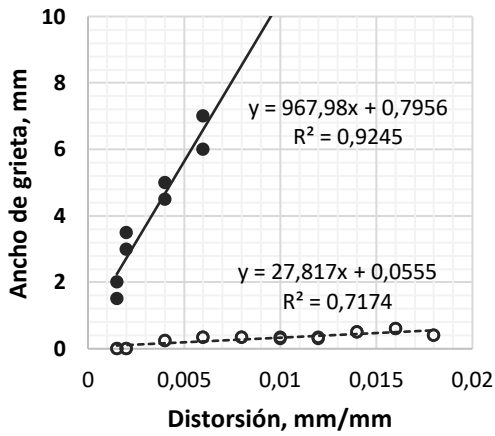


c) M-1

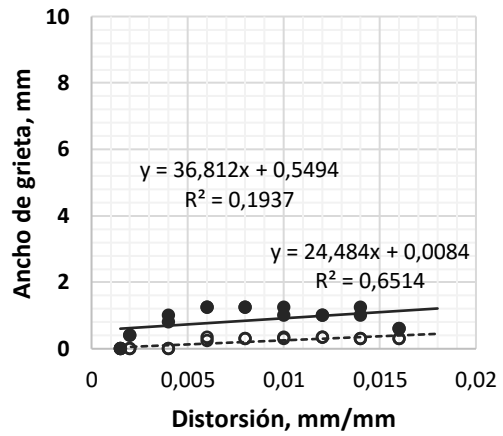


d) M-1R

**Figura 113. Grietas pico y residuales de M-1 y M-1R.**

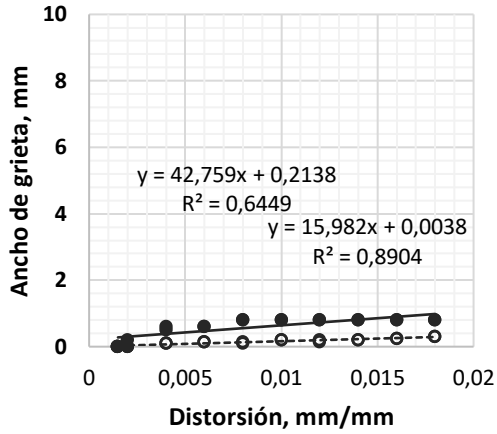


c) M-2

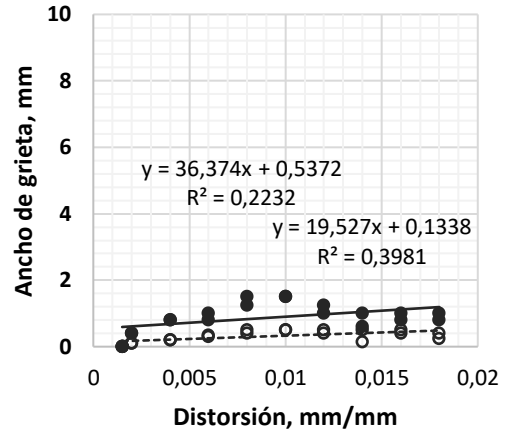


d) M-2R

**Figura 114. Grietas pico y residuales de M-2 y M-2R.**

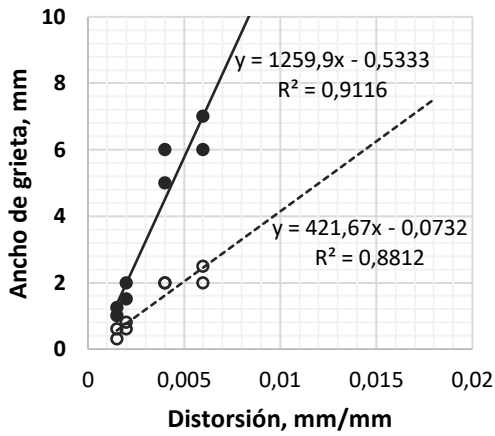


c) M-3R

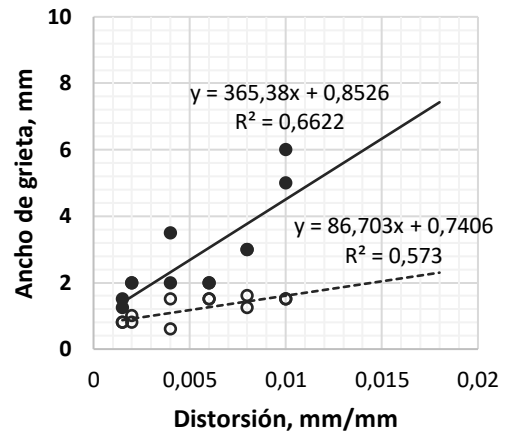


d) M-4R

**Figura 115. Grietas pico y residuales de M-3R y M-4R.**

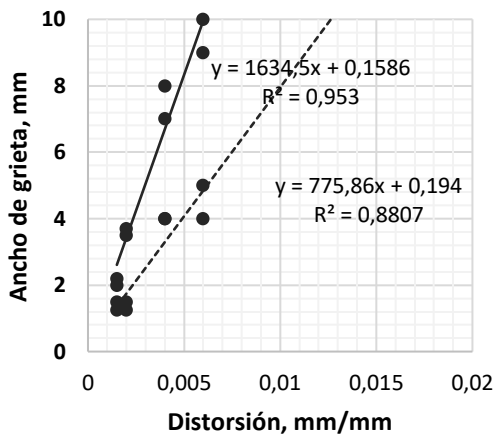


c) M-5

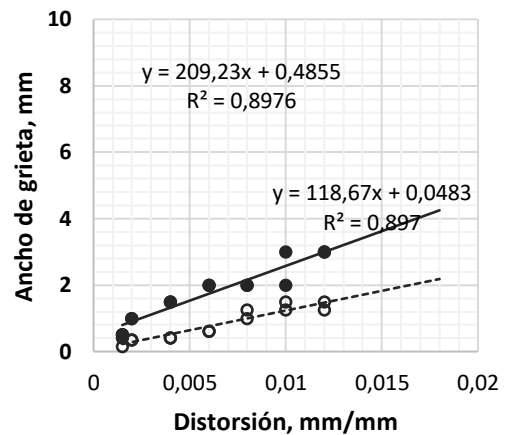


d) M-5R

**Figura 116. Grietas pico y residuales de M-5 y M-5R.**

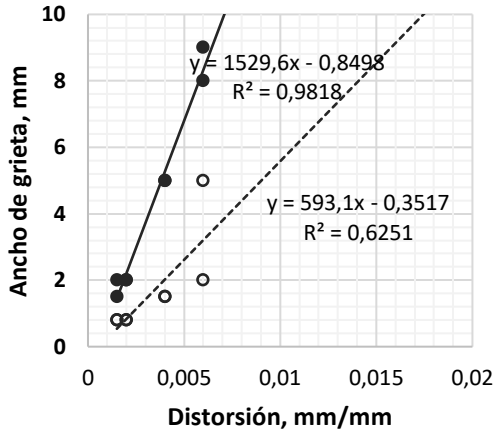


c) M-6

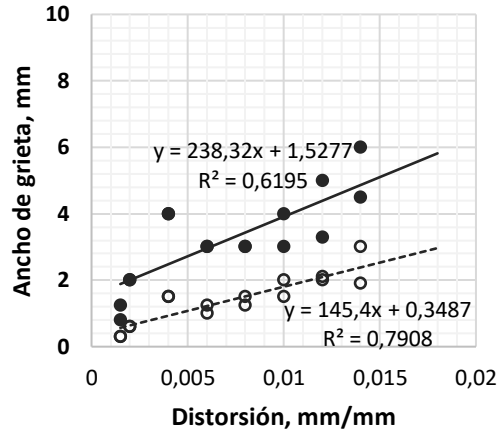


d) M-6R

**Figura 117. Grietas pico y residuales de M-6 y M-6R.**

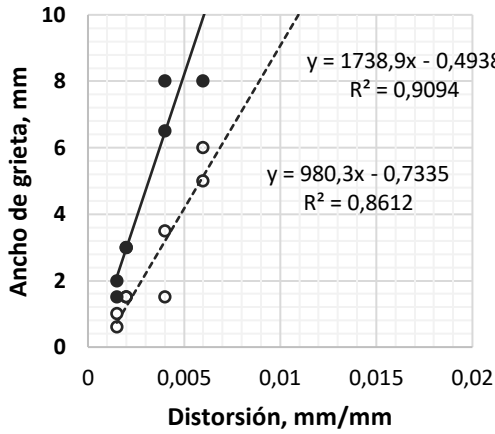


c) M-7

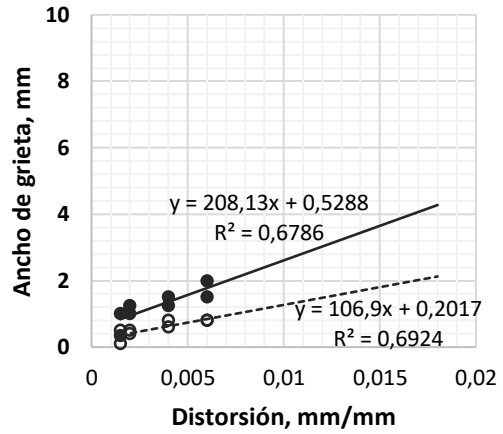


d) M-7R

**Figura 118. Grietas pico y residuales de M-7 y M-7R.**

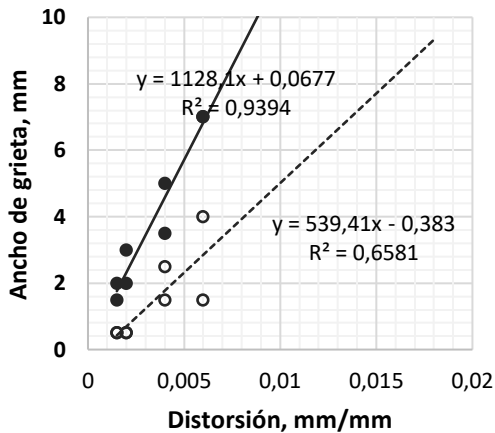


c) M-8

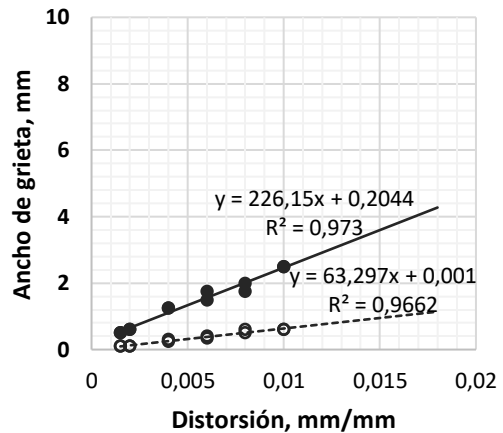


d) M-8R

**Figura 119. Grietas pico y residuales de M-8 y M-8R.**



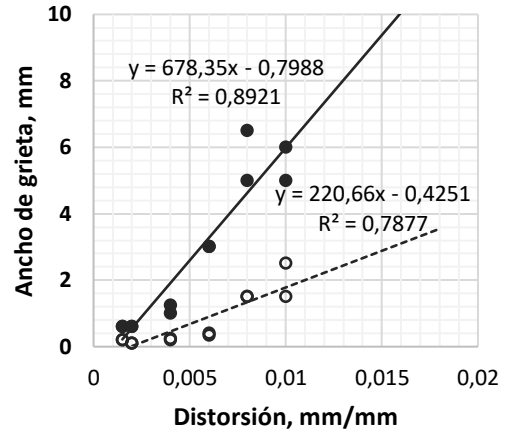
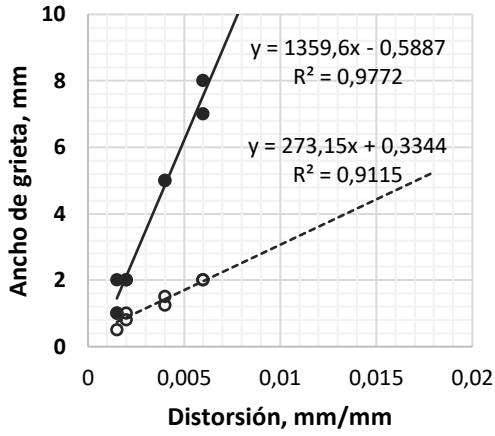
c) M-11



d) M-11R

**Figura 120. Grietas pico y residuales de M-11 y M-11R.**

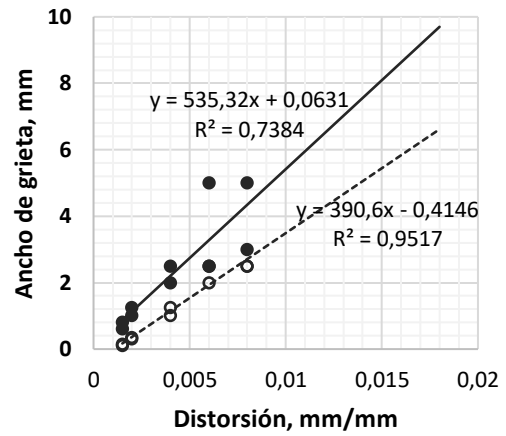
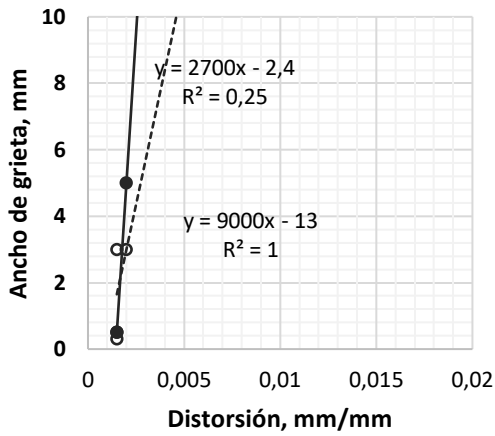




c) M-12

d) M-12R

**Figura 121. Grietas pico y residuales de M-12 y M-12R.**



c) M-13

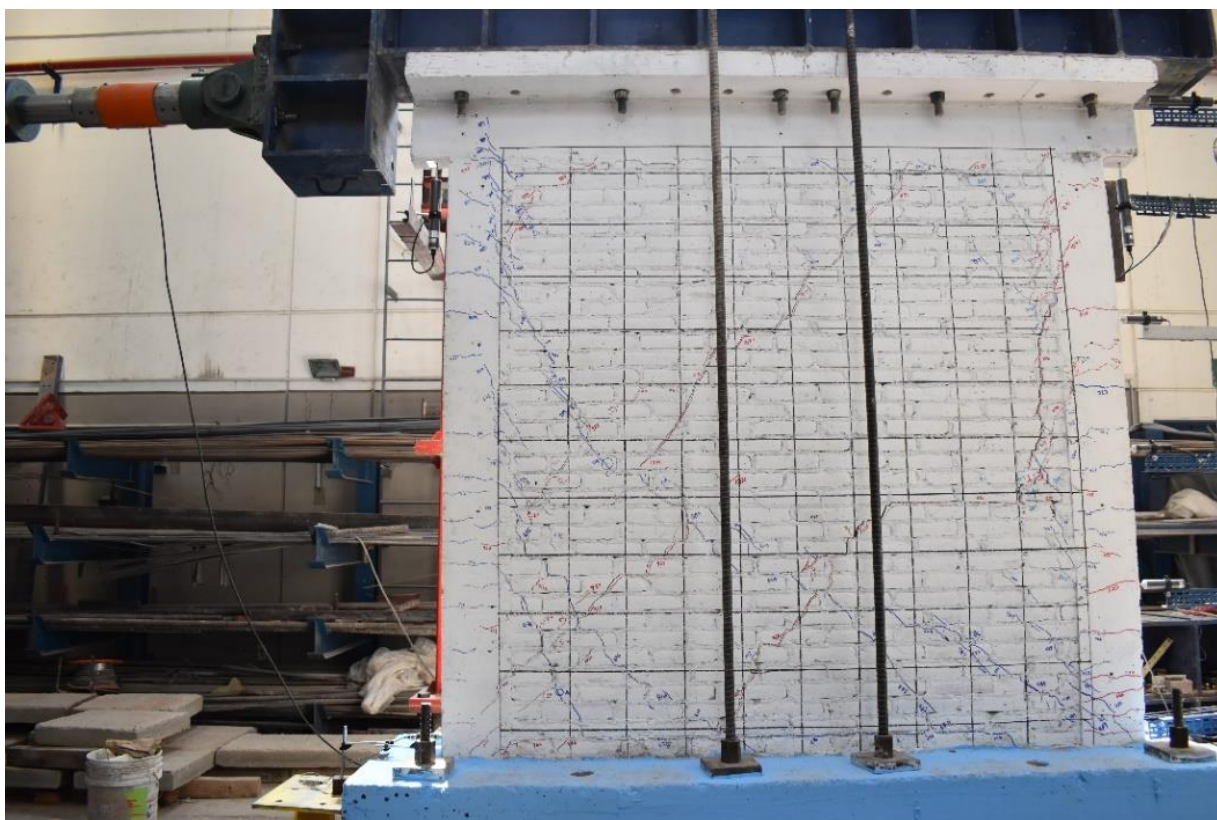
d) M-13R

**Figura 122. Grietas pico y residuales de M-13 y M-13R.**

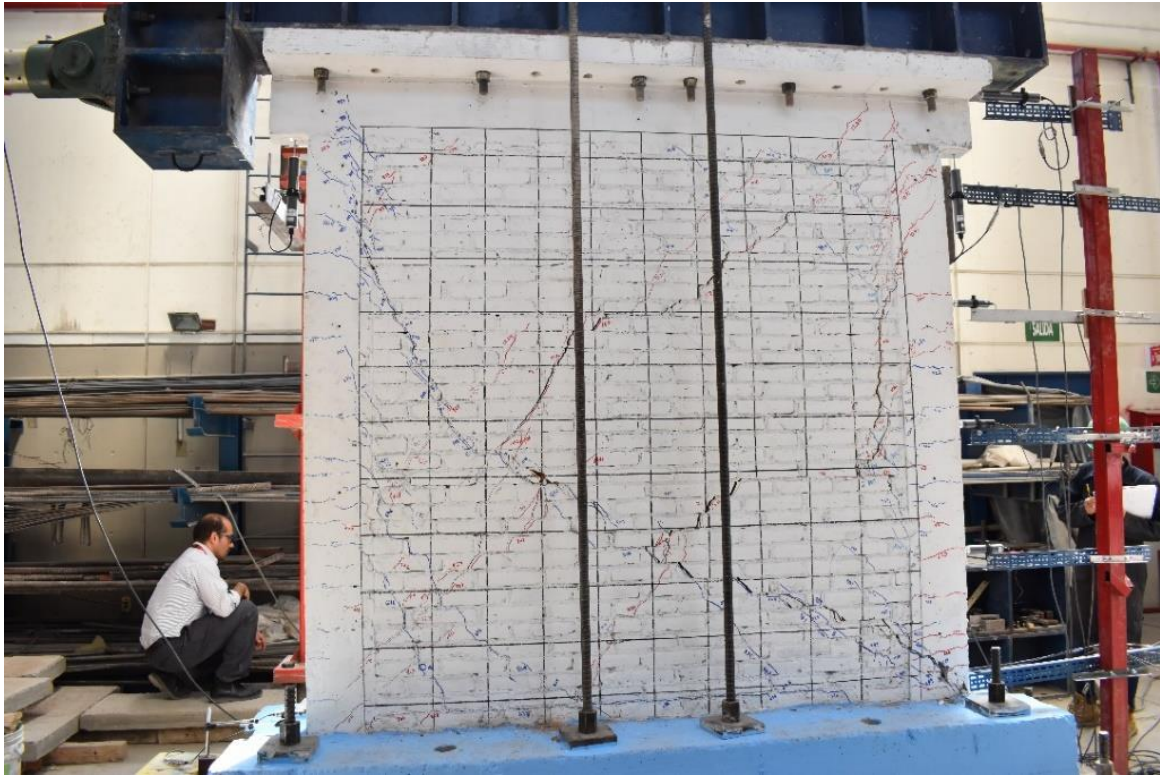
## 5.7. EVALUACIÓN VISUAL DE LOS DAÑOS

Durante las pruebas, se marcaron con color rojo las grietas provocadas cuando el espécimen es empujado y con color azul cuando es jalado por el actuador. En las **Figura 123** a **Figura 179**, se presenta un reporte fotográfico de la distribución de las grietas. Se consideran principalmente las fotografías tomadas a las distorsiones de 0.002, 0.005 y 0.010. De forma general, se observa una distribución uniforme de las grietas en los especímenes rehabilitados con malla electrosoldada. Dicho resultado es muy útil ya que evidencia la eficiencia de estas técnicas de rehabilitación para mejorar la capacidad de deformación inelástica del muro.

En las **Figura 127**, **Figura 135** y **Figura 138** se aprecia un nivel importante de daño en las bases de los castillos mientras que el daño en la mampostería fue mucho menor. Este efecto ocurrió por el sobre reforzamiento con la malla en ambas caras del muro. Lo que provocó un cambio en el mecanismo de falla. En lugar de que fallara la mampostería por tensión diagonal, se deslizó la base provocando el daño de los castillos en su base.



**Figura 123. M-1 a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 2 mm, grieta residual: 0.5 mm.**



**Figura 124. M-1 a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 8 mm, grieta residual: 3 mm.**



**Figura 125. M-1R a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 0.6 mm, grieta residual: 0.1 mm.**

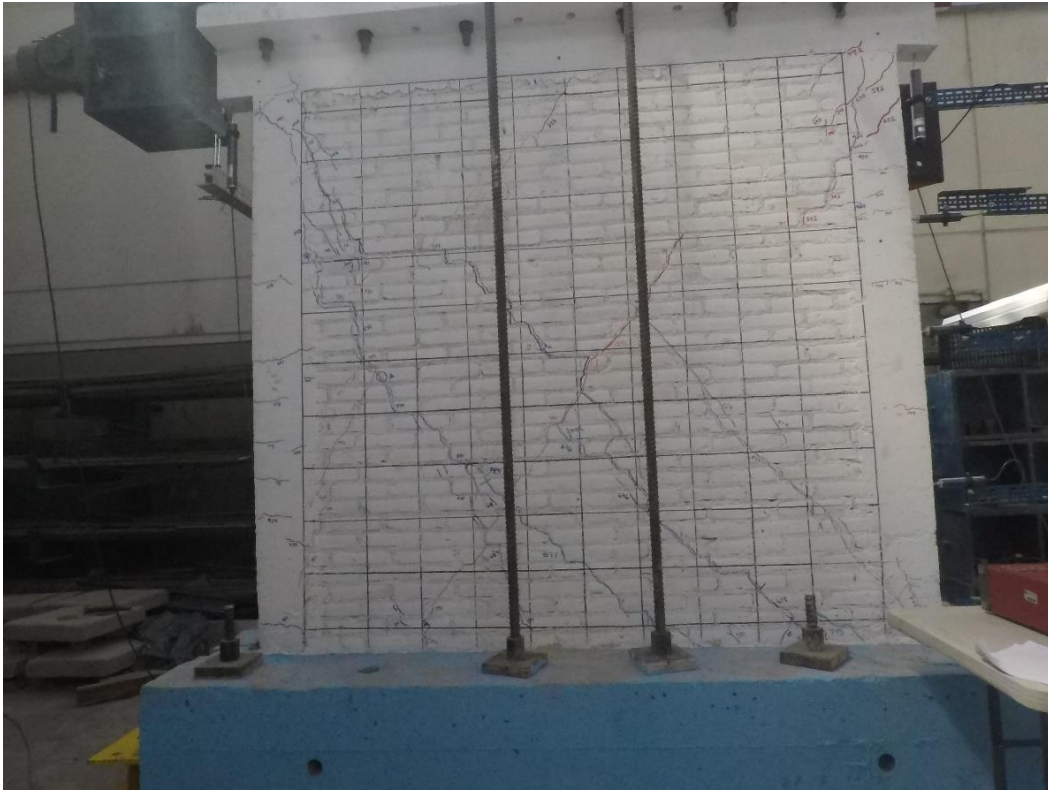




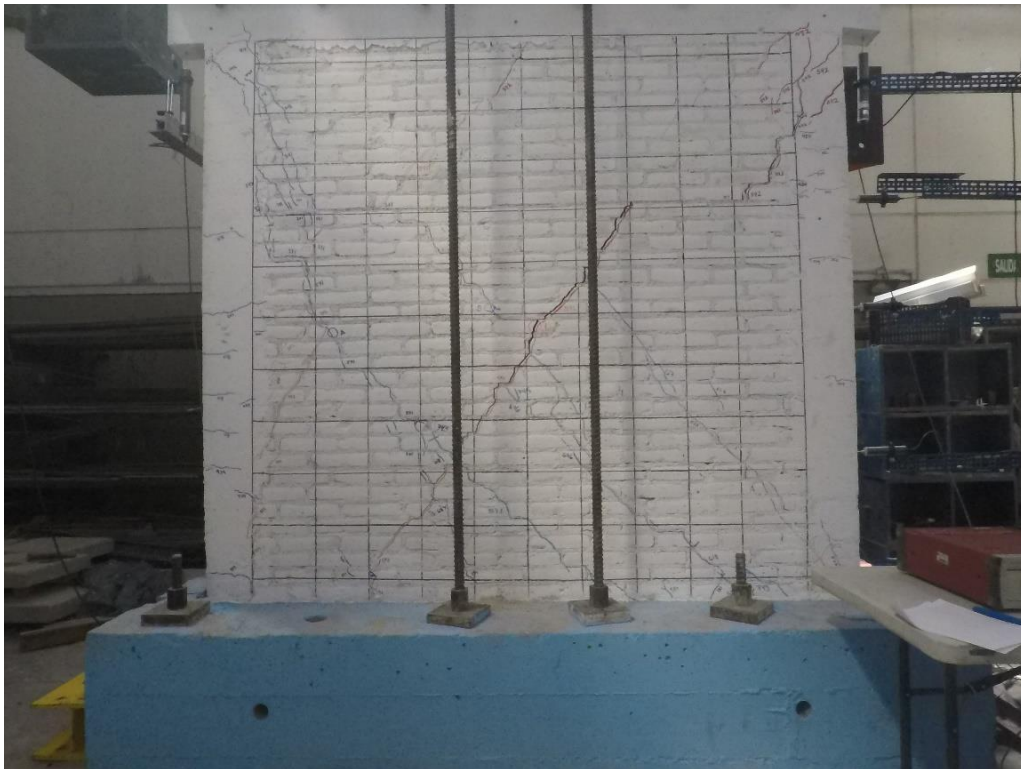
**Figura 126. M-1R a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 1.5 mm, grieta residual: 0.35 mm.**



**Figura 127. M-1R a  $\delta = 0.010$ . Grieta pico: 1.6 mm, grieta residual: 0.6 mm.**

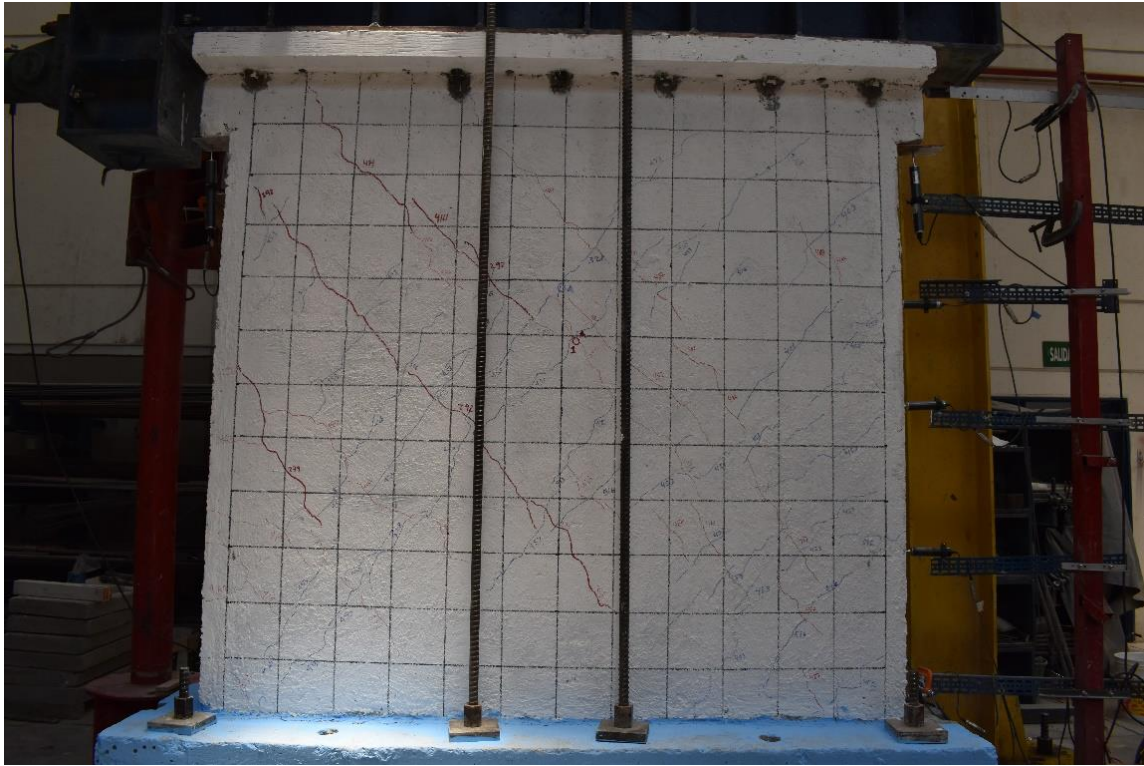


**Figura 128. M-2 a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 3.5 mm, grieta residual: 1.0 mm.**



**Figura 129. M-2 a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 7 mm, grieta residual: 1.5 mm.**





**Figura 130. M-2R a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 0.4 mm, grieta residual: 0.1 mm.**



**Figura 131. M-2R a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 1.25 mm, grieta residual: 0.25 mm.**





**Figura 132. M-2R a  $\delta = 0.01$ . Grieta pico: 1.25 mm, grieta residual: 0.35 mm.**



**Figura 133. M-3R a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 0.2 mm, grieta residual: 0.1 mm.**



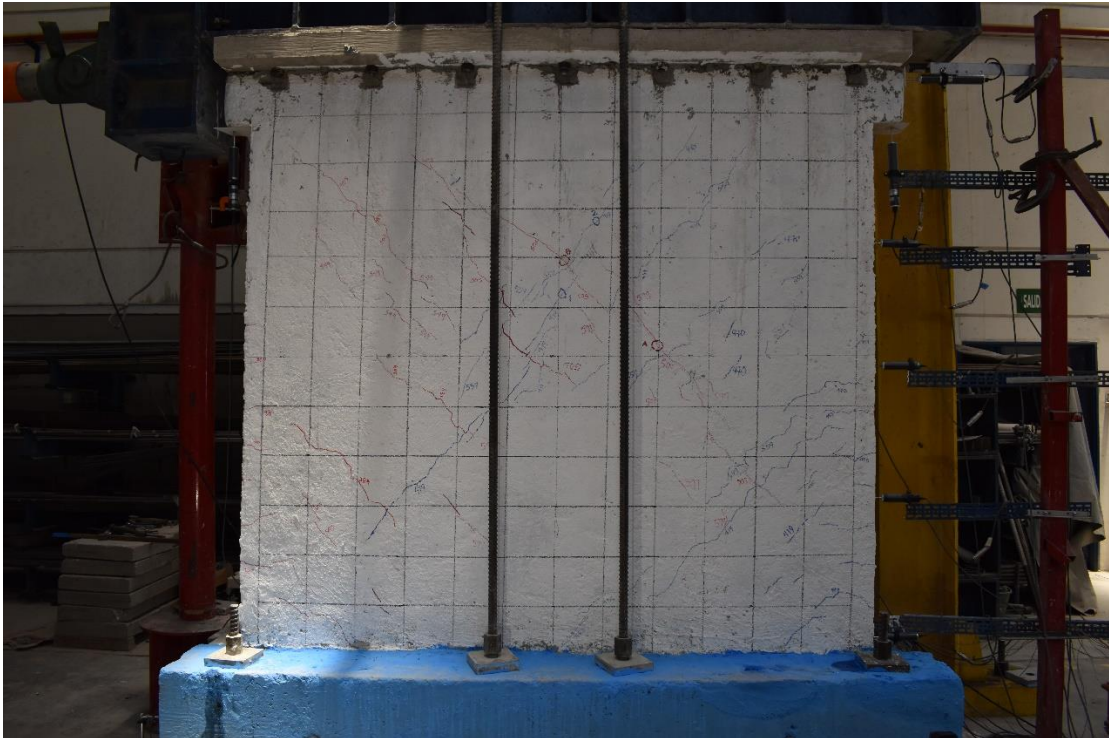


**Figura 134. M-3R a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 0.6 mm, grieta residual: 0.15 mm.**

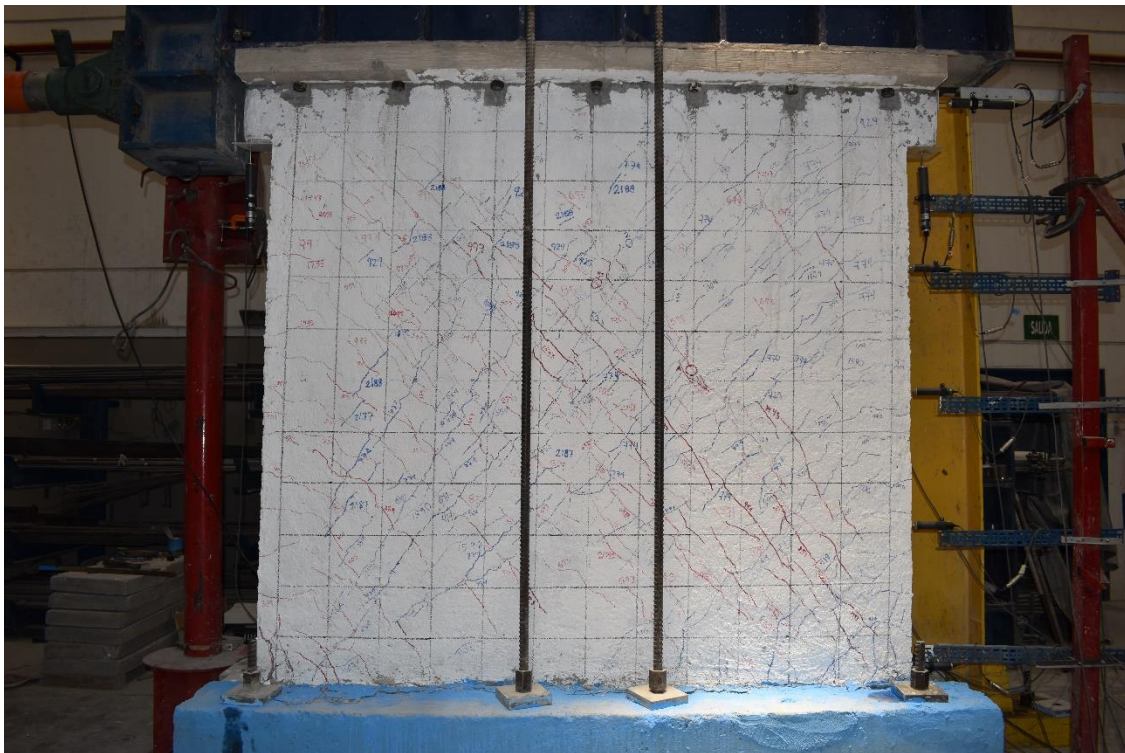


**Figura 135. M-3R a  $\delta = 0.01$ . Grieta pico: 0.2 mm, grieta residual: 0.1 mm.**





**Figura 136. M-4R a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 0.8 mm, grieta residual: 0.35 mm.**



**Figura 137. M-4R a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 1.5 mm, grieta residual: 0.5 mm.**





**Figura 138. M-4R a  $\delta = 0.01$ . Grieta pico: 1.5 mm, grieta residual: 0.5 mm.**

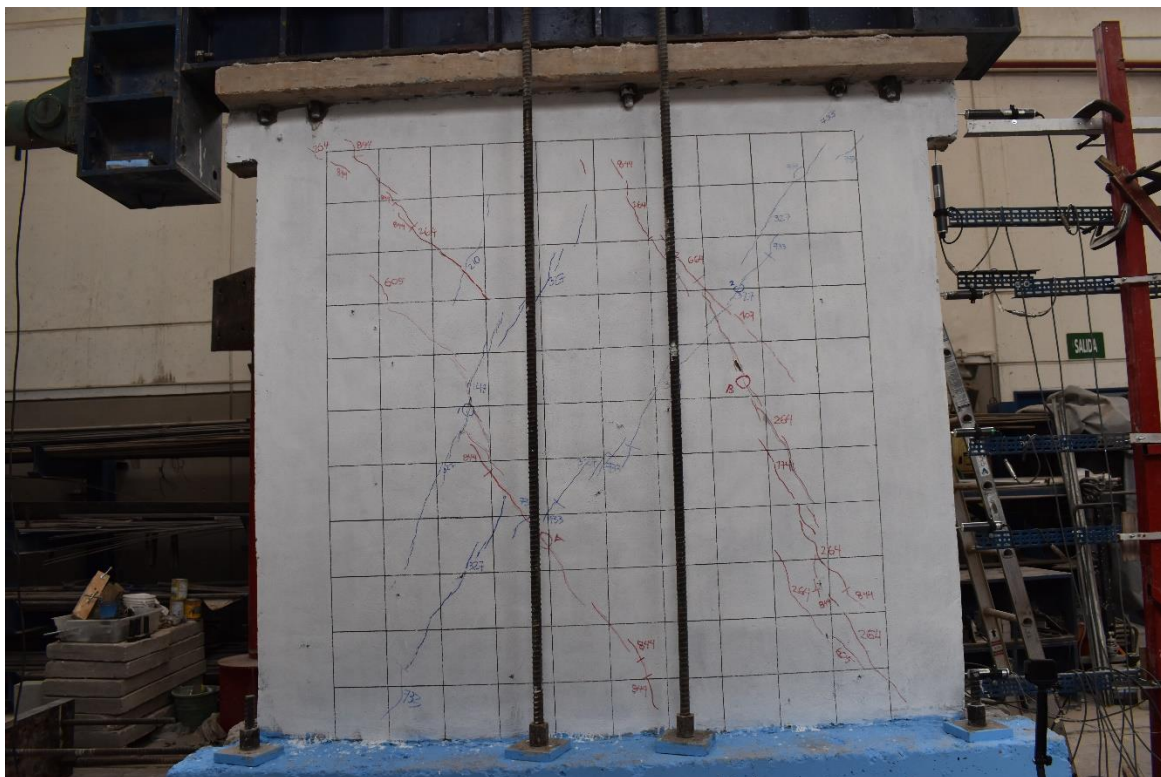


**Figura 139. M-5 a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 1.5 mm, grieta residual: 0.8 mm.**





**Figura 140. M-5 a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 7.0 mm, grieta residual: 2.5 mm.**



**Figura 141. M-5R a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 2 mm, grieta residual: 0.8 mm.**

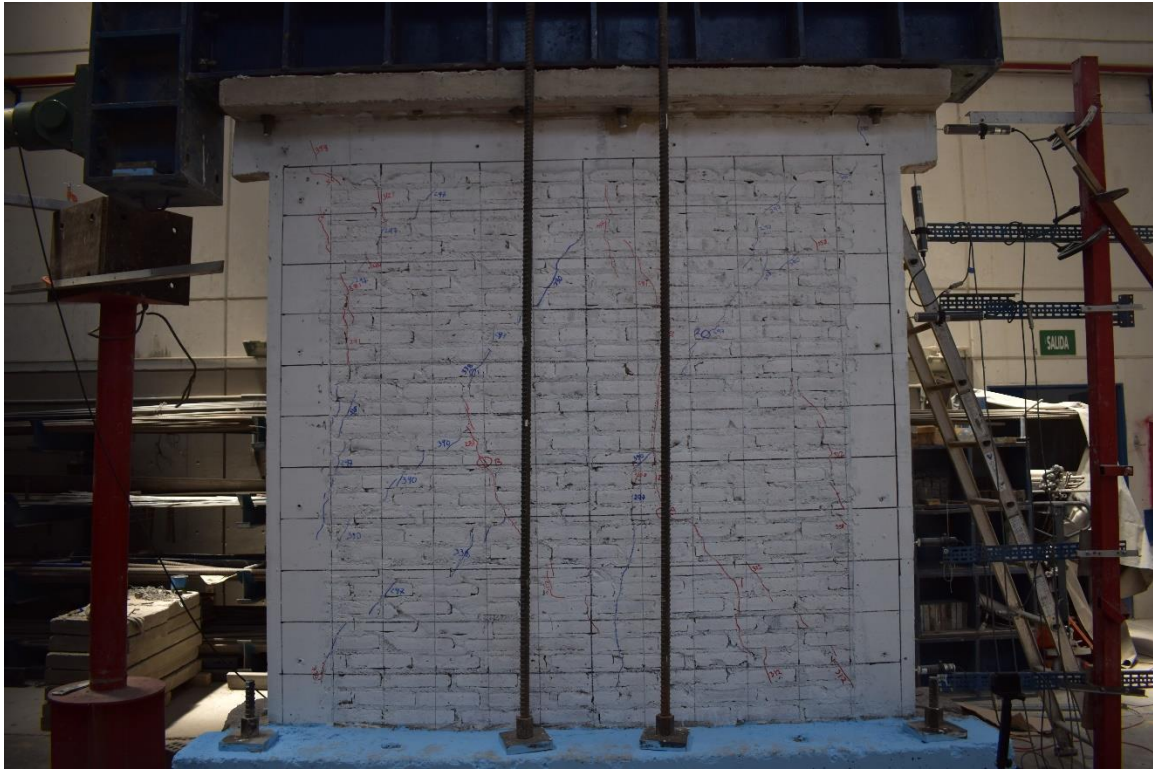


**Figura 142. M-5R a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 2.0 mm, grieta residual: 1.5 mm.**



**Figura 143. M-5R a  $\delta = 0.010$ . Grieta pico 5.0 mm, grieta residual: 1.5 mm.**



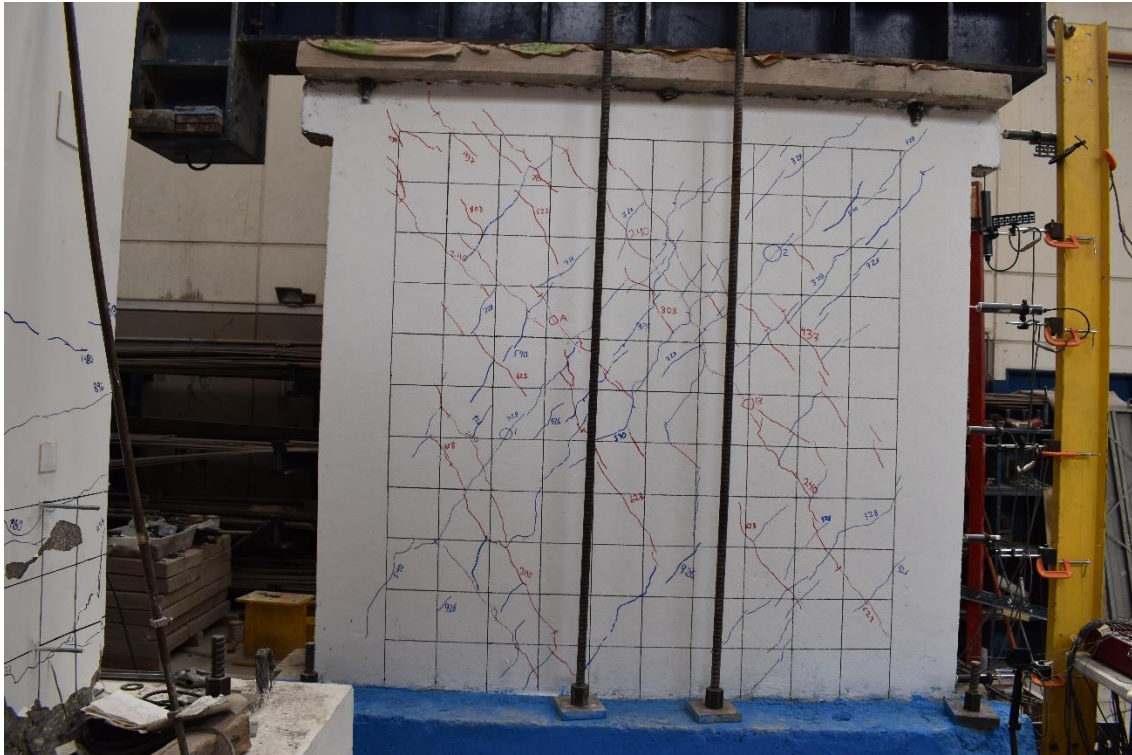


**Figura 144. M-6 a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 3.7 mm, grieta residual: 1.5 mm.**

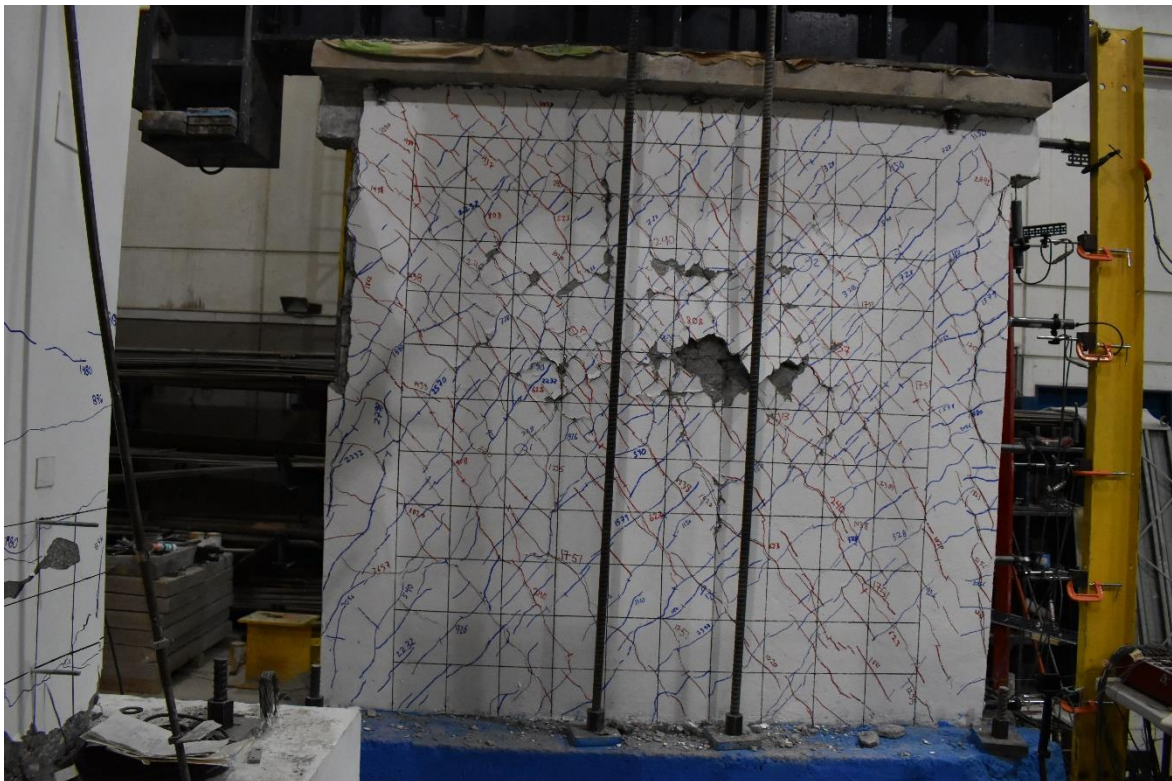


**Figura 145. M-6 a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 10.0 mm, grieta residual: 5.0 mm.**





**Figura 146. M-6R a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 1.0 mm, grieta residual: 0.35 mm.**



**Figura 147. M-6R a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 2.0 mm, grieta residual: 0.6 mm.**



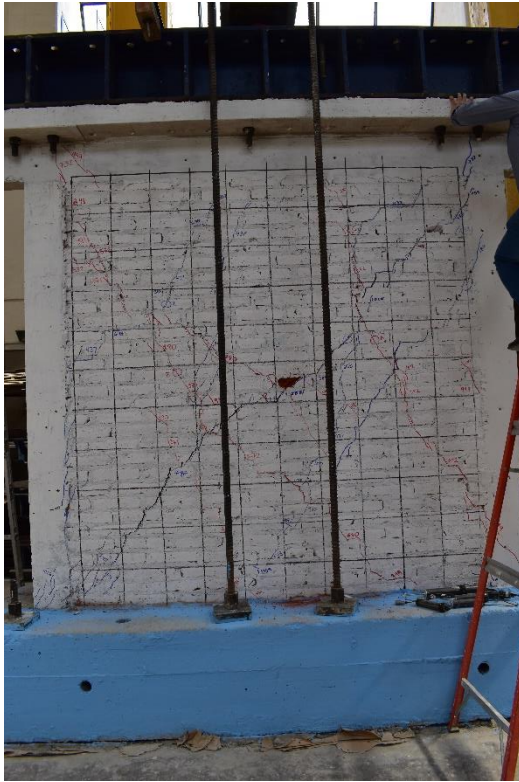


**Figura 148. M-6R a  $\delta = 0.010$ . Grieta pico: 2.0 mm, grieta residual: 1.5 mm.**

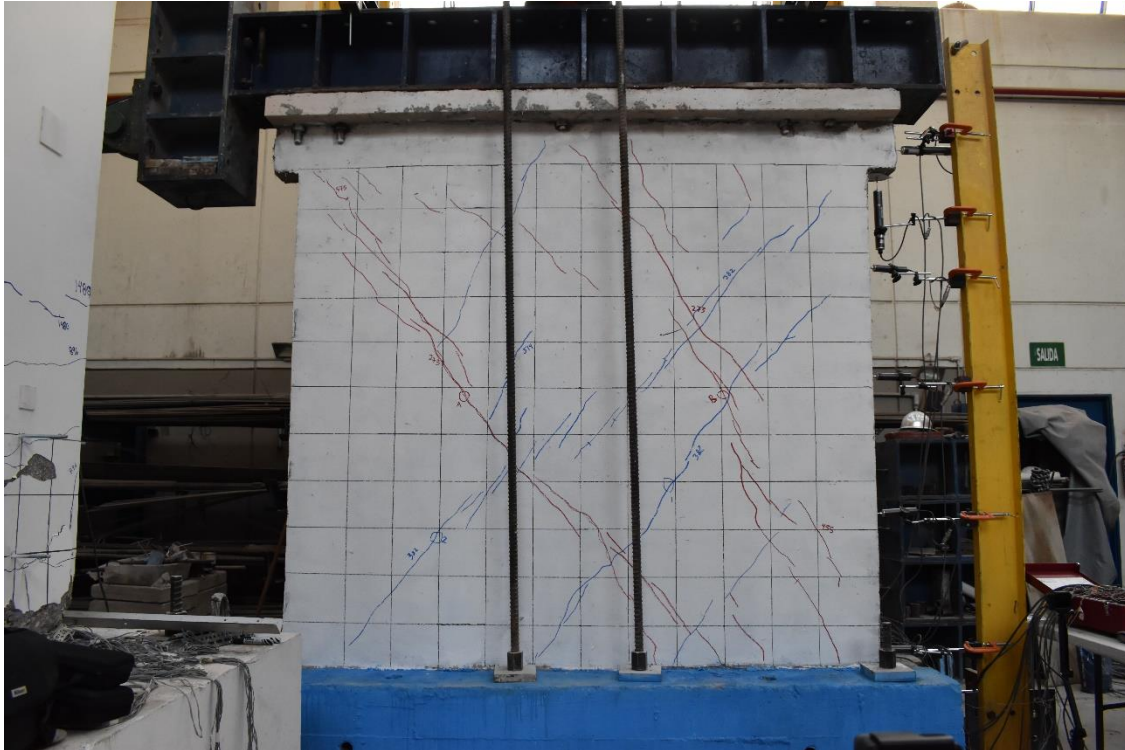


**Figura 149. M-7 a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 2.0 mm, grieta residual: 0.8 mm.**





**Figura 150. M-7 a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 9.0 mm, grieta residual: 5.0 mm.**



**Figura 151. M-7R a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 2.0 mm, grieta residual: 0.6 mm.**



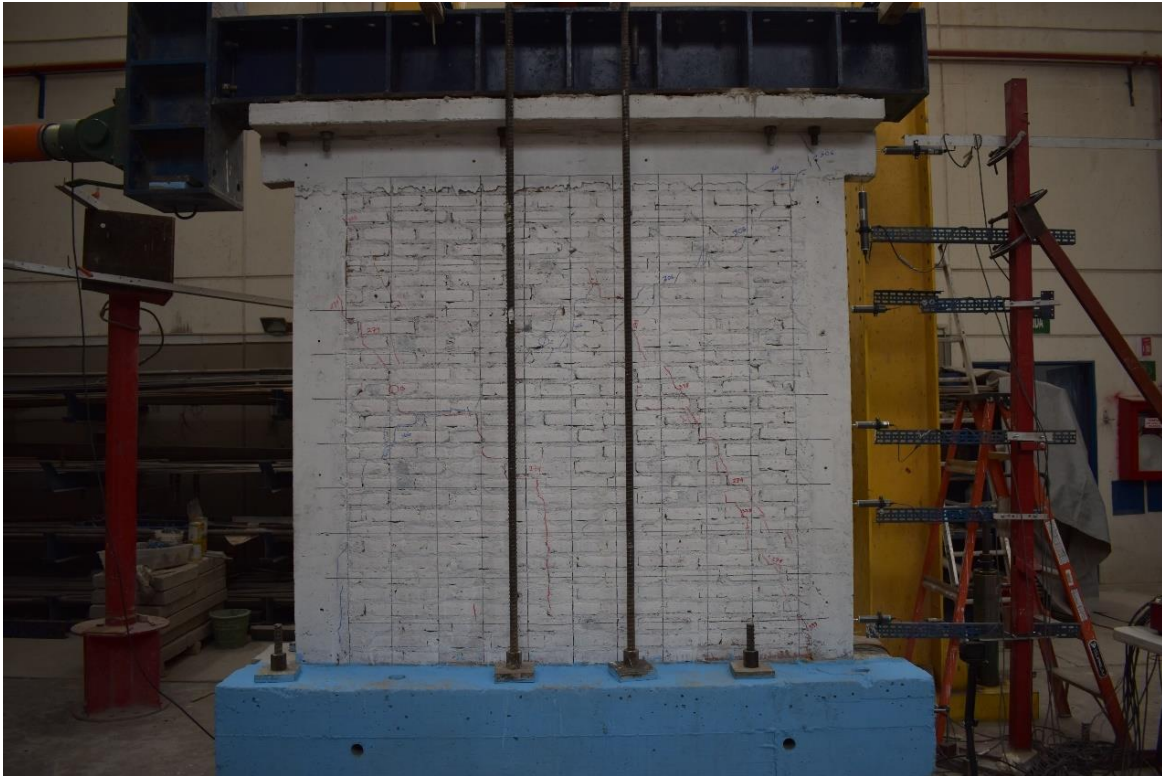


**Figura 152. M-7R a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 3.0 mm, grieta residual: 1.0 mm.**

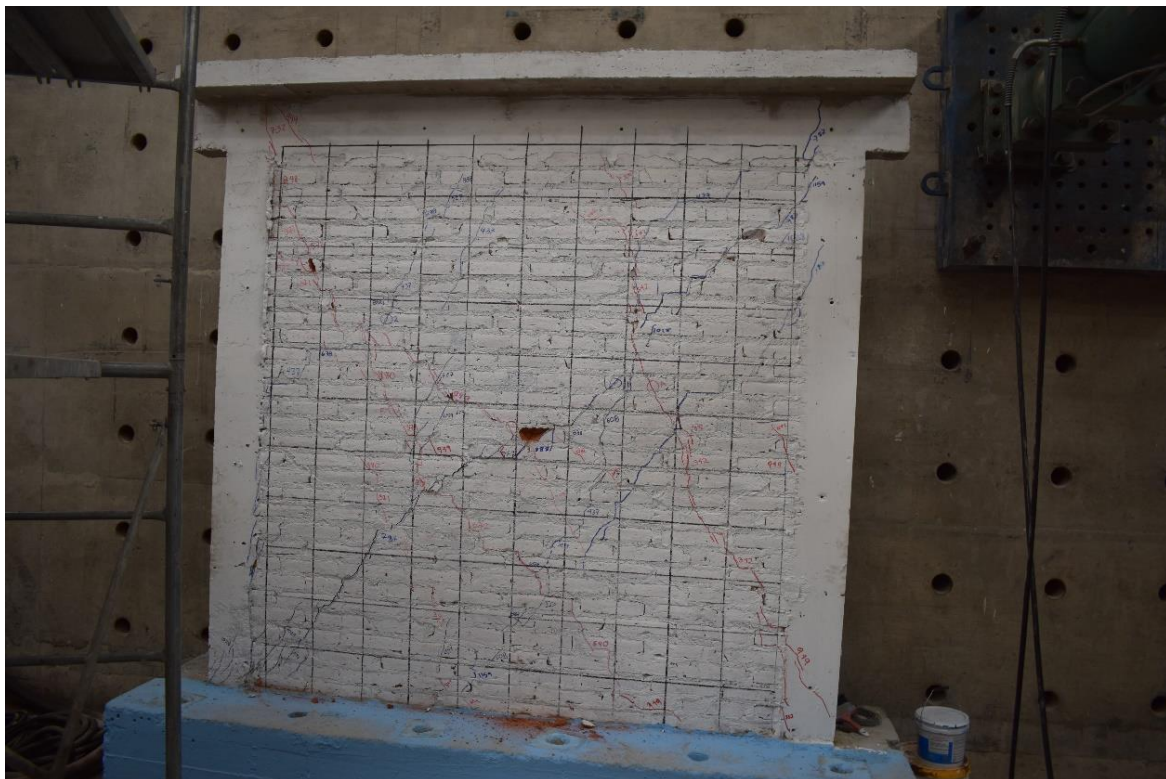


