

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

**COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE MUROS DE MAMPOSTERÍA
REHABILITADAS CON DIFERENTES MÉTODOS SUJETOS A CARGAS
CÍCLICAS**

PROGRAMA ANUAL DE TRABAJO 2021

Dirección de Investigación
Subdirección de Riesgos Estructurales

Instituto de Ingeniería de la UNAM

Febrero de 2022

Contenido

Introducción.....	3
Objetivos y alcances.....	4
Características de los especímenes.....	5
Características de los materiales.....	7
Propuesta de dispositivo de aplicación de carga.....	11
Propuesta de dispositivos de instrumentación	13
Instrumentación interna.....	13
Instrumentación externa.....	14
Valores de resistencia teóricos	15
Proceso de construcción de los especímenes.....	17
Resultados experimentales.....	22
Conclusiones	32
Referencias	33
Agradecimientos	34

INTRODUCCIÓN

Uno de los materiales con mayor diversidad de usos, desde la antigüedad hasta nuestros días, es la mampostería y se define como un material compuesto, integrado por piezas naturales o moldeadas artificialmente, acopladas entre sí por un mortero adhesivo. Sus componentes han variado a largo del tiempo, desde rocas simples hasta las unidades industrializadas de arcilla y concreto, utilizándose ampliamente en la construcción de edificaciones.

El hecho de que la mampostería es un material elaborado por las manos del hombre invita a que se le agregue un efecto aleatorio sobre su calidad y resistencia para los propósitos de construcción. Esto hace de la mampostería un material interesante para estudiarlo a detalle.

En el siglo pasado, tras la segunda guerra mundial se estimularon a nivel mundial las investigaciones sobre la mampostería, normalmente por reacción ante desastres naturales o incitados por el hombre.

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, 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 este tipo de estructuras, resulta de vital importancia estudiar diversas técnicas de rehabilitación y reforzamiento que permitan construir comunidades más resilientes, mejorando la seguridad de las estructuras, especialmente aquellas de mampostería, cuya importancia es muy alta por la cantidad de edificaciones hechas a base de ese material.

La investigación de la mampostería en México comenzó a partir de los años sesenta, después de los efectos sufridos en los sismos de 1957. Estas investigaciones fueron emprendidas por la Universidad Nacional Autónoma de México, a través del Instituto y Facultad de Ingeniería, continuando su labor hasta nuestros días. Se abarcaron en estos estudios la calidad de los elementos que conforman la mampostería, ensayos a diferentes arreglos de muros ya sean confinados, reforzados interiormente y muros diafragma.

La importancia de estas investigaciones son sus aplicaciones en el diseño estructural y los procesos constructivos de la mampostería. Esto llevó a la normalización de las construcciones en mampostería en México, cuyas recomendaciones han sido aplicadas por diversos países para elaborar sus normas locales. Una edificación consta de varios elementos, en el caso de vivienda se tienen los muros, columnas, losas, marcos, etc. Se analiza al conjunto de estos elementos como una estructura, en las que intervendrán los cálculos estructurales y de mecánica de materiales.

En las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2020 (NTC-DCEM-2020), se muestra el comportamiento de las diferentes técnicas de rehabilitación, no obstante no existe información suficiente en el medio mexicano sobre el comportamiento de elementos de mampostería rehabilitados ante estos niveles de demanda. Por lo tanto resulta importante, tanto para el gremio académico, como para el ingeniero de la práctica, conocer los parámetros que describan el comportamiento de elementos ante carga cíclica reversible, tipo sísmico, generalmente denominada como comportamiento histerético, que desarrollan los elementos.

OBJETIVOS Y ALCANCES

El objetivo general del proyecto es estudiar el comportamiento de muros de mampostería típicos de procedimientos constructivos informales (autoconstrucción), cuando éstos son reforzados y rehabilitados usando diversas técnicas, preferentemente con aplanado reforzado con mallas y fibras.

Los objetivos específicos se pueden resumir en los siguientes:

- Identificar los parámetros de comportamiento de este tipo de muros de mampostería rehabilitados.
- Revisar los valores de los parámetros de comportamiento que permitan lograr desempeños acorde a lo indicado en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Mampostería, del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTC-Mampostería).
- Promover el reforzamiento y rehabilitación de estructuras de mampostería del sector informal en México y Latinoamérica.

En el presente trabajo se estudió experimentalmente el uso de distintas técnicas de rehabilitación basadas principalmente en el uso 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 las recomendaciones de las NTC-Mampostería, ya que los ensayos se realizaron con base en éstas.

Finalmente, se compara y se discute el comportamiento de las distintas técnicas empleadas. Esto con la intención de ayudar a los diseñadores a comprender las ventajas y desventajas de ellas, y revisar su posible uso en lugares con una combinación de altos niveles de peligro sísmico y vulnerabilidad sísmica; lo anterior tomando en cuenta la relación entre el mejoramiento de la capacidad y el costo de la rehabilitación.

CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES

Los modelos ensayados consisten en muros de mampostería confinada, con relación de aspecto de 2.5 metros por lado y 12 centímetros de espesor, cuya geometría se observa en la Figura 1. 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. La dala se coló monolíticamente con una losa de 10 cm de espesor y 45 cm de ancho.

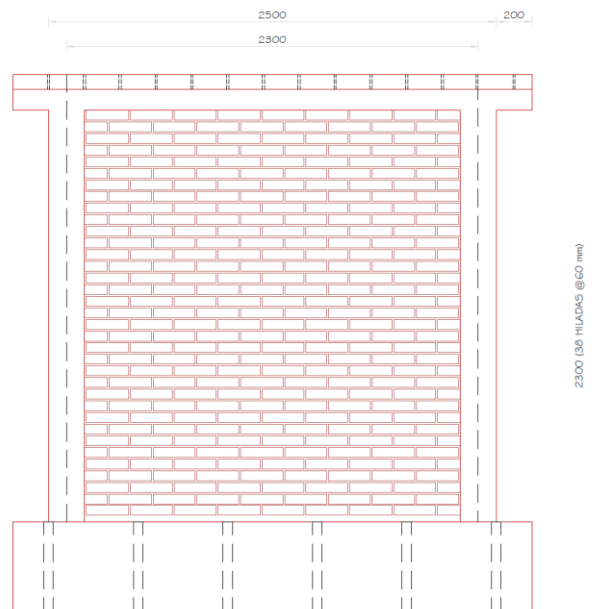


Figura 1. Modelo geométrico de los ensayos.

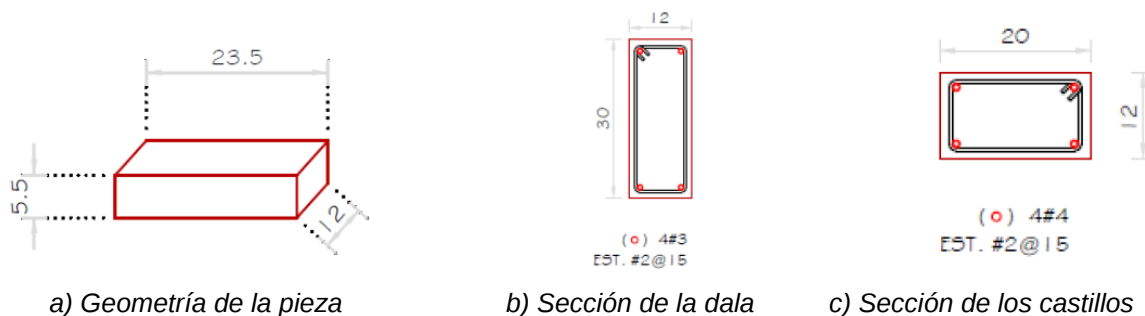
En la Tabla 1 se muestra las características y variables generales de los 13 modelos ensayados. No se indujo daño inicial en los especímenes M-3 y M-4, mientras que en los demás sí. Los especímenes M-1 a M-4 se rehabilitaron por ambas caras, mientras que los demás se rehabilitaron por una sola cara. 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 con calibres 8 y 10, fijándose al muro de tabique con clavos y alambrrn como anclaje. El espécimen M-8 se rehabilitó con malla de fibra de vidrio Sikawrap-350G 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

Nota: El modelo M-13 fue construido usando refuerzo prearmado para castillos y dala, tipo ARMEX

En la Figura 2, se muestran las dimensiones de los elementos que conforman el muro. Las cotas están en centímetros. Todos los modelos de prueba fueron estructurados con las mismas dimensiones de los elementos de confinamiento, castillos y dalas, pero para el modelo M-13 se usó refuerzo prearmado, coloquialmente conocido como “Armex”, siendo ésta en realidad una marca de producto en el mercado de la construcción.


Figura 2. Elementos que conforman el muro (dimensiones en cm)

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Las piezas de mampostería utilizadas en los muros son de ladrillo rojo recocido, cuyas dimensiones son de 23.5x5.5x12 como se aprecia en la Figura 2. Se realizaron ensayos a compresión en cinco probetas de piezas de mampostería, siguiendo lo establecido en la norma mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2014. Los resultados obtenidos, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resistencias a la compresión de pieza de mampostería.

Pieza	Área transversal [cm ²]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm ²]
1	282	23150	82.09
2	282	15650	55.50
3	282	25000	88.65
4	282	23300	82.62
5	282	23500	83.33
		Promedio	78.44

La resistencia a compresión simple de los muros se determinó del ensaye de 18 pilas, cuyas dimensiones aparecen la Figura 3. Los ensayos se hicieron conforme lo establece la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

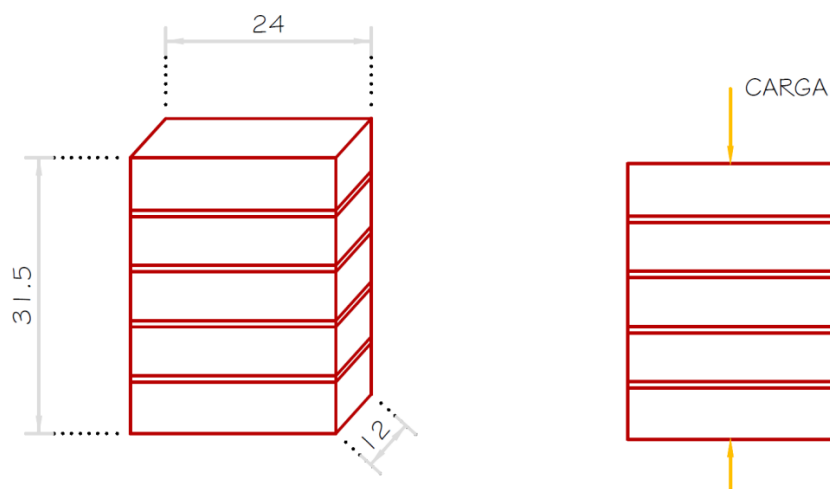


Figura 3. Pilas de mampostería para ensayos a compresión.

Para determinar la resistencia a cortante de la mampostería se realizaron 11 muretes cuyas dimensiones se muestran en la Figura 4. Estos se someten a una carga de compresión diagonal, conforme se establece en la Norma Técnica Complementaria de Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2020, así como la norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE-2010. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 3. Resistencias experimentales de pilas de mampostería

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

Para determinar la resistencia a cortante de la mampostería se elaboraron 11 muretes cuyas dimensiones se muestran en la figura 4. Estos se someten a una carga de compresión diagonal, conforme se establece en la Norma Técnica Complementaria de Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2020, así como en la norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE-2010. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

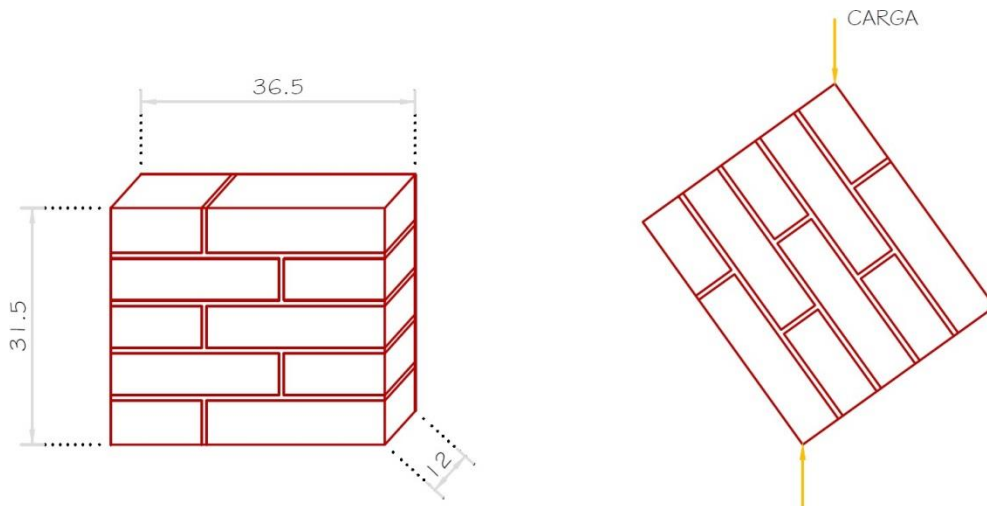


Figura 4. Pilas de mampostería para ensayos a cortante

Para evaluar la resistencia a compresión diagonal de la mampostería con encamisado de mortero, procedimiento de refuerzo empleado en el estudio, también se realizó el ensaye de muretes con aplanado en una sola cara. Los resultados obtenidos para los muretes con aplanado tradicional se muestran en la Tabla 5. Mientras que los morteros empleados para los muretes cuyos resultados se reportan de las tablas 6 a 8, fueron reforzados con malla de fibra de vidrio, fibras sintéticas y fibras metálicas, respectivamente. Se aprecia que la resistencia a la compresión diagonal de los muretes con algún tipo de refuerzo resultó, en promedio, superior a 10 kg/cm², es decir, un 70% mayor a la resistencia promedio mostrada en los muretes sin reforzamiento, mostrados en la Tabla 4.

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

Murete	Espesor [cm]	Longitud [cm]	Altura [cm]	Área diagonal [cm ²]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm ²]
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
					Promedio	5.98

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

Murete	Área diagonal [cm ²]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm ²]
1	699	6600	9.44
2	699	7050	10.08
3	699	7840	11.21
		Promedio	10.25

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

Murete	Área diagonal [cm ²]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm ²]
1	699	6980	9.98
2	699	6650	9.51
3	699	6180	8.84
		Promedio	10.54

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

Murete	Área diagonal [cm ²]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm ²]
1	699	8040	12
2	699	6680	10
3	699	6500	9
		Promedio	10.12

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

Murete	Área diagonal [cm ²]	Carga máxima [kg]	Resistencia [kg/cm ²]
1	699	8110	11.60
2	699	5680	8.12
3	699	7540	10.79
		Promedio	10.17

Para las juntas entre las piezas de los muros se empleó un mortero dosificado de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2020, para morteros tipo 1. Además, se usaron otros materiales para la elaboración de morteros de junta, no necesariamente contemplados en las normas mencionadas. Las resistencias promedio de las pruebas de compresión en cada tipo de mortero se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados obtenidos en los ensayos de cubos de mortero de junta

Tipo de mortero	Resistencia [kg/cm ²]
Tipo I, tradicional	132
Sika Monotop – 722 Mur (2020)	286
StoneCrete (2018)	161
Mortero tipo I reforzado con fibras sintéticas	250
Mortero tipo I reforzado con fibras metálicas	229

Para determinar la resistencia del concreto empleado en dalas y castillos de los modelos, se ensayaron probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Se consideró un factor de corrección por esbeltez de 1.00 de acuerdo con la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014 y las Normas Técnicas de Construcción y Diseño de Estructuras de Mampostería. La resistencia de dalas, castillos y losa de los modelos, en promedio, resultó de 168 kg/cm², con un máximo de 206 y un valor mínimo de 145.

Para la rehabilitación con contraventeo del espécimen M-10, el sistema se reforzó con un marco de concreto, resultado de un encamisado de concreto reforzado alrededor de la dala y castillos del modelo de mampostería original. La resistencia a la compresión promedio del concreto empleado en el encamisado de refuerzo, resultó de 400 kg/cm^2 .

En relación con el acero de refuerzo de dalas y castillos, se utilizaron barras corrugadas con esfuerzo de fluencia nominal $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$, mientras que para el refuerzo transversal se usó alambρόn de 60 mm de diámetro a base de acero con esfuerzo de fluencia $f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$. Para identificar y tratar de controlar la fluencia del acero de refuerzo de los castillos, estos se instrumentaron con deformímetros que midieron la deformación del acero durante los ensayos. En la Figura 5, se muestra la aplicación de estos medidores de deformaciones unitarias en el acero de refuerzo de los castillos.

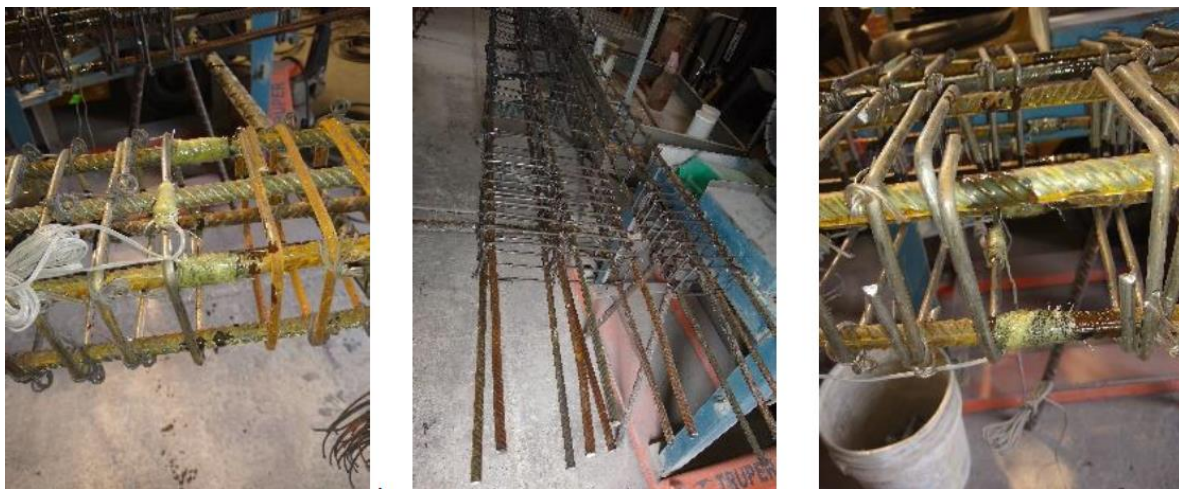


Figura 5. Instrumentación del acero de refuerzo de los castillos

En el caso de la malla electrosoldada usada en la rehabilitación y refuerzo con repellado de los muros, se empleó acero con esfuerzo de fluencia nominal $f_y = 5000 \text{ kg/cm}^2$.

PROPUESTA DE DISPOSITIVO DE APLICACIÓN DE CARGA

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras Grandes (LEG) del CENAPRED. La Figura 6 muestra 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 de la carga del actuador al muro se logra a través de una trabe metálica de acero muy rígida, con una peso de 1.5 t., adicionalmente sobre la trabe se colocó un peso de 13.5 t, lo que sumó una carga axial sobre los modelos de 15 t. El área transversal de los modelos fue de 3000 cm^2 , por lo que el esfuerzo axial fue de 5 kg/cm^2 , valor regularmente empleado en los estudios experimentales de muros de mampostería.

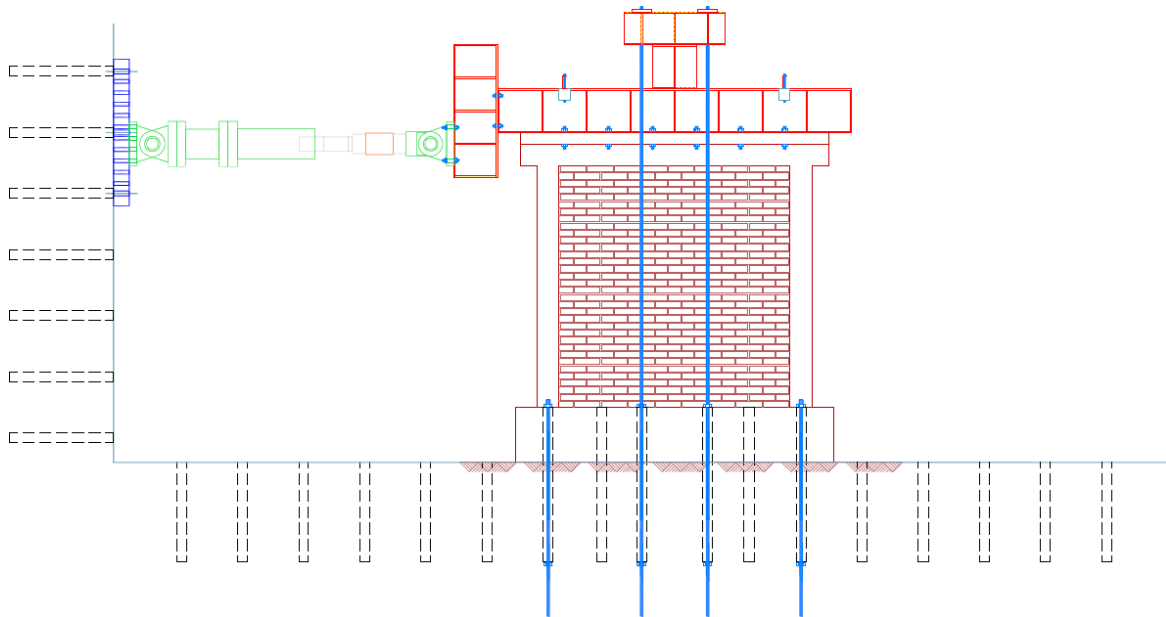


Figura 6. Marco de carga avista en elevación del arreglo.

Protocolo de carga

Las pruebas fueron cíclicas reversibles siguiendo las recomendaciones del apéndice A de las NTC-Mampostería (2020), con una historia de desplazamiento como la mostrada en la Figura 7. Se identifican dos etapas de aplicación de los ciclos de carga, una controlada por carga, hasta alcanzar el valor teórico de la carga correspondiente al agrietamiento por tensión diagonal por cortante; y la otra controlada por desplazamientos estableciendo valores pico en función del desplazamiento máximo permisible, reglamentariamente hablando. La prueba se termina cuando se tenga una degradación de resistencia superior al 20% de la capacidad máxima del modelo, cuando se presente un síntoma de inestabilidad del sistema, o cuando esté en riesgo la seguridad de grupo de investigación o los equipos empleados en la prueba.

- 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.

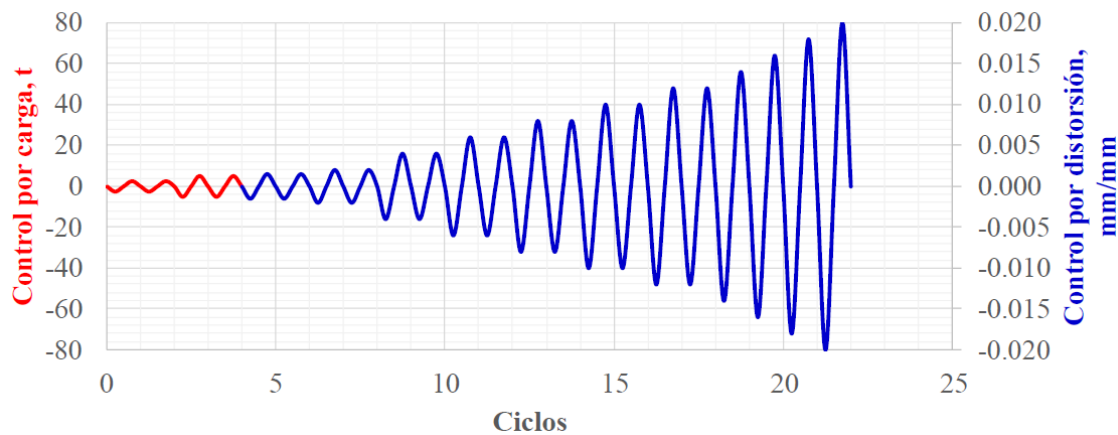


Figura 7. Protocolo de carga según las NTC-Mampostería (2020)

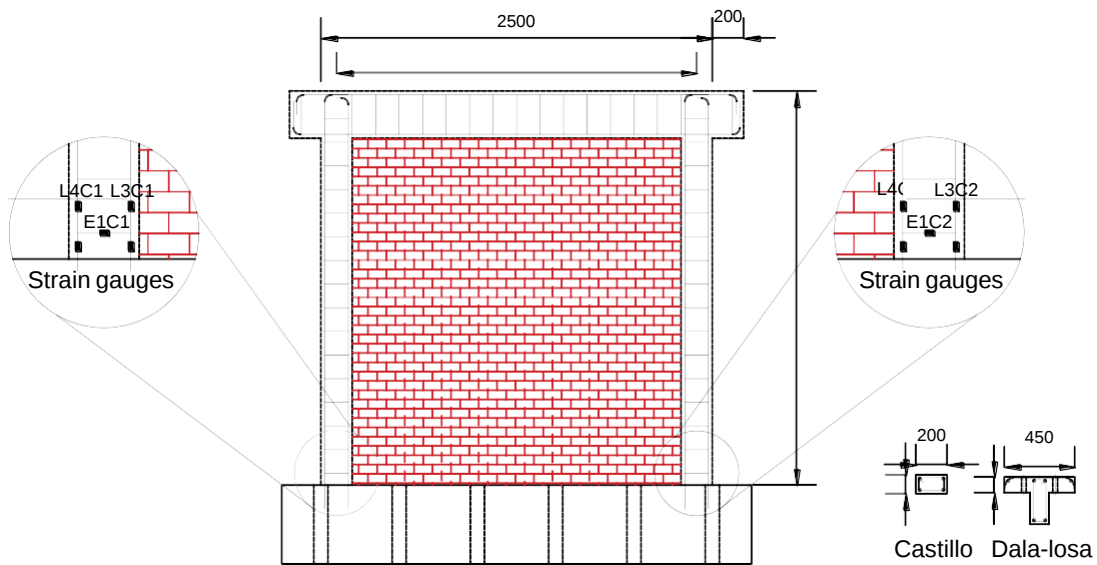
PROPUESTA DE DISPOSITIVOS DE INSTRUMENTACIÓN

Para el análisis de los modelos se colocó instrumentación interna y externa. La instrumentación externa consistió tanto en celdas de carga como transductores de desplazamiento. Las celdas de carga para medir la fuerza vertical aplicada en el modelo representativo de tres a cinco niveles superiores, como la fuerza horizontal que permite simular el efecto de la incidencia de sismo. También como parte de la instrumentación externa se emplearon medidores de desplazamiento, dispositivos que permiten cuantificar desplazamientos relativos entre puntos bien definidos y, con base en ello, revisar la configuración deformada del modelo y estimar la distribución de fuerzas, esfuerzos y el posible mecanismo de falla asociado.

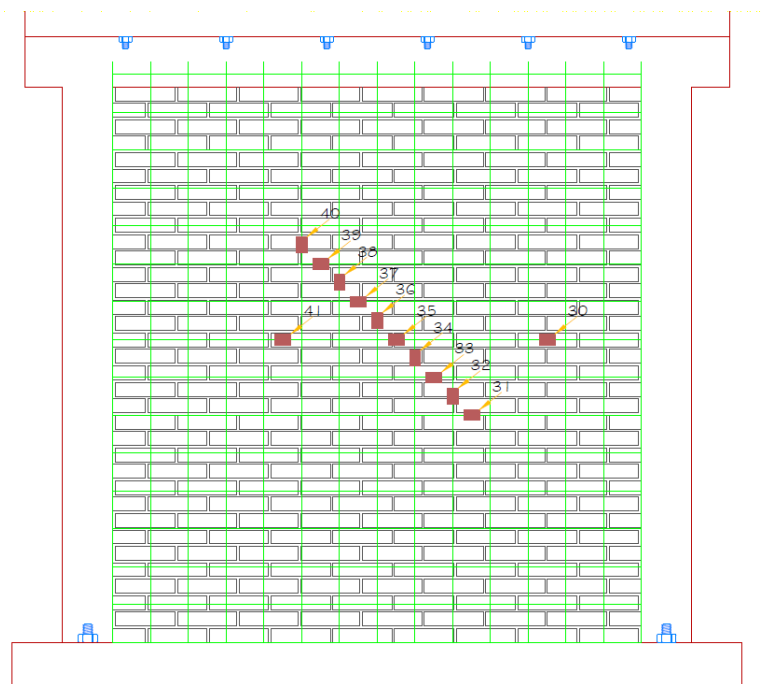
A continuación se incluye una breve descripción de los esquemas de instrumentación interna y externa empleada para el estudio y análisis de los modelos de prueba en el proyecto que se reporta.

Instrumentación interna

La instrumentación interna tiene la finalidad de conocer la distribución de esfuerzos y fuerzas en el elemento estructural, mediante deformímetros eléctricos (strain gauges), en este caso adheridos a barras de refuerzo (Figura 8). El tipo de deformímetro usado fue de 2 mm de longitud, tanto en barras longitudinales como en estribos. Los strain gauges son dispositivos cuya resistencia eléctrica varía de forma proporcional a la deformación a que es sometido el acero de refuerzo.



Distribución de la instrumentación interna (castillos)



Distribución de la instrumentación interna (malla)

Figura 8. Distribución de la instrumentación interna en los modelos

Instrumentación externa

Para medir la deformación del elemento debido a la carga aplicada, se recurre a la colocación de transductores. En la Figura 9 se presenta la distribución de los transductores en los modelos.

De acuerdo a la figura 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 la figura se muestra la simbología utilizada y la posición del aparato de medición en el espécimen.

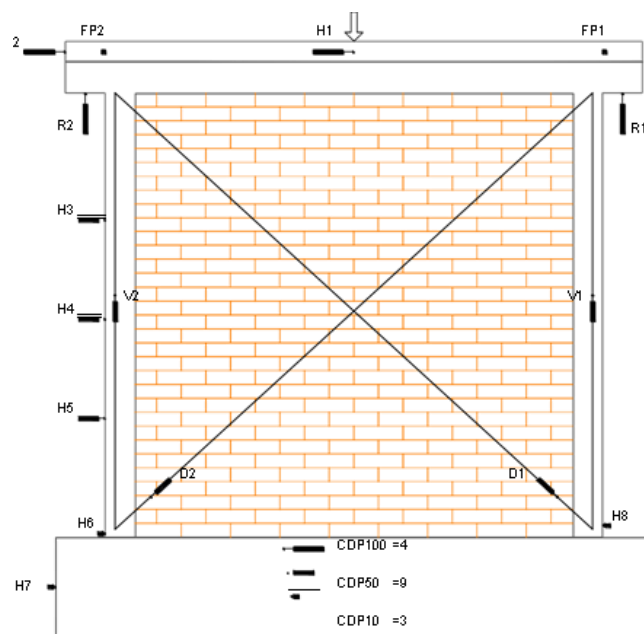


Figura 9. Distribución de los instrumentos externos

VALORES DE RESISTENCIA TEÓRICOS

Resistencia a cortante

Con la finalidad de comparar los resultados experimentales con las expresiones de resistencia de la NTC-Mampostería (2020), se presenta el cálculo de las resistencias teóricas a fuerza cortante, considerando sus propiedades geométricas, así como las propiedades mecánicas de los materiales que los conforman. No se omite mencionar que se revisaron las resistencias a flexión, carga axial y flexocompresión, con el propósito de verificar que el mecanismo de falla dominante fuera el de cortante. Para las variables que intervienen en las expresiones de resistencia a cortante, se usaron los valores de dimensiones de los modelos y de resistencia y propiedades mecánicas de los materiales mostrados en las secciones anteriores. La expresión para calcular la resistencia teórica de los modelos, se siguió el procedimiento descrito en la NTC-Mampostería (2020):

$$V_R = V_{mR} + V_{SR}$$



$$V_{mR} = F_R f \{0.5 v'_m A + 0.3 P\}$$

$$V_{sR} = F_R \eta \rho_h f_{yh} A$$

Donde:

- F_R Factor de resistencia
 f Factor de corrección por esbeltez (en este caso igual a la unidad)
 v'_m Esfuerzo resistente a cortante (tensión diagonal) para la mampostería
 A Área transversal de la sección transversal (horizontal) del muro
 P Carga axial actuando en el muro
 η Factor de eficiencia para considerar la contribución del acero de refuerzo
 ρ_h Cuantía de refuerzo horizontal en el muro
 f_{yh} Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo horizontal en el muro

Rigidez lateral de los modelos

Con base en las características de los especímenes, se determinó la rigidez lateral teórica de los modelos. 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 efecto del daño inicial, por lo que la rigidez teórica es la misma en todos los casos. Para el cálculo de la rigidez se consideró la geometría y propiedades mecánicas nominales de los modelos. Los resultados de la resistencia a cortante y rigidez lateral de los 13 modelos probados se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores teóricos de la resistencia lateral a cortante y la rigidez

Modelo	Resistencia a cortante (t)	Rigidez lateral (t/cm)
M-1	9.43	32.50
M-1R	14.83	32.50
M-2	9.43	32.50
M-2R	15.94	32.50
M-3R	15.94	32.50
M-4R	14.83	32.50
M-5	9.43	32.50
M-5R	19.55	32.50
M-6	9.43	32.50
M-6R	14.10	32.50
M-7	9.43	32.50
M-7R	19.60	32.50
M-8	9.43	32.50
M-8R	19.97	32.50
M-9	13.81	54.60
M-10	50.23	196.60
M-11	9.43	32.50
M-11R	10.12	32.50
M-12	9.43	32.50
M-12R	10.12	32.50
M-13	9.43	32.50
M-13R	14.83	32.50

PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS

Construcción de los muros

En la Figura 10, 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 10. Proceso de construcción de los modelos

Refuerzo de los modelos con encamisado de malla electrosoldada y mortero

Los especímenes M-1 a M-4, M-6 y M-11 a M-13 fueron rehabilitados con esta técnica. La Figura 11 muestra el proceso de colocación del refuerzo. Después de escarificar la mampostería, se ancla la malla al muro mediante alambIÓN o clavos para concreto @45 cm. 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.



Figura 11. Proceso de refuerzo con malla y mortero

Refuerzo con aplanado con mortero reforzado con fibras

En la Figura 12 se muestra un resumen del proceso empleado para aplicar el refuerzo con aplanado y fibras, tanto metálicas, como sintéticas. Al igual que para la rehabilitación con la malla, es necesario escarificar la mampostería para una mejor adhesión del aplanado. Las fibras se utilizan 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/m³) y los muros M-7 y M-11 se rehabilitaron con mortero reforzado con fibras sintéticas (proporción 10 kg/m³). Se colocó malla electrosoldada para confinamiento en las esquinas de los modelos.



Mezclado del mortero con fibras



Figura 12. Proceso de refuerzo con fibras en el mortero de repellado

Aplanado con malla de fibra de vidrio y mortero industrializado

En la Figura 13 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. Al finalizar, se agregaron cuatro puntos de anclaje con fibra de vidrio.



Aplicación de la malla de fibra de vidrio con mortero industrializado



Anclaje del refuerzo de fibra de vidrio en la cara opuesta al refuerzo



Vista general del modelo ya rehabilitado

Figura 13. Proceso de refuerzo con malla de fibras de vidrio y mortero industrial

Encamisado del marco con concreto reforzado e inclusión del contraviento restringido al pandeo

Se rehabilitó el marco con encamisado de concreto en los castillos y la dala. Las dimensiones de las columnas resultaron de 35 por 35 cm. Una vez reforzado el marco, se colocó el contraviento restringido al pandeo. Al ser esta técnica poco convencional para su uso en el sector de la construcción informal, los resultados de esta tecnología no se presentan en el resto del presente informe.



Figura 14. Proceso de refuerzo del marco de concreto y la inserción del contraviento restringido al pandeo

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las pruebas experimentales en los modelos fueron cuasi-estáticas, aplicando fuerzas y desplazamientos laterales en forma cíclica reversible. Resultado de las mismas, se obtuvo información sobre el comportamiento en los intervalos elásticos e inelásticos de los modelos, cuyo comportamiento global se representa por medio de las relaciones carga – desplazamiento lateral y sus envolventes. A partir de esta información se pueden obtener parámetros de comportamiento asociados a filosofías de diseño varias, como diseño por capacidad, diseño por desempeño, diseño por resiliencia, etc., estos parámetros son, entre otros, la energía disipada, el amortiguamiento equivalente, patrones de agrietamiento y daño, tendencias de degradación de resistencia y de rigidez. En este trabajo se reporta únicamente los parámetros de comportamiento global, carga lateral y desplazamiento lateral.

Curvas de histéresis y sus envolventes

Cuando los muros son sometidos a carga cíclica reversible, se obtiene la relación carga – desplazamiento, también definida como curva de histéresis, que permite estudiar los intervalos de comportamiento elástico e inelástico de los modelos. En la Figura 15 se muestran las curvas de histéresis de los especímenes originales y rehabilitados para algunos de los modelos. En línea gris se ven las curvas de histéresis. En línea negra continua se muestra la envolvente del primer ciclo de carga para cada nivel de carga y/o desplazamiento aplicado en el modelo, mientras que la línea negra discontinua muestra la envolvente de la repetición. Las líneas discontinuas rojas, horizontales, muestran la resistencia teórica según las (NTC-Mampostería, 2020). Se puede apreciar que, salvo el modelo M-13, construido con criterios del sector informal, todos los especímenes tuvieron capacidades de resistencia y deformación superior a los valores teóricos calculados. Además, las capacidades de los modelos rehabilitados con las diversas técnicas, independientemente de las mismas, se incrementaron en porcentajes superiores, en promedio, al 50%.

En la Figura 15 se muestran únicamente las curvas histéreticas que relacionan la carga lateral aplicada en toneladas (t), con el desplazamiento global medido en la parte superior de los especímenes, en milímetros (mm), para los modelos 1, 2, 3, 4, 5, 7 y 13.

Como generalmente se identifica de estudios experimentales sobre el comportamiento de sistemas estructurales de mampostería, las relaciones carga-desplazamiento de todos los modelos, una vez que alcanzan la resistencia máxima, presentan una tendencia de degradación de resistencia, siendo esto más notable en los modelos M-7 y M-13. También es evidente, como en cualquier sistema estructural a base de materiales pétreos, que existe degradación de rigidez y un cierto adelgazamiento de las curvas de histéresis, asociado al mecanismo de falla de tensión diagonal por cortante, mecanismo dominante en todos los modelos.

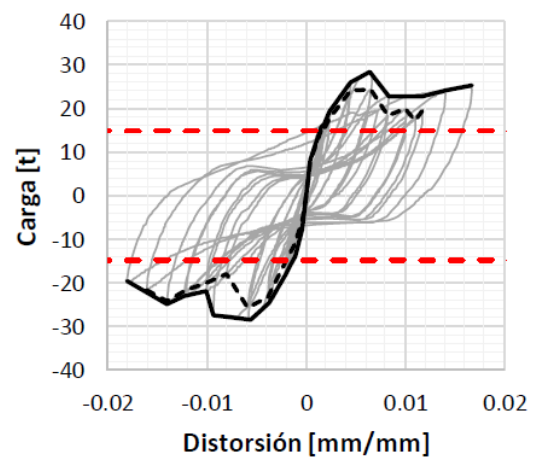
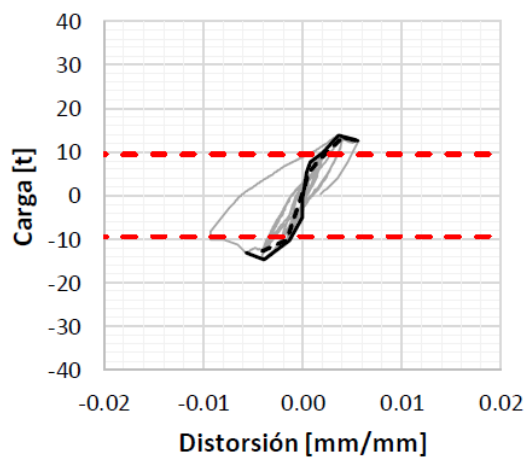


Figura 15.a. Curvas de histéresis de los especímenes M-1 y M-1R

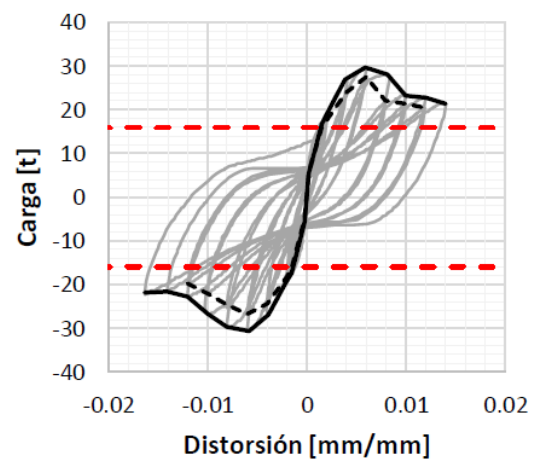
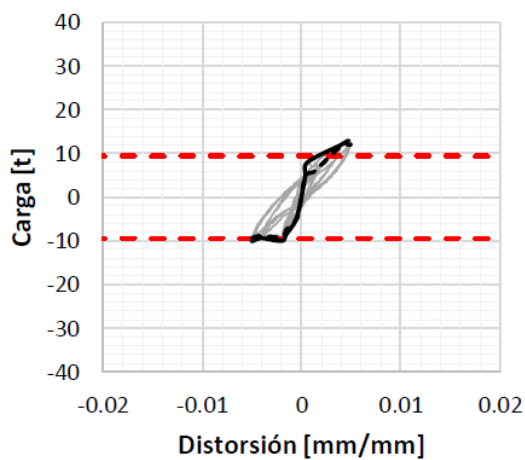


Figura 15.b. Curvas de histéresis de los especímenes M-2 y M-2R

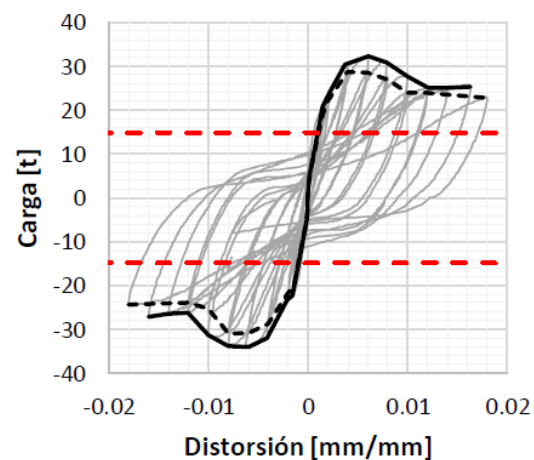
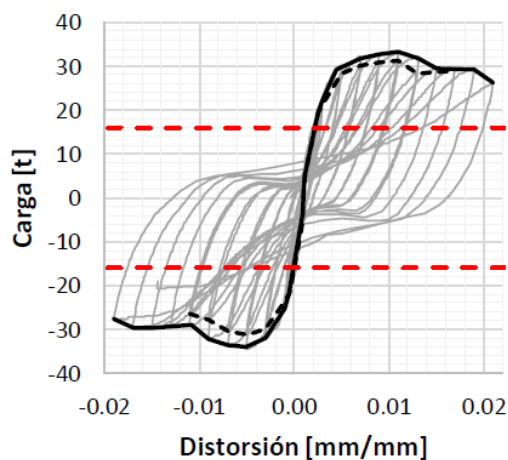


Figura 15.c. Curvas de histéresis de los especímenes M-3R y M-4R

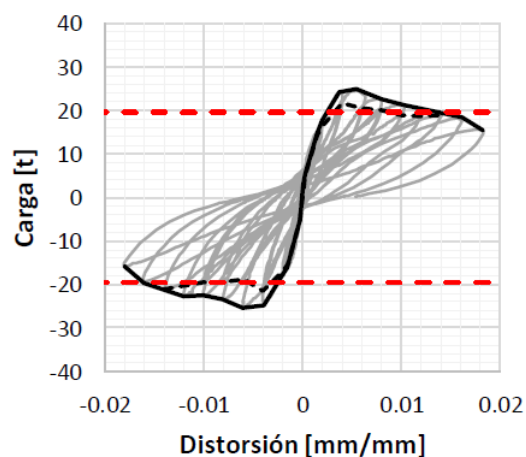
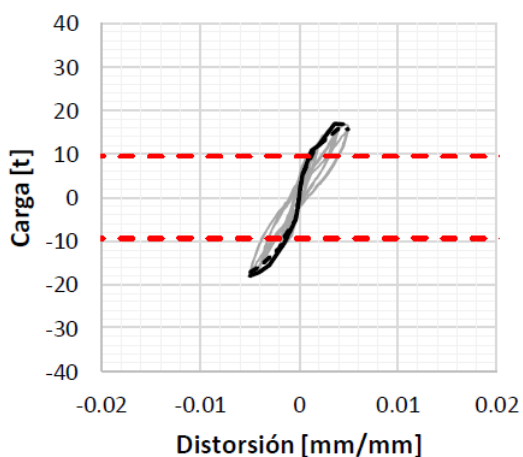


Figura 15.d. Curvas de histéresis de los especímenes M-5 y M-5R

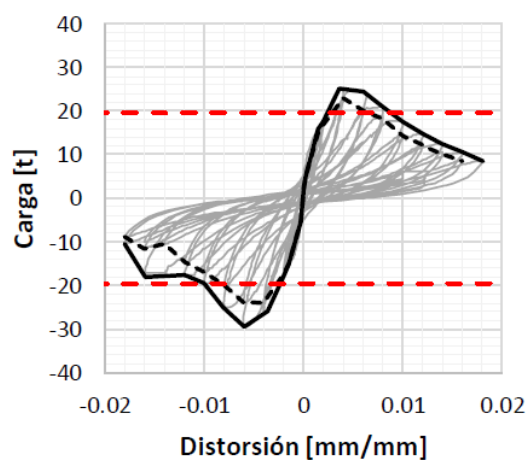
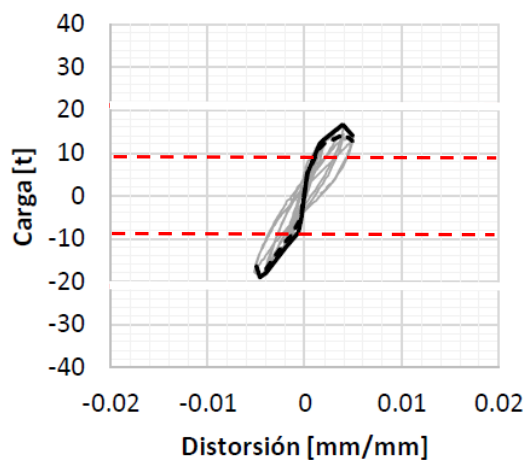


Figura 15.e. Curvas de histéresis de los especímenes M-7 y M-7R

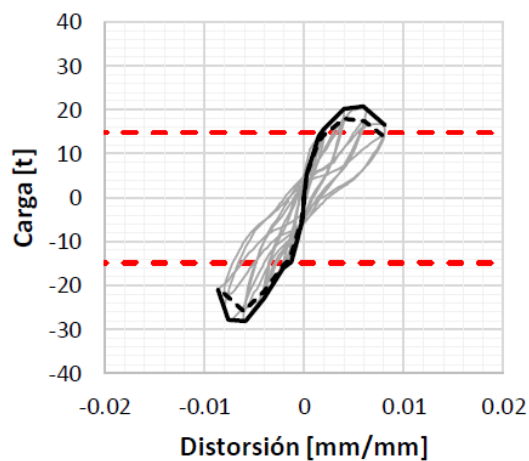
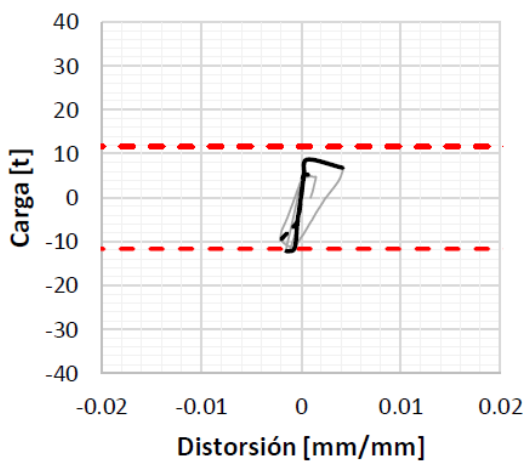


Figura 15.f. Curvas de histéresis de los especímenes M-13 y M-13R

Figura 15. Curvas de histéresis representativas

Comparación de las resistencias teóricas con las experimentales

En la Tabla 11 se muestra un resumen comparativo de los valores de resistencia lateral, teórica (F_{LT}) y experimental (F_{LE}), así como las relaciones entre ellas.

Tabla 11. Comparación de los valores teóricos y experimentales de la resistencia lateral de los modelos

Modelo	Resistencia lateral Teórica (F_{LT}) (t)	Resistencia lateral Experimental (F_{LE}) (t)	Relación entre las resistencias (F_{LE}/F_{LT})
M-1	9.43	15	1.59
M-1R	14.83	29	1.96
M-2	9.43	13.84	1.47
M-2R	15.94	31	1.94
M-3R	15.94	34.9	2.19
M-4R	14.83	34.2	2.37
M-5	9.43	18.12	1.92
M-5R	19.55	26	1.33
M-6	9.43	15	1.59
M-6R	14.10	29.88	2.12
M-7	9.43	19.89	2.11
M-7R	19.60	29.9	1.53
M-8	9.43	16.82	1.78
M-8R	19.97	23.5	1.18
M-9	13.81	20.8	1.51
M-10	50.23	57	1.13
M-11	9.43	26.89	2.85
M-11R	10.12	35	1.79
M-12	9.43	23.73	2.52
M-12R	10.12	31.14	3.08
M-13	9.43	12.95	1.37
M-13R	14.83	28.43	1.92

En cuanto al efecto del refuerzo, incluyendo a los modelos M-7 y M-13, todas las soluciones proporcionan un incremento notable de la resistencia lateral; y, exceptuando a los modelos M-7 y M-13, también se logran incrementos importantes de la capacidad de deformación después de alcanzar la resistencia máxima. Tomando en cuenta lo mencionado por Meli et al (1994, 2014), sobre la influencia de una robustez y detallado

adecuado de los castillos, principalmente en los extremos superior e inferior, que permite lograr incrementos de resistencia lateral y, sobre todo, capacidad a deformación, es notable en la respuesta observada para los modelos M-7 y M-13, en los cuales los castillos cumplen el requisito mínimo que establece la norma en general, pero no resultan adecuados para demandas de ciclos reversibles para niveles de la resistencia máxima. En estos dos modelos, tanto en la condición original, como en la reforzada, la capacidad dúctil es en la vecindad de la unidad, aspectos que deberá ser considerado para los diseños sismorresistentes de edificaciones originales y para los procesos de evaluación de la seguridad estructural en edificaciones existentes con estas características.

El modelo M-13 mostró el menor valor de resistencia experimental, lo cual está asociado con la poca o nula capacidad del castillo en los extremos, superior e inferior, para contener la propagación de la grieta de tensión diagonal que se forma inicialmente en el panel de mampostería, esto se asocia con las características del refuerzo prearmado en castillos tipo armex; el modelo M-7 tiene características geométricas y de materiales similares al M-13, con la diferencia de que el refuerzo de los castillos del M-7 sí contó con acero de refuerzo transversal suficiente para evitar la falla abrupta del castillo al incidir en él la grieta diagonal. No obstante lo mencionado, después de la rehabilitación con malla electrosoldada calibre 10, el modelo M-13 alcanzó una resistencia del orden de 30 toneladas, evidenciando el nivel de eficiencia de la técnica de rehabilitación con mortero reforzado con malla electrosoldada.

Tabla 12. Comparación de los valores teóricos y experimentales para las dos condiciones de los modelos, la condición original y la reforzada

Modelo	Resistencias laterales teóricas (FLTR/FLTO)	Resistencias laterales experimental (FLER/FLRO)	Relación entre las resistencias (FLEO/FLTO)	Relación entre las resistencias (FLER/FLTR)
M-1	1.57	1.93	1.59	1.96
M-2	1.69	2.24	1.47	1.94
M-5	2.07	1.43	1.92	1.33
M-6	1.50	1.99	1.59	2.12
M-7	2.08	1.50	2.11	1.53
M-8	2.12	1.40	1.78	1.18
M-11	1.07	1.30	2.85	3.46
M-12	1.07	1.31	2.52	3.08
M-13	1.57	2.20	1.37	1.92
Promedio	1.64	1.70	1.91	2.09

Simbología:

FLTR: Resistencia lateral teórica del modelo reforzado

FLTO: Resistencia lateral teórica del modelo original

FLTR: Resistencia lateral experimental del modelo reforzado

FLTO: Resistencia lateral experimental del modelo original

En la Tabla 12 se muestran los valores comparativos de las resistencias teóricas y experimentales para las dos condiciones de los modelos, la condición original y la reforzada. De la primera columna se identifica que, con base en las resistencias teóricas, se tendría una eficiencia del refuerzo del 64%, siendo del 70% considerando los resultados experimentales. Los porcentajes de dispersión de las resistencias anteriores, resultan consistentes con la dispersión entre las resistencias experimentales y teóricas de los modelos originales, que es de 91%, y para los modelos con refuerzo la dispersión resultó de 109%.

Patrones de agrietamiento y daño

Con el propósito de identificar el patrón de agrietamiento y, a partir de ello, definir el mecanismo de falla, 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 gato. En las Figuras 16, se presenta un resumen de los patrones de agrietamiento más característicos de los modelos probados. En general se observa una distribución uniforme de las grietas en los especímenes rehabilitados con malla electrosoldada. También se aprecia un nivel importante de daño en las bases de los castillos, atribuible al reforzamiento concentrado en el panel. Lo anterior provoca una modificación en el mecanismo de falla, de una falla de tensión diagonal por cortante en la mampostería del panel en los modelos originales, a otro de deslizamiento en la base en los modelos reforzados.

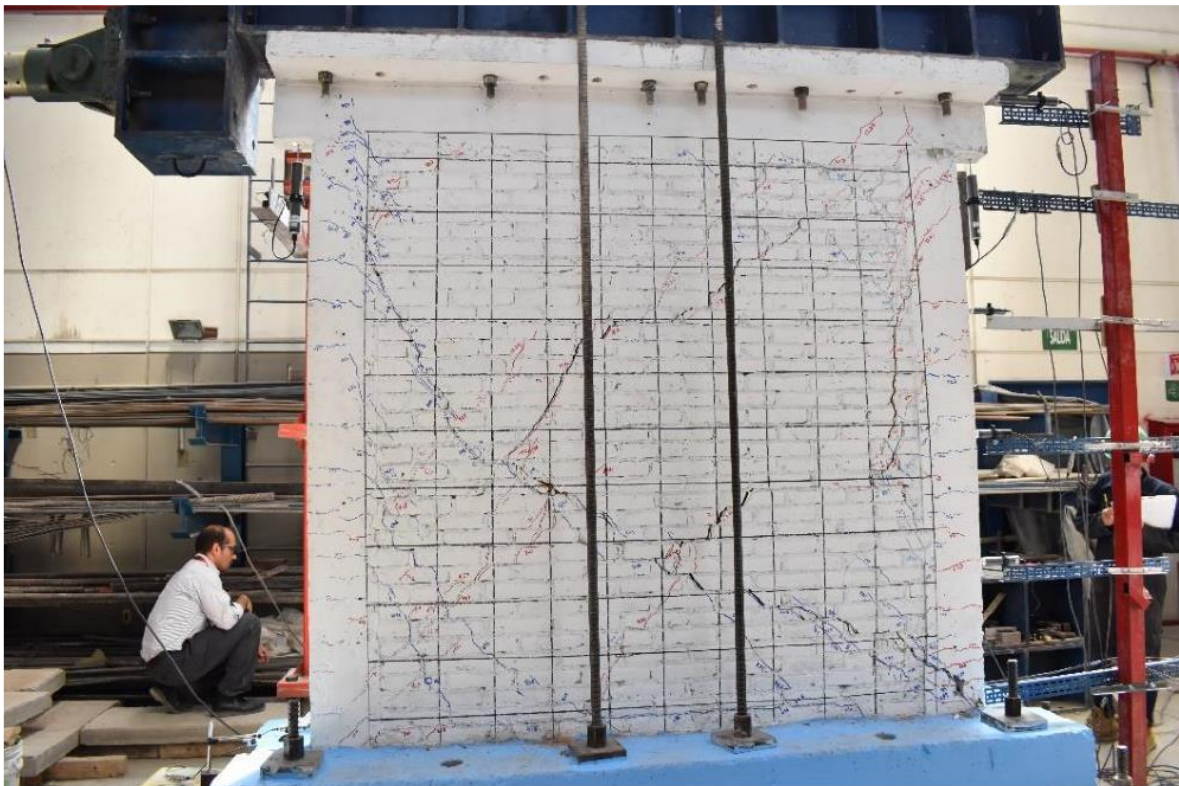


Figura 16.a. Modelo M-1, patrón de agrietamiento a 0.5% de distorsión



Figura 16.b. Modelo M-1R, patrón de daño a 1.0% de distorsión



Figura 16.c. Modelo M-3R, patrón de daño a 1.0% de distorsión



Figura 16.d. Modelo M-7, patrón de daño a 0.5% de distorsión



Figura 16.d. Modelo M-7, patrón de daño a 0.5% de distorsión



Figura 16.e. Modelo M-13, patrón de daño a 0.5% de distorsión



Figura 16.f. Modelo M-13R, patrón de daño a 1.0% de distorsión

Figura 16. Patrones de daño y agrietamiento representativos

CONCLUSIONES

Se presentan resultados obtenidos de un programa experimental sobre el estudio del comportamiento de muros de mampostería confinada reforzados con criterio de resiliencia. Los modelos fueron 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 morteros industrializados. Algunas de las conclusiones de mayor relevancia son:

- Todas las técnicas de rehabilitación resultaron exitosas ya que en todos los casos se logró un aumento considerable tanto de la resistencia lateral, como de la capacidad de deformación de los modelos
- 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 especímenes rehabilitados en ambas caras, naturalmente mostraron mayor resistencia lateral, lo que generó un cambio en el modo de falla. El modo de falla de estos modelos fue por deslizamiento de la base
- Los muros rehabilitados con malla electrosoldada 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
- Resultado de la comparación de los valores teóricos y experimentales para los modelos del estudio, tanto en su condición original como reforzada, se puede identificar la necesidad de revisar los planteamientos que dan lugar a las expresiones de resistencia. Lo anterior dado que las dispersiones son en promedio 91% y 109%, respectivamente.

Recomendaciones

Los resultados obtenidos en este programa experimental se pueden complementar con estudios adicionales relacionados con el tipo de anclaje de los repellados y encamisados. También se recomienda extender este estudio experimental para ensayar una mayor cantidad de arreglos de soluciones estructurales en muros de mampostería propios de edificaciones del sector informal, con ello se contribuiría a mejorar las prácticas constructivas y de reforzamiento del universo de edificación existente y, con ello, incrementar la resiliencia sísmica.

Es necesario 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 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, 220Bis, 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, P. R. (1994, 2014), "Mampostería Estructural. La práctica, La investigación y el comportamiento sísmico observado en México", Centro Nacional de Prevención de Desastres, Cuadernos de Investigación Julio – 1994, 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.

AGRADECIMIENTOS

La Subdirección de Riegos Estructurales del CENAPRED agradece ampliamente al estudiante que está desarrollando el proyecto dentro del Programa de Maestría en Ingeniería de la UNAM, ya que permitió el uso de parte de la información del estudio.

También se extiende un reconocimiento y agradecimiento al tutor principal del estudiante, el Dr. Héctor Guerrero Bobadilla, sin su entusiasmo y empuje no hubiera sido posible el desarrollo de este estudio.