



SEGURIDAD
SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CENAPRED
CENTRO NACIONAL DE
PREVENCIÓN DE DESASTRES

**SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

**ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE MUROS DE MAMPOSTERÍA
REHABILITADOS CON CONCRETOS CON FIBRAS**

PROGRAMA ANUAL DE TRABAJO 2020

Felipe Bennetts Toledo

Oscar López Bátiz

Héctor Guerrero Bobadilla, Investigador del Instituto de Ingeniería UNAM

Becario de Maestría, Instituto de Ingeniería UNAM

Dirección de Investigación

Subdirección de Riesgos Estructurales

Febrero de 2021

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVO Y ALCANCES.....	4
1. PROGRAMA DE PRUEBAS	4
2. CONFIGURACION DEL EXPERIMENTO	6
3. REHABILITACIÓN DE LOS MODELOS.....	7
4. PROTOCOLO DE CARGA E INSTRUMENTACIÓN	9
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES GENERALES	11
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	15
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	25
REFERENCIAS	26
AGRADECIMIENTOS.....	27

INTRODUCCIÓN

En años recientes se ha incrementado el estudio y uso de concretos innovadores que mejoran el comportamiento de los elementos estructurales. Uno de ellos es el concreto reforzado con fibras. Aunque su estudio ha sido poco desarrollado en México, existen algunos esfuerzos realizados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) y en el Centro Nacional de Prevención de Desastres Naturales (CENAPRED), en donde se han ensayado algunos elementos como: muros de concreto y mampostería, conexiones muro-losa, vigas y losas (ej. Carrillo y Alcocer, 2012, Saavedra et al., 2017; Guerrero et al., 2018, entre otros).

Existe un gran interés en México por evaluar el comportamiento de elementos dañados, rehabilitados con concretos y/o morteros con fibras u otras opciones. Aunque las Normas para la Rehabilitación Sísmica de Edificios de Concreto Dañados, emitidas por el gobierno de la Ciudad de México después del Sismo del 19 de septiembre de 2017, permiten el uso de morteros con fibras metálicas para el refuerzo de elementos de concreto y mampostería, existen aún dudas sobre la contribución del refuerzo y la forma de evaluarlo cuantitativamente. Estas normas recomiendan dosificaciones mínimas de 40 kg/m³ y una relación de aspecto, largo/diámetro de las fibras, mínima de 50. Estos valores se derivaron de experimentos de muros de concreto rehabilitados con un encamisado de concreto con fibras de acero principalmente en Estados Unidos y Japón, por lo que su uso en nuestro país, por las diferencias en los procedimientos constructivos y de supervisión de obra, podría resultar inadecuadas y poco eficientes.

En México se han realizado experimentos sobre algunas metodologías de rehabilitación consistentes con la realidad social y económica del país (como inserción de piezas metálicas o aplanado sobre malla de alambres soldados) (Alcocer et al, 1996). También se encontró que la técnica de encamisado de muros, especialmente aquella que consiste en aplanado sobre malla de alambres electro-soldados, se usa en varios países del mundo de manera práctica, económica y eficiente. Para el caso del encamisado con concreto reforzado con fibras, se ha observado que no hay muchos estudios aplicados a la rehabilitación de muros, específicamente de mampostería que constituyen aproximadamente el 80% del universo de edificación para vivienda en México. Al parecer, uno de los pocos estudios a nivel Latinoamérica en muros rehabilitados con concreto reforzado con fibras (CRF) se han hecho en México por Carrillo et al. (2010), Flores et al. (2012) y Ávila et al. (2011). La mayoría de los estudios se ha enfocado en el refuerzo de elementos lineales, columnas y vigas, los cuales han demostrado que los encamisados de CRF permiten recuperar e, incluso, mejorar la capacidad de resistencia y de deformación de los elementos. Algo muy significativo que se ha notado es que la combinación de técnicas ha mostrado resultados interesantes desde el punto de vista de ventajas, tanto para el constructor, como para el usuario.

A raíz de los sismos de 2017, se desarrolló un amplio esfuerzo de rehabilitación de edificios en la zona centro del país. Si bien la mayoría de los edificios es de concreto, también se

han rehabilitado edificios de mampostería con muros de carga. Las técnicas de rehabilitación de muros han consistido, principalmente, considerando:

1. Sustitución de muros dañados por muros nuevos.
2. Encamisado de muros de mampostería con mallas de alambre electro-soldado recubiertas con mortero o concreto.
3. Encamisado de muros de concreto, mediante la adición de capas de concreto, en una o dos caras.

En la información disponible, no se tiene evidencia del uso de mortero o concreto con fibras (metálicas y/o sintéticas) diseñado explícitamente para incrementar las capacidades de carga lateral y de deformación de la estructura; es decir, refuerzo con la finalidad de mejorar el desempeño estructural ante la demanda sísmica.

En este documento se presenta la propuesta general para realizar un programa de investigación experimental en muros de mampostería y de concreto reforzado rehabilitados con morteros con fibras. En total se plantea ensayar 22 muros, cada muro será ensayado sin daño, será rehabilitado y ensayado otra vez. De los 22 muros, ocho serán de mampostería y 14 de concreto reforzado con fibras. El presente reporta abarca la primera parte del estudio experimental.

OBJETIVOS Y ALCANCES

Evaluar experimentalmente la factibilidad del uso de concreto reforzado y/o mortero con fibras en la rehabilitación de muros de mampostería y de concreto reforzado.

Como se mencionó anteriormente, las pruebas se realizarán, primero, en los especímenes nuevos, generando daño controlado. Después, éstos serán rehabilitados y ensayados nuevamente. Para las rehabilitaciones se utilizarán diversas técnicas y se evaluarán las ventajas y desventajas de cada una, desde una visión de desempeño: revisando la resistencia lateral y la capacidad a deformación.

1. PROGRAMA DE PRUEBAS

Las cargas en los elementos se aplicarán de manera cuasi-estática siguiendo un protocolo de carga cíclica reversible. En la Tabla 1 se muestran las variables de estudio identificadas. Del estudio de las variables, se definieron los especímenes por ensayar. Las características de ellos se presentan en la Tabla 1. Se variarán los materiales y dosificaciones de fibra en los especímenes. Con respecto a la mampostería (especímenes 1 a 12), se usarán piezas de tabique macizos de barro recocido pegados con mortero cemento-arena tipo I. Con respecto al concreto (especímenes 13 al 22), se usará concreto con resistencias nominales entre 15 y 25 MPa; es decir, la resistencia del concreto será también una variable de estudio.

Tabla 1. Pruebas por realizar

Prueba	Realizada	Muro	Material Original	Espesor, cm	Daño inicial	Ensaye	Material de Rehabilitado (dos caras)	Dosificación de la fibra (kg/m3)
1	SI	1	Mampostería	12	Sí	Nuevo	NA	NA
2	SI	3	Mampostería	12	Sí	Nuevo	NA	NA
3	SÍ	1R	Mampostería	12	Sí	Rehab.	Mortero c/malla cal. 8. Anclaje clavos. 2 caras	NA
4	SÍ	3R	Mampostería	12	Sí	Rehab.	Mortero c/malla cal. 10. Anclaje clavos. 2 caras	NA
5	SÍ	2R	Mampostería	12	No	Rehab.	Mortero c/malla cal. 8. Anclaje clavos. 2 caras	NA
6	SÍ	4R	Mampostería	12	No	Rehab.	Mortero c/malla cal. 10. Anclaje clavos, 2 caras	NA
7	SI	5	Mampostería	12	Sí	Nuevo	NA	NA
8	SI	6	Mampostería	12	Sí	Nuevo	NA	NA
9	SI	7	Mampostería	12	Sí	Nuevo	NA	NA
10	SI	8	Mampostería	12	Sí	Nuevo	NA	NA
11	SÍ	5R	Mampostería	12	Sí	Rehab.	Mortero c/malla cal. 8 anclaje alambón, 1 cara	NA
12	SI	6R	Mampostería	12	Sí	Rehab.	MR Fibras de acero	16
13	SI	7R	Mampostería	12	Sí	Rehab.	MR Fibras sintéticas	7
14	SI	8R	Mampostería	12	Sí	Rehab.	MR Fibra de vidrio	NA
15	SÍ	9a	Mampostería	12	Sí	Rehab.	Rehabilitado con contraventeo restringido al pandeo	NA
16	SÍ	9b	Mampostería	12	Sí	Rehab.	Rehabilitado con dispositivo tipo Adas	NA
17	SÍ	10a	Mampostería	12	Sí	Rehab.	Rehabilitado con contraventeo restringido al pandeo	NA
18	SÍ	10b	Mampostería	12	Sí	Rehab.	Rehabilitado con dispositivo de concreto	NA
19		11	Mampostería	12	Si	Nuevo	NA	NA
20		12	Mampostería	12	Si	Rehab.	MR Fibras metálicas + malla Cal. 8	16
21		11	Mampostería	12	Si	Nuevo	NA	NA
22		12	Mampostería	12	Si	Rehab.	MR Fibras sintéticas + malla Cal. 8	7

Nomenclatura: MRFibras=mortero reforzado con fibras; CR=concreto reforzado; CRFibras=concreto reforzado con fibras; N=espécimen nuevo; R=espécimen rehabilitado.

2. CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO

La Figura 1 muestra el arreglo experimental considerado para el ensaye de cada uno de los muros enlistados en la Tabla 1. Cada muro será anclado a una losa de reacción y se le colocará un peso vertical constante en la parte superior según el análisis estructural. Después se aplicará carga lateral mediante un actuador hidráulico que estará fijo a un muro de reacción. Nótese que la carga se transmitirá a través de una viga rígida como se muestra en la Figura 1. El protocolo de carga que se utilizará se define en la sección 4.

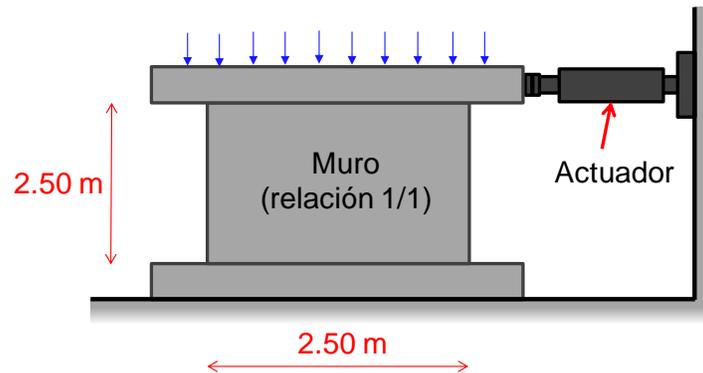


Figura 1. Arreglo experimental. IINGEN 2020

Con la finalidad de inducir un daño controlado, primero se aplicarán ciclos de carga controlados por carga hasta una magnitud de 40% la carga de diseño. Después, se aplicará un protocolo controlado por desplazamientos. Las pruebas se detendrán cuando la capacidad de carga resistente decrezca 10% de la máxima aplicada, cuando se alcance una distorsión de entrepiso equivalente de 0.005 o cuando la grieta residual sea mayor a 2 mm.

Todos los muros a ensayar, tanto originales como rehabilitados, han sido diseñados para fallar por cortante. Los muros de concreto fueron diseñados con el criterio de estructuras de ductilidad baja, según el capítulo 7 de las NTC-Concreto (2017). Según las NTC-Sismo (2017), el factor de comportamiento sísmico y la distorsión de entrepiso correspondientes son de $Q=2$ y $Distorsión_{max}=0.010$. Los muros de concreto no cuentan con elementos de borde. Por su parte, los muros de mampostería fueron diseñados según los criterios del capítulo 5 de las NTC-Mampostería (2017). Éstos están confinados por castillos y dalas; mismos que fueron detallados según las especificaciones del capítulo 5.1.1 de las NTC-Mampostería (2017). Según las NTC-Sismo (2017), el factor de comportamiento sísmico y la distorsión de entrepiso correspondientes es de $Q=2$ y $Distorsión_{max}=0.010$.

En cuanto a la instrumentación, se colocará una instrumentación externa y una interna. La instrumentación externa consistirá de transductores de desplazamiento colocados de manera horizontal, vertical y diagonal en diferentes localizaciones del muro. La

instrumentación interna consistirá de deformímetros eléctricos (o strain gages, en inglés) en algunas barras de acero específicas cuando el espécimen cuente con ellas. En la figura 2, se puede ver un arreglo tipo de la instrumentación externa para cada muro ensayado.

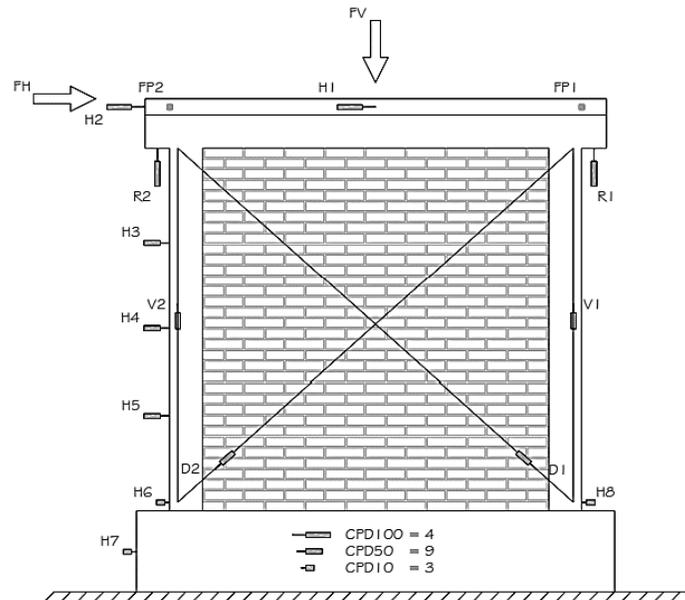


Figura 2. Arreglo de instrumentos (transductores) de la instrumentación externa para capturar las deformaciones inducida por la carga lateral. IINGEN 2020

3. DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN

Es preciso hacer notar que, de acuerdo con una revisión bibliográfica realizada durante el desarrollo de esta propuesta, la técnica de encamisado de muros se usa mucho en varias regiones del mundo, incluyendo México, Italia, Polonia, Macedonia, Pakistán, etc. Este tipo de rehabilitación se realiza principalmente en muros de mampostería. De manera general, se usa mortero reforzado con malla alambre anclado a muro. En este proyecto, la rehabilitación de los muros se realizará con los materiales indicados en la quinta columna de la Tabla 2, es decir: mortero simple reforzado con malla de alambre; mortero reforzado con fibras metálicas y/o sintéticas (algunas veces incluyendo malla de alambre o barras de acero).

En las figuras 3 y 4, se muestran, detalles de la técnica de rehabilitación de aplanado de mortero con malla electro-soldada. Esta técnica como se ha mencionado con antelación ha sido ampliamente estudiada y aceptada por el gremio de la ingeniería civil.

En el marco de los modelos considerados en este estudio, algunas de las soluciones fueron exactamente iguales a las empleadas en el último lustro en el país como una opción de refuerzo para edificación para vivienda, tanto del sector formal, como informal. Este tipo de soluciones estructurales para refuerzo, correspondientes a las mostradas en las figuras 3 y 4, fueron revisadas con el propósito de evaluar los resultados experimentales que dieron

luz a la propuesta normativa de la definición del índice de eficiencia del acero de refuerzo horizontal (incluso vertical) en muros de mampostería, que forma parte de la Norma Técnica Complementaria para Diseño de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

Adicionalmente al uso tradicional y, relativamente, estandarizado de malla electro-soldada y mortero exterior, en la mayoría de los casos en una sola cara; en este trabajo se consideró como elemento innovador en el proceso de refuerzo el uso de fibra complementaria al mortero, e, incluso, el uso de fibra suplementaria a la malla electro-soldada.