**Figura 153. M-7R a  $\delta = 0.010$ . Grieta pico: 30 mm, grieta residual: 20 mm.**

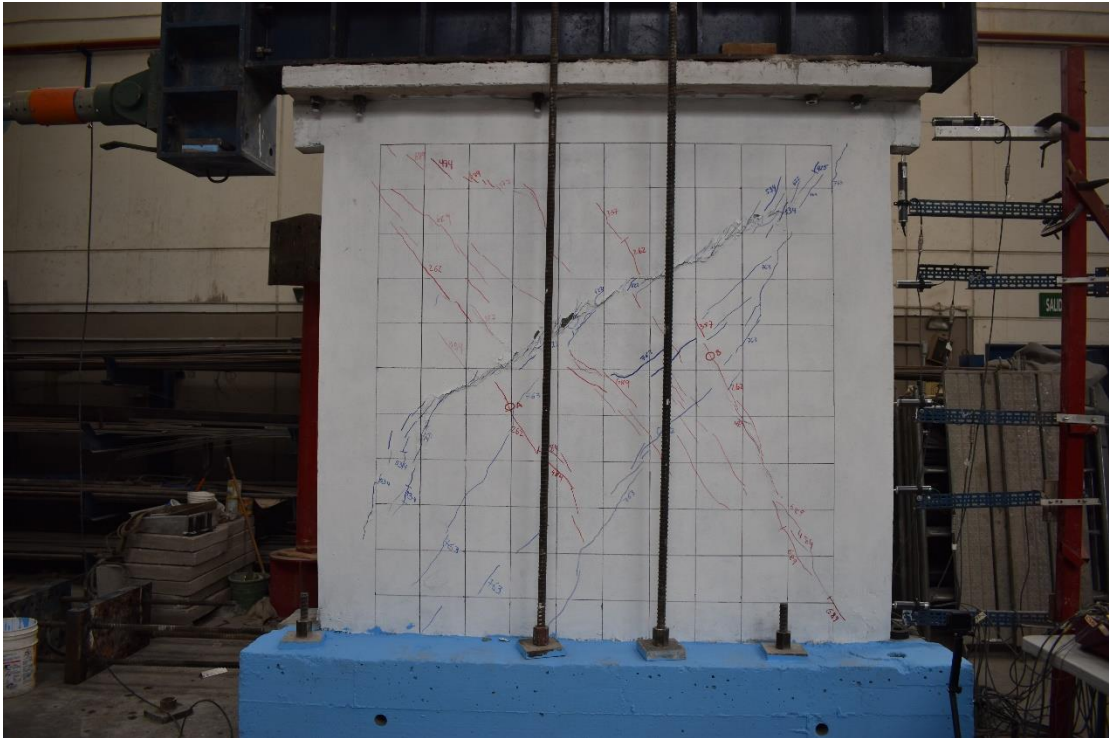




**Figura 154. M-8 a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 3.0 mm, grieta residual: 1.5 mm.**



**Figura 155. M-8 a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 11.0 mm, grieta residual: 6.0 mm.**

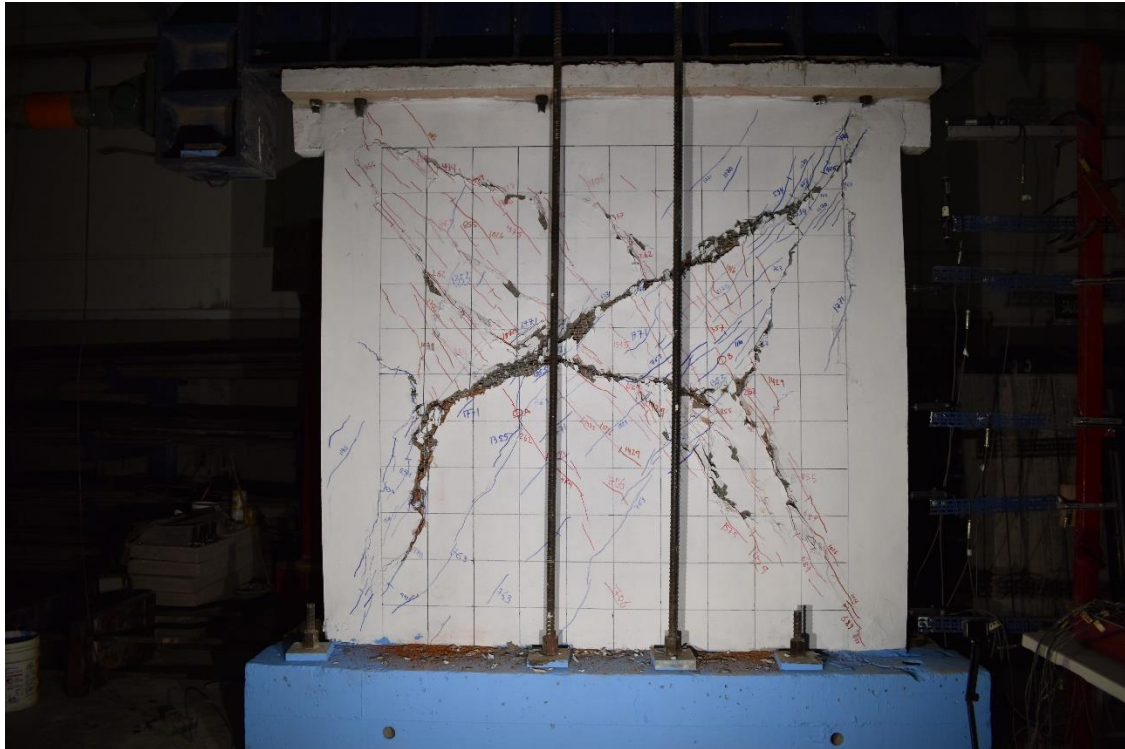


**Figura 156. M-8R a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 1.25 mm, grieta residual: 0.5 mm.**

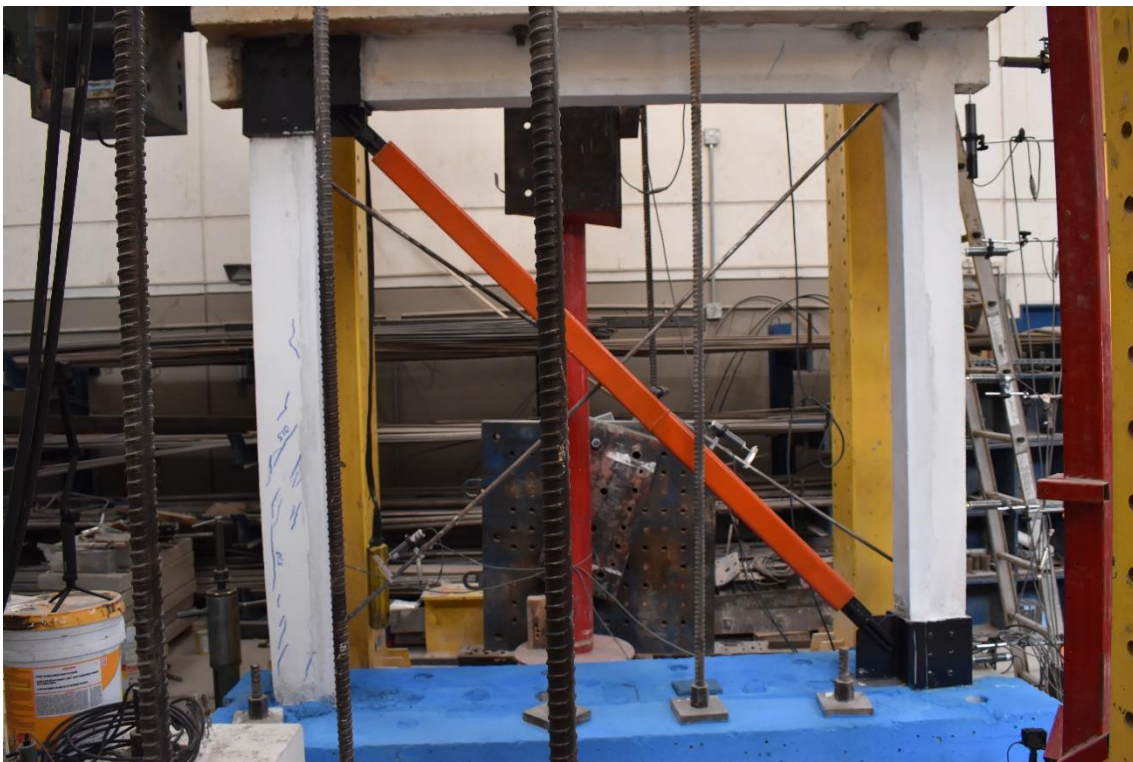


**Figura 157. M-8R a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 1.5 mm, grieta residual: 0.8 mm.**





**Figura 158. M-8R a  $\delta = 0.010$ . Grieta pico: 2.0 mm, grieta residual: 0.8 mm.**



**Figura 159. M-9.**

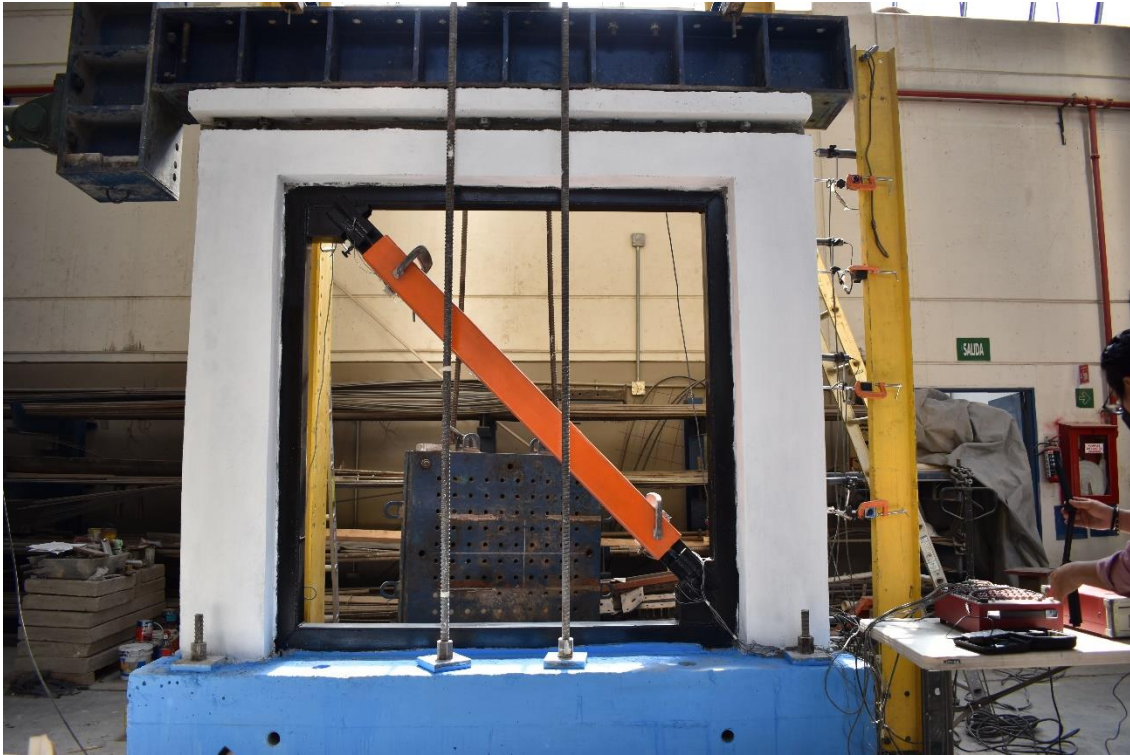


**Figura 160. M-9.**



**Figura 161. M-9.**





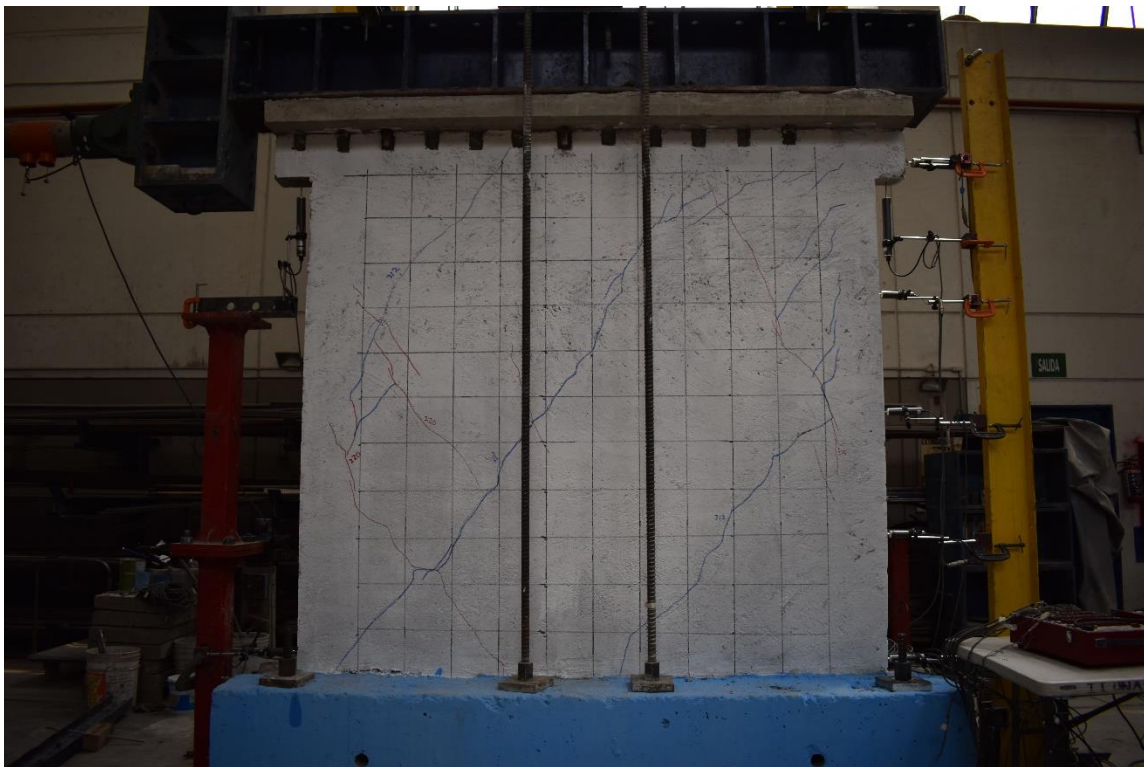
**Figura 162. M-10.**



**Figura 163. M-10.**

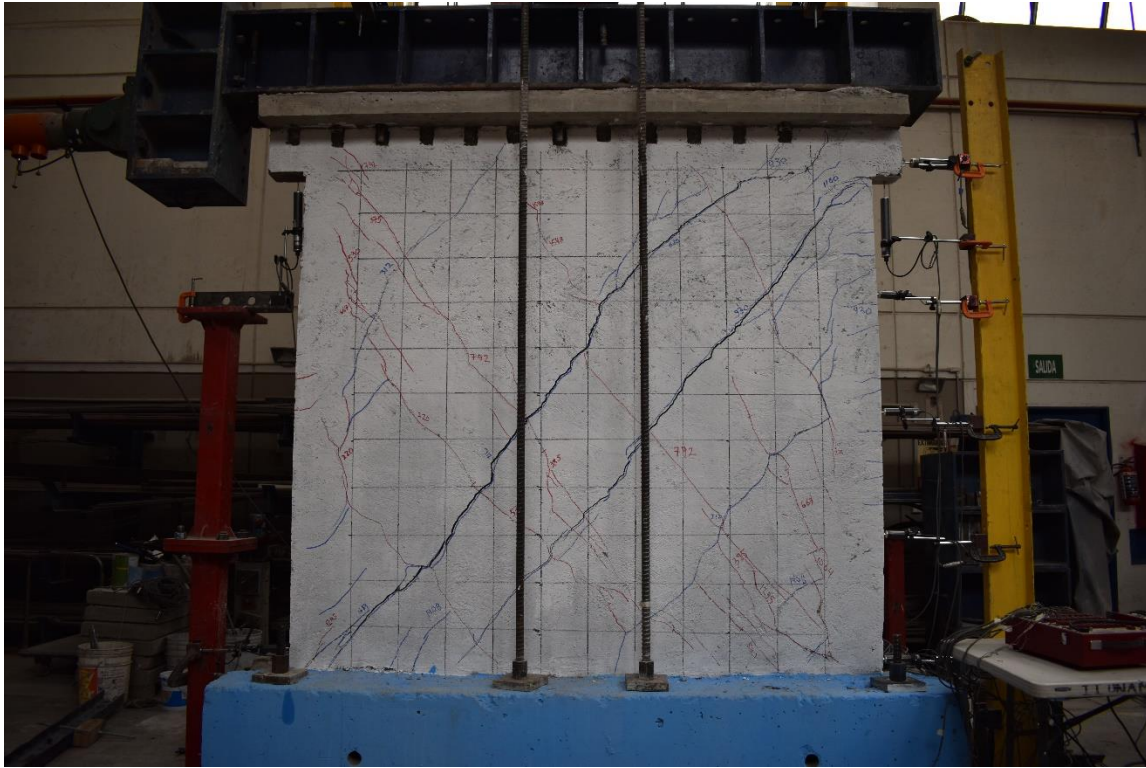


**Figura 164. M-10.**

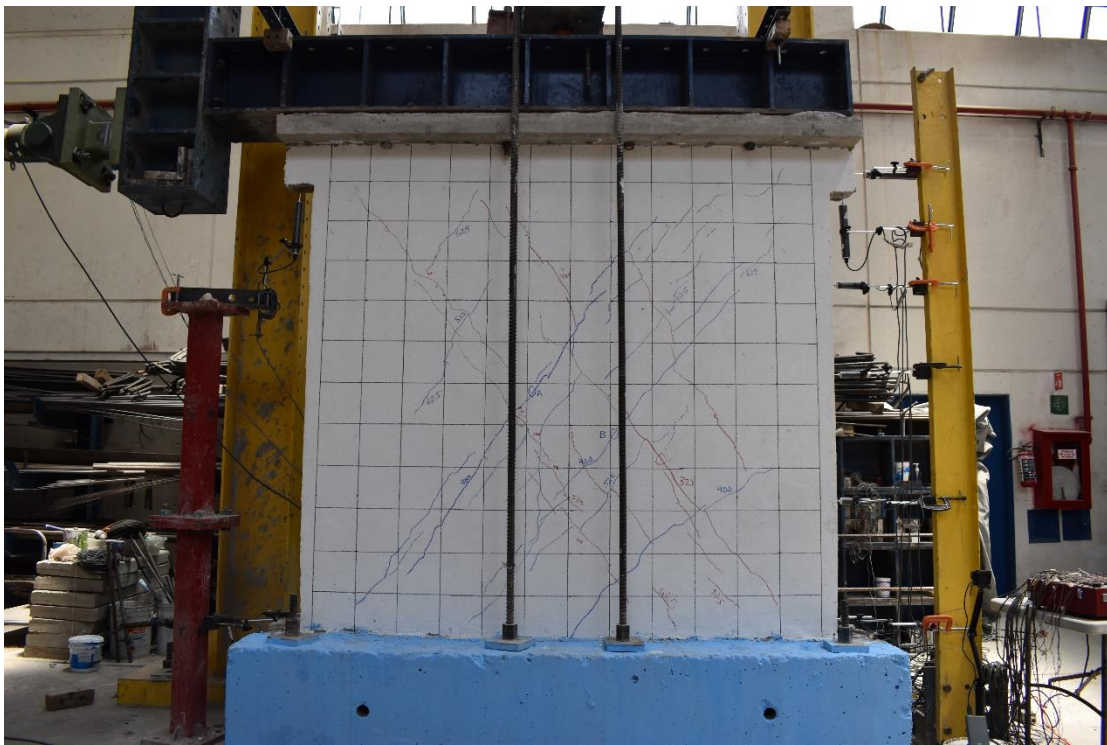


**Figura 165. M-11 a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 3.0 mm, grieta residual: 0.5 mm.**



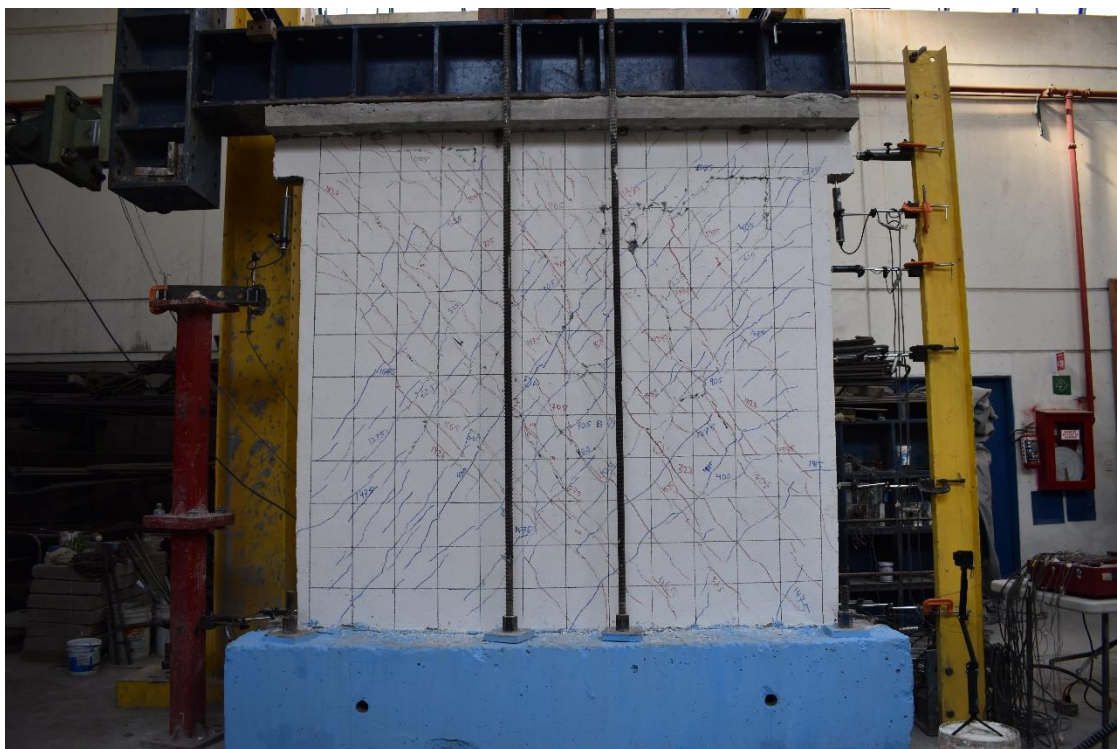


**Figura 166. M-11 a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 7.0 mm, grieta residual: 4.0 mm.**



**Figura 167. M-11R a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 0.6 mm, grieta residual: 1.0 mm.**

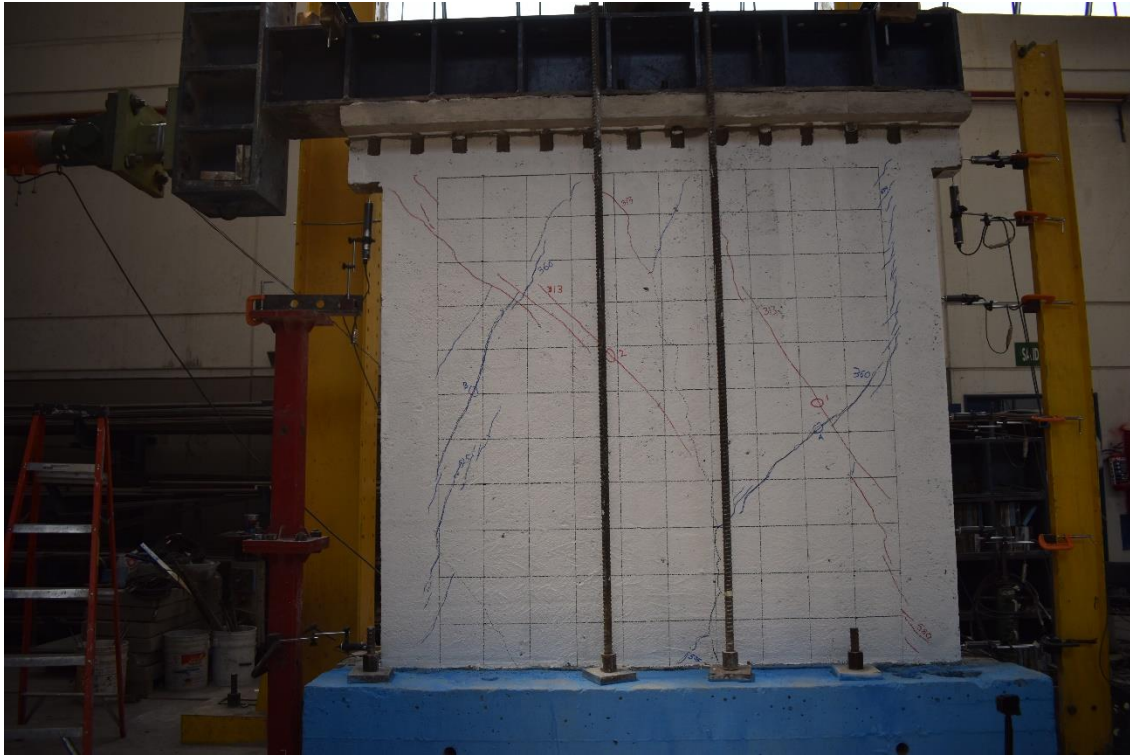




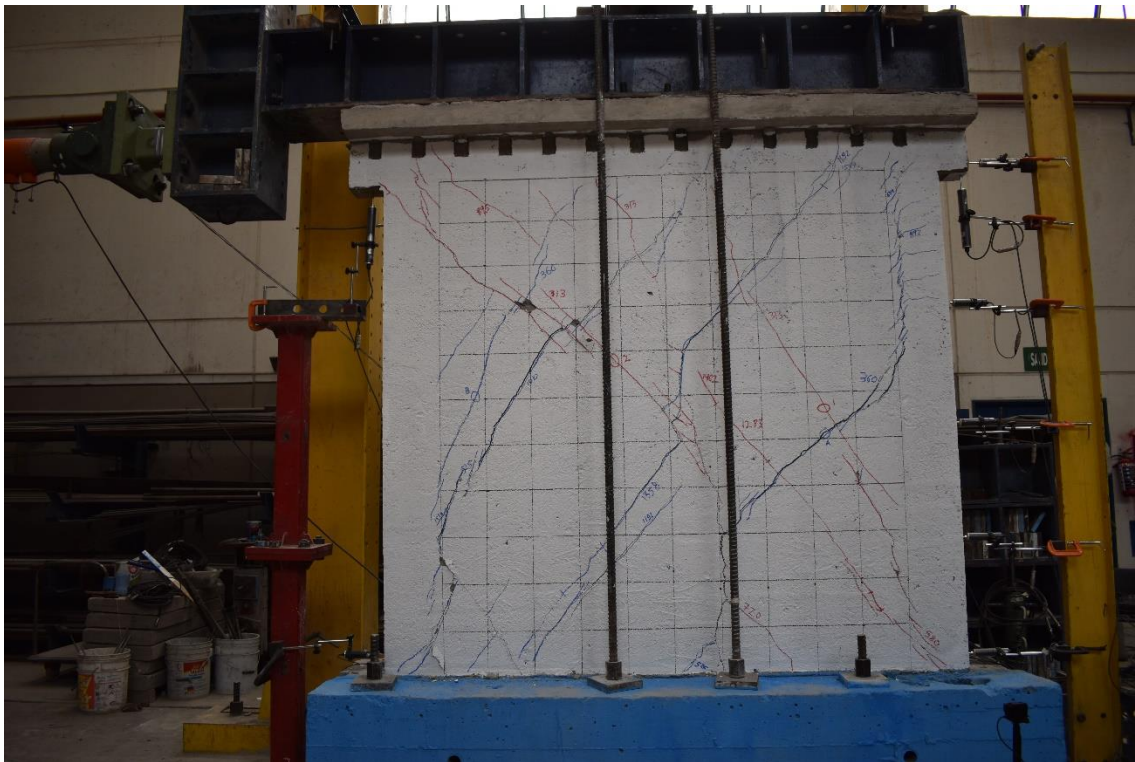
**Figura 168. M-11R a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 1.75 mm, grieta residual: 0.4 mm.**



**Figura 169. M-11R a  $\delta = 0.010$ . Grieta pico: 2.5 mm, grieta residual: 0.6 mm.**

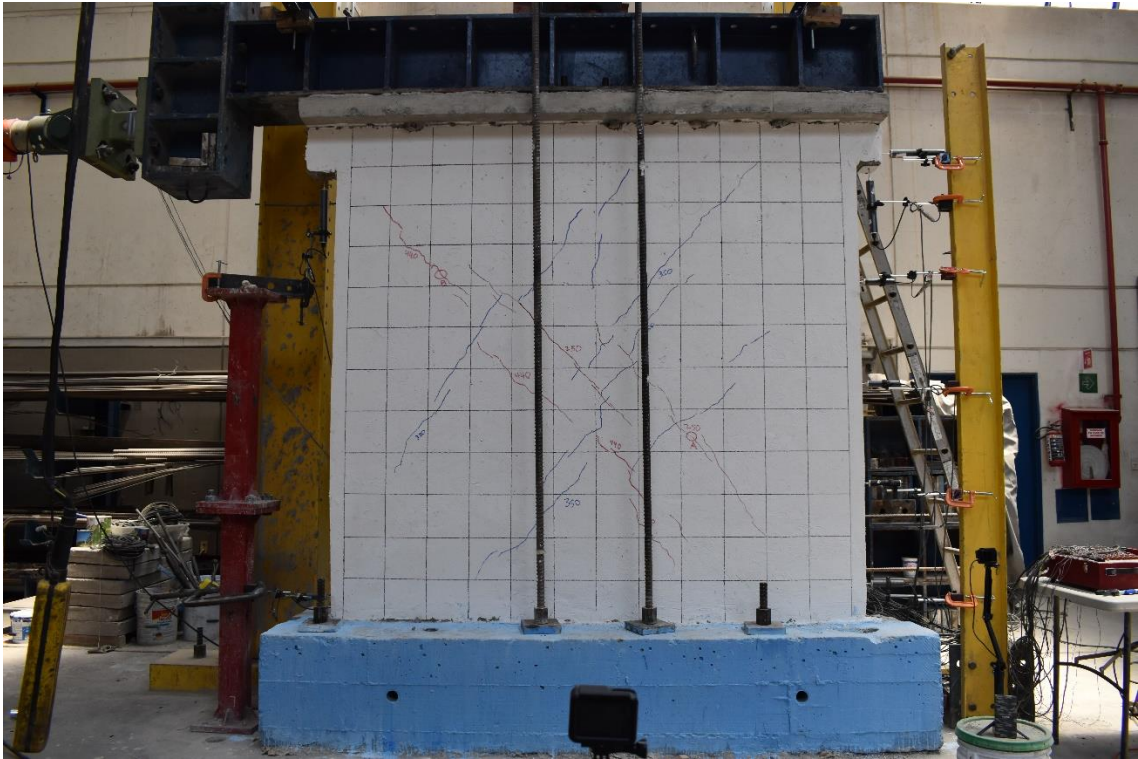


**Figura 170. M-12 a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 0.6 mm, grieta residual: 0.1 mm.**

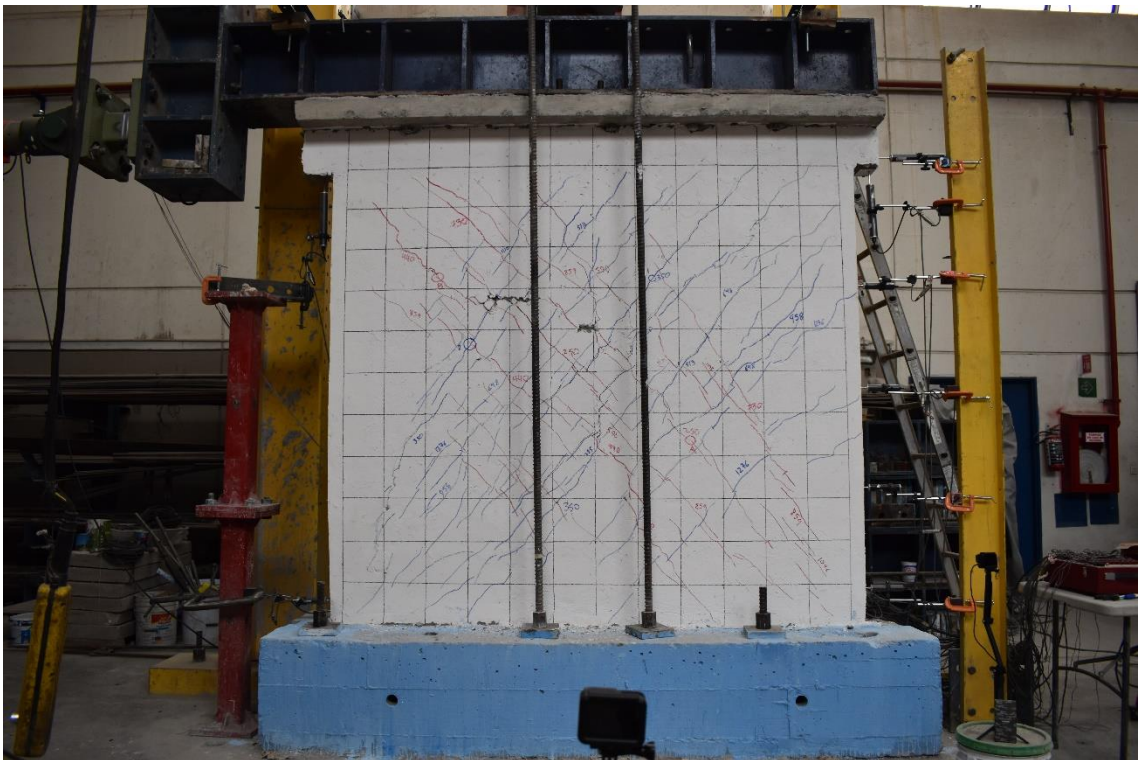


**Figura 171. M-12 a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 1.25 mm, grieta residual: 0.3 mm.**





**Figura 172. M-12R a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 0.6 mm, grieta residual: 0.1 mm.**



**Figura 173. M-12R a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 3.0 mm, grieta residual: 0.4 mm.**





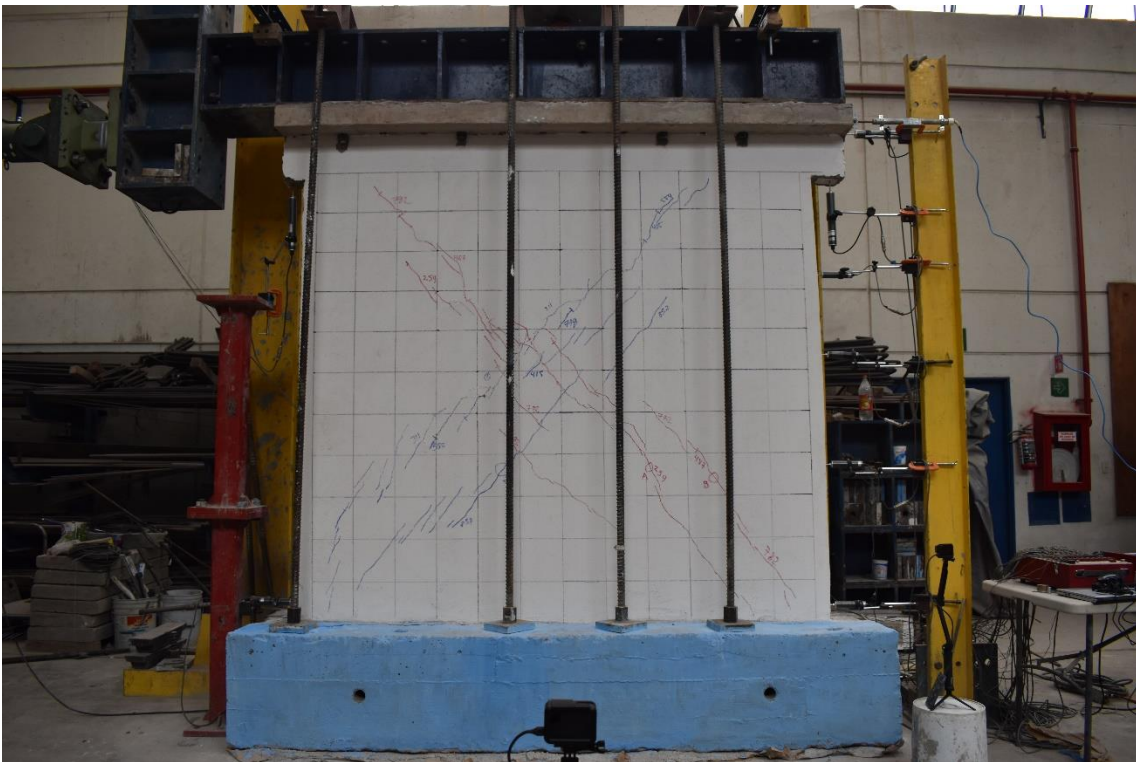
**Figura 174. M-12R a  $\delta = 0.010$ . Grieta pico: 6.0 mm, grieta residual: 2.5 mm.**



**Figura 175. M-13 a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 4.0 mm, grieta residual: 2.0 mm.**

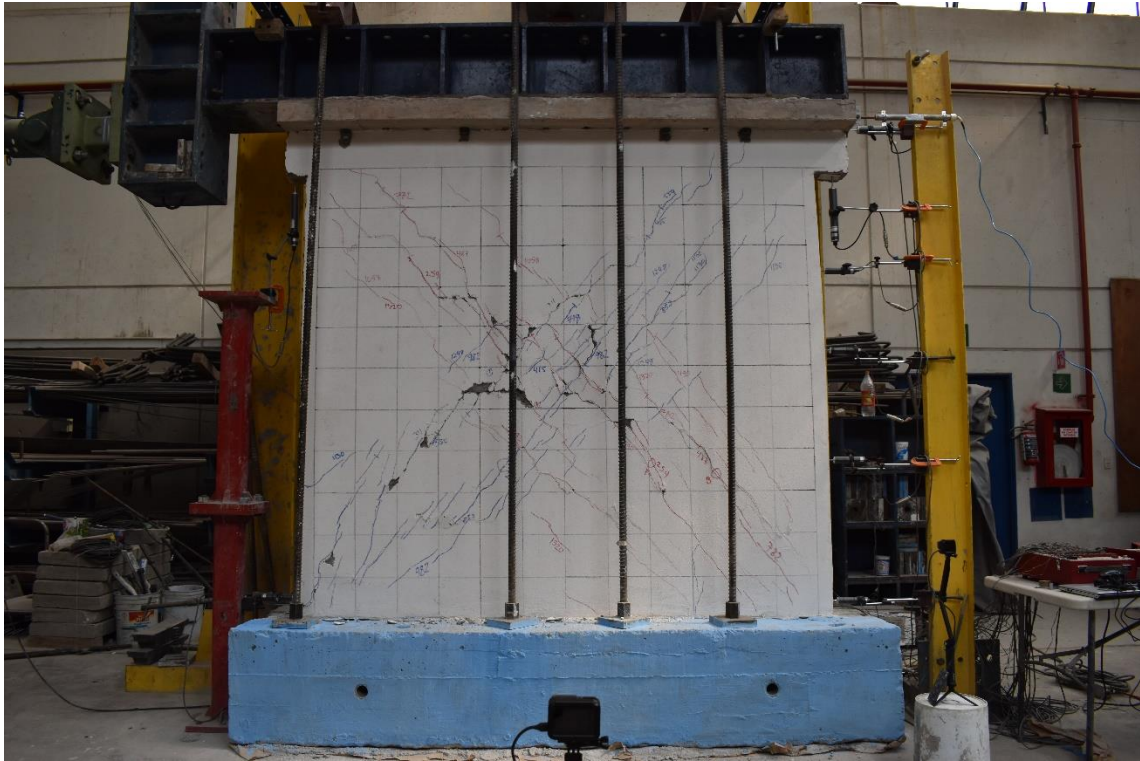


**Figura 176. M-13 a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 5.0 mm, grieta residual: 3.0 mm.**



**Figura 177. M-13R a  $\delta = 0.002$ . Grieta pico: 1.25 mm, grieta residual: 0.35 mm.**





**Figura 178. M-13R a  $\delta = 0.005$ . Grieta pico: 2.5 mm, grieta residual: 1.25 mm.**



**Figura 179. M-13R a  $\delta = 0.010$ . Grieta pico: 5.0 mm, grieta residual: 2.5 mm.**

## 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. EFECTO DE LA REHABILITACIÓN EN LA RESISTENCIA

En la **Figura 180**, se grafica la resistencia máxima de cada espécimen. La resistencia de los especímenes ensayados en su estado original está representada por las columnas rellenas y la de los especímenes rehabilitados está representada por las columnas huecas. La R de las etiquetas significa rehabilitado. En la gráfica, se observa que los especímenes en su estado original presentaron resistencias inferiores, con valores alrededor de 15 t mientras que los especímenes rehabilitados presentaron un incremento significativo en la resistencia. Los especímenes M-3R, M-4R y M-11R, donde la “R” significa rehabilitado, presentaron la resistencia mayor, con valores cercanos a los 35 t. Después, los muros M-1R, M-2R, M-6R, M-7R, M-12R y M-13R tuvieron resistencias cercanas a 30 t, seguidos de los muros M-5R, M-8R, M-9 que presentaron resistencias mayores a 20 t. El espécimen M-10 presentó una resistencia de hasta 56.35 t. Para una mejor interpretación de los resultados mostrados en la **Figura 180**, cabe destacar los puntos siguientes.

- los especímenes M-1R a M-4R fueron rehabilitados con malla electrosoldada en ambas caras mientras que los muros M-5R a M-13R fueron rehabilitados en una sola cara.
- Los especímenes M-3R y M-4R se reforzaron sin daño inicial mientras que todos los demás se dañaron antes de ser rehabilitado.
- El marco del espécimen M-9, rehabilitado con CRP, se obtuvo quitando el panel del muro M-8R después de haber ensayado este último.
- El marco M-10 se rehabilitó con otro contraventeo restringido al pandeo y encamisado de los castillos y de la dala.
- Los muros M-11 y M-12 originalmente se aplanaron con una capa de 2.5 cm de mortero industrial StoneCrete y se rehabilitaron con mortero reforzado tanto con malla electrosoldada calibre 8 como con fibra sintética para M-11R y fibra metálica para M-12R.
- El muro M-13 se construyó con armex en los castillos y se rehabilitó con malla electrosoldada calibre 10.

Los especímenes M1-R y M-4R fueron ambos rehabilitados con malla electrosoldada de calibre 10. En la gráfica, se observa que la resistencia de M-4R alcanzó casi los 35 t. mientras que la de M-1R alcanzó 28.5 t. Eso se debe a que a M-1R se le indujo daño inicialmente mientras que M-4R se reforzó sin daño inicial. El daño inicial tuvo el mismo efecto sobre M-2R (con daño inicial) y M-3R (sin daño inicial) que fueron rehabilitados con malla electrosoldada de calibre 8.

Al comparar los especímenes M-1R (rehabilitado con malla de calibre 10) y M-2R (rehabilitado con malla de calibre 8), se observa que el porcentaje de acero influye en el incremento de la resistencia. A mayor cuantía de acero, mayor incremento de la resistencia.

El espécimen M-9 tuvo un incremento menor de la resistencia porque se rehabilitó con un contraventeo de baja resistencia. En cambio, el espécimen M-10, rehabilitado con un contraventeo de alta resistencia, además del encamisado de su marco, alcanzó una resistencia de 56.35 t.

Los especímenes M-11 y M-12, por tener originalmente un aplanado de mortero de StoneCrete (2018) presentaron una resistencia original mayor de 22 t. Este valor es considerablemente mayor que la resistencia alcanzada por los demás especímenes en su estado original. Por lo tanto, el incremento después de la rehabilitación no es tan significativo como en los demás casos. Sin embargo, el valor alcanzado por la resistencia combinando ambas técnicas con malla electrosoldada y con fibra es muy importante. Además, si se comparan M-11R y M-12R contra M-5R y M-6R que únicamente se rehabilitaron con fibra sintética y fibra metálica respectivamente, se ve que ambos presentaron mayor resistencia.



El muro M-13 alcanzó el menor valor de resistencia original porque se construyó con armado en castillos tipo armex. Sin embargo, después de la rehabilitación con malla electrosoldada calibre 10, casi alcanzó una resistencia de 30 toneladas evidenciando el nivel de eficacia de la técnica de rehabilitación con mortero reforzado con malla electrosoldada. Y si se compara M-13R con M-6R, ambos rehabilitado con malla electrosoldada calibre 10 en una sola cara, se ve que el incremento de la resistencia en el muro construido usando armex es mucho mayor que el incremento de la resistencia en el muro construido usando varillas, por lo que la eficiencia fue mayor en el M-13.

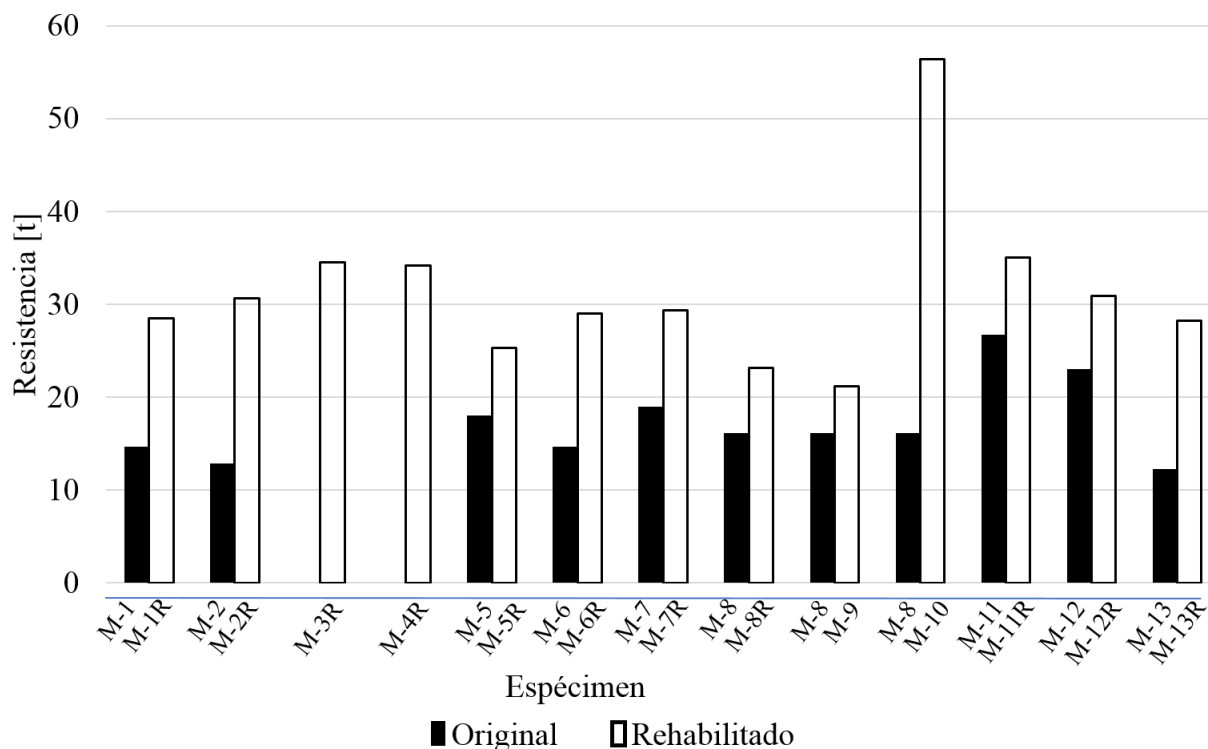


Figura 180 Efecto de la rehabilitación en la resistencia.

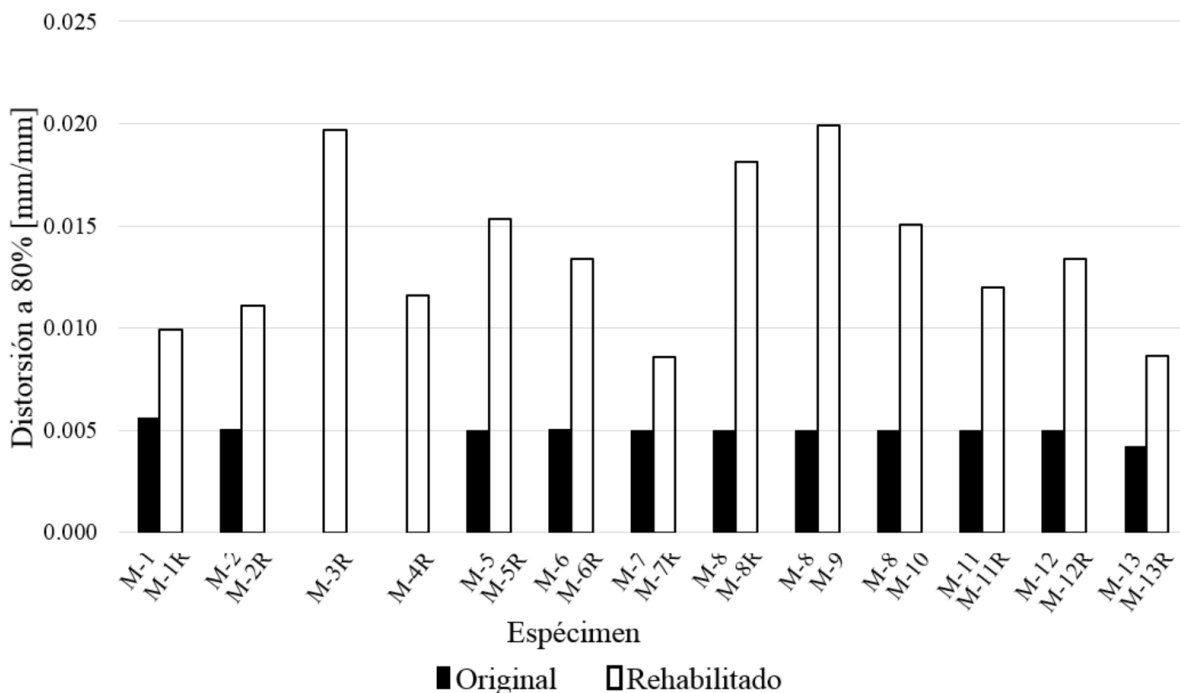
## 6.2. EFECTO DE LA REHABILITACIÓN EN LA CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN

En la **Figura 181**, se grafica la deformación lateral en términos de distorsión para cada espécimen. Estas distorsiones corresponden a una pérdida del 20% de la resistencia máxima ya que muchos autores consideran que este porcentaje podría corresponder razonablemente a la falla del muro. La distorsión de los especímenes ensayados en su estado original está representada por las columnas rellenas. Muy probablemente, esos especímenes pudieron haber alcanzado valores mayores de deformación lateral, quizás cercanas a 0.008, así como el espécimen M-1. Sin embargo, el objetivo solo consistió en inducirles un nivel moderado de daño. Las barras huecas presentan los niveles de deformación lateral, correspondiente a una pérdida del 20% de la resistencia máxima, alcanzado por los especímenes rehabilitados. Se observa que se presentaron distorsiones grandes (mayores a 0.015) en casi todos los casos, a excepción del espécimen M-13R que solamente alcanzó un valor de 0.009 por falta de confinamiento, ya que se construyó con castillos con refuerzo tipo armex y el espécimen M-7R que alcanzó un valor de 0.01 porque se deterioró muy rápidamente la resistencia después de alcanzar su valor máximo.

Al comparar los resultados del muro M-1R y M-R con M4R y M3R respectivamente, se nota que al igual que la resistencia, la capacidad de deformación incrementa considerablemente por el efecto del refuerzo sin daño inicial.

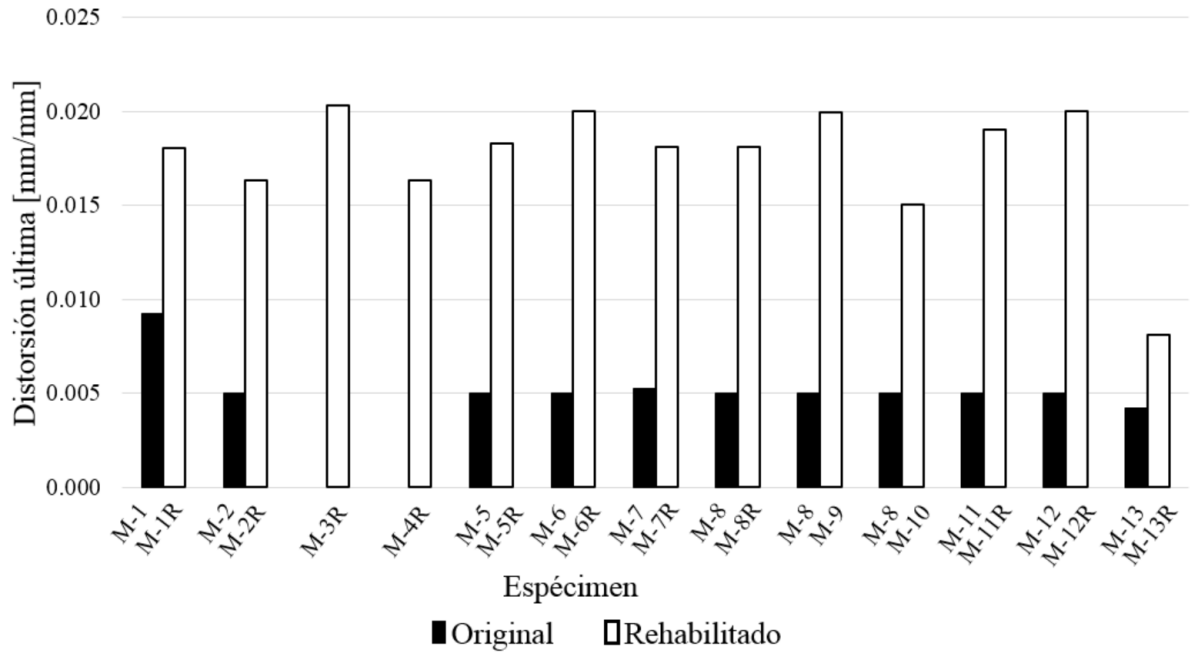
Los especímenes M-9 y M-10 alcanzaron respectivamente los niveles de distorsión 0.020 y 0.015. Estos resultados son muy interesantes ya que muestran que la capacidad de deformación inelástica del contraventeo de menor resistencia es mayor a la del contraventeo de mayor resistencia.

El espécimen M-6R se rehabilitó únicamente con malla, el M-7R se rehabilitó únicamente con fibra. Mientras que los especímenes M-11R y M-12R se rehabilitaron con malla y con fibra. La capacidad de deformación lateral de los muros M-11 y M-11R superan por mucho la del muro M-7 mientras que son similares a la de M-6. Por lo tanto, la malla es muy eficiente para incrementar la capacidad de deformación lateral.



**Figura 181 Efecto de la rehabilitación en la capacidad de deformación lateral. (Distorsión al 80%)**

En la **Figura 182**, se grafica la deformación lateral última en términos de distorsión para cada espécimen. A pesar de que muchos autores consideran que la falla del muro ocurre cuando el deterioro de la resistencia alcanza el 20% de su valor máximo, se decidió continuar con los ensayos para llevar a los muros rehabilitados hasta su falla última. Los resultados son muy interesantes ya que muestran que todos los especímenes alcanzaron niveles de deformación lateral mayores a 0.015. Un valor muy grande considerando que se trata de muros de mampostería que según la norma deberían limitarse a distorsiones máximas de 0.010 o menos. El único espécimen que aún rehabilitado no alcanzó valores mayores de 0.010 es el M-13R que fue construido con armex.



**Figura 182 Efecto de la rehabilitación en la capacidad de deformación lateral (Distorsión última).**

## 7. ANÁLISIS DE COSTOS

Este capítulo fue implementado con el objetivo de desarrollar una herramienta de estimación de costos de las distintas técnicas de rehabilitación consideradas en el presente estudio. Para lograr esto, se recopiló la información sobre recursos humanos, materiales y procesos constructivos. Los resultados para cada espécimen se presentan en las

**Tabla 27 a Tabla 37**, se efectuó el análisis de los costos considerando los diferentes conceptos que intervienen en cada técnica. Al finalizar se presenta una reflexión sobre los costos de las distintas técnicas.

**Tabla 27 Análisis de costos de construcción de los muros originales.**

<b>Análisis: Muro de mampostería confinada</b>	<b>Unidad: pieza</b>			
<p>Construcción de muros de mampostería confinada de 2.5 metros por lado y 12 centímetros de espesor con piezas macizas de tabique rojo recocido, desplantados sobre una viga de cimentación de concreto reforzado. El confinamiento se llevó a cabo mediante una dala de concreto de 12X30 cm reforzada con 4 varillas del #3 y estribos del #2@15 cm y dos castillos de 12X20 cm reforzados con una losa de 10 cm de espesor y 45 cm de ancho.</p>				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Importe</b>
<b>MATERIALES</b>				
Tabique rojo recocido de 6X12X24 cm.	mil	0.4	3220	1288.00
Mortero cemento-arena 1:3, incluye: materiales.	m <sup>3</sup>	0.225	1516.44	341.20
<b>BÁSICOS</b>				
Dala de sección 12X30 cm. f'c = 200 kg/cm <sup>2</sup> , agregado máximo 19 mm, reforzada con 4 varillas del #3 y estribos del No. 2 a cada 20 cm. Incluye: Cimbra común 2 caras, descimbra, material, mano de obra, herramienta y equipo necesario	m	2.5	331.85	829.63
Castillo de sección 12X20 cm. f'c = 200 kg/cm <sup>2</sup> , agregado máximo 19 mm, reforzado con 4 varillas del #4 y estribos del No. 2 a cada 20 cm. Incluye: Cimbra común 2 caras, descimbra, material, mano de obra, herramienta y equipo necesario	m	5	429.2	2146.00
<b>MANO DE OBRA</b>				
Cuadrilla 05 (1 Albañil + 1 peón)	jor	0.893	1040	928.72
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>				
Herramienta menor	%	928.72	0.03	27.86
Andamio.	%	928.72	0.03	27.86
Equipo de seguridad	%	928.72	0.02	18.57
			Costo directo	\$ 5607.84
			Costo indirecto 18%	\$ 1009.41
			<b>Costo total</b>	<b>\$ 6617.25</b>
			<b>Costo por m<sup>2</sup></b>	<b>\$ 1058.76</b>



**Tabla 28 Análisis de costos de rehabilitación de los muros M-1R y M-4R.**

**Análisis: Encamisado con mortero reforzado con malla electrosoldada calibre 10.**

**Unidad: pieza**

Rehabilitación de muro de 2.50 x 2.50 m con mortero cemento-arena, en proporciones 1:3, reforzado con malla electrosoldada 6x6 - 10/10 en ambas caras.

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Importe</b>
<b>MATERIALES</b>				
Mortero cemento-arena 1:3, incluye: materiales.	m <sup>3</sup>	0.393	1516.44	595.96
Malla electrosoldada calibre 10	m <sup>2</sup>	18.2	32	582.40
Clavos para anclaje de 2 1/2" (143 pzas/kg) caja de 20 kg.	kg	0.619	90	55.71
<b>MANO DE OBRA</b>				
Cuadrilla 05 (1 Albañil + 1 peón)	jor	0.893	1040	928.72
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>				
Herramienta menor	%	928.72	0.03	27.86
Andamio.	%	928.72	0.03	27.86
Equipo de seguridad	%	928.72	0.02	18.57
			Costo directo	\$ 2237.09
			Costo indirecto 18%	\$ 402.68
			<b>Costo total</b>	<b>\$ 2639.76</b>
			<b>Costo por m<sup>2</sup></b>	<b>\$ 422.36</b>

**Tabla 29 Análisis de costos de rehabilitación de los muros M-2R y M-3R.**

**Análisis: Encamisado con malla electrosoldada calibre 8.**

**Unidad: pieza**

Rehabilitación de muro de 2.50 x 2.50 m con mortero cemento-arena, en proporciones 1:3, reforzado con malla electrosoldada 6x6 - 8/8 en ambas caras.

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Importe</b>
<b>MATERIALES</b>				
Mortero cemento-arena 1:3, incluye: materiales.	m <sup>3</sup>	0.393	1516.44	595.96
Malla electrosoldada calibre	m <sup>2</sup>	18.2	46	837.20
Clavos para anclaje de 2 1/2" (143 pzas/kg) caja de 20 kg.	kg	0.619	90	55.71
<b>MANO DE OBRA</b>				
Cuadrilla 05 (1 Albañil + 1 peón)	jor	0.893	1040	928.72
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>				
Herramienta menor	%	928.72	0.03	27.86
Andamio.	%	928.72	0.03	27.86
Equipo de seguridad	%	928.72	0.02	18.57
			Costo directo	\$ 2491.89
			Costo indirecto 18%	\$ 448.54
			<b>Costo total</b>	<b>\$ 2940.43</b>
			<b>Costo por m<sup>2</sup></b>	<b>\$ 470.47</b>

**Tabla 30 Análisis de costos de rehabilitación del muro M-5R.**

**Análisis: Aplanado con fibra sintética.**

**Unidad: pieza**

Rehabilitación de muro de 2.50 x 2.50 m con mortero cemento-arena, en proporciones 1:3, reforzado con fibra sintética en una sola cara.

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Importe</b>
<b>MATERIALES</b>				
Mortero cemento-arena 1:3, incluye: materiales.	m <sup>3</sup>	0.273	1516.44	413.99
Malla electrosoldada calibre 10	m <sup>2</sup>	2.9	46	133.40
Clavos para anclaje de 2 1/2" (143 pzas/kg) caja de 20 kg.	kg	0.0969	90	8.72
Fibra sintética	kg	2.63	43	113.09
<b>MANO DE OBRA</b>				
Cuadrilla 05 (1 Albañil + 1 peón)	jor	0.893	1040	928.72
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>				
Herramienta menor	%	928.72	0.03	27.86
Andamio.	%	928.72	0.03	27.86
Equipo de seguridad	%	928.72	0.02	18.57
			Costo directo	\$ 1672.22
			Costo indirecto 18%	\$ 301.00
			<b>Costo total</b>	<b>\$ 1973.22</b>
			<b>Costo por m<sup>2</sup></b>	<b>\$ 315.72</b>

**Tabla 31 Análisis de costos de rehabilitación del muro M-6R.**

**Análisis: Encamisado con malla electrosoldada calibre 8.**

**Unidad: pieza**

Rehabilitación de muro de 2.50 x 2.50 m con mortero cemento-arena, en proporciones 1:3, reforzado con malla electrosoldada 6x6 - 8/8 en una sola cara.

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Importe</b>
<b>MATERIALES</b>				
Mortero cemento-arena 1:3, incluye: materiales.	m <sup>3</sup>	0.273	1516.44	413.99
Malla electrosoldada calibre 8	m <sup>2</sup>	9.1	46	418.60
Clavos para anclaje de 2 1/2" (143 pzas/kg) caja de 20 kg.	kg	0.3094	90	27.85
<b>MANO DE OBRA</b>				
Cuadrilla 05 (1 Albañil + 1 peón)	jor	0.893	1040	928.72
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>				
Herramienta menor	%	928.72	0.03	27.86
Andamio.	%	928.72	0.03	27.86
Equipo de seguridad	%	928.72	0.02	18.57
			Costo directo	\$ 1863.45
			Costo indirecto 18%	\$ 335.42
			<b>Costo total</b>	<b>\$ 2198.87</b>
			<b>Costo por m<sup>2</sup></b>	<b>\$ 351.82</b>



**Tabla 32 Análisis de costos de rehabilitación del muro M-7R.**

<b>Análisis: Aplanado con fibra metálica</b>		<b>Unidad: pieza</b>		
Rehabilitación de muro de 2.50 x 2.50 m con mortero cemento-arena, en proporciones 1:3, reforzado con fibra metálica Sika FiberXorex.				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Importe</b>
<b>MATERIALES</b>				
Mortero cemento-arena 1:3, incluye: materiales.	m <sup>3</sup>	0.273	1516.44	413.99
Malla electrosoldada calibre 10	m <sup>2</sup>	2.9	46	133.40
Clavos para anclaje de 2 1/2" (143 pzas/kg) caja de 20 kg.	kg	0.0969	90	8.72
Fibra metálica	kg	2.63	50.78	133.55
<b>MANO DE OBRA</b>				
Cuadrilla 05 (1 Albañil + 1 peón)	jor	0.893	1040	928.72
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>				
Herramienta menor	%	928.72	0.03	27.86
Andamio.	%	928.72	0.03	27.86
Equipo de seguridad	%	928.72	0.02	18.57
			Costo directo	\$ 1692.68
			Costo indirecto 18%	\$ 304.68
			<b>Costo total</b>	<b>\$ 1997.36</b>
			<b>Costo por m<sup>2</sup></b>	<b>\$ 319.58</b>

**Tabla 33 Análisis de costos de rehabilitación del muro M-8R.**

<b>Análisis: Encamisado con malla de fibra de vidrio</b>		<b>Unidad: pieza</b>		
Rehabilitación de muro de 2.50 x 2.50 m con mortero industrializado Sika MonoTop – 722 Mur, con malla de fibra de vidrio (Sika) anclada a la mampostería con fibra de vidrio.				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Importe</b>
<b>MATERIALES</b>				
Mortero industrial (Sika), incluye: materiales y mano de obra.	kg	136.5	52.04	7103.46
Malla de fibra de vidrio (Sika)	m <sup>2</sup>	9.1	68.69	625.08
Adhesivo epóxico Sikadur 32 Gel para anclaje	kg	0.3	734.27	220.28
<b>MANO DE OBRA</b>				
Cuadrilla 05 (1 Albañil + 1 peón)	jor	0.893	1040	928.72
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>				
Herramienta menor	%	928.72	0.03	27.86
Andamio.	%	928.72	0.03	27.86
Equipo de seguridad	%	928.72	0.02	18.57
			Costo directo	\$ 8951.84
			Costo indirecto 18%	\$ 1611.33
			<b>Costo total</b>	<b>\$ 10563.17</b>
			<b>Costo por m<sup>2</sup></b>	<b>\$ 1690.11</b>

**Tabla 34 Análisis de costos de rehabilitación del muro M-9.**

<b>Análisis: Rehabilitación con contraventeo de baja resistencia</b>		<b>Unidad: pieza</b>		
Rehabilitación de muro de 2.50 x 2.50 m con Contraventeo restringido al pandeo de baja resistencia				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Importe</b>
<b>MATERIALES</b>				
Contraventeo Restringido al pandeo	pza	1	15000	10000.00
<b>MANO DE OBRA</b>				
Cuadrilla 05 (1 Soldador + 1 peón)	jor	0.500	1040	520.00
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>				
Herramienta menor	%	520.00	0.03	15.60
Andamio.	%	520.00	0.03	15.60
Equipo de seguridad	%	520.00	0.02	10.40
		Costo directo		\$ 10561.60
		Costo indirecto	18%	\$ 1901.09
		<b>Costo total</b>		<b>\$ 12462.69</b>
		<b>Costo por m<sup>2</sup></b>		<b>\$ 1994.03</b>

**Tabla 35 Análisis de costos de rehabilitación del muro M-10.**

<b>Análisis: Rehabilitación con contraventeo de alta resistencia</b>		<b>Unidad: pieza</b>		
Rehabilitación con Contraventeo restringido al pandeo de alta resistencia				
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Importe</b>
<b>MATERIALES</b>				
Contraventeo Restringido al pandeo	pza	1	35000	25000.00
<b>MANO DE OBRA</b>				
Cuadrilla 05 (1 Soldador + 1 peón)	jor	0.500	1040	520.00
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>				
Herramienta menor	%	520.00	0.03	15.60
Andamio.	%	520.00	0.03	15.60
Equipo de seguridad	%	520.00	0.02	10.40
		Costo directo		\$ 25561.60
		Costo indirecto	18%	\$ 4601.09
		<b>Costo total</b>		<b>\$ 30162.69</b>
		<b>Costo por m<sup>2</sup></b>		<b>\$ 4826.03</b>

**Tabla 36 Análisis de costos de rehabilitación del muro M-11R.**

**Análisis: Encamisado con malla electrosoldada calibre 8 y fibra sintética. Unidad: pieza**

Rehabilitación de muro de 2.50 x 2.50 m con mortero cemento-arena, en proporciones 1:3, reforzado tanto con malla electrosoldada 6x6 - 8/8 como con fibra sintética en una sola cara.

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Importe</b>
<b>MATERIALES</b>				
Mortero cemento-arena 1:3, incluye materiales.	m <sup>3</sup>	0.273	1516.44	413.99
Malla electrosoldada calibre 8	m <sup>2</sup>	9.1	46	418.60
Clavos para anclaje de 2 1/2" (143 pzas/kg) caja de 20 kg.	kg	0.3094	90	27.85
Fibra sintética	kg	2.63	43	113.09
<b>MANO DE OBRA</b>				
Cuadrilla 05 (1 Albañil + 1 peón)	jor	0.893	1040	928.72
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>				
Herramienta menor	%	928.72	0.03	27.86
Andamio.	%	928.72	0.03	27.86
Equipo de seguridad	%	928.72	0.02	18.57
			Costo directo	\$ 1976.54
			Costo indirecto 18%	\$ 355.78
			<b>Costo total</b>	<b>\$ 2332.32</b>
			<b>Costo por m<sup>2</sup></b>	<b>\$ 373.17</b>



**Tabla 37 Análisis de costos de rehabilitación del muro M-12R.**

**Análisis: Encamisado con malla electrosoldada calibre 8 y fibra metálica**      **Unidad: pieza**

Rehabilitación de muro de 2.50 x 2.50 m con mortero cemento-arena, en proporciones 1:3, reforzado tanto con malla electrosoldada 6x6 - 8/8 como con fibra metálica en una sola cara.

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Importe</b>
<b>MATERIALES</b>				
Mortero cemento-arena 1:3, incluye: materiales.	m <sup>3</sup>	0.273	1516.44	413.99
Malla electrosoldada calibre 8	m <sup>2</sup>	9.1	46	418.60
Clavos para anclaje de 2 1/2" (143 pzas/kg) caja de 20 kg.	kg	0.3094	90	27.85
Fibra metálica	kg	2.63	50.78	133.55
<b>MANO DE OBRA</b>				
Cuadrilla 05 (1 Albañil + 1 peón)	jor	0.893	1040	928.72
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>				
Herramienta menor	%	928.72	0.03	27.86
Andamio.	%	928.72	0.03	27.86
Equipo de seguridad	%	928.72	0.02	18.57
			Costo directo	\$ 1997.00
			Costo indirecto	18% \$ 359.46
			<b>Costo total</b>	<b>\$ 2356.46</b>
			<b>Costo por m<sup>2</sup></b>	<b>\$ 377.03</b>

En la **Tabla 38**, se muestran los costos por unidad de resistencia y de energía acumulada para cada una de las técnicas de rehabilitación empleadas. Si se observa la columna de costo por m<sup>2</sup>, los valores son muy diferentes siendo más económicas las técnicas con malla electrosoldada y fibras metálicas en comparación con las técnicas con malla de fibra de vidrio y contraventeos. Sin embargo, podría no ser la forma de comparación correcta, ya que los valores de resistencia y energía acumulada varían de una técnica a otra. Por lo tanto, comparando los valores de la columna de costo por tonelada, se aprecia que la técnica más económica es la rehabilitación con malla electrosoldada calibre 8 y fibra metálica con un costo de \$ 66.54 MN por toneladas y la más cara es la rehabilitación con contraventeos de alta resistencia con un costo de \$ 535.27 MN. Los costos de la rehabilitación con contraventeo de baja resistencia y con malla de fibra de vidrio siendo \$428.27 MN y \$456.29 respectivamente no están tan alejados del costo de la rehabilitación con contraventeo de alta resistencia. Finalmente, se comparan los valores de la columna Costo por unidad de energía. La técnica menos económica es la rehabilitación con malla de fibra de vidrio costando \$ 38.18 MN por t – cm seguida de la rehabilitación con contraventeos de alta resistencia que cuesta \$ 14.16 MN. Mientras que las técnicas más económicas fueron la rehabilitación con malla y fibras metálicas o sintéticas con valores cercanos a \$ 3 MN por t – cm.

**Tabla 38 Costos de las técnicas por tonelada y por unidad de energía acumulada.**

No	Técnica	Costo por m <sup>2</sup> [\$ MN]	Resistencia [t]	Energía acumulada [t-cm]	Costo por tonelada [\$ MN]	Costo por t-cm [\$ MN]
1	Encamisado con malla calibre 10 en ambas caras	422.36	28.50	767.61	92.62	3.44
2	Encamisado con malla calibre 8 en ambas caras	470.47	30.65	557.69	95.94	5.27
3	Aplanado con fibra sintética en una sola cara	315.72	25.30	349.25	77.99	5.65
4	Encamisado con malla calibre 8 en una sola cara	351.82	29.05	535.24	75.69	4.11
5	Aplanado con fibra sintética en una sola cara	319.58	29.35	401.86	68.05	4.97
6	Encamisado con malla de fibra de vidrio en una sola cara	1690.11	23.15	276.69	456.29	38.18
7	Rehabilitación con contraventeo restringido al pandeo de baja resistencia.	1994.03	29.1	2640.78	428.27	4.72
8	Rehabilitación con contraventeo restringido al pandeo de alta resistencia.	4826.03	56.35	2130.05	535.27	14.16
9	Encamisado con malla calibre 8 y fibra sintética en una sola cara	373.17	35.05	712.55	66.54	3.27
10	Encamisado con malla calibre 8 y fibra metálica en una sola cara	377.03	30.9	630.16	76.26	3.74

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 Conclusiones

En este trabajo, se presentaron resultados obtenidos de un programa experimental de muros de mampostería confinada ensayados ante carga cíclica reversible en el Laboratorio de Estructuras Grandes del Centro Nacional de Prevención de Desastres. Se ensayaron trece especímenes, de los cuales, once fueron ensayados en su estado original para inducir daño inicial y luego rehabilitados usando diferentes técnicas de rehabilitación. Otros dos muros se rehabilitaron sin inducir daño inicial. Las técnicas usadas consistieron en aplanado de mortero convencional reforzado con malla electrosoldada de diferentes calibres, con malla de fibra de vidrio y con fibras sintéticas y fibras metálicas. Se usaron diferentes tipos de mortero para el aplanado, tanto mortero convencional tipo I como mortero industrializado Sika MonoTop – 722 Mur (2020) y StoneCrete (2018). A continuación, se ofrecen algunas conclusiones sobre los principales resultados obtenidos.

- Todas las técnicas de rehabilitación resultaron exitosas ya que en todos los casos aumentaron considerablemente tanto la resistencia como la capacidad de deformación de los muros.
- La resistencia y la capacidad de deformación lateral de los muros reforzados sin daño inicial fue claramente mayor a las de los muros con daño inicial.
- Los primeros especímenes se rehabilitaron en ambas caras. Eso que provocó que la resistencia a cortante fuese más alta y originó un cambio en el modo de falla. El modo de falla fue por deslizamiento de la base, seguida de una falla en flexo-compresión de los castillos.
- Las distintas técnicas de rehabilitación incrementaron la rigidez inicial de los muros, incluso ésta se mantuvo consistentemente por arriba de aquella de los muros ensayados en su estado original.
- La rigidez es altamente dependiente del nivel de distorsión impuesta en los muros, por lo que se debe discutir más sobre los valores actualmente especificados en las NTC-mampostería (2020).
- La grieta residual resultó, en promedio, cercana a 1 mm para una distorsión de 0.002 y cercana a 5 mm para una distorsión de 0.005.
- Los muros rehabilitados con malla electrosoldada dieron resultados muy interesantes. Presentaron una distribución más uniforme de las grietas sobre toda la superficie del panel del muro. Además, los valores de incremento de la resistencia y la capacidad de deformación son mayores en comparación con las demás técnicas.
- El costo de las técnicas de rehabilitación es relativamente bajo cuando se evalúa la eficiencia de los métodos en términos de incremento de la resistencia y la capacidad de deformación de los muros rehabilitados. La técnica más económica en términos de costo por tonelada de resistencia y por unidad de energía acumulada es la rehabilitación combinada usando malla electrosoldada calibre 8 y fibras metálicas o sintéticas.
- El espécimen rehabilitado con contraventeo restringido al pandeo de baja resistencia dio resultados sorprendentes en cuanto al incremento de la capacidad de deformación lateral y de disipación de energía.

### 8.2 Recomendaciones

- Los resultados obtenidos en este programa experimental se pueden complementar con más estudios sobre todo en términos del anclaje de los encamisados con los muros cuando estos están ensamblados con las diferentes configuraciones posibles, como: en T, en Cruz, en L, etc.
- Se recomienda extender este estudio experimental para ensayar edificaciones autoconstruidas. Se obtendrían resultados sumamente útiles para mejorar las prácticas constructivas y con ello incrementar la resiliencia sísmica de las mismas mediante las diferentes técnicas de rehabilitación.

- Se puede profundizar el estudio de los costos de las técnicas de rehabilitación para evaluar mejor el nivel de eficiencia de cada método no solo en términos de incremento de resistencia, de capacidad de deformación lateral y de capacidad de disipación de energía sino también en términos y de beneficios económicos a largo plazo.

## REFERENCIAS

- [1] INEGI (2020). **Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica.** Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/> el 01/oct/2020.
- [2] N-Rehabilitación (2017). **“Normas para la rehabilitación sísmica de edificios de concreto dañados por el sismo del 19 de septiembre de 2017.”** Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 220 Bis, 107-371.
- [3] NTC-Mampostería. (2020). **“Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería.”** Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 220 Bis, 372-566.
- [4] NTC-Sismo (2017). **“Normas técnicas complementarias para diseño por sismo.”** Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 220 Bis, 44-83.
- [5] SMIE. (2012). **“Guía para el Análisis de Estructuras de Mampostería”** - Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A. C. Ciudad de México.
- [6] NMX-C-036-ONNCCE (2013), **“Industria de la construcción – Mampostería – Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines – Método de ensayo”**, Norma Mexicana, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- [7] NMX-C-083-ONNCCE (2014), **“Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes – Método de ensayo”**, Norma Mexicana, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- [8] NMX-C-128-ONNCCE (2013), **“Industria de la construcción – Concreto sometido a compresión – Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson”**, Norma Mexicana, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- [9] NMX-C-464-ONNCCE (2010), **“Industria de la construcción – Mampostería – Determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes, así como determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o de concreto - Método de ensayo”**,



Norma Mexicana, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.

- [10] SMIE (2019), “**Edificaciones de Mampostería**”, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural A.C., Ed. Limusa.
- [11] Sika (2020), “**Mortero monocomponente para la reparación y el refuerzo de muros tradicionales**”, Ficha técnica publicada por la empresa Sika, México 2020.
- [12] StoneCrete (2018), “**Mortero para aplanado estructural**”, Ficha técnica publicada por Industrial Mexicana S.A. de C.V., México 2018
- [13] Soto, E., (2008), “Rehabilitación de estructuras de concreto”. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [14] Alcocer, S. M. (2019), “**Rehabilitación de estructuras de mampostería. Edificaciones de Mampostería.**”, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural A.C., Ed. Limusa.
- [15] Meli, R. P. (2014), “**Mampostería Estructural. La práctica, La investigación y el comportamiento sísmico observado en México**”, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Cuadernos de Investigación Julio – 994, No.17, Versión Electrónica 2014.
- [16] Flores (2012), “**Rehabilitación de muros de mampostería de Piezas multiperforadas reforzados con mortero con fibras o con mortero y malla de alambre**”, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero, 2012.
- [17] Guerrero (2020), “**Pruebas experimentales de muros de mampostería rehabilitados con técnicas diversas**”, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, XXII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Aguascalientes, Aguascalientes, 2020.