

**Ensaye de tipo sísmico de un muro
estructural construido con piezas
multiperforadas de concreto utilizando un
mortero enriquecido con resina**

IISGCONV-006-2025

Elaborado para Industrial Bloquera Mexicana

Revisado: 08/2025

Responsable:

Dr. Juan José Pérez Gavilán E.

Instituto de Ingeniería de la UNAM

Contenido

ACLARACIÓN.....	4
ANTECEDENTES.....	4
PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	5
ESPECÍMENES	5
MATERIALES	7
<i>Piezas</i>	7
<i>Mortero</i>	7
<i>Concreto de castillos, dala y losa</i>	7
<i>Muestreo</i>	7
CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES	8
INSTRUMENTACIÓN	8
SISTEMAS DE CARGA	10
<i>Carga lateral</i>	11
<i>Carga vertical</i>	11
SECUENCIA DE CARGA	15
RESULTADOS.....	15
PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	15
HISTERÉTICOS, MODELO ELASTOPLÁSTICO Y DEGRADACIÓN DE RIGIDEZ DE CICLO	16
CICLOS DE HISTÉRESIS CRÍTICOS	19
<i>MH8R-1</i>	19
<i>MH8R-2</i>	19
<i>MH8R-3</i>	19
<i>MH8R-4</i>	20
RESUMEN DE VALORES CRÍTICOS.....	20
COMPARACIÓN DE ENVOLVENTES	21
DEFORMACIÓN DEL REFUERZO EN LOS CASTILLOS.....	22
DEFORMACIÓN DEL REFUERZO HORIZONTAL	24
<i>El problema de la adherencia refuerzo - mortero</i>	24
<i>Contribución del refuerzo a la resistencia MH8R-4</i>	25
PATRONES DE AGRIETAMIENTO.....	28
<i>MH8R1</i>	29
<i>MH8R2</i>	30
<i>MH8R3</i>	31
<i>MH8R4</i>	32
DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYES	32
MH8R-1	33
MH8R-2	33
MH8R-3	34
MH8R-4	36
CRITERIOS DE ACEPTACIÓN.....	37
DESCRIPCIÓN	37
<i>A.9.2 $\theta_{max} > \gamma_{max}/2$</i>	37

A.9.2 $R_{max} > R$	38
A.9.3 $R_{ymax}/R_{max} > 0.6$ o 0.8	38
A.9.4 $k_{ymax}/k_0 > 0.1$	38
A.9.5 $\theta_{max}/\theta_y > 1 + 4(Q - 1)$	38
CÁLCULO DE LA RESISTENCIA R	38
Muros sin refuerzo horizontal.....	38
Muros con refuerzo horizontal.....	39
RESUMEN DE RESULTADOS.....	40
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	40
MATERIALES	40
Piezas.....	40
Mortero.....	41
Mampostería f_m'	41
Mampostería v_m'	41
G_m/E_m	41
RESISTENCIA	41
DEGRADACIÓN DE LA RESISTENCIA	41
CAPACIDAD DE DEFORMACIÓN.....	42
AGRIETAMIENTO.....	42
DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ DE CICLO.....	43
DUCTILIDAD	43
CONCLUSIONES.....	43
REFERENCIAS	45
ANEXO A RESULTADO DE LOS ENSAYES DE LOS MATERIALES	46
ANEXO B FICHA TÉCNICA DE BLOCK MULTIPERFORADO MACIZO (BH8S)	50
ANEXO C APÉNDICE A DEL NTC-MAMPOSTERÍA DE LA CDMX	51

Aclaración

El presente informe corresponde a una extensión del estudio realizado para Industrial Bloquera Mexicana (IBMEX) que incluyó tres muros confinados contruidos con piezas multiperforadas de concreto 12×20×40 cm usando un mortero especial, mejorado con resina (Convenio IISGCONV-074-2023). En la extensión de dicho estudio, se ensayó un nuevo espécimen, con una cuantía de refuerzo horizontal mayor a la de los casos estudiados con anterioridad y con un ancho de los castillos de 20 cm a diferencia de los muros anteriores con que tuvieron un ancho de 15 cm.

El presente informe incorpora los resultados presentados en el informe anterior y se hace una presentación e interpretación de los resultados en forma conjunta, respetando estrictamente los resultados numéricos presentados en el estudio anterior.

Para todo efecto práctico el presente informe incluye al anterior. En adelante se incluyen los cuatro especímenes ensayados como si se tratara de un solo estudio.

Antecedentes

Industrial Bloquera Mexicana (IBMEX) solicitó al Instituto de Ingeniería (IINGEN) de la UNAM la evaluación del comportamiento sísmico de un sistema de muros confinados de mampostería, desarrollado por IBMEX.

El sistema consiste en muros confinados contruidos con piezas multiperforadas de concreto 12×20×40 cm usando un mortero especial, mejorado con resina. La pieza se denominada como BH8S, con un área neta de 76% que, de acuerdo a la NTC-Mampostería, se clasifica como pieza maciza. Las piezas se pegan con un mortero a base de cemento y arena mejorado con resina (Se anexa hoja técnica).

Dado que se trata de un mortero especial del fabricante, que no se contempla en la NTC-Mampostería, se propuso la evaluación del desempeño del sistema de acuerdo al Apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería de la Ciudad de México (NTC-Mampostería) en su versión del 2023: APÉNDICE NORMATIVO A CRITERIO DE ACEPTACIÓN DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS A BASE DE MAMPOSTERÍA DISEÑADOS POR SISMO. Dicho apéndice establece los requisitos que deben cumplir muros contruidos con un sistema de mampostería, que no esté reconocido explícitamente en la Norma, para que dichos muros y mampostería puedan ser utilizados en la CDMX. Los requisitos incluyen aspectos de resistencia, degradación de la resistencia y ductilidad del sistema. Para referencia se incluye dicho documento en el Anexo C de este informe.

El objetivo de dichos requisitos es el de garantizar que el sistema que se esté evaluando, cumpla los supuestos que se utilizan en el Norma para el diseño de estructuras de mampostería. Algunos de ellos incluyen, que la resistencia máxima de los muros pueda alcanzarse para las deformaciones admisibles previstas en la Norma; que la ductilidad del sistema alcance la prevista en la Norma; y que la degradación de la resistencia a la deformación admisible no sea excesiva, nuevamente, para garantizar que la resistencia máxima pueda desarrollarse.

La norma contempla que el mismo fabricante provea una metodología de diseño para los muros con el sistema que se desea evaluar. Esta posibilidad requiere, normalmente, que el fabricante

haya realizado un extenso trabajo experimental. Otra posibilidad es que se asuma que los muros con el material propuesto se diseñen de acuerdo a alguna de las modalidades contempladas en la Norma, lo que implica que se aceptan como aplicables los requisitos de desplazamiento lateral y factor de comportamiento sísmico admisibles para dicha modalidad.

En el caso que nos ocupa, el sistema se valoró como un sistema de mampostería confinada con piezas macizas con y sin refuerzo horizontal.

Programa experimental

Especímenes

Se realizó el ensaye de 4 muros a escala natural con dimensiones nominales de 2.5 x 2.5 m de longitud y altura respectivamente (Figs. 1 y 2), en el laboratorio de estructuras del Instituto de Ingeniería de la UNAM y el Laboratorio de Estructuras Grandes del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). En la Tabla 1, se presentan las características de los especímenes.

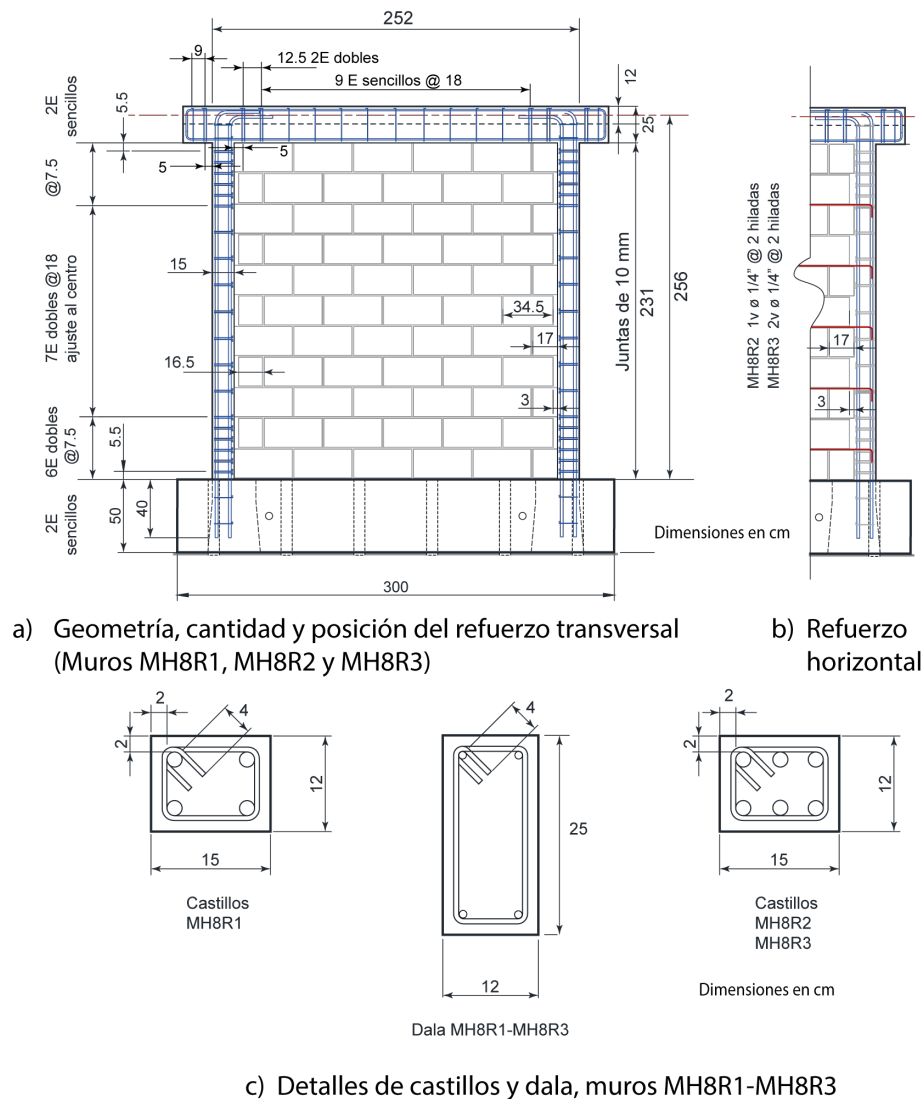


Figura 1 Geometría, refuerzo transversal y longitudinal en castillos, muros MH8R1-MH8R3

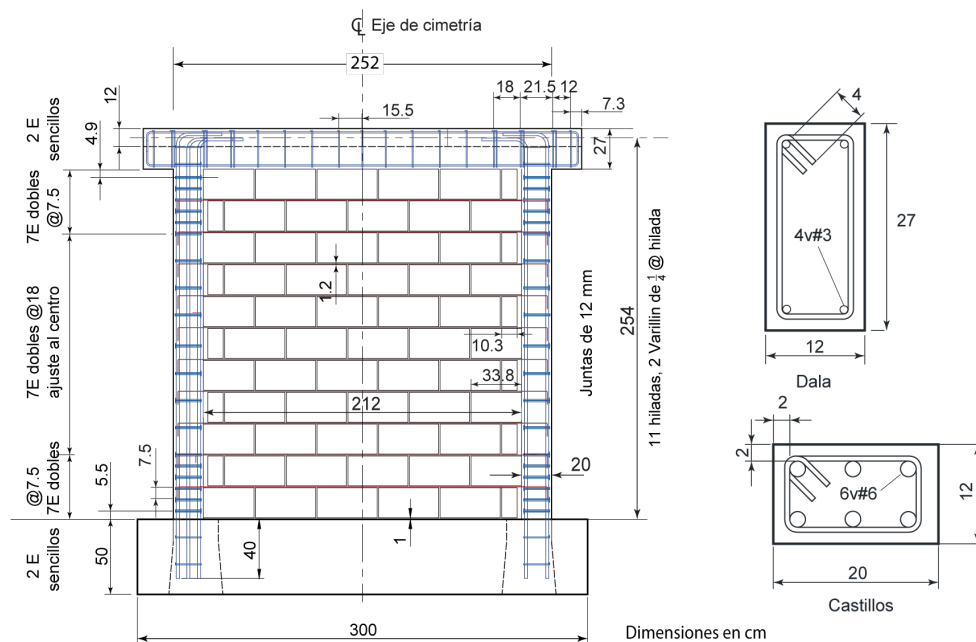


Figura 2 Geometría, refuerzo transversal y longitudinal en castillos, muro MH8R4

Tabla 1 Geometría de los muros, refuerzo y esfuerzo axial

Espécimen	H cm	L cm	$p_h f_{yh}$ kg/cm ²	p (castillos)	σ kg/cm ²
MH8R-1	256	252	0	0.0633*	5.4
MH8R-2	256	252	3.86 ⁺	0.0950**	5.4
MH8R-3	256	252	7.72 ⁺⁺	0.0950**	5.4
MH8R-4	256	252	15.08 ⁺⁺⁺	0.0713 ^{***}	6.1

⁺1v ϕ 1/4" f_{yh} = 6000 kg/cm² @ 2 hiladas, ⁺⁺2v ϕ 1/4" @ 2 hiladas, ⁺⁺⁺2v ϕ 1/4" @ hilada

*4 v ϕ 3/4", **6 v ϕ 3/4", ***igual que MH8R-3 con castillos de 12×20 cm

Los castillos fueron externos de 12×15 cm de concreto reforzado, con 4 barras del #6 en el muro MH8R-1 y 6 barras del #6 en el resto de los muros. La diferencia en la cuantía del muro MH8R-4 respecto a MH8R-3 y MH8R-2, que se muestra en la Tabla 1 se debe al tamaño de los castillos de 12×20 cm en el muro MH8R-4. Los muros están rematados con una dala de 12 cm de ancho y 25 cm de peralte y una losa de 12 cm de espesor y 50 cm de ancho, ambos elementos de concreto reforzado. En el muro MH8R-4 la de la tuvo un peralte de 27 cm (Figs. 1 y 2).

El refuerzo longitudinal en los castillos se diseñó de modo que la falla del muro fuera por cortante. Para la estimación de la resistencia preliminar de los muros, para efectos de su diseño, se utilizaron las propiedades mecánicas de la mampostería reportadas por el fabricante, resultado de ensayos anteriores.

Los muros se construyeron sobre una viga de concreto reforzado, con las preparaciones necesarias para poder sujetarla en el piso fuerte del laboratorio (Figs. 1 y 2).

Materiales

El fabricante se encargó de proveer todos los materiales. En particular las piezas y el mortero para hacer la mampostería con la que se construyeron los muros y probetas.

Piezas

Se utilizaron piezas de concreto denominadas BH8S con un área neta de 76%, que, de acuerdo a la Norma de mampostería de la CDMX, se clasifica como maciza (Fig. 3). En el Anexo B se incluye la ficha técnica de la pieza producida por el fabricante.