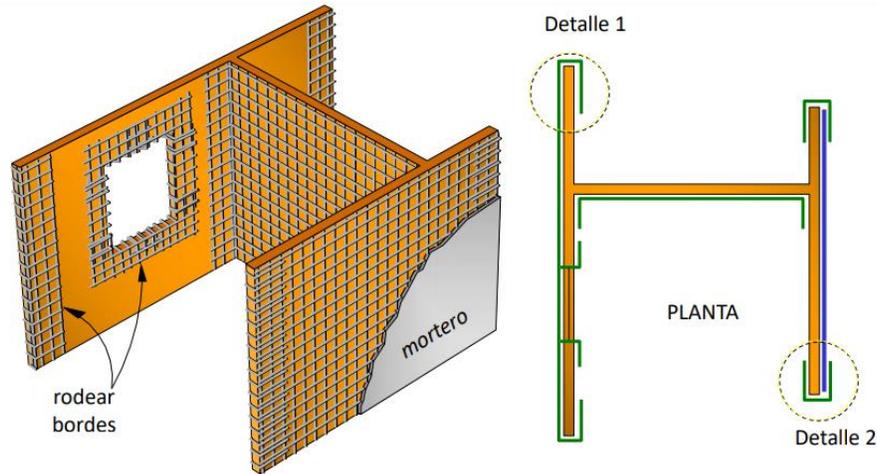


Figura 3. Técnica de rehabilitación de muros de mampostería con malla electro-soldada. NTC Mampostería 2017

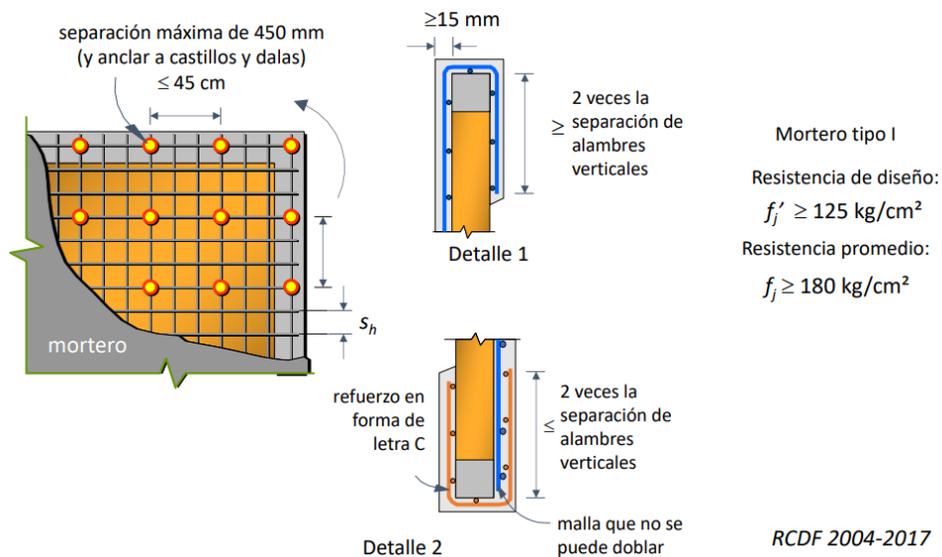


Figura 4. Detalle típico de refuerzo en muros de mampostería con malla electro soldada NTC Mampostería 2017

De la Tabla 1, se identifican marcados con gris los modelos probados a que se hace referencia en este estudio. Todos son muros de mampostería confinada, con procedimiento constructivo estrictamente respetuoso de los lineamientos normativos y con un procedimiento de supervisión en el diseño y construcción propio de laboratorio de ingeniería estructural. No obstante, con la finalidad de tener información cercana al sector de la informalidad, como parte del procedimiento de fijación de la malla electro-soldada para refuerzo, se usaron clavos sin el uso de rondana y/o corcholata para protección del sistema de fijación.

4. PROTOCOLO DE CARGA E INSTRUMENTACIÓN

Siguiendo las recomendaciones del comité ACI 374.2R-13 (2013), se utilizará el protocolo de carga de las Figura 5, el cual está controlado por desplazamientos. Se aplicarán dos ciclos para amplitudes objetivo y un ciclo intermedio de menor magnitud.

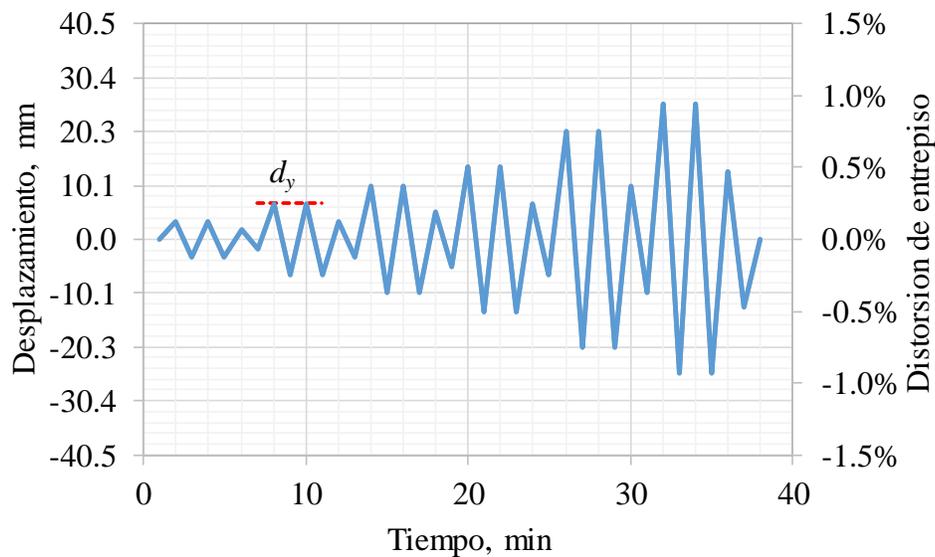


Figura 5. Protocolo de carga

La Figura 6 muestra la instrumentación propuesta que consta de transductores de desplazamiento (tipo LVDT) horizontales, verticales y en diagonal.

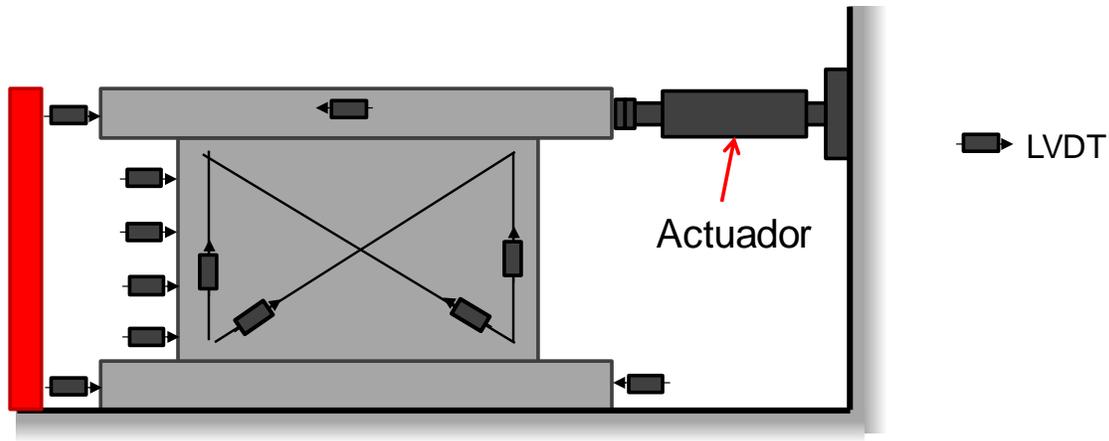


Figura 6. Instrumentación. IINGEN UNAM

Todos los modelos fueron sujetos a carga axial generando un estado constante de esfuerzos de compresión del orden de 5 kg/cm², representativo del nivel de carga axial generado en un muro de carga de edificación habitacional de uso multifamiliar de, al menos, cinco niveles.

El sistema de aplicación de carga es a base de gatos de doble acción, de comportamiento cuasi-estático, controlados por un sistema de bombas hidráulicas con dispositivos manuales para el flujo de aceite hacia los pistones.

El registro de la información de prueba se hizo con un sistema marca Tokyo-Sokki, de lectura rápida, teniendo la capacidad de leer 301 canales por segundo, y se programó el hacer un barrido de lectura de canales a cada 10 segundos durante la prueba.

Dado que las pruebas se realizaron en periodo de contingencia sanitaria por COVID-19, el personal de apoyo durante la prueba debía respetar el protocolo de higiene establecido, además de los protocolos de atención y revisión del proceso de aplicación de carga en cada espécimen, procedimiento que era, en resumen:

- Cada participante contaba con cubrebocas, careta protectora de cara y guantes de látex
- Cada participante contaba con las herramientas de papelería necesarias para realizar la revisión del patrón de agrietamiento para cada ciclo de carga, siendo especialmente cuidadosos en los picos y en el regreso a la condición de carga nula.
- Una vez alcanzado el pico de cada ciclo de carga, positivo y/o negativo, se paraba momentáneamente la prueba para que el personal pudiera revisar la aparición de grietas y, además, midiera el ancho de las grietas representativas.
- En la condición de carga nula, al término de cada ciclo, también se revisaba y medía el ancho de grieta remanente, parámetro vital para los procedimientos de evaluación de la seguridad estructural después de la ocurrencia de un sismo de gran intensidad.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES GENERALES

En la tabla 3 y de las figuras 7 a 14, se presenta un resumen de los resultados de mayor relevancia obtenidos hasta el momento del programa de pruebas experimentales.

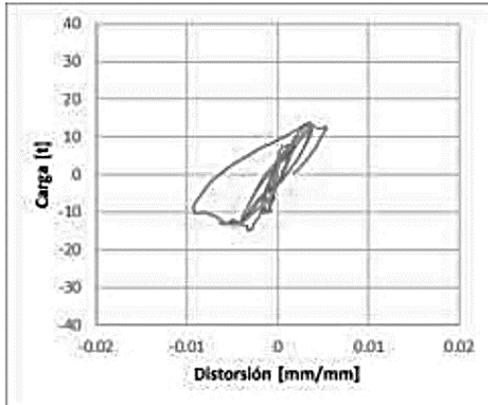
Tabla 3. Resumen de los resultados experimentales

Espécimen	Tipo de rehabilitación	Daño inicial	Comentarios
M-1	Ninguna	No	Muro de mampostería de tabique rojo recocido. Se le indujo medio-bajo, para ser rehabilitado con mortero y malla electrosoldada M-1R.
M-1R	Malla electrosoldada cal. 10 en ambas caras	Si	Refuerzo efectivo, se duplico la capacidad de resistencia y deformación en rango inelástico. En la figura 7b, se aprecian estos resultados.
M-2	Ninguna	No	Muro de mampostería de tabique rojo recocido. Se le indujo medio-bajo, para ser rehabilitado con mortero y malla electrosoldada M-2R.
M-2R	Malla electrosoldada cal. 8 en ambas caras	Si	Refuerzo efectivo, se duplico la capacidad de resistencia. Se aumentó la capacidad de deformación en rango inelástico, pero no fue tan significativa que en el muro M-1R. Hace suponer que el área de acero en el refuerzo, influye directamente sobre el comportamiento del modelo. En la figura 8b, se aprecian estos resultados.
M-3R	Malla electrosoldada cal. 10 en ambas caras	No	Muro rehabilitado sin daño inicial. Refuerzo efectivo comparado con los muros M1 y M2. Se aprecia una reducción del área dentro de la curva. Dicha reducción corresponde a un efecto de deslizamiento causado por un sobre reforzamiento induciendo la falla en los castillos. Se propuso refuerzo en una sola cara para solventar esta falla. En la figura 9a, se aprecian estos resultados.
M-4R	Malla electrosoldada cal. 8 en ambas caras		Muro rehabilitado sin daño inicial. Refuerzo efectivo comparado con los muros M1 y M2. Se aprecia una reducción del área dentro de la curva. Dicha reducción corresponde a un efecto de deslizamiento causado por un sobre reforzamiento induciendo la falla en los castillos. Se propuso refuerzo en una sola cara para solventar esta falla. En la figura 9b, se aprecian estos resultados.
M-5	Ninguna	No	Muro de mampostería de tabique rojo recocido. Se le indujo daño medio-bajo, para ser rehabilitado con mortero y malla electrosoldada M-5R.
M-5R	Malla electrosoldada cal. 8 en una sola cara, refuerzo anclado con alambón.	Si	Refuerzo efectivo, se duplico la capacidad de resistencia. Se apreció mejor comportamiento comparación a los modelos rehabilitados en ambas caras, ya que no se presenta un efecto tan pronunciado del deslizamiento. Lo que significa que el refuerzo se desempeñó significativamente. En la figura 10, se aprecian estos resultados.

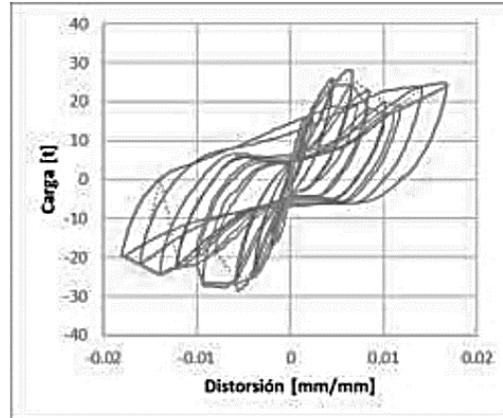
Tabla 3 (continuación). Resumen de los resultados experimentales

Espécimen	Tipo de rehabilitación	Daño inicial	Comentarios
M-6	Ninguna	No	Muro de mampostería de tabique rojo recocido. Se le indujo daño medio-bajo, para ser rehabilitado con mortero y malla electrosoldada M-6R.
M-6R	Fibras metálicas		Refuerzo efectivo. Se aprecia que la resistencia aportada por la fibra en la figura 11b, es más del doble de la resistencia original del muro (gráfica a) de la misma figura. Además, su capacidad de deformación incrementó considerablemente.
M-7	Ninguna	No	Muro de mampostería de tabique rojo recocido. Se le indujo daño bajo a medio, para ser rehabilitado con mortero y malla electrosoldada M-7.
M-7R	MR Fibras sintéticas	Si	Las gráficas de la Figura 15 muestran que el comportamiento del modelo M-7 rehabilitado con fibras sintéticas, se parece mucho al del modelo M-6R. Aunque con incrementos de capacidad de resistencia en menor proporción.
M-8	Ninguna	No	Muro de mampostería de tabique rojo recocido. Se le indujo daño bajo a medio, para ser rehabilitado con mortero y malla electrosoldada M-8R.
M-8R	Fibras de vidrio	Si	Si se compara con todos los modelos anteriores, es decir, M-6R y M-7R, se observa que el incremento de la resistencia y de la capacidad de deformación es ampliamente mayor que en los casos anteriores. En la figura 13, se aprecian estos resultados.
M-9R	Contraventeo restringido al pandeo	No	Refuerzo efectivo, aunque un poco impráctico en su implementación en rehabilitación de muros de mampostería. Las curvas evidencian un enorme incremento de la capacidad de deformación. En comparación con los otros especímenes, la capacidad de resistencia aumentó en menor proporción. En la figura 14, se aprecian estos resultados.

Como puede identificarse de la tabla 3, en el transcurso del estudio se realizaron algunas adecuaciones en relación con la propuesta original, mostrada en la tabla 2, como es el caso de uso de fibras, tanto metálicas, como de vidrio. Igualmente para el reforzamiento del modelo número nueve se usó un dispositivo de contraventeo restringido al pandeo. Y, de las figuras 7 a 14, se presenta un resumen de los resultados de mayor relevancia obtenidos hasta el momento del programa de pruebas experimentales. El resumen consiste en la presentación de las relaciones carga lateral – desplazamiento global lateral de los modelos, gráfica que se analiza para determinar, entre otros parámetro de desempeño, el nivel de ductilidad global, los diferentes niveles de resistencia lateral asociados a los diferentes estados límite considerados en los proceso d diseño, la capacidad de deformación del sistema y las bases para la formulación de un modelo de comportamiento histerético.

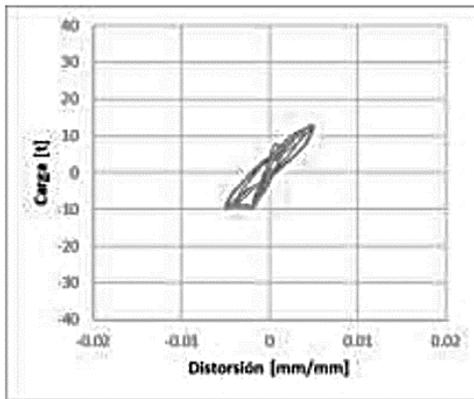


a) M-1

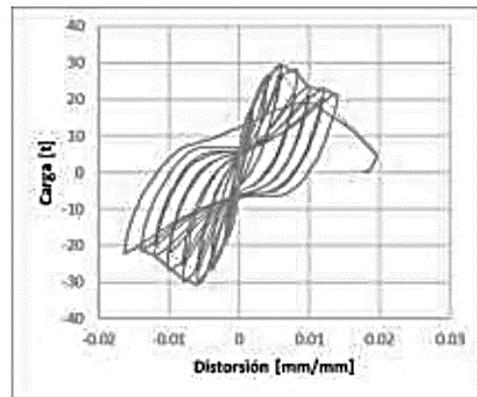


b) M-1R

Figura 7. Curvas de carga vs desplazamiento de los muros M-1 y M-1R

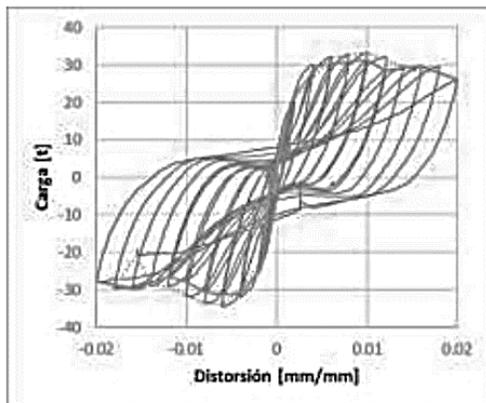


a) M-2

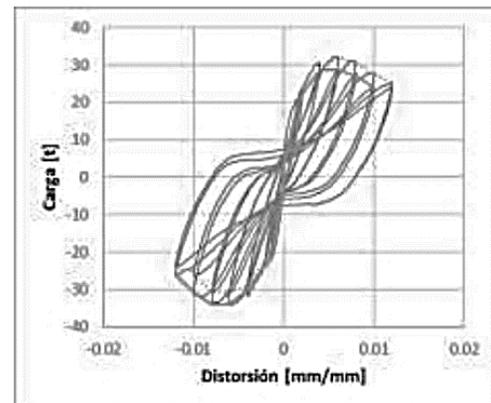


b) M-2R

Figura 8. Curvas de carga vs desplazamiento de los muros M-2 y M-2R

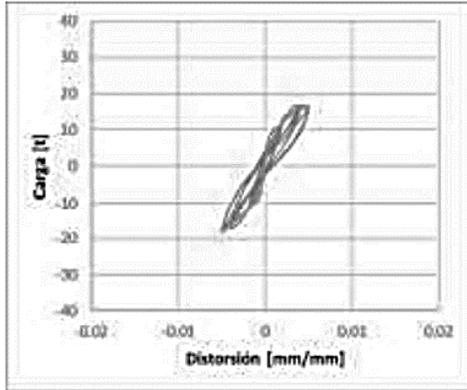


a) M-3R

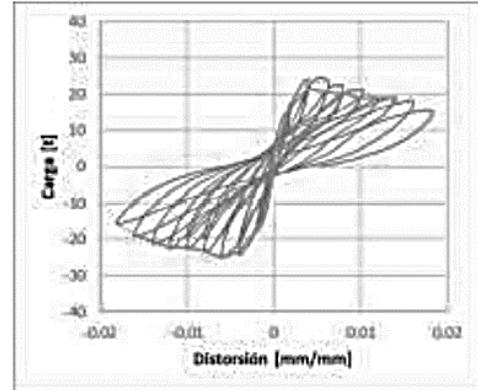


b) M-4R

Figura 9. Curvas de carga vs desplazamiento de los muros M-3R y M-4R

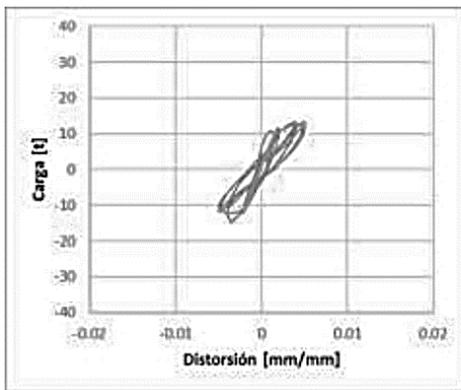


a) M-5

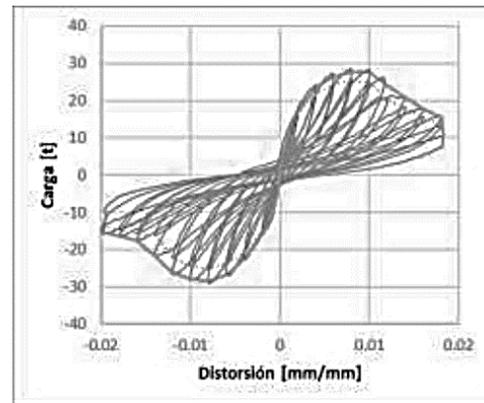


b) M-5R

Figura 10. Curvas de carga vs desplazamiento de los muros M-5 y M-5R

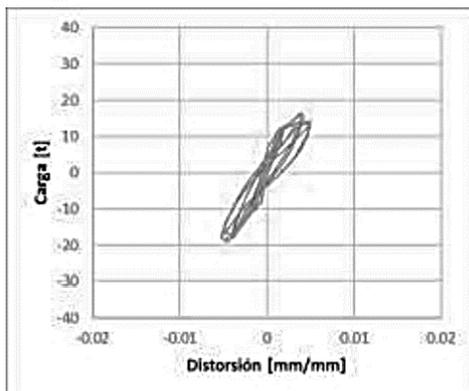


a) M-6

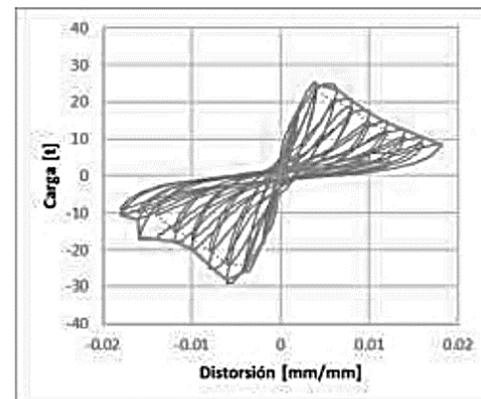


b) M-6R

Figura 11. Curvas de carga vs desplazamiento de los muros M-6 y M-6R

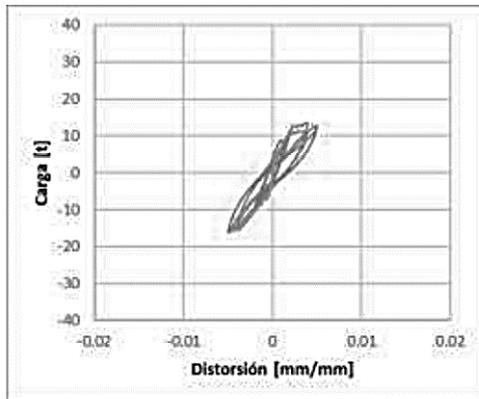


a) M-7

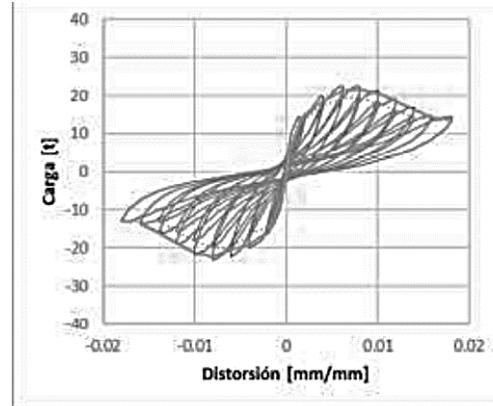


b) M-7R

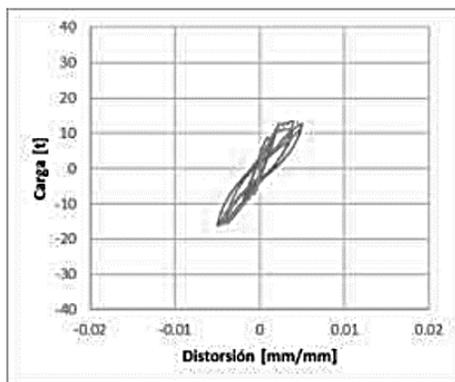
Figura 12. Curvas de carga vs desplazamiento de los muros M-7 y M-7R



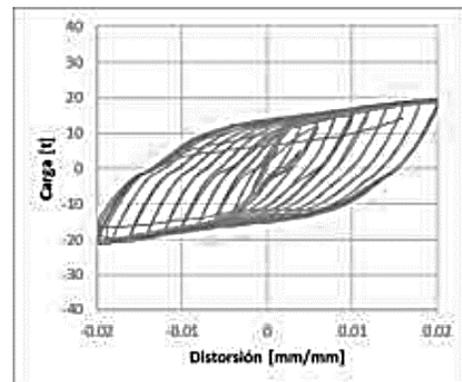
a) M-8



b) M-8R

Figura 13. Curvas de carga vs desplazamiento de los muros M-8 y M-8R

a) M-8



b) M-9

Figura 14. Curvas de carga vs desplazamiento de los muros M-8 y M-9

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante cada uno de los ensayos se documentó por medio de fotografías la evolución del daño de los muros, además del patrón de agrietamiento, ancho de grieta en carga máxima y remanente (sin carga en el espécimen). Al respecto, en la tabla 4 y en las figuras 15 a 22 se presentan fotografías del patrón de daño de algunos de los muros ensayados.

En la tabla 4 se presentan, además, comentarios sobre el tipo de daño y el patrón de agrietamiento observado para cada muro ensayado. Indicando también el tipo de rehabilitación realizada en el modelo.

Como es común en este tipo de especímenes con relación de aspecto, longitud/altura, en la vecindad de la unidad, el mecanismo de falla dominante es el de tensión diagonal por cortante. En algunos casos se manifiesta el de compresión diagonal en los extremos de los paneles o muros de mampostería, En la vecindad de los castillos.

Tabla 4. Resumen de los resultados experimentales

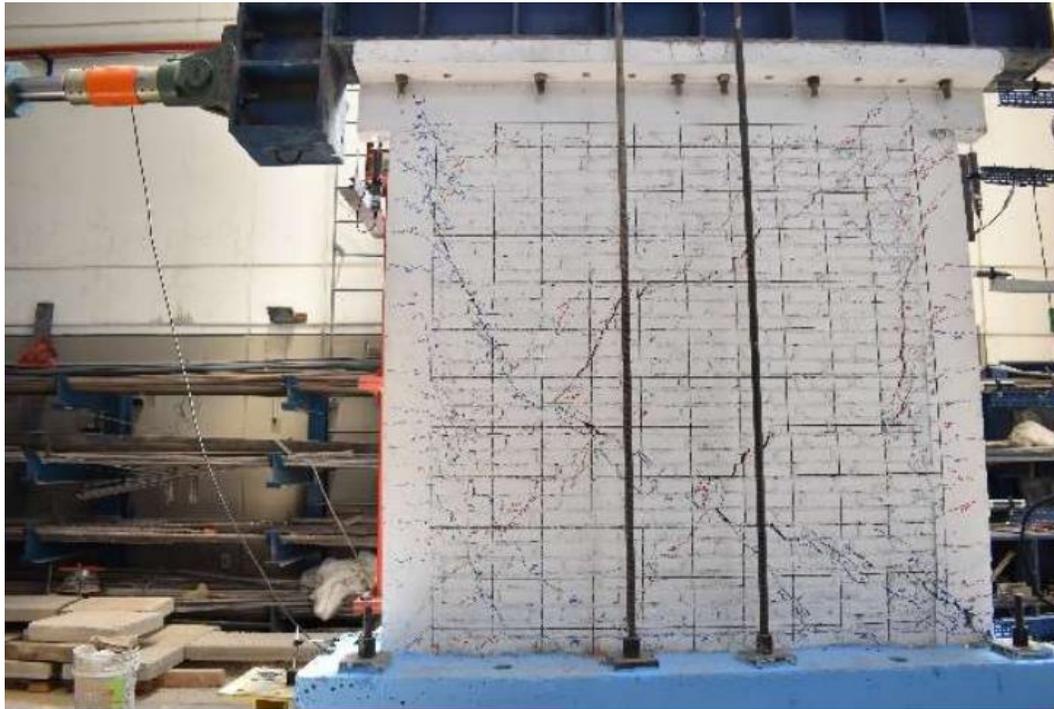
Espécimen	Tipo de rehabilitación	Comentarios
M-1	Ninguna	Muro ensayado a un nivel de daño medio ($\gamma = 0.5\%$). En la figura 15 se puede apreciar el patrón de agrietamiento típico de una falla por tensión diagonal.
M-1R	Malla electrosoldada cal. 10 en ambas caras	La figura 16b se observa una distribución de grietas (daño) uniforme en todo el muro. El muro falló por deslizamiento en la base, debido a la gran capacidad de resistencia del refuerzo. La falla no deseable.
M-2	Ninguna	Muro ensayado a un nivel de daño medio ($\gamma = 0.5\%$). En la figura 17 se puede apreciar el patrón de agrietamiento típico de una falla por tensión diagonal.
M-2R	Malla electrosoldada cal. 8 en ambas caras	La figura 17b se observa una distribución de grietas (daño) uniforme en todo el muro. El muro falló por deslizamiento en la base, debido a la gran capacidad de resistencia del refuerzo. La falla no deseable.
-3R	Malla electrosoldada cal. 10 en ambas caras	La figura 18a se observa una distribución de grietas (daño) uniforme en todo el muro. El muro falló por deslizamiento en la base, debido a la gran capacidad de resistencia del refuerzo. La falla no deseable en la base.
M-4R	Malla electrosoldada cal. 8 en ambas caras	La figura 18b se observa una distribución de grietas (daño) uniforme en todo el muro. El muro falló por deslizamiento en la base, debido a la gran capacidad de resistencia del refuerzo. La falla no deseable.
M-5	Ninguna	Muro ensayado a un nivel de daño medio ($g = 0.5\%$). En la figura 19a se puede apreciar el patrón de agrietamiento típico de una falla por tensión diagonal.
M-5R	Malla electrosoldada cal. 8 en una sola cara, refuerzo anclado con alambón.	En la figura 19b que muestra la evolución del daño en el muro, se observó una gran distribución del daño en todo el muro, además de que ya no se observó la falla por deslizamiento en la base. El anclaje de alambón no mostro ningún cambio a las técnicas utilizadas en los muros MR1, MR2, MR3 y MR4.
M-6	Ninguna	Muro ensayado a un nivel de daño medio ($g = 0.5\%$). En la figura 20a se puede apreciar el patrón de agrietamiento típico de una falla por tensión diagonal.
M-6R	Fibras metálicas, rehabilitación una cara	En la figura 20b que muestra la evolución del daño en el muro, ya no se observa el deslizamiento en la base. La distribución del agrietamiento es uniforme en toda el área del muro. El uso de fibras permitió que el aplanado trabajara en conjunto.
M-7	Ninguna	Muro ensayado a un nivel de daño medio ($g = 0.5\%$). En la figura 21a se puede apreciar el patrón de agrietamiento típico de una falla por tensión diagonal.
M-7R	MR Fibras sintéticas rehabilitación una cara	El muro M-7 rehabilitado con fibras sintéticas en una sola cara tuvo igualmente un buen la distribución de las grietas después de haber inducido daño al muro. En la figura 21b se aprecia como la fibra permitió una mejor distribución del daño permitiendo que el aplanado trabajara en conjunto.



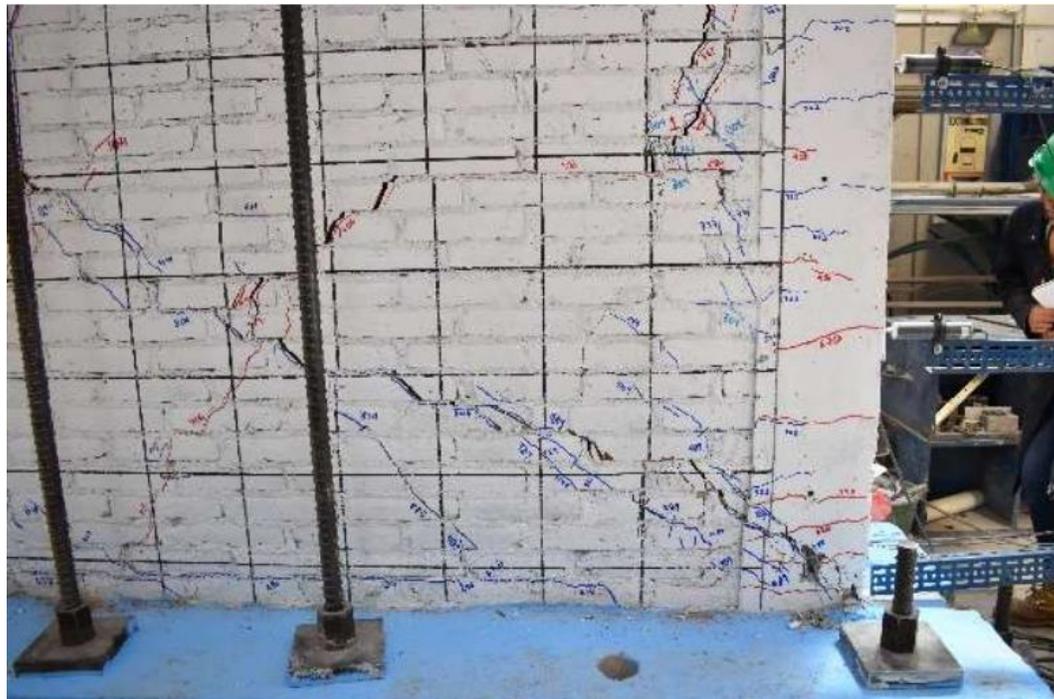
M-8	Ninguna	Muro ensayado a un nivel de daño medio ($g = 0.5\%$). En la figura 19a se puede apreciar el patrón de agrietamiento típico de una falla por tensión diagonal.
M-8R	Fibras de vidrio rehabilitación una cara	Lo interesante con la rehabilitación de este muro es el comportamiento de la malla de fibra de vidrio que hizo incrementar considerablemente su capacidad de deformación. En la figura 25, se ve que la estructura no cede a pesar de un nivel muy alto de daño. Y el daño se distribuye en diferentes zonas de la superficie del muro
M-9R	Contraventeo restringido al pandeo (CRP/BRB)	Técnica atípica para la rehabilitación de muros. Se pudo verificar que muros ensayados (reciclados) pudieron ser utilizados para colocar un dispositivo con capacidad de disipación de energía. Los resultados mostraron buena estabilidad del dispositivo, aunque presento una falla frágil por defectos propios de los materiales en su fabricación. Detectada la falla, se pudo volver a fabricar un dispositivo con las mismas dimensiones y características. Esta vez el dispositivo mostro gran estabilidad y disipación de energía. Los castillos y dalas acondicionados para la prueba presentaron daño en la unión de los contraventeos, lo que sugiere que este tipo de rehabilitación debe ser más estudiada para su implementación en un estructuras diseñadas originalmente con el nivel de detalles para ductilidad limitada, especialmente en sus uniones.

La figura 15 presenta el patrón de daño observado en el modelo M1, prueba que se realizó en un muro original de mampostería confinada tradicional. Se manifiesta claramente el agrietamiento de cortante por tensión diagonal, interesando, en algunos casos a las piezas de mampostería y, como es común en algunos de estos tipos de elementos en los que el mortero pudo tener algunas deficiencias de adherencia con las piezas, algunas de las grietas siguen un patrón definido por las juntas. El detalle que se presenta en la figura 15.b, pone de manifiesto la incursión de la grieta de la mampostería hasta el castillo de concreto, problema que se recrudece cuando la separación del estribado en los extremos de los castillos es superior a la dimensión menor del mismo castillo. Algunos autores consideran que la incursión de la grieta, o bien. Del puntal de concreto en compresión, en el castillo, debe ser considerada como la definición de la falla del elemento de mampostería confinada.

En la figura 16 se muestra el patrón de daño en el mismo muro anterior, pero en la prueba después de haberse sometido a un proceso de reforzamiento. Como puede referirse de la figura 7, donde se presentan las relaciones carga lateral – desplazamiento lateral, para los modelos M1 y MR1, se identifica que la opción de reforzo, en este caso encamisado con malla electro-soldada en ambas caras y mortero simple, incrementó la capacidad de resistencia lateral y la capacidad a deformación en aproximadamente 200%, lo que es muestra manifiesta de la idoneidad, al menos en resultados de laboratorio, del uso de esta tecnología de reforzamiento estructural en elementos de mampostería confinada. Aunado a lo anterior, de la figura 16 queda claro que el patrón de daño y posible mecanismo de falla no cambia en relación con el observado en el modelo original (M1), falla de tensión – compresión diagonal por cortante, interesando al castillo de confinamiento.



a)



b)

Figura 15. Evolución de daños en el muro M-1



a)



b)

Figura 16. Evolución de daños en el muro M-1R



a)



b)

Figura 17. Evolución de daños en los muros M-2 y M-2R

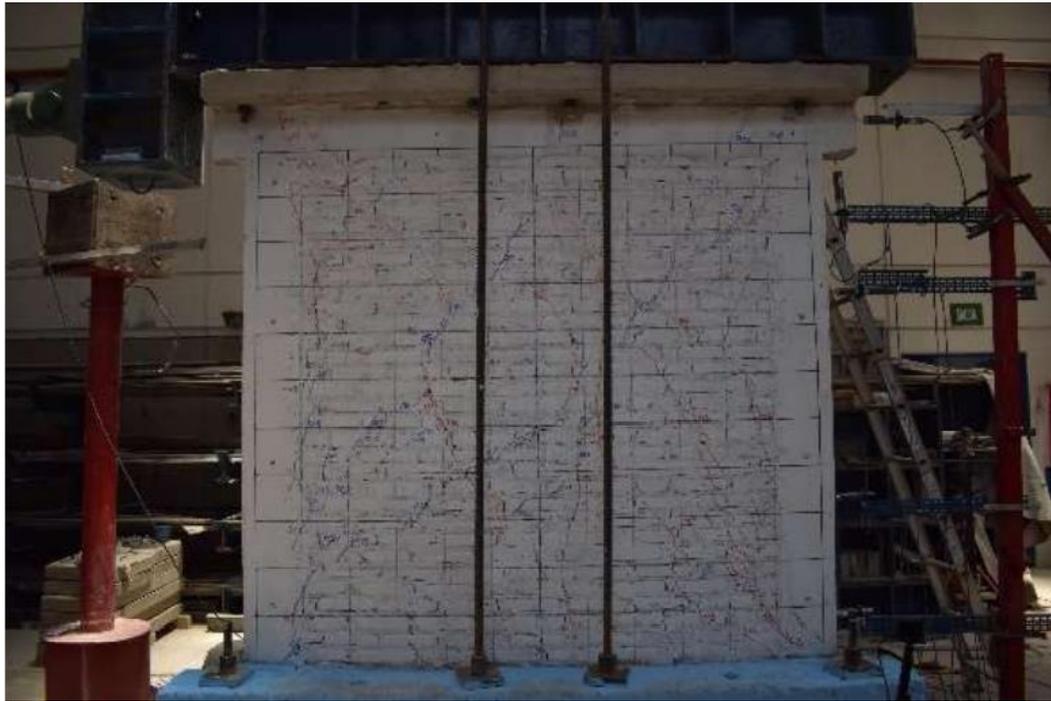


a)

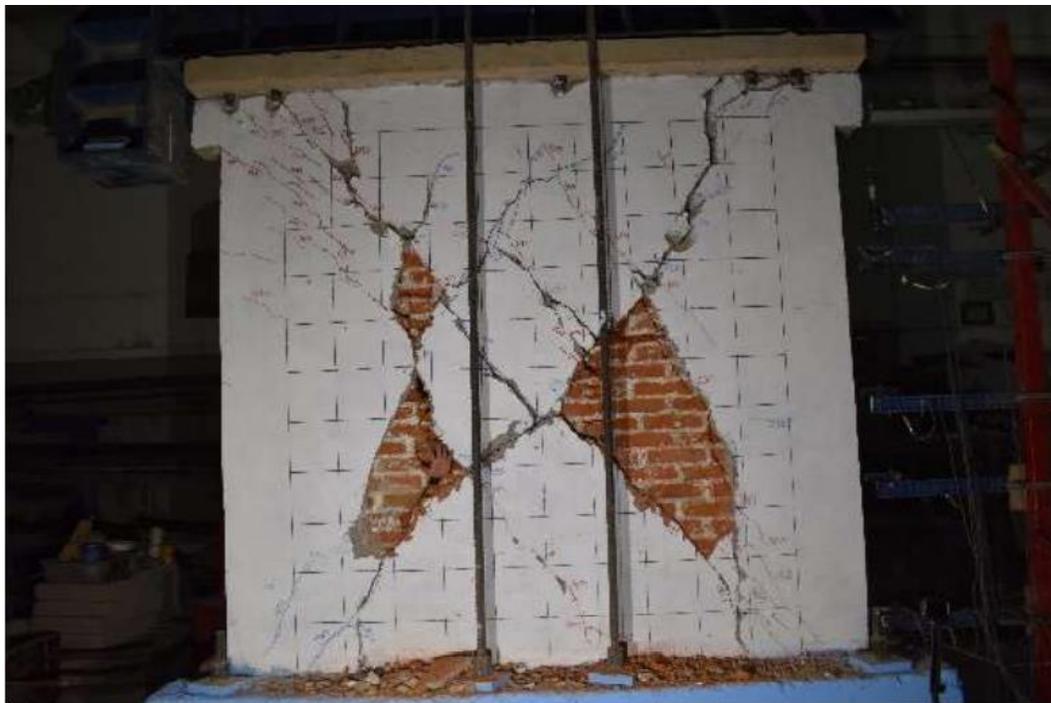


b)

Figura 18. Evolución de daños en los muros M-3R y M-4R



a)



b)

Figura 19. Evolución de daños en los muros M-5 y M-5R

Resultado de la revisión de los patrones de daño en los modelos de las figuras 17 a 21, es claro que el mecanismo de falla del sistema reforzado no cambia significativamente al mecanismo de falla original; es decir, se manifiesta un mecanismo de resistencia asociado al fenómeno de cortante por tensión – compresión diagonal. Por otro lado, de la revisión de las figuras 7 a 14, evidencian la idoneidad del procedimiento de refuerzo con malla y mortero, logrando, en la mayoría de los casos, incrementos notables, del orden de 200%, en la capacidad de resistencia lateral y en la capacidad a deformación de los elementos muro.

No obstante lo anterior, los autores consideran necesario mencionar que la eficiencia del procedimiento de refuerzo puede verse afectado si la relación de aspecto de los muros (longitud/altura) es mayor que la unidad (muros largos). Otro aspecto que puede repercutir desfavorablemente en la eficiencia del procedimiento de refuerzo lo constituyen las propiedades geométricas del refuerzo en los castillos; si se usa una cuantía de acero longitudinal considerable, significativamente superior a 1%, aparentemente se tiene garantizada la eficiencia del refuerzo con malla y mortero. Pero en la realidad del medio de la construcción de edificación para vivienda en México, la cuantía de acero de refuerzo longitudinal en los castillos resulta del orden de 1%, o incluso menor que dicho valor.

En la figura 17, se puede observar la relación carga lateral – desplazamiento lateral del muro reforzado con un contraventeo restringido al pandeo. Es clara la bondad del uso de este tipo de tecnología, por la gran capacidad de disipar energía a partir de niveles de distorsión del sistema relativamente bajos.



Figura 20. Evolución de daños en los muros M-6 y M-6R



a)



b)

Figura 21. Evolución de daños en los muros M-7 y M-7R

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se presentan los resultados experimentales obtenidos de muros de mampostería confinada ensayados ante carga cíclica reversible realizados durante el periodo 2020. Hasta la fecha se han ensayado nueve especímenes, de los cuales, seis fueron ensayados en su estado original para inducir daño inicial y luego rehabilitados usando diferentes técnicas, otros dos muros se rehabilitaron sin inducir daño inicial. De los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- Todas las técnicas de rehabilitación resultaron exitosas, pues en todos los casos aumentó la resistencia y la capacidad de deformación de los muros.
- Reforzar los muros sin daño inicial llevó a una resistencia lateral mayor de estos.
- El hecho de reforzar algunos muros en ambas caras originó que la resistencia a cortante fuese muy alta, lo que provocó un cambio en el modo de falla de los muros rehabilitados, obteniéndose un modo de falla por deslizamiento de la base, además, en algunos casos, y falla por flexo-compresión de los castillos.
- La rigidez inicial de los muros también aumentó debido a la rehabilitación, incluso la rigidez de los muros rehabilitados se mantuvo consistentemente por arriba de aquella de los muros ensayados en su estado original.
- Se apreció que la rigidez es altamente dependiente del nivel de distorsión impuesta en los muros, por lo que se debe discutir más sobre los valores de rigidez actualmente especificados en las NTC-mampostería (2020).
- El muro 8 (M8), rehabilitado con malla de fibra de vidrio (MR8) dio resultados sumamente interesantes, ya que incrementó las capacidades del muro original en mayor proporción que las demás técnicas de aplanado. Además, la distribución de las grietas fue uniforme llevando a una falla distribuida en toda la superficie del muro.
- El comportamiento de contraventeo restringido al pandeo (CRP/BRB) resultó adecuado. El dispositivo presentó un buen comportamiento, se obtuvieron curvas esfuerzo deformación con gran capacidad de disipación de energía aún para niveles de distorsión en el estado límite de servicio. No obstante lo anterior, la implementación de estos dispositivos para rehabilitar estructuras de mampostería resulta impráctico, toda vez que se requiere de mano de obra especializada, tanto en la etapa de diseño, como para el proceso de instalación de los mismos.
- Como trabajo a futuro, se deberá hacer una serie de experimentos y análisis que validen la rehabilitación de estructuras de mampostería mediante el uso de CRP. Poniendo énfasis en el trabajo en conjunto de la mampostería y el CRP, toda vez que la mampostería presenta daño a deformaciones pequeñas (alrededor de Distorsión = 0.002 – 0.004), existiendo la posibilidad de que en un evento sísmico, la mampostería presente daño antes de que el dispositivo comience a disipar energía.

REFERENCIAS

ACI 374.2R-13 (2013). "Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads". Instituto Americano del Concreto. Farmington Hills, MI, EUA.

Alcocer S.M., Ruiz J., Pineda J.A., y Zepeda J.A. (1996), "Retrofitting of confined masonry walls with welded wire mesh", Memorias de la 11ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Acapulco, México, artículo No. 1471.

Ávila O., Carrillo J., Alcocer SM (2011). "Rehabilitación de muros de concreto usando CRFA: ensayos en mesa vibradora", Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, México.

Guerrero H, Alcocer SM, Hernandez H, Carrillo J, Escobar JA, Rodriguez V (2018). "Steel Fiber Reinforced Concrete Wall-Slab Joints Subjected to Cyclic Loading". Journal of Structural Engineering, en revisión.

Flores LE, Pacheco MA, Carrillo J (2012). "Rehabilitación de muros de mampostería de piezas multiperforadas reforzados con mortero con fibras o con mortero y malla de alambre", XVIII

Normas-Rehabilitación (2017). "Normas para la Rehabilitación Sísmica de Edificios de Concreto Dañados por el Sismo del 19 de septiembre de 2017", Gobierno de la Ciudad de México.

NTC-Concreto (2017). "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto", Gobierno de la Ciudad de México.

NTC-Mampostería (2017). "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", Gobierno de la Ciudad de México.

Saavedra D, López-Bátiz O, Arellano E, Delgado JC, Ramírez R, Rieger C (2017). "Study on the behavior of concrete beam elements reinforced with synthetic fibers subjected to cyclic loads reversals", Structural Engineers World Congress 2017, Cancun, Mexico.

AGRADECIMIENTOS

El estudio presentado en este informe, forma parte de los trabajos experimentales y analíticos que se están desarrollando en el marco del proyecto Resiliencia Sísmica que coordina el grupo de investigadores de la Subdirección de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

El proyecto cuenta con el financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), se agradece ampliamente el apoyo.

Se agradece la participación y apoyo de todo el personal de la Subdirección de Riesgos Estructurales de la Dirección de Investigación del CENAPRED, así como la siempre amable disposición del personal de la Coordinación Administrativa del mismo Centro.