Figura 3 Pieza BH8S 12×20×40 cm, multiperforada 76% de área neta.

Mortero

La fórmula para elaborar el mortero solo es conocida por el fabricante, solo se tiene referencia de que se trata de un mortero mejorado con resina que es un compuesto de acetato de vinilo.

Concreto de castillos, dala y losa

La dosificación del concreto, el contenido de agua y el revenimiento de la mezcla fueron diseñados por el fabricante para lograr una resistencia y fluidez apropiada; esta última, para lograr el colado de los castillos aun cuando se tenía una gran cantidad de refuerzo longitudinal y transversal, que dejaba un espacio reducido para el flujo del concreto.

Muestreo

Para conocer las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la construcción de los muros se elaboraron 3 muretes y 3 pilas durante la construcción de cada muro. Adicionalmente se hicieron muestras de mortero en la forma de cubos cúbicos de 5 cm de lado y cilindros de concreto de 10 cm de diámetro y 20 cm de alto, tanto de los castillos como de la losa.

Los ensayos se realizaron de acuerdo a las siguientes normas:

NMX-C-083-ONNCCE-2014	Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes –Método de ensayo
-----------------------	--

NMX-C-404-ONNCCE-2012	Industria de la Construcción – Mampostería – Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – Especificaciones y métodos de ensayo.
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 – Métodos de ensayo.
NMX-C-486-ONNCCE-2014	Industria de la Construcción – Mampostería – Mortero para uso estructural – Especificaciones y métodos de ensayo.

Se tomaron tres muestras del acero de refuerzo horizontal utilizado en el muro MH8R-4 y se realizaron ensayos estándar a tensión, para determinar la curva esfuerzo deformación de dicho refuerzo.

Construcción de los especímenes

La construcción de los especímenes, así como las probetas de materiales: pilas, muretes, cilindros y cubos de mortero, se realizaron por personal capacitado del fabricante.

Los muros se construyeron con un aparejo estándar, cuatrapeado, y juntas de 10 mm en los muros MH8R1 a MH8R3 y de 12 mm para el muro MH8R4. Se llevó a cabo un dentado de 3 cm en la interfaz del castillo y el panel de muro haciendo los cortes de las piezas con sierra. El despiece se muestra con detalle en las Figs. 1 y 2.

Los muros se construyeron, en cada caso, sobre una viga de concreto reforzado de 50×80 cm, con aberturas para alojar a los castillos y su refuerzo. Una vez colocado y plomeado el refuerzo de los castillos, se colaron los huecos de la viga.

Se procedió entonces a la construcción del panel de mampostería, empacando cada una de las hiladas de mortero con un junteador. Una vez alcanzado el nivel superior del panel de mampostería, se procedió a colar los castillos.

En general el colado de los castillos fue exitoso, solo se observó cierta segregación en la base de los castillos de los muros MH8R1 y MH8R2, que, no tuvo ningún efecto apreciable durante los ensayos.

Posteriormente se preparó la cimbra de la losa superior. Se colocaron tubos de PVC dispuestos en forma vertical sobre la cimbra para dejar las perforaciones en la losa necesarias para el paso de los tornillos de alta resistencia que serían utilizados para la sujeción de la viga de acero a la losa de concreto. Se preparó el armado de la dala y de la losa. Se coló la losa y se hizo el debido curado de la misma al menos por tres días.

Instrumentación

En la Fig. 4 se muestran los dispositivos utilizados para la medición de la respuesta del muro. Se trata de CDPs Tokyo Sokki de distintas carreras. Durante el ensayo, se utilizó el instrumento L2 para medir el desplazamiento que se deseaba imponer al muro según la secuencia de carga durante el control por desplazamientos (ver Secuencia de carga).

Los instrumentos V1, V2 se utilizaron para conocer la extensión de los castillos en el sentido axial, y D1, D2 para establecer las deformaciones a lo largo de las diagonales. Los aparatos H2, H3 y H4, junto con L2, se utilizaron para tener el perfil de desplazamientos laterales del muro con la altura. El instrumento H5, se utilizó para ver, en su caso, el deslizamiento de la cimentación y el H1, para medir el desplazamiento fuera del plano del extremo distal. Adicionalmente se instalaron galgas extensométricas (“strain gauges”) en el refuerzo longitudinal de los catillos, para medir la evolución de las deformaciones en el refuerzo.

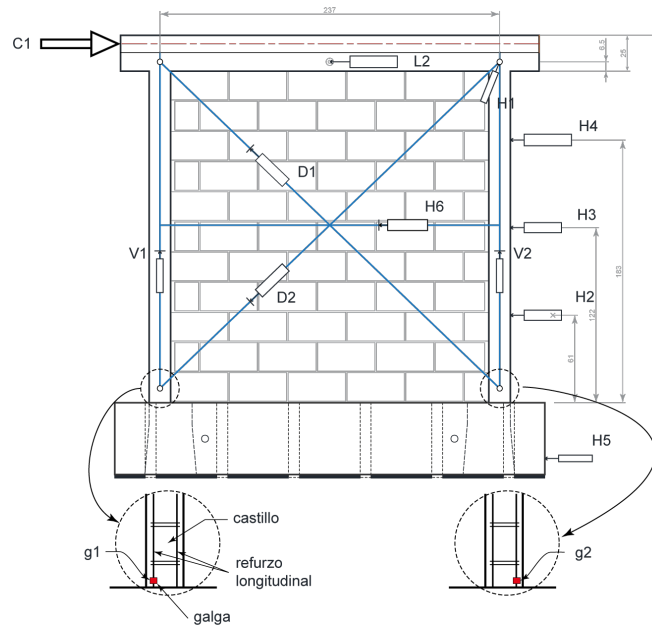


Figura 4 Instrumentación externa de muros, galgas en refuerzo longitudinal de castillos de los muros MH8R1-MH8R3

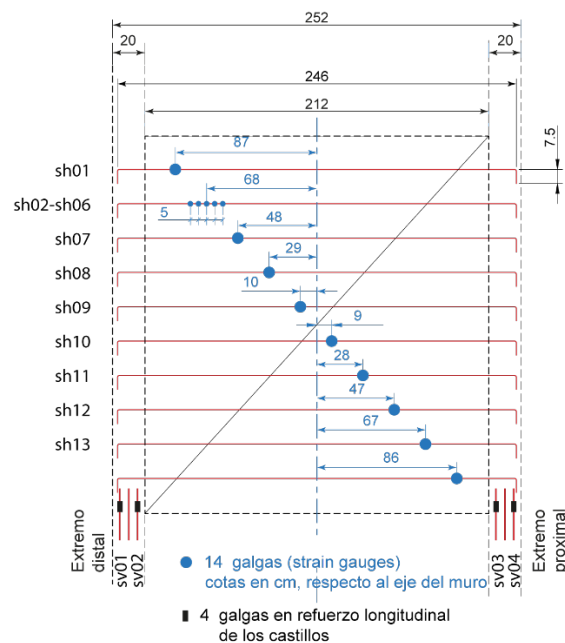
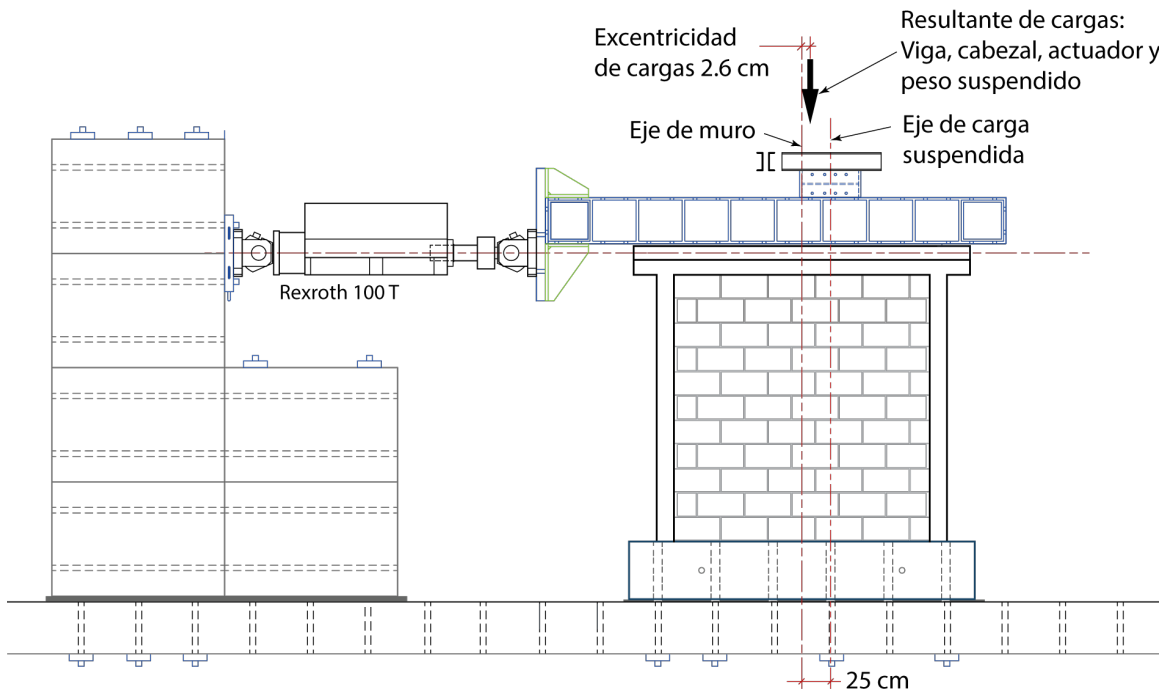
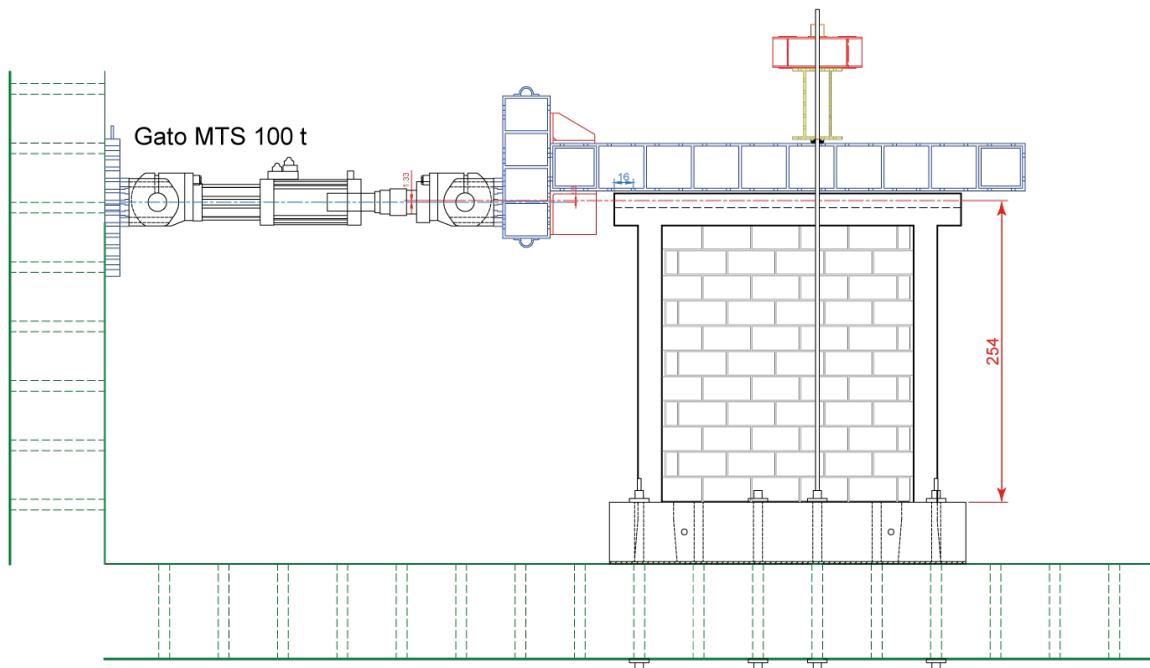


Figura 5 Instrumentación interna muro MH8R4

Sistemas de carga



a) Muros MH8R1-MH8R3, Instituto de Ingeniería



b) Muro MH8R4, CNEAPRED

Figura 6 Sistema de carga lateral (vista Este)

En el muro MH8R4 se incluyeron galgas extensométricas en el refuerzo horizontal según se indica en la Fig. 5. En el segundo alambre de arriba hacia abajo, se incluyó una serie de galgas con el objeto de determinar la adherencia del refuerzo y el mortero de la junta. Se intuye que, de haber una alta adherencia, el registro de la deformación en las distintas galgas debe diferir significativamente, aunque las galgas estén muy cerca una de otra, ante el paso de una eventual grieta cerca de alguna de ellas.

Carga lateral

Los primeros tres especímenes se ensayaron en el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el cuarto muro se construyó y se ensayó en el CENAPRED. En los tres primeros muros, la carga lateral se aplicó con un actuador hidráulico Rexroth con capacidad de 100 t, mientras en el cuarto muro se utilizó un actuador MTS del mismo tonelaje de capacidad. La fuerza se aplicó de modo que la línea de acción de la misma coincidiera con el eje de la losa tanto en el sentido vertical como horizontal. La acción se transmitió al muro por medio de una viga de acero sujeta al muro por medio de tornillos de alta resistencia. Dichos tornillos se colocaron en orificios a cada 40 cm, dejados en la losa durante la construcción, que coincidían con los orificios en la viga de acero. Esta forma de transmitir la carga, simula la forma en que se transmite la fuerza sísmica a los muros en una estructura real, en forma aproximadamente uniforme a lo largo del muro.

Dado que el eje de la viga y el eje de aplicación de la carga no coincidían, fue necesario diseñar un cabezal, formado, en el caso de los primeros tres muros, por una placa y dos ménsulas, como se aprecia en la Fig. 6.a, para poder aplicar la carga con la línea de acción a la altura deseada. Un esquema similar se utilizó en el muro MH8R-4 (Fig. 6.b)

Carga vertical

Para aplicar la carga vertical se utilizó una viga de acero apoyada sobre el muro en el sentido transversal. Se suspendió un peso muerto, W , en un extremo de la viga, a una cierta distancia, L_1 , del eje del muro y el otro extremo se sujetó con un tensor anclado en el piso fuerte a una distancia, L_2 (Fig. 7). El peso de la viga, W_v , también se tomó en cuenta, considerando que su centroide se localizaba a una distancia, respecto al eje del muro, L_3 . La carga sobre el muro, P , esta determinada por equilibrio estático mediante la expresión.

$$P = \frac{W(L_1 + L_2) + W_v(L_2 + L_3)}{L_2}$$

En la Tabla 2, se muestran los parámetros para el cálculo del esfuerzo vertical sobre los muros que incluye el peso muerto el peso de las vigas, cabezal y el peso tributario del actuador, para el sistema de carga utilizado en los muros MH8R1 a MH8R3, en el IINGEN, y el sistema de carga para el muro MH8R4, en el CENAPRED.

Otras cargas verticales incluyeron el peso de la viga de acero para distribuir las cargas los elementos del cabezal y el peso tributario de actuador sobre el muro. Se determinó analíticamente la posición de la resultante de todas las cargas, encontrando que se tuvo una excentricidad respecto al eje del muro de 2.6 cm en la dirección del cabezal (o proximal respecto al muro fuerte), en el caso de los muros ensayados en el IINGEN y 2.4 en sentido distal en el CENAPRED. En la Fig. 7, se muestran, en forma esquemática, los arreglos utilizados para aplicar la

carga vertical y en las Figs. 8 y 9, las fotografías de los muros y el sistema de carga utilizado en el IINGEN y el CENAPRED, respectivamente.

Tabla 2 Carga vertical sobre los muros

	MH8R1-MH8R3	MH8R4
Peso de placas (W)	1606.0 kg	2484.0 kg
Peso de viga (W_v)	332.0 cm	438.0 kg
L_1	185.4 cm	124.0 cm
L_2	27.1 cm	26.0 cm
L_3	72.9 cm	53.0 cm
P	13793.0 kg	15662.0 kg
Peso total incluyendo viga superior, cabezal y actuador	16195.0 kg	18338.0 kg
Esfuerzo en el muro	5.4 kg/cm ²	6.1 kg/cm ²

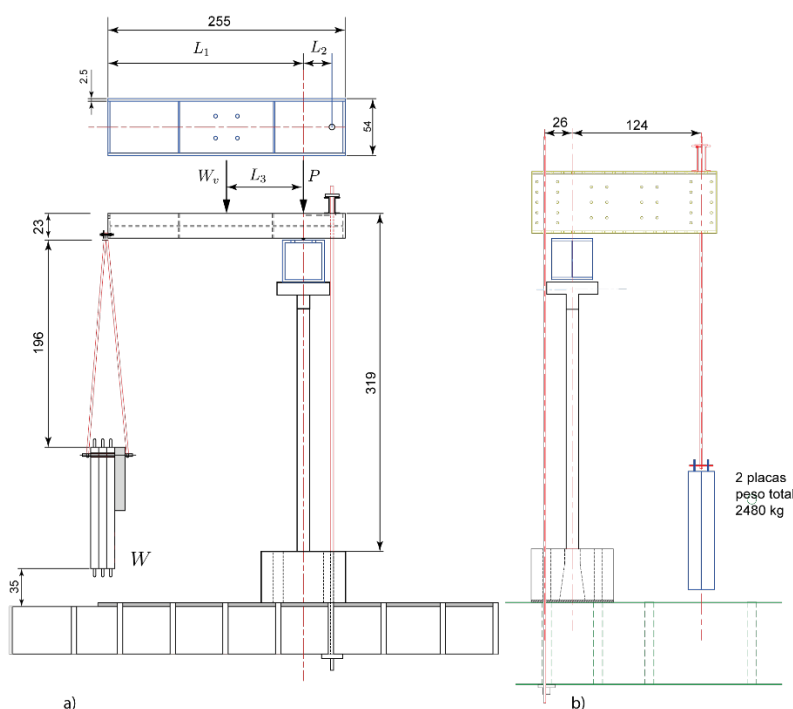


Figura 7 Sistema de carga vertical a) Instituto de Ingeniería, muros MH8R1-MH8R3 y b) CENAPRED muro MH8R4.

La viga de acero distribuye la carga vertical sobre el muro. Se ha determinado con modelos elásticos, que la carga se aproxima rápidamente a una distribución uniforme a medida que la sección del muro que se considera se aleja del extremo superior del muro y se acerca a la base.

En la Figura 8 se muestra el muro BH8R-1 durante el montaje. Se aprecia, en orden distal a proximal respecto al muro fuerte, una columna de acero que sirvió de soporte para los aparatos de medición de desplazamiento (CDPs) y el muro sobre la viga de cimentación sujeta al piso fuerte por anclas de acero postensadas. Se colocó una columna similar del otro lado del muro, pero no se



Figura 8 Aspecto de un muro durante el montaje (vista de Oeste a Este)

observa en la fotografía. En la parte superior del muro, se aprecia una viga de acero sujeta a todo lo largo del muro y encima de ella la viga transversal utilizada para suspender el peso muerto. Dicha viga transversal está detenida por una sola barra de acero anclada, en la parte inferior, en el piso fuerte del laboratorio; en la parte superior, la barra pasa a través de una viga hecha a base de dos canales espalda con espalda (yugo) hasta rematarse con una tuerca que se asienta sobre una placa que descansa sobre el yugo (Fig. 7). En el extremo proximal de la viga de acero, se aprecia una placa de acero, a la que llega el actuador, que está montado sobre el muro fuerte del laboratorio. La placa está sujeta a la viga sobre el muro, mediante un par de ménsulas (no se aprecian bien en la fotografía, pero se aprecian en la Fig.7). Las ménsulas y la placa forman un cabezal donde se sujeta al actuador. Abajo del actuador se aprecian dos bloques postensados de concreto que se utilizaron para reforzar al muro fuerte (hecho también de bloques postensados de concreto reforzado).



Figura 9 Aspecto del muro MH8R4 en el CENAPRED

En la Fig. 9 se aprecia el muro MH8R4 durante el montaje en el CENAPRED. Se observan los mismos elementos básicos: viga de cimentación, viga para distribuir la carga sobre el muro, viga transversal para suspender el peso muerto y el cabezal. Además, se aprecian dos canales dispuesto en el sentido transversal que se utilizaron para restringir el desplazamiento fuera del plano del muro. Las canales se sujetaron a columnas verticales de acero, como se parecía en la figura.

Secuencia de carga

La secuencia de carga utilizada fue la definida en el Apéndice A de la NTC-Mampostería de la CDMX (ver Anexo C A.7). Se aplica primero la carga en el sentido positivo (jalando), incrementando la carga/desplazamiento en forma uniforme, hasta llegar a un valor máximo de carga/desplazamiento según se controle el sistema por carga o desplazamiento respectivamente. Posteriormente se reduce la carga/desplazamiento hasta cero. Se repite el procedimiento en el sentido negativo (empujando) llegando al mismo valor de carga/desplazamiento ahora en sentido negativo y regresando a cero. A esta secuencia se le conoce como un ciclo de carga. Cada ciclo se repite una vez a la misma intensidad de carga. Posteriormente, se aplica un nuevo ciclo a una nueva intensidad de carga/desplazamiento.

Se aplican primero cuatro ciclos controlados por carga. En los dos primeros ciclos se alcanzan una carga de $0.25 V_{mR}$ y los siguientes dos a una de $0.5 V_{mR}$. El valor de V_{mR} es la resistencia a corte preliminar estimada del muro sin considerar el refuerzo. En estos cálculos se tomaron valores preliminares de la geometría y de las propiedades de los materiales, dando lugar a una resistencia a corte preliminar de $V_{mR} = 24000 \text{ kg}$ ($v_m = 13 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma = 5 \text{ kg/cm}^2$, $H = 255 \text{ cm}$ y $L = 250 \text{ cm}$). Se seleccionó un valor conservador para garantizar, que, para una carga de $0.5 V_{mR}$ no se alcanzara el primer agrietamiento. Los siguientes pares de ciclos se realizaron por control de desplazamiento empezando con un desplazamiento lateral igual a $0.001 H$ e incrementando el desplazamiento en $0.002 H$ cada vez.

Resultados

Propiedades de los materiales

En la Tabla 3 se presenta el promedio de las principales propiedades de los materiales por muro y el promedio general del peso de la mampostería y la resistencia a compresión de las piezas

El detalle de los resultados de todos los ensayos, se presenta en el Anexo A.

La nomenclatura usada en la Tabla 3 es la siguiente

f_m	Valor promedio de la resistencia a compresión de pilas construidas durante la construcción del muro.
v_m	Resistencia a compresión diagonal promedio de muretes.
E_m	Módulo de elasticidad promedio de la mampostería, obtenido del ensaye de pilas a compresión.
G_m	Módulo de cortante promedio de la mampostería, obtenido del ensaye de muretes.
f_c	Resistencia a compresión promedio del concreto utilizado en los castillos, obtenido del ensaye de cilindros de 20 cm de alto $\times$ 10 cm de diámetro.
E_c	Módulo de elasticidad promedio del concreto utilizado en los castillos.
f_j	Resistencia a compresión promedio del mortero utilizado para pegar las piezas de mampostería. Se obtuvo del ensaye a compresión de cubos de 5 cm de lado.
f'_m	Resistencia de diseño a compresión de la mampostería. Se utilizó el coeficiente de variación reglamentario para calcularlo.
v'_m	Resistencia a compresión diagonal de diseño de la mampostería. Se utilizó el coeficiente de variación reglamentario para calcularlo.

Tabla 3 Propiedades mecánicas promedio de los materiales por muro

Muro	Valores promedio							de Diseño (+)	
	f_m kg/cm ²	v_m kg/cm ²	E_m kg/cm ²	G_m kg/cm ²	f_c kg/cm ²	E_c kg/cm ²	f_j kg/cm ²	f'_m kg/cm ²	v'_m kg/cm ²
MH8R-1	182.2	17.2	89621	28334	323	142957	242	132.5	11.4
MH8R-2	188.6	12.7	100653	27315	331	155047	166	137.2	8.5
MH8R-3	191.3	18.8	99800	25075	350	180814	133	139.1	12.5
MH8R-4	169.1	12.1	96335	25478	461	188568	262	123.0	8.1
Promedio	182.8	15.2	96602	26550	399	174087	277	132.9	10.1

(+) Los valores de diseño se calcularon con los valores reglamentarios del coeficiente de variación (CV) que es mayor al valor de CV obtenido experimentalmente. El v'_m con el CV experimental fue (15.2, 11.5, 12.5 y 9.0), respectivamente.

Peso de las piezas 13.3 kg 1822.9 kg/m³ (neto)
 Peso por m² de la mampostería 198.1 kg/m²
 Resistencia a compresión de las piezas 190.9 kg/cm² 152.7 kg/cm² (valor de diseño CV=0.1)

Las curvas esfuerzo-deformación de tres muestras del acero de refuerzo horizontal utilizado en el muro MH8R-4 se presentan en la Fig. 10. En la misma figura se muestra la curva promedio que se utilizó para estudiar la participación del refuerzo en la resistencia a carga lateral.

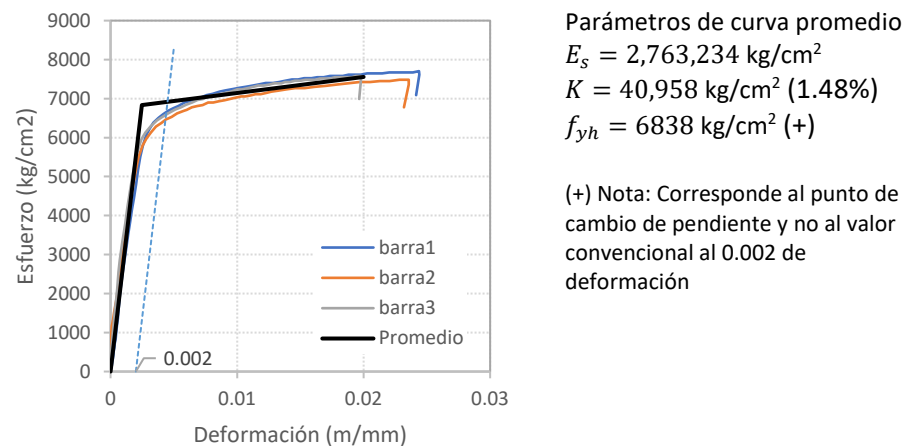
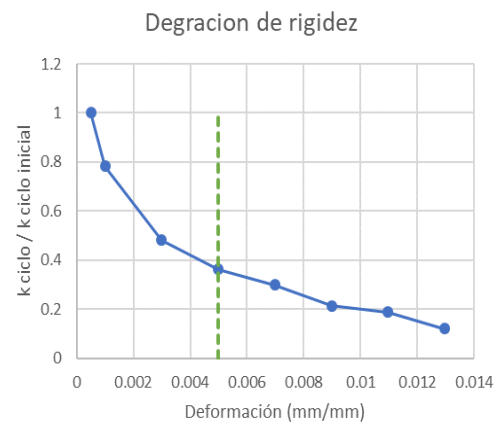
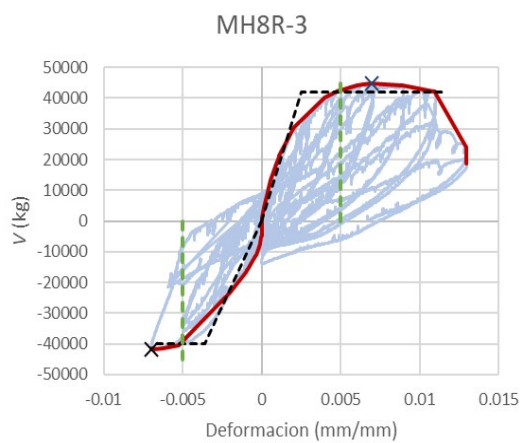
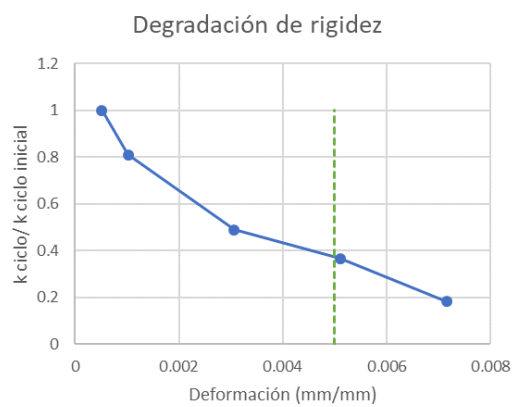
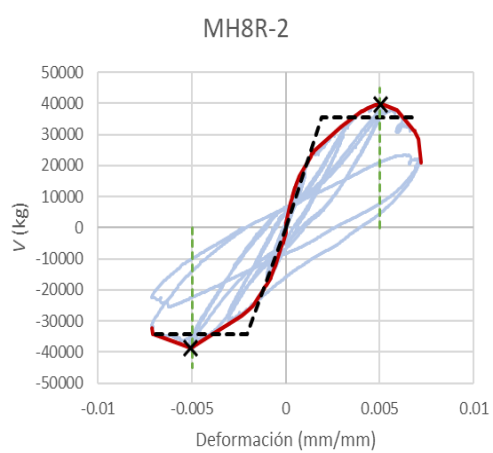
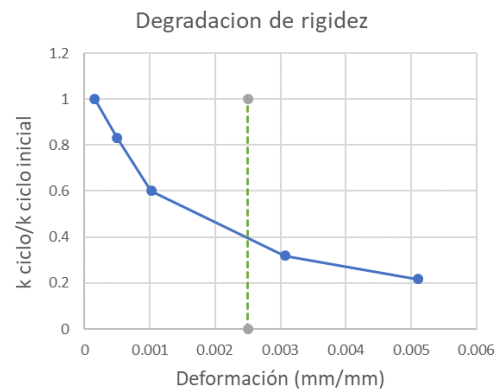
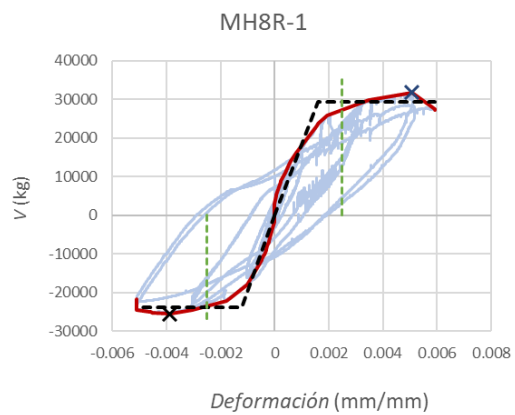


Figura 10 Curvas esfuerzo deformación de varillón de ¼" de diámetro utilizado en el muro MH8R-4.

Histeréticos, modelo elastoplástico y degradación de rigidez de ciclo

Se presentan a continuación, algunos de los resultados en forma gráfica (Fig. 11). Se presenta la curva de histerésis, la envolvente y el modelo elastoplástico equivalente en una sola gráfica para cada uno de los ensayos.

En dicha gráfica, con línea puntada, se indica el valor de la deformación máxima admisible $\gamma_{max}/2$. La intersección de dicha línea con la envolvente da lugar al valor $R_{\gamma_{max}}$. El valor de la resistencia, R_{max} , (cortante máximo) se indica con el símbolo "x". La construcción del modelo elastoplástico equivalente se realizó utilizando la definición del Apéndice A de la NTC-Mampostería (Anexo C A.8.12). La envolvente es convexa o suave evitando los puntos reentrantes. En la siguiente sección se describen las envolventes obtenidas.



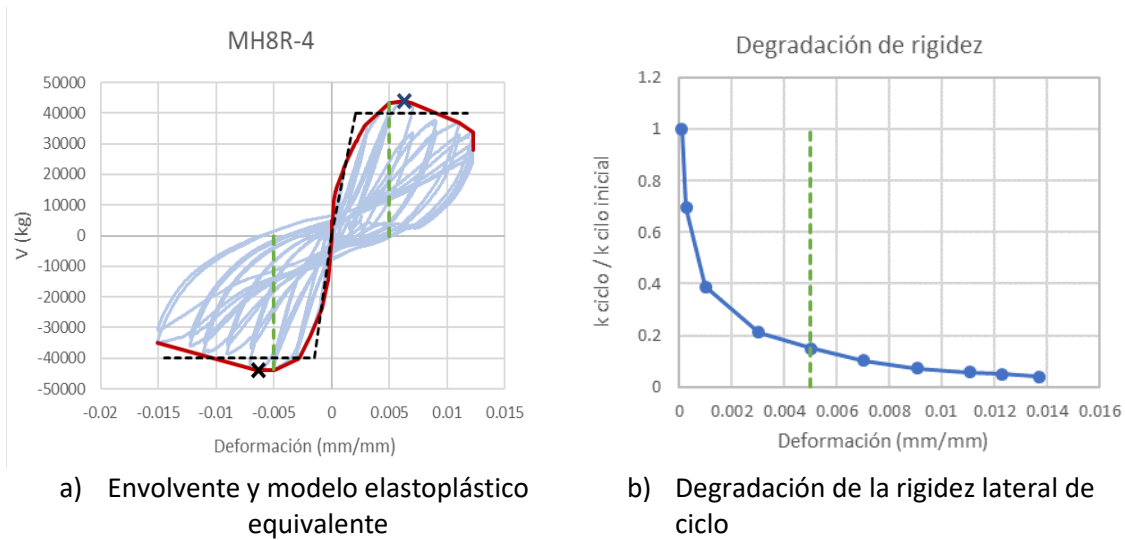


Figura 11 Resultados por muro, a) Histerético, envolvente, modelo elastoplástico equivalente y b) degradación de rigidez, para cada uno de los muros

Los muros tuvieron una rigidez del 40%, 37%, 36% y 15% de la inicial, a la deformación admisible de los muros, $k_{\gamma_{max}}$. La rigidez de ciclo del muro MH8R1, sin refuerzo horizontal, fue solo un poco mayor a la de los muros MH8R2 y MH8R3 con cierto nivel de refuerzo, sin embargo, la deformación considerada, $\gamma_{max}/2$, fue de 0.0025 en vez de 0.005, respectivamente. Es notable la reducción de la rigidez de ciclo del muro MH8R4 (Figs. 11 y 12) para cualquier deformación lateral. Este hecho se atribuye al tipo de agrietamiento más profuso y distribuido que se produjo en este último muro y que el agrietamiento se propagó por las piezas y las juntas y no predominantemente por las juntas como en los muros MH8R1-MH8R3, como se explica en la descripción de los ensayos más adelante. Ver la comparación de las rigideces de ciclo de los muros en la Fig. 12.

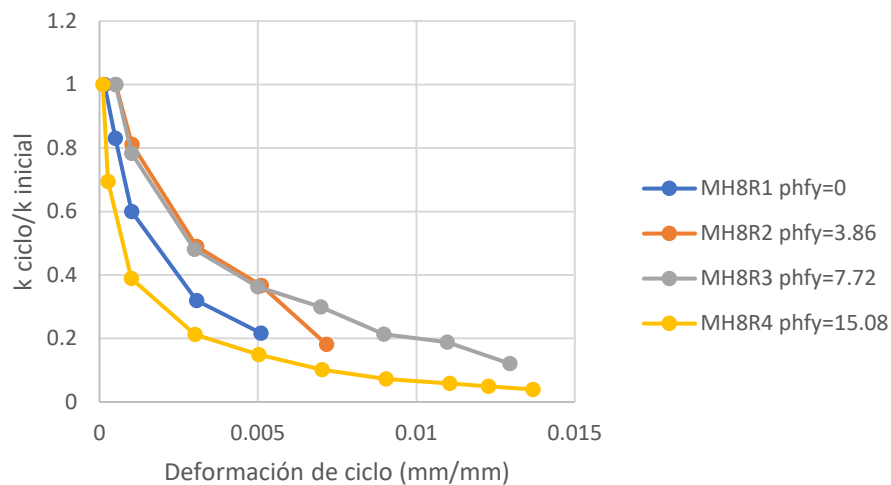
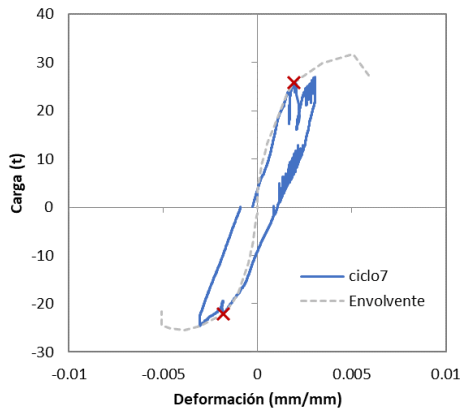


Figura 12 Comparación de la rigidez de ciclo de los muros MH8R1 a MH8R4 para distintos valores de deformación lateral

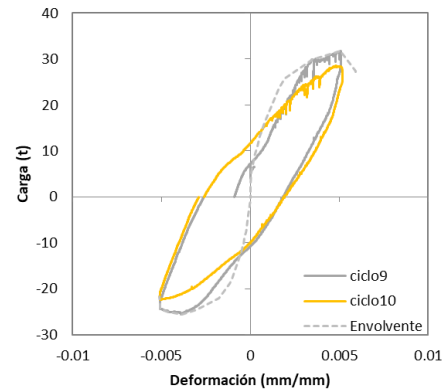
Ciclos de histéresis críticos

Se presentan en forma separada los ciclos de histéresis de cada muro, en los que se presentó el primer agrietamiento diagonal y los ciclos a la resistencia máxima junto con algunos posteriores. Se hace referencia a estos ciclos en la descripción de los ensayos, más adelante.

MH8R-1

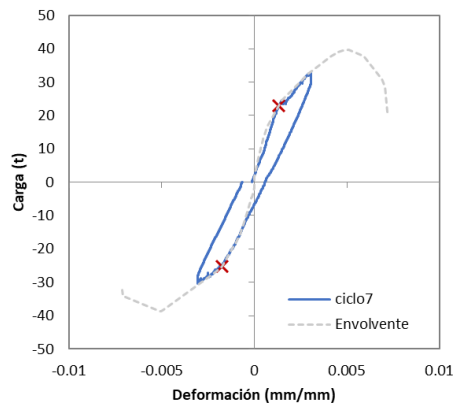


a)

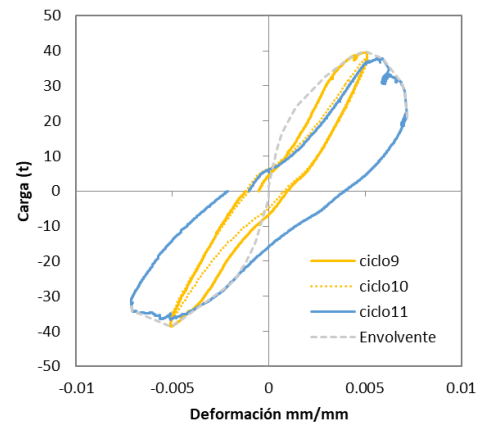


b)

MH8R-2

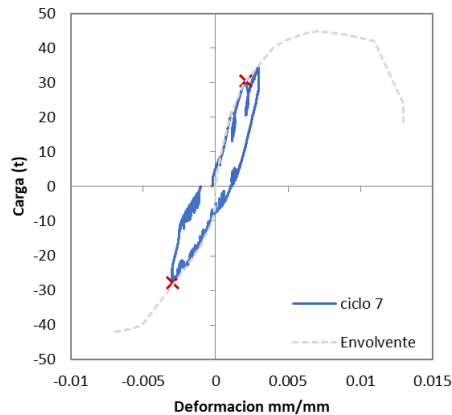


c)

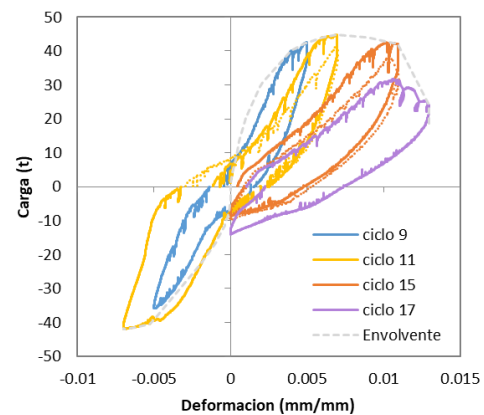


d)

MH8R-3



e)



f)

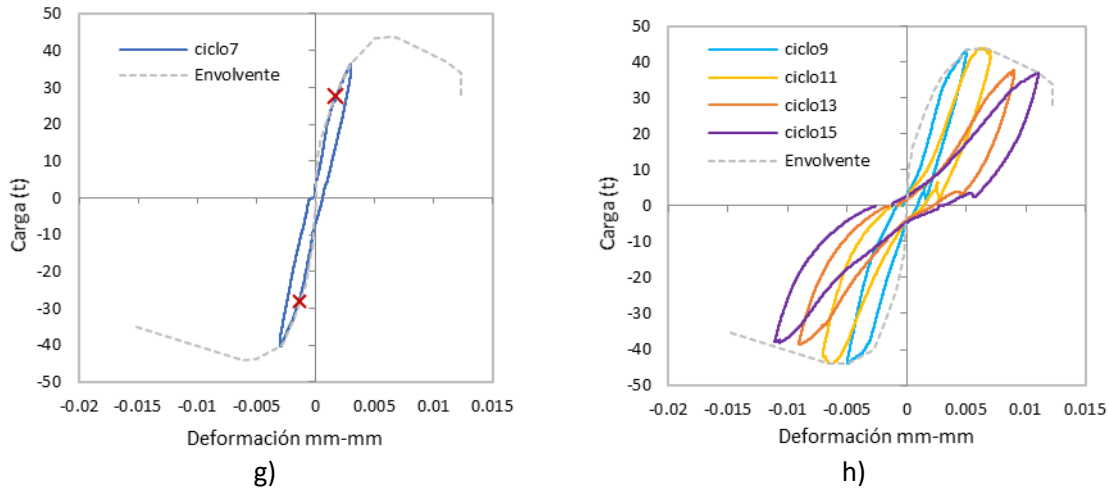


Figura 13 Ciclos de histéresis por muro, al agrietamiento a), c), e) y g) a la resistencia b), d), f) y h)

Resumen de valores críticos

En la Tabla 4 se presentan por muro los valores que se utilizaron para medir el comportamiento del muro: La nomenclatura utilizada es la que se usa en la NTC-Mampostería (Ver Anexo C). Para facilitar su referencia el significado de los símbolos se indica aquí más adelante. En la Tabla 5, se presentan resultados complementarios que, aunque no se utilizan directamente en la evaluación de las NTC-Mampostería, se reportan rutinariamente: el cortante al agrietamiento, R_{ag} , la resistencia última, R_u y la deformaciones correspondientes, θ_{ag} y θ_u .

La nomenclatura utilizada incluye:

$Q = 2$ para todos los muros, factor de comportamiento sísmico supuesto.

θ_y	Distorsión a la fluencia del modelo elastoplástico equivalente
R_y	Resistencia a la fluencia del modelo elastoplástico equivalente
R	Resistencia lateral de diseño calculada con un factor de resistencia unitario
θ_{ag}	Deformación al agrietamiento
R_{ag}	Resistencia al primer agrietamiento diagonal
R_{max}	Resistencia (carga máxima) medida en el laboratorio
θ_{max}	Distorsión a la resistencia medida (deslazamiento lateral / altura del muro)
$R_{\gamma_{max}}$	Resistencia a la deformación máxima admisible
$\gamma_{max}/2$	Deformación máxima admisible, donde γ_{max} es la deformación admisible de acuerdo a la NTC-Sismo de la CDX,
	$\gamma_{max} = 0.005$ para muros con piezas macizas y sin refuerzo horizontal
	$\gamma_{max} = 0.01$ para muros con piezas macizas y refuerzo horizontal
θ_u	Deformación a la falla
R_u	Resistencia a la falla
k_0	Rigidez del ciclo inicial (ver definición en Anexo C A.8.11)
$k_{\gamma_{max}}$	Rigidez de ciclo para una deformación lateral correspondiente a la máxima admisible.

Tabla 4 Resultados, valores para definir el comportamiento (sentido positivo y negativo)

Muro	θ_y (%)	R_y kg	R kg	R_{max} kg	θ_{max} (%)	$R_{\gamma max}$ Kg	$\gamma_{max}/2$ (%)	$k_{\gamma max}/k$
MH8R-1	0.161 -0.121	29355 -23881	21972	31742 -25529	0.506 -0.388	27346 -23484	0.25	0.27
MH8R-2	0.192 -0.208	35338 -34327	27607	39648 -38722	0.507 -0.508	39586 -38522	0.5	0.37
MH8R-3	0.247 -0.363	41910 -40058	37544	44810 -41947	0.697 -0.696	42587 -39345	0.5	0.36
MH8R-4	0.211 -0.146	40089 -39950	38819	43802 -43995	0.629 -0.636	43225 -43930	0.5	0.15

Tabla 5 Resultados complementarios, no usados directamente en la evaluación de acuerdo al Apéndice A de las NTC-Mampostería

Muro	θ_{ag} (%)	R_{ag}	θ_u (%)	R_u
MH8R-1	0.192 -0.179	25752 -22090	0.592 -0.510	27287+ -21665++
MH8R-2	0.133 -0.173	23007 -25126	0.677 -0.715	31718 -32229*
MH8R-3	0.207 -0.300	30626 -27801	1.163 (--)	35848 (--)
MH8R-4	0.168 -0.139	27721 -28053	1.178 -1.492	35042 -35196

+ $R_u/R_{max} = 0.86$; ++ $R_u/R_{max} = 0.85$

* $R_u/R_{max} = 0.83$

Comparación de envolventes

En la Fig. 14 se muestran superpuestas las envolventes de las curvas fuerza lateral vs deformación de cada muro.

Se observa cierta asimetría en la carga máxima alcanzada en el muro MH8R-1 al comparar el lado positivo y negativo. La curva de este muro se caracteriza por su falla temprana, apenas después de alcanzar la resistencia. El comportamiento es típico de un muro sin refuerzo horizontal.

En el caso de la curva del muro MH8R-2 se observa buena simetría y se aprecia un incremento considerable de la resistencia con respecto al muro MH8R-1. Sin embargo, se sigue apreciando una degradación rápida de la resistencia después el valor máximo de carga.

En el caso de la curva del muro MH8R-3 se observa que la curva se suspende del lado negativo. Esto fue debido a que los últimos ciclos de carga solo se hicieron en sentido positivo (ver descripción de los ensayos más adelante). Es evidente una importante mejora en la capacidad de deformación del muro y que la resistencia se alcanza para una deformación mayor que en los dos

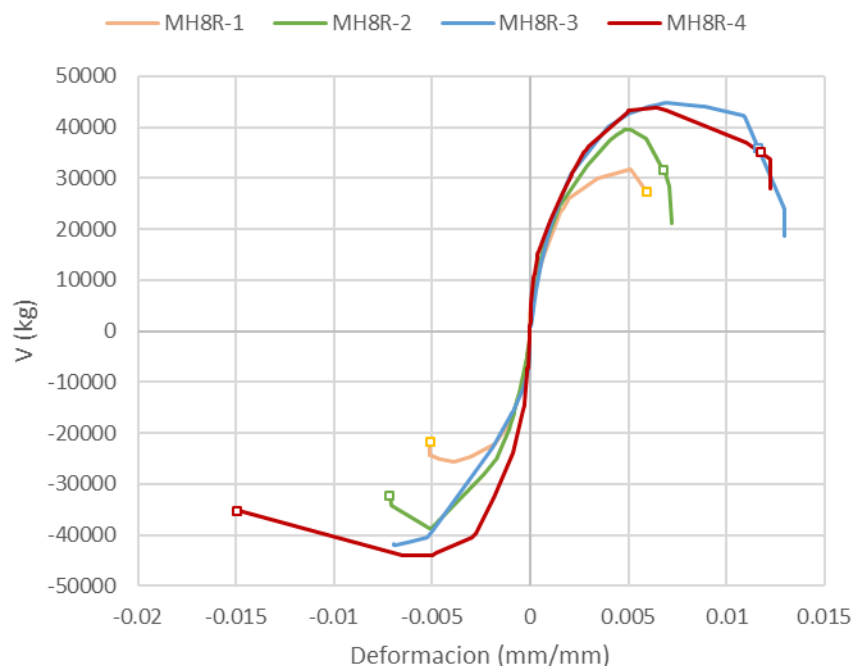


Figura 14 Comparación de envoltentes, se indican los puntos de falla.

casos anteriores. Se aprecia que la degradación de la resistencia fue mucho más lenta después de alcanzar la carga máxima, fue solo hasta que el muro alcanzó una deformación mayor al 1% que el muro redujo en forma rápida la carga como preámbulo a la falla.

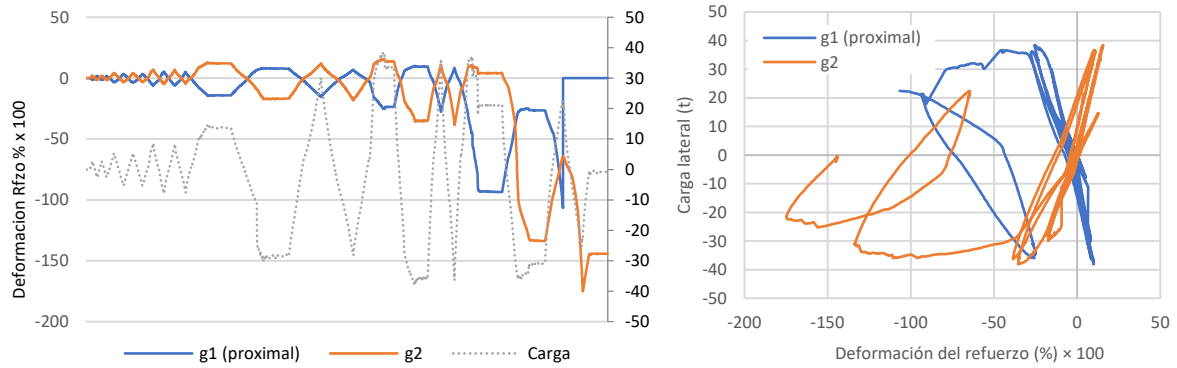
La curva envolvente del muro MH8R-4, muestra claramente que, aunque el muro tuvo el doble de refuerzo, no aumentó la resistencia del lado positivo, y solo un 4.8% del lado negativo. Este hecho esta en acuerdo con el concepto de cuantía efectiva que utiliza la norma técnica NTC-Mampostería 2023, que contempla que la resistencia debida al refuerzo llega a un máximo para un cierto nivel de cuantía, que depende de la resistencia a compresión de las piezas y el área neta de las piezas. La capacidad de deformación lateral es similar a la del muro MH8R3, como se muestra del lado positivo de las curvas, aunque en el lado negativo se aprecia mucho mayor diferencia, esto se debe que la curva del lado negativo no se pudo obtener para el muro MH8R3.

Deformación del refuerzo en los castillos

En la Fig. 15 se muestra la deformación en el refuerzo longitudinal de los castillos en cada muro. En el caso del primer muro no se obtuvo el registro. Del lado izquierdo se presentan las curvas que corresponden a las deformaciones en el castillo proximal (sur) en azul (galga g1) y castillo norte (distal) en naranja (galga g2).

La línea punteada indica la carga, que tiene su escala en el lado derecho de la gráfica en toneladas. El eje horizontal es el tiempo. Del lado derecho, se muestran curvas de histéresis, indicando en el eje horizontal la deformación y en el vertical la carga lateral aplicada al muro en toneladas.

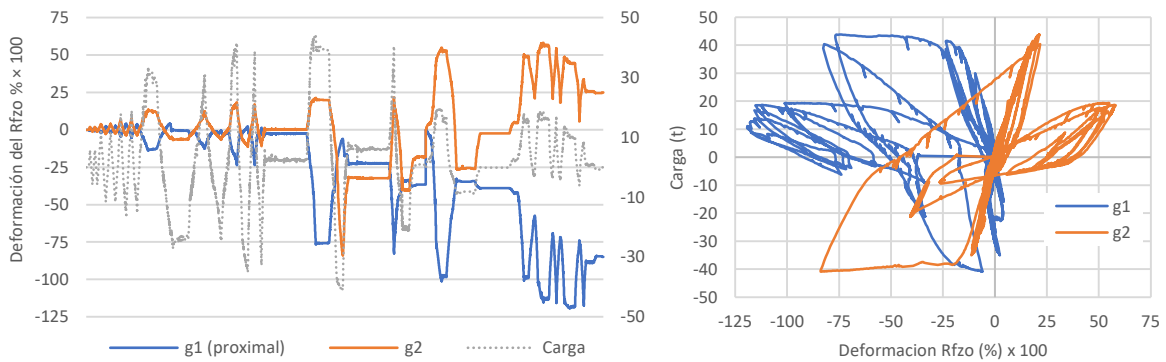
MH8R-2



Deformaciones de las galgas g1 (proximal) y g2 (escala izquierda) y carga lateral (escala derecha) en el tiempo

Carga lateral vs deformación del refuerzo de las galas g1 y g2

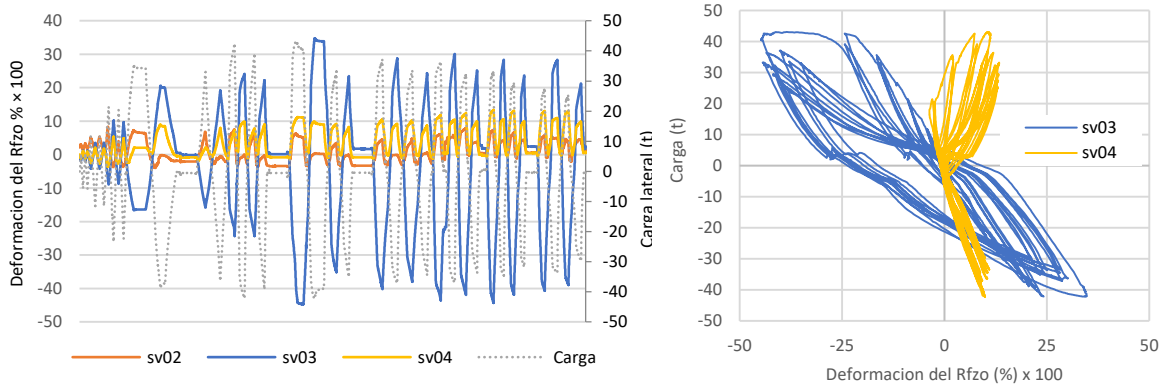
MH8R-3



Deformaciones de las galgas g1 (proximal) y g2 (escala izquierda) y carga lateral (escala derecha) en el tiempo.

Carga lateral vs deformación del refuerzo de las galas g1 y g2

MH8R-4



(ver Fig 5 localización de las galgas en MH8R-4, sv01 se perdió)
Cuando la carga es >0 (jala) sv03 <0 (comprime)

Figura 15 Deformación del refuerzo longitudinal de los castillos

En los muros MH8R-2 y MH8R-3, es evidente, en las curvas en el tiempo, que las deformaciones de las galgas en los dos castillos son opuestas durante los primeros ciclos, indicando que el refuerzo está en tensión en el caso positivo y en compresión en el lado negativo, dependiendo del castillo y

dirección de la carga. Posteriormente, las curvas ya no cortan el eje, indicando que se tienen deformaciones permanentes. En las curvas de histéresis, se observa en el caso del muro MH8R-2 que, cuando se alcanza la carga máxima, la deformación en el refuerzo crece en forma abrupta, esto, coincidiendo con que la deformación en el refuerzo es la de fluencia del material, alrededor de .0025. El incremento rápido o violento de las deformaciones en el refuerzo sugiere un proceso de inestabilidad en el muro que se traduce en una demanda abrupta en el refuerzo de los castillos.

En el caso del muro MH8R-3, la fluencia es evidente una vez que se alcanza una deformación en el refuerzo de alrededor de 0.0025; sin embargo, la demanda se incrementa en formas más ordenada, en el caso de la galga g1, a compresión. Se observa en la galga g2, un pico de deformación, que coincide con el pico de carga en el sentido negativo, cuando la gala del castillo distal estaba en compresión. Después de ese evento, dado que los demás ciclos se hicieron en el sentido positivo, no siguió incrementándose la demanda.

En el muro MH8R-4 es notable que el nivel de deformación del refuerzo fue menor que en el caso de los dos muros anteriores. Esto se explica por el incremento en la dimensión de los castillos. La galga que experimentó las mayores deformaciones fue la sv03, en el castillo proximal y en una barra cercana al panel de mampostería, esto es una barra interior. Se observa la fluencia en el histerético para una deformación de -0.0025. En el tiempo se aprecia la deformación máxima de la galga correspondiendo con la carga máxima, hasta alcanzar -0.0045. Sin embargo, la galga exterior, sv04, no alcanza la fluencia.

Deformación del refuerzo horizontal

El problema de la adherencia refuerzo - mortero

Durante el ensaye de los muros MH8R-2 y MH8R-3 se presentó la ruptura de varios alambres que formaban parte del refuerzo horizontal en los muros. Esto hecho se había observado, en ensayos en el pasado, en muros con cuantías muy bajas (menor a la mínima) y con alambres de pequeño diámetro, 5/32" (4 mm), que no era el caso de los muros en esta campaña experimental. En el muro MH8R-4 se duplicó la cuantía reduciendo la separación del refuerzo a cada hilada.

Se planteó, como posible explicación de la rotura de los alambres en los muros MH8R-2 y MH8R-3, a que la resina en el mortero producía una muy buena adherencia del refuerzo y el mortero, lo que se habría traducido en una concentración de la deformación en los alambres en los puntos donde cruzaba una grieta sin que dicha deformación se propagara a otras partes del alambre. Para tratar de sustanciar esta hipótesis, se decidió instrumentar el refuerzo horizontal del muro MH8R-4 como se muestra en la Fig. 5. En particular el arreglo de galgas sh02 a sh06 en la segunda hilada contada de arriba hacia abajo en el muro, se incluyó con la intención de observar si la deformación en distintos puntos del alambre, muy cercanos entre sí, revelaba diferencias muy importantes, lo que daría soporte a la hipótesis. Se presenta en la Fig. 16 la deformación en el tiempo de dos de dichas galgas, sh02 y sh04.

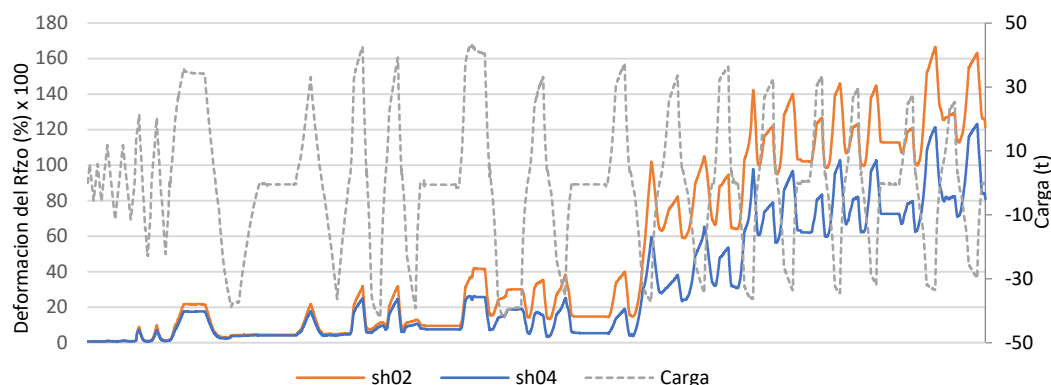


Figura 16 Deformación de galgas contiguas en segunda hilada (de arriba hacia abajo) del muro MH8R-4. La curva con línea discreta es la variación de la carga en el tiempo, como referencia.

La deformación en las galgas a niveles bajos de carga, es especialmente significativa, para efectos de corroborar la hipótesis. A ese nivel de carga el agrietamiento es muy escaso por lo que la deformación en una galga se debe a un agrietamiento cercano, pero probablemente único. Se observa que las dos galgas, sh02 y sh04, que están a 10 cm de distancia, tienen un nivel de deformación semejante. Esto indica que la adherencia no fue tan perfecta como se había supuesto.

Después de alcanzar la resistencia (carga máxima), la diferencia de deformación en las galgas se hace mucho mayor. Esta diferencia de deformación en las galgas para niveles elevados de carga es más difícil de interpretar. Cuando el agrietamiento es profuso, la deformación en las galgas, puede deberse a múltiples grietas de distintos anchos que cruzan el refuerzo en puntos cercanos a dichos instrumentos.

No se muestran en la Fig. 16 las deformaciones en las galgas sh05 y sh06 por claridad; sin embargo, fueron muy parecidas a las de las galgas mostradas, para valores de carga bajos. (La galga sh03 no produjo señal).

Contribución del refuerzo a la resistencia MH8R-4

Las curvas de carga vs deformación de las galgas en el refuerzo horizontal del muro MH8R-4 se muestran en la Fig. 18. Las gráficas tienen la escala uniforme para facilitar la comparación de las curvas en los distintos puntos. Se observa que la deformación de las galgas tiende a aumentar hacia la parte superior del muro. La máxima deformación se observó en la gala sh02, alcanzando una deformación 1.66%.

Para estimar el esfuerzo que se desarrolla en los alambres, en los puntos donde se encuentran las galgas, es necesario tomar en cuenta el comportamiento no-lineal del refuerzo y la historia de deformación en el punto considerado (Simo *et al.*, 1997). Para hacer la integración, se utilizó la curva esfuerzo deformación promedio y los parámetros que se muestran en la Fig.10 y la historia de deformación de cada una de las galgas. Se obtuvo así, para cada valor de deformación, el correspondiente valor de esfuerzo estimado. El resultado de dicha integración se muestra en la Fig.19.

Una vez obtenido el esfuerzo, se obtuvo la fuerza desarrollada en el alambre, multiplicado el esfuerzo por el área de los alambres, en este caso 2v1/4". Al sumar las fuerzas de todos los alambres, se obtuvo la estimación de la fuerza total desarrollada en el refuerzo, V_s .

En la literatura, se acepta que esta fuerza es una buena estimación de la contribución del refuerzo a la resistencia a carga lateral del muro. La contribución de la mampostería a la resistencia se estima como la diferencia entre la fuerza aplicada y la contribución del refuerzo. En la Fig. 17 se muestra la carga total y las contribuciones del refuerzo y la mampostería. Se muestra el lado positivo, dado que las galgas se dispusieron en la diagonal que sufre el agrietamiento cuando la carga era positiva (jalando). En la Tabla 6, se presentan los valores de las contribuciones del refuerzo y la mampostería, medidas experimentalmente y estimadas de acuerdo a la NTC-Mampostería, utilizando las propiedades mecánicas promedio, medidas en el laboratorio.

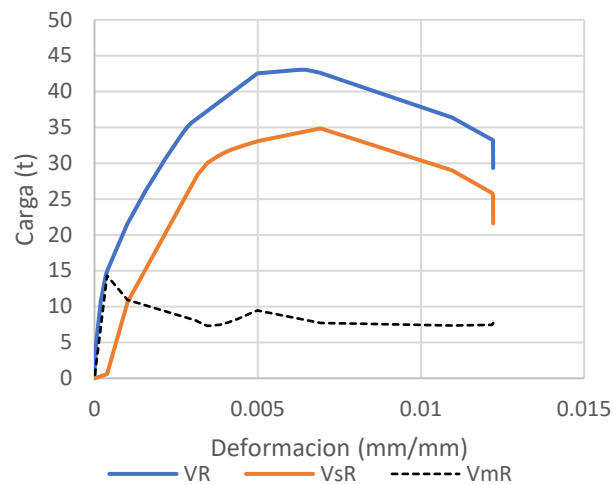


Figura 17 Resistencia V_R , y las contribuciones debidas al refuerzo V_{Rs} y a la mampostería, V_{Rm}

Tabla 6 Contribuciones del refuerzo y la mampostería a la resistencia a corte Pico (*)

Medición/cálculo	V_{sR} (kg)	V_{mR} (kg)	V_R
Experimental (+)	34,430	8,137	42,567
Calculada NTC-Mampostería (++)	29,147	12,998	42,145

(+) Valor positivo

(++) $\lambda f_m f_{an} = 0.1(169.1)(0.76) = 12.85$

Nota: El valor de V_{sR} no se ve afectado, en este caso, por el hecho de tomar el valor nominal de 6000 kg/cm² o el valor medido de 6838 kg/cm², dado que rige el valor límite de la cuantía, que se reporta aquí.

(*) El total de la resistencia en esta tabla difiere marginalmente con el reportado en la Tabla 3. Esto se debe a que las mediciones para obtener V_{sR} se hicieron con un equipo que tomaba muestras cada 2 s, aproximadamente, lo que en ocasiones dio lugar a pérdida de los valores pico.

Se observa que la contribución del refuerzo fue del 80%, experimentalmente, y cerca del 70% de acuerdo a la Norma. El valor de la resistencia V_R , calculado con la norma y el valor experimental, solo difieren en 1%.

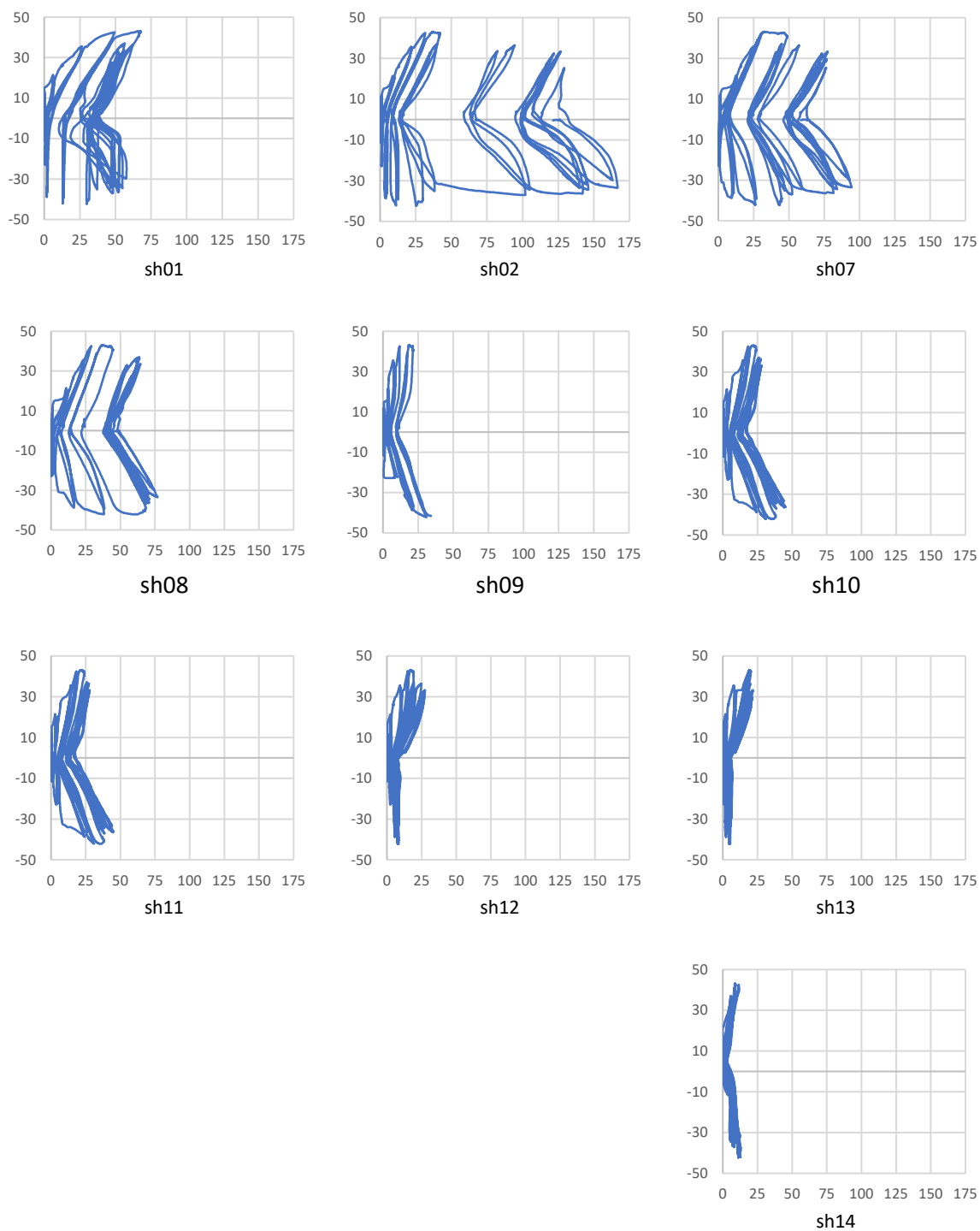


Figura 18 Curvas Carga vs deformación (%)x100 del refuerzo horizontal del muro MH8R-4

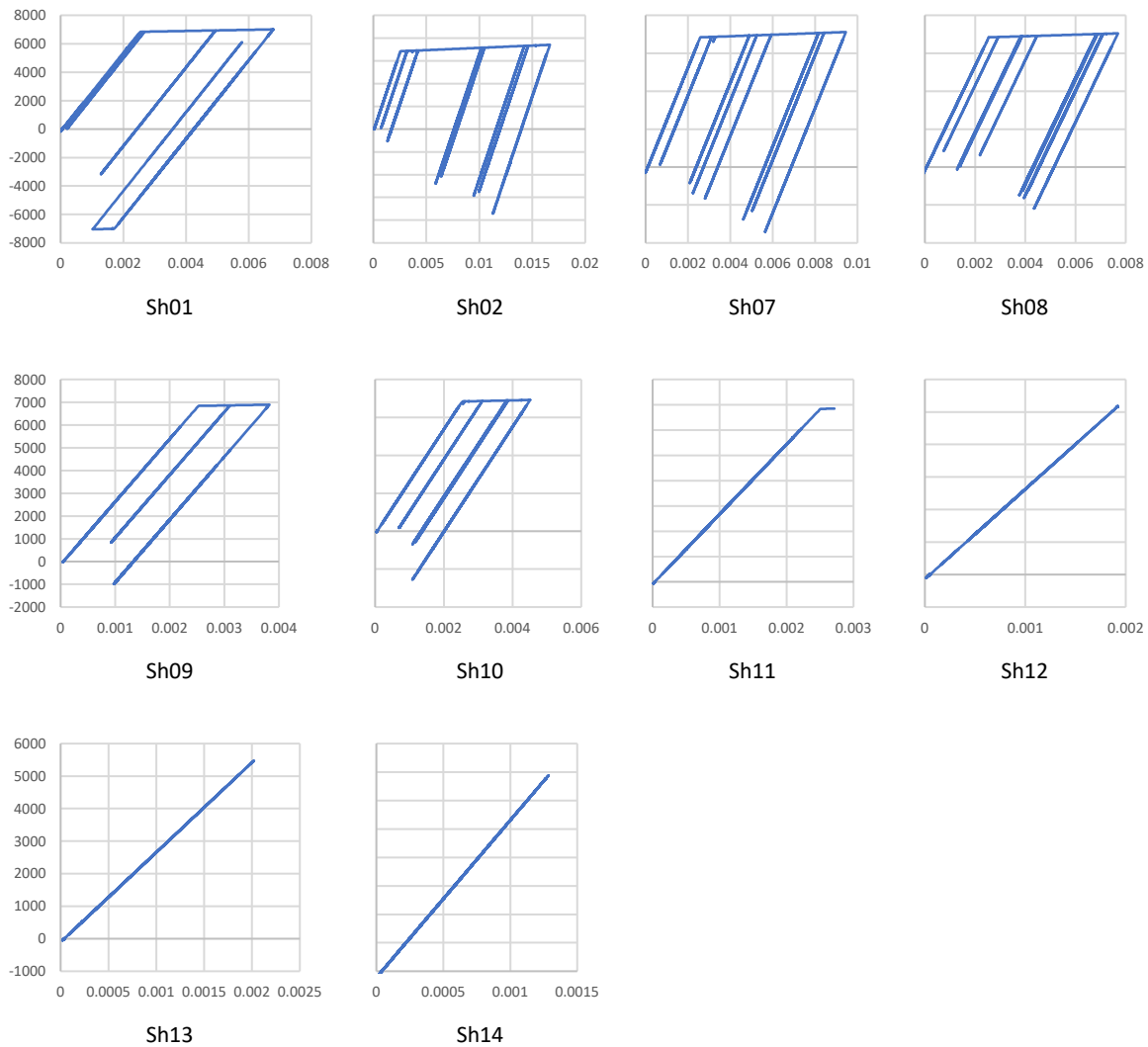


Figura 19 Curvas esfuerzo deformación de los alambres en los puntos donde se instalaron las galgas del muro MH8R-4, tras la integración de la historia de las deformaciones mostradas en la Fig. 18.

Patrones de Agrietamiento

Se muestran a continuación fotografías de los muros durante los ensayos (Figs. 20, 21, 22 y 23). En cada caso se presenta el estado del muro al primer agrietamiento diagonal o agrietamiento por tensión diagonal. Una segunda fotografía corresponde al agrietamiento del muro registrado al momento en que se alcanzó la resistencia máxima. Se presenta, adicionalmente el estado del muro al suspender el ensaye y algunos acercamientos, típicamente en la base de los castillos y de otras regiones.

En los dos primeros casos, las fotografías se obtuvieron cuando la carga en el muro era máxima en el ciclo de carga correspondiente, que permite observar el ancho de grieta máximo en dicho ciclo. Al quitar la carga lateral, el agrietamiento se redujo sustancialmente.

La descripción de los agrietamientos se presenta junto con la descripción de los ensayos, más adelante. En la descripción de los ensayos se hace referencia a las secciones proximal y distal, estas son relativas al muro fuerte.

MH8R1



a) $R_{ag} = 25752 \text{ kg}$
 $\theta_{ag} = 0.192\%$



b) $R_{max} = 31742 \text{ kg}$
 $\theta_{max} = 0.506\%$



c) $R_u = 27287 \text{ kg}$
 $\theta_u = 0.592\%$



d) Base de castillo

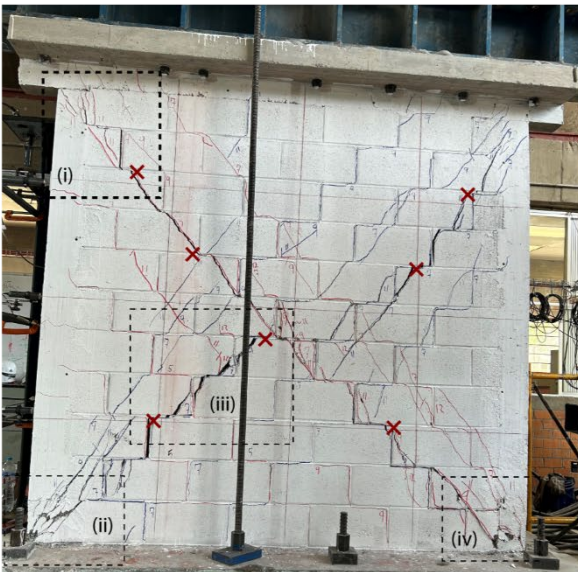
Figura 20 Patrones de agrietamiento del muro MH8R-1 sin refuerzo horizontal; a) al agrietamiento, b) a la resistencia, c) condición final, d) detalle de castillo.



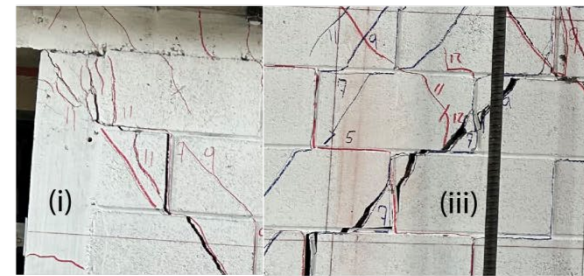
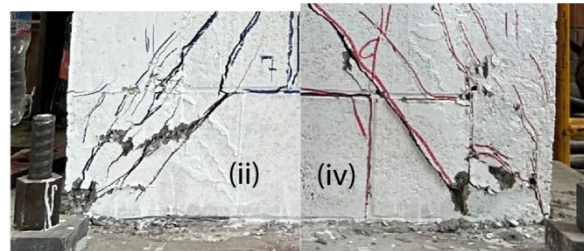
a) $R_{ag} = 23007 \text{ kg}$
 $\theta_{ag} = 0.133\%$



b) $R_{max} = 39648 \text{ kg}$
 $\theta_{max} = 0.507\%$



c) $R_u = 31718 \text{ kg}$ **X** rotura de alambre
 $\theta_u = 0.677\%$



d) Detalles

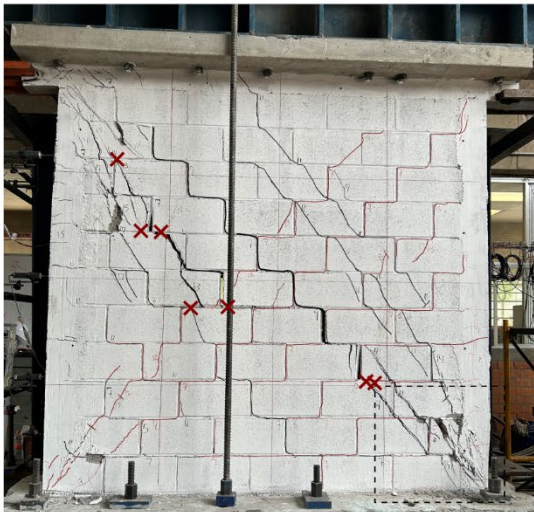
Figura 21 Patrones de agrietamiento del muro MH8R-2 Con refuerzo, $p_h f_{yh} = 3.86 \text{ kg/cm}^2$ refuerzo horizontal. a) al agrietamiento, b) a la resistencia, c) condición final se indica la localización de la rotura interna del refuerzo con **X**, d) detalles.



a) $R_{ag} = 30626 \text{ kg}$
 $\theta_{ag} = 0.207\%$



b) $R_{max} = 44810 \text{ kg}$
 $\theta_{max} = 0.697\%$

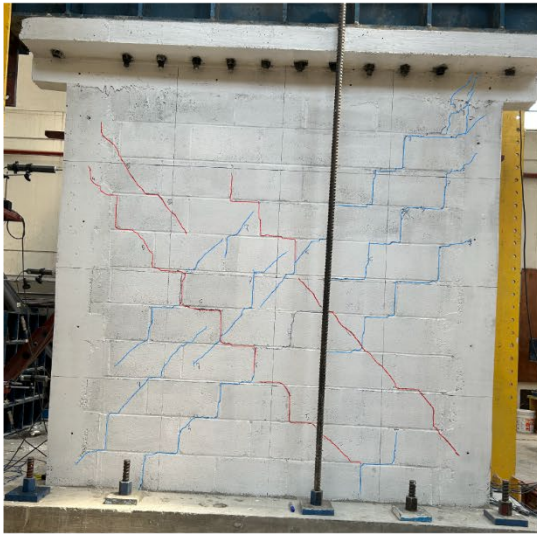


c) $R_u = 35848 \text{ kg}$
 $\theta_u = 1.163\%$

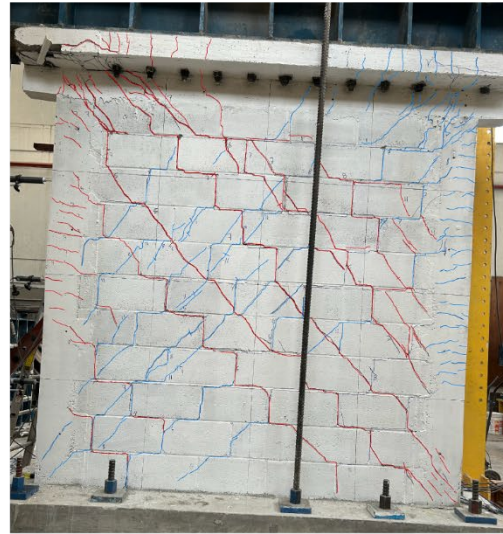


d) Detalle de castillo

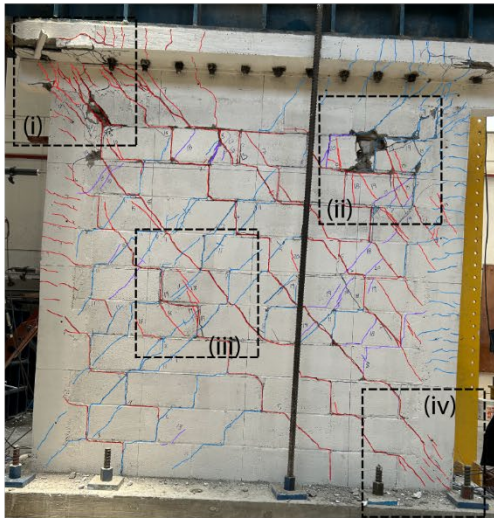
Figura 22 Patrones de agrietamiento del muro MH8R-3 con refuerzo, $p_h f_{yh} = 7.72 \text{ kg/cm}^2$. a) al agrietamiento, b) a la resistencia, c) condición final, se indica la localización de la rotura interna del refuerzo con X rotura de alambre, d) detalle de castillo.



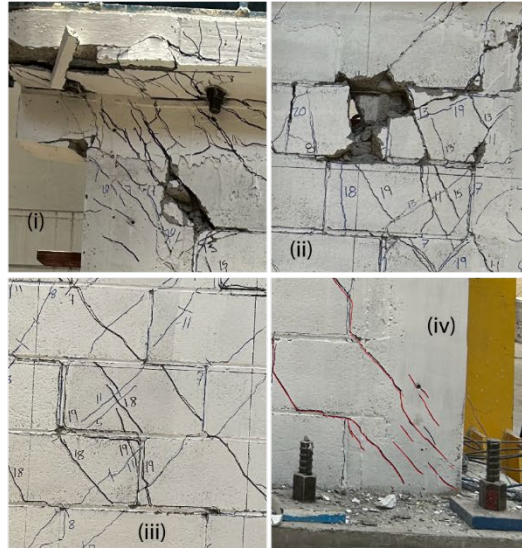
a) $R_{ag} = 27721kg$
 $\theta_{ag} = 0.168\%$



b) $R_{max} = 43802kg$
 $\theta_{max} = 0.629\%$



c) $R_u = 35042kg$
 $\theta_u = 1.178$



d) Detalles

Figura 23 Patrones de agrietamiento del muro MH8R-4 con refuerzo, $p_h f_{yh} = 15.08 \text{ kg/cm}^2$. a) al agrietamiento, b) a la resistencia, c) condición final y d) detalles.

Descripción de los ensayos

Se describen los principales eventos registrado durante los ensayos de los muros. Se hace referencia, en cada caso, a los distintos ciclos de carga. Algunos de los ciclos histeréticos que ayudan a la descripción del comportamiento de los muros se presentan en la Fig. 13. Así mismo se

hace referencia a los patrones de agrietamiento que se muestran en las Figs. 20, 21, 22 y 23 correspondientes a cada espécimen.

MH8R-1

Se realizaron los ciclos por control de carga sin novedad a una velocidad de 9600 kg/min. Se aplicaron los ciclos siguientes por control de desplazamientos, a una velocidad de 1.813 mm/min, hasta el pico positivo del ciclo 7 a una deformación de 0.003, y una carga de 25,585 kg, donde se hizo una pausa para examinar el agrietamiento. El primer agrietamiento diagonal se presentó antes de llegar al pico, con un ruido perceptible, a una deformación de $\theta_{ag}=0.00192$ y carga de $R_{ag}=25,752$ kg. Se continuó el ensaye hasta el pico negativo del ciclo 7, donde se aplicó una carga de -22,886 kg. Durante la aplicación de la carga se alcanzó el agrietamiento diagonal antes de llegar al pico, a una deformación $\theta_{ag}=-0.00179$ y carga de $R_{ag}=22,090$ kg (Fig.13.a). En la Fig. 20.a, se muestra el primer agrietamiento mientras se aplicaba la carga en el sentido positivo (jalando). Se aprecia que predomina la propagación de las grietas por las juntas. Al aplicar el ciclo 8 de repetición no observó degradación de la resistencia.

El siguiente ciclo, el noveno, se aplicó a una velocidad de 7.14 mm/min., hasta alcanzar una deformación de 0.005, y una carga máxima $R_{max}=31,742$ kg. En el sentido negativo la carga máxima fue de $R_{max}=-25,529$ kg, pero esta se presentó antes de llegar a la deformación objetivo del ciclo a una deformación de -0.00388, asimétrica respecto al sentido positivo. Se pudo realizar el ciclo 10 de repetición donde se empezó a observar una cierta degradación (Fig. 13.d). En la Fig. 20.b, se aprecia el agrietamiento observado mientras se aplicaba la carga en el sentido negativo (empujando) y un ancho de grieta de aproximadamente 10 mm. Se observan algunas grietas penetrando ambos castillos en su extremo inferior. Se inició la aplicación del ciclo 11 con el objetivo de deformación de 0.007, sin embargo, se suspendió la prueba al alcanzar una deformación de 0.006 y una carga de 27,312 kg, tras fuertes ruidos de daño en el castillo sur (proximal), y un ancho de grieta excesivo. En la Fig. 20.c, se aprecia ya un severo daño en el castillo y puede apreciarse el agrietamiento, que se presentó cercano al momento de suspensión del ensaye. La carga última registrada fue de $R_u=27,287$ kg, 86% de la máxima, un poco mayor a la de falla teórica que corresponde al 80% de la máxima. En forma similar, en el sentido negativo, la carga última registrada fue de $R_u=-21,665$, 83% de la máxima.

MH8R-2

Se aplicaron los ciclos controlados por carga sin novedad a la misma velocidad de 9600 kg/min, que anteriormente. Se aplicaron los ciclos siguientes por control de desplazamientos, a una velocidad de 1.8 mm/min, hasta el pico positivo del ciclo 7 a una deformación de 0.003, y una carga de 32,901 kg, 7,300 kg mayor que la observada en el muro MH8R-1. El primer agrietamiento diagonal se presentó antes de llegar al pico, con un ruido perceptible, a una deformación de $\theta_{ag}=0.00133$ y carga de $R_{ag}=23007$ kg. Se continuó el ensaye hasta el pico negativo del ciclo 7, donde se aplicó una carga de -30,353 kg. Durante la aplicación de la carga se alcanzó el agrietamiento diagonal antes de llegar al pico, a una deformación $\theta_{ag}=-0.00173$ y una carga de $R_{ag}=-25,126$ kg. Las cargas de agrietamiento fueron muy similares a las del muro MH8R-1, lo que confirma que el refuerzo no tiene un efecto significativo en la carga de agrietamiento (Fig.13.c).

En la Fig.21.a, se muestra el primer agrietamiento mientras se aplicaba la carga en el sentido positivo (jalando). Pueden observarse dos líneas principales de grietas paralelas a lo largo de la

diagonal. Otras grietas menores, que se observan en el cuadrante inferior izquierdo, se desarrollaron anteriormente, pero no produjeron un cambio de pendiente significativo en la curva carga-deformación. Las grietas se propagaron principalmente por las juntas, como en el muro MH8R-1. El ciclo 8 de repetición no mostró degradación de resistencia.

El siguiente ciclo, el noveno, se aplicó a una velocidad de 7.2 mm/min., hasta alcanzar una deformación de 0.003, y una velocidad de 1.8 mm/min de 0.003 a 0.005. La idea fue que el incremento de deformación en los ciclos impares, se hiciera siempre a la misma velocidad de 1.8 mm/min. y la deformación que ya había sido recorrida por el muro pudiera hacerse más rápidamente. Esto permitió reducir el tiempo del ensaye significativamente, evitando tener un efecto por la velocidad de aplicación del desplazamiento en los ciclos con incremento de deformación. La carga máxima obtenida fue de $R_{max}=39,648$ kg obtenida a la deformación máxima del ciclo, $\theta_{max}=0.005$. En el ciclo negativo la carga máxima fue muy similar, alcanzó $R_{max}=-38,722$ kg (Fig.13.d). Las resistencias fueron significativamente mayores a las del muro MH8R-1, 25% en el sentido positivo y 52% en el sentido negativo. La diferencia fue mayor en el sentido negativo, pero, la deformación alcanzada en el muro MH8R-1 fue 24% menor, esto es, no toda la diferencia (de 52%) puede atribuirse al refuerzo. En la aplicación de este ciclo, fue muy evidente la rotura de algunos de los alambres de refuerzo.

En la Fig.21.b, se observa el agrietamiento a la resistencia del espécimen. El ancho del agrietamiento, aunque se percibió ya de consideración, estaba aún bajo control y no había penetrado los castillos. Se observa un agrietamiento un poco más profuso que en el caso MH8R-1.

El ciclo 10, de repetición, mantuvo la carga, prácticamente sin degradación, y sin que se percibieran nuevas roturas de alambres. Sin embargo, el ciclo 11, a una deformación objetivo de 0.007, ya muestra una degradación de resistencia significativa, la fuerza aplicada alcanzó 21,052 kg a la deformación máxima del ciclo, solo 47% de la carga máxima. Por lo que se consideró la falla a una deformación menor 0.00677 cuando la carga era el 80% de la máxima, $R_u = 31,718$ (Fig.13.d). En este incremento de deformación se percibió la rotura de nuevos alambres. Durante la demolición del espécimen, fue posible verificar que el primer alambre empezando de la base del muro hacia arriba no sufrió roturas, el siguiente tuvo dos roturas, el tercero, que corresponde al central, solo una, y los dos siguientes alambres, dos roturas. La posición de las roturas, pudo verificarse que, coincidió con las grietas en el muro, como se indica en la Fig.21.c donde se indica la rotura de un alambre con una "X". En el sentido negativo, la carga a la deformación máxima del ciclo fue de 32,229 kg, 83% de la máxima. Tras la fuerte degradación observada, se decidió ya no hacer el ciclo 12 de repetición. En la misma Fig.21.c puede observarse ya un agrietamiento de un ancho que excedió los 12 mm y el daño en la base de ambos castillos es evidente. Una vez que se perdió el refuerzo horizontal el muro perdió confinamiento, los castillos se flexionaron apreciablemente en su sección central y todo esto permitió la apertura de las grietas.

MH8R-3

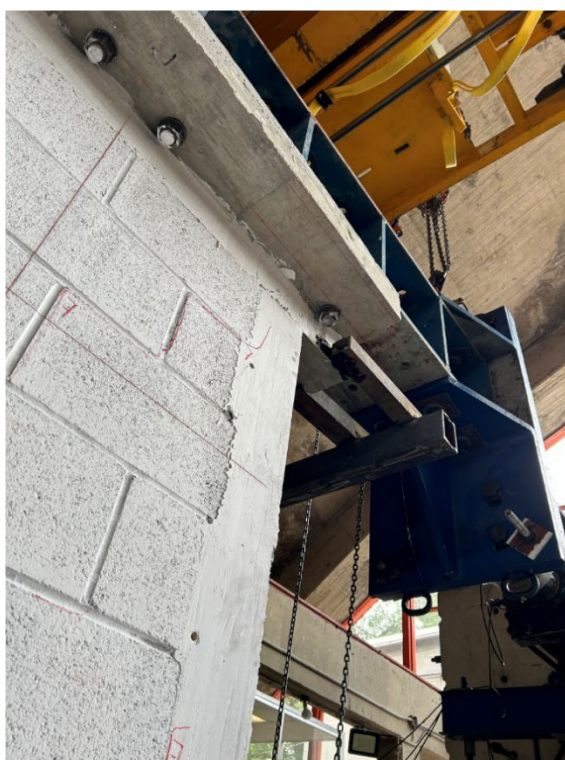
Como en los otros especímenes, los primeros ciclos por control de carga se aplicaron sin novedad. Las velocidades de carga y de desplazamiento se hicieron de acuerdo a lo mencionado para el espécimen MH8R-2. Al llegar al ciclo 7 a una deformación de 0.003 se alcanzó una carga de 34,482 kg, 1,581 kg mayor que para el muro MH8R-2. El primer agrietamiento se presentó a una deformación $\theta_{ag}=0.00133$, al aplicar una carga de $R_{ag}=30,626$ kg, coincidiendo con un sonido

apreciable. En este caso, 7,619 kg mayor que para el muro MH8R-2. Completando el ciclo en el sentido negativo, se alcanzó una carga de $R_{ag} = -27,801$ kg que coincidió con la deformación y carga máxima del ciclo (-0.003) (Fig.13.e). Al aplicar el ciclo 8, de repetición, la degradación de resistencia fue mínima.

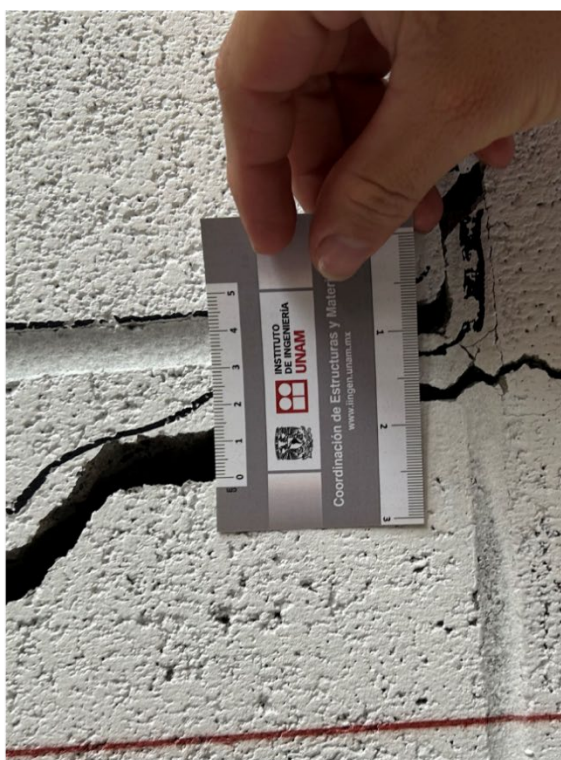
En la Fig. 22.a Se muestra el estado de muro MH8R-3 al agrietamiento. Se observa que las grietas se propagaron principalmente por las juntas.

Durante la aplicación del ciclo 9 se escucharon nuevos agrietamientos y se alcanzaron las cargas de 42,505 kg y -35,891 kg en el sentido positivo y negativo respectivamente (Fig.13.f). Al aplicar el ciclo 10 de repetición, se alcanzaron las cargas de 40,152 kg, y -33,774 kg, mostrando ya cierta degradación de resistencia.

En el ciclo 11, a la deformación objetivo de 0.007, se alcanzó la carga máxima, $R_{max} = 44,810$ kg y -41,947 kg en el sentido positivo y negativo respectivamente. Para el lado negativo se observó un fuerte desplazamiento fuera del plano de la sección distal de 38.4 mm; sin embargo, se decidió aplicar el ciclo 12 de repetición, que alcanzó la carga positiva de 41,591 kg coincidiendo con el ruido apreciable de la rotura de un alambre (Fig.13.f ciclo 12 con línea punteada).



a) Dispositivo de control fuera del plano sección proximal



b) Ancho de grieta 14 mm

Figura 24 Muro MH8R-3. a) Dispositivo para controlar el desplazamiento fuera del plano, que resultó ineficiente. b) agrietamiento medido al finalizar el ensaye.

En la Fig. 22.b se muestra el patrón de agrietamiento a la resistencia máxima. Se observan anchos de grieta un poco menores a los observados en el muro MH8R-1 y hay un mayor número de grietas y más distribuidas en la cara del muro.

En el sentido negativo, empujando, al alcanzar una carga de -21,170 kg, se alcanzó el desplazamiento fuera del plano del ciclo anterior, por lo que se decidió suspender temporalmente el ensaye, llevando la carga a cero. Con el objetivo de evitar este desplazamiento fuera del plano, se incluyeron dispositivos, tanto en la sección proximal como en la distal (Fig. 24.a).

Después de incluir los dispositivos mencionados, se continuó el ensaye después de 3 días.

Se reinició el ensaye, aplicando el ciclo 13 con una deformación objetivo de 0.009. Se alcanzó una carga de 43,994 kg. Al empujar, y al llegar a la carga de -21,170 kg, se presentó un fuerte movimiento fuera del plano, pero, en esta ocasión, de la sección proximal, por lo que se decidió regresar la carga a cero. No se consideró la posibilidad de reforzar el muro fuera del plano, por razones logísticas. Se propuso entonces, hacer los siguientes ciclos de carga, solo en el sentido positivo (jalando), que aseguraba la estabilidad del muro.

Se aplicó el ciclo de carga 14, de repetición, a una deformación objetivo de 0.009 sólo en el sentido positivo. Se alcanzó una carga de 40,546 kg; se regresó entonces a deformación cero, que implicó empujar con una carga de 7,311 kg. Sin embargo, a ese nivel de carga, no se tuvieron movimientos fuera del plano significativos.

Se aplicó el ciclo 15 hasta una deformación objetivo de 0.011; se alcanzó la carga máxima del ciclo de 42,569 kg, a una deformación de 0.010, un poco menor a la del objetivo, para la cual se escuchó la rotura de un nuevo alambre. La repetición se aplicó con el ciclo 16. Se escuchó la rotura de un alambre al alcanzar la carga máxima del ciclo de 38,043 kg, a una deformación de 0.010; la carga se redujo posteriormente, hasta 37,894 kg, al llegar a la deformación objetivo de 0.011 (Fig.13.f ciclo 16 con línea punteada)

Finalmente, se aplicó el ciclo 17, a una deformación objetivo de 0.013. La carga máxima del ciclo fue de 31,648 kg a una deformación de 0.0106, coincidiendo con nuevas roturas de alambres; subsecuentemente la carga se redujo rápidamente hasta 22,678 kg al llegar a la deformación objetivo (Fig.8.f).

En la Fig. 22.c se muestra el patrón de agrietamiento al finalizar el ensaye. Debido a que los últimos ciclos solo se hicieron en el sentido positivo se observa que los agrietamientos, que en la figura aparecen de izquierda a derecha, tuvieron anchos muy grandes y un daño concentrado en el extremo inferior del castillo sur (proximal) (Fig.22.d). El ancho de grieta alcanzó los 14 mm como se muestra en la Fig.24.b. Fue evidente una flexión importante de los castillos consistente con el ancho de las grietas.

MH8R-4

En los ciclos controlados por carga no se observó ningún cambio. En el ciclo 5, primer ciclo controlado por desplazamiento a 0.001 H, al alcanzar una carga de 14,700 kg, y una deformación de 0.0035, aproximadamente, se observa en la curva histerética un cambio de pendiente abrupto, que se asocia a algún tipo de agrietamiento del muro. En el muro, efectivamente fue apenas apreciable un agrietamiento cerca de la base del muro (2da hilada) (ver fotografía IMG_7170).

Este agrietamiento suele asociarse a flexión, por lo que no se registró como primer agrietamiento por tensión diagonal. Más tarde en el ciclo 7, con una deformación objetivo de 0.003 H, se registró el primer agrietamiento franco por tensión diagonal, a una carga de 27721 kg y una deformación de 0.00168 (Fig. 13.a, Fig. 23.a con agrietamiento en ambos sentidos). En los siguientes ciclos siguió incrementándose el agrietamiento; sin embargo, fue apreciablemente menor que en el caso del muro MH8R2 y MH8R3. En este caso, el agrietamiento antes de la resistencia, no alcanzó los 2 mm. Además, el agrietamiento se propagó por las piezas y las juntas dando lugar a un patrón de grietas más profuso que en los muros anteriores (Fig. 23.b). No se percibió el ruido característico de la rotura de algún alambre. La no fractura de los alambres se confirmó durante la demolición del espécimen. La resistencia se alcanzó en el ciclo 11 (objetivo 0.007 H) para una carga de 43,802 kg y una deformación de 0.629%. Fue notable que la base los castillos se mantuvo con mínimos agrietamientos y de ancho apenas perceptible. En el extremo superior y proximal, se observa que el agrietamiento penetró más bien a la dala y no al castillo. La falla se produjo para una deformación de 1.178% (ciclo 17 objetivo 0.0123 H) y -1.492% (ciclo 19 objetivo 0.015 H). Después de alcanzar la resistencia, se empezó a observar el aplastamiento en la parte superior de muro, tanto en el extremo proximal como distal. El ancho máximo del agrietamiento observado alcanzó 8 mm; sin embargo, después de quitar la carga lateral, el agrietamiento se redujo hasta 2 mm. En el extremo superior, también pudo observarse un deslizamiento a nivel de la primera hilada de arriba hacia abajo. El deslizamiento es apreciable por la discontinuidad de las líneas verticales de la retícula dibujada en la cara del muro (ver fotografía IM_7211 o Fig.23.c).

Criterios de aceptación

Descripción

Para facilitar la interpretación de los resultados se hace una breve descripción de los criterios de aceptación que solicita la NTC-Mampostería 2023. En lo que sigue, se hace referencia a la deformación máxima admisible como $\gamma_{max}/2$, donde γ_{max} es la deformación admisible de acuerdo a la Norma Técnica para el Diseño por Sismo, de acuerdo a la modalidad de mampostería utilizada, en este caso, mampostería de piezas macizas con y sin refuerzo. Se usa $\gamma_{max}/2$ por tratarse de ensayos pseudo estáticos.

A.9.2 $\theta_{max} > \gamma_{max}/2$

Este requisito establece que la deformación a la que se presenta la resistencia máxima debe alcanzarse a una deformación mayor a la deformación admisible $\gamma_{max}/2$. Esto implica que, cuando se alcanza la deformación admisible, el muro sigue en la parte ascendente de la curva carga-desplazamiento, que se identifica con un comportamiento estable. Estable significa que con pequeñas variaciones de desplazamiento lateral se obtienen pequeñas variaciones de la carga. Si se tuviera el caso contrario, la deformación admisible se presentaría en la parte descendente de la curva, esto es cuando se tiene una degradación de la resistencia. En esa región se pueden tener variaciones rápidas de carga ante pequeños incrementos de desplazamiento lateral, lo que significa un comportamiento inestable.

A.9.2 $|R_{max}| > R$

Este requisito garantiza que el muro puede desarrollar la resistencia que se predice con el método de diseño seleccionado con un cierto margen de seguridad dado que el factor de reducción de la resistencia que se usa para calcular, R , es unitario.

A.9.3 $R_{\gamma max}/R_{max} > 0.6$ o 0.8

Este requisito garantiza que la fuerza cortante a la deformación máxima admisible no difiere sustancialmente de la resistencia del muro. Para el caso de muros sin refuerzo horizontal se admite que dicha resistencia sea 60% de la máxima o mayor y para muros con refuerzo, dicha resistencia debe ser mayor o igual al 80% de la máxima. Este requisito debe entenderse junto con A.9.2 $\theta_{max} > \gamma_{max}/2$, esto es la resistencia máxima se presenta a una deformación mayor o igual a la máxima admisible, pero la resistencia a la deformación admisible no debe ser muy distinta a la máxima. Esto garantiza que la resistencia considerada en el diseño es apropiada. (Ver Anexo C Fig A.9.1)

A.9.4 $k_{\gamma max}/k_0 > 0.1$

Este requisito establece que la rigidez de ciclo del muro a la deformación máxima admisible no sea menor al 10%. Se ha observado experimentalmente que la fuerza cortante resistente en un muro se alcanza para rigideces de ciclo bastante bajas, 15% o menor de la rigidez inicial. Este requisito trata de garantizar que la degradación de la rigidez, a la deformación máxima admisible, no es menor al 10% para garantizar que la resistencia máxima pueda alcanzarse.

A.9.5 $\theta_{max}/\theta_y > 1 + 4(Q - 1)$

Este requisito garantiza que la ductilidad del muro, es suficiente para el nivel de ductilidad esperado, Q , para una estructura de 5 niveles. La ductilidad se calcula con la deformación a la resistencia máxima y la deformación a la fluencia del sistema elastoplástico equivalente. Para el caso de $Q = 2$ que corresponde a mamposterías de piezas macizas, la demanda de ductilidad máxima esperada es de 5 y para una mampostería de piezas huecas es de 3.

Cálculo de la resistencia R

Se utilizan las expresiones de las NTC-Mampostería de la CDMX en su revisión del 2023, para estimar la resistencia de los muros ensayados. Para los muros con refuerzo horizontal se usa un formato de las ecuaciones que se menciona en los comentarios de dichas normas. Se utilizó R para referirnos a esta resistencia de acuerdo a la nomenclatura usada en el Apéndice A de la NTC-Mampostería.

Muros sin refuerzo horizontal

En este caso la resistencia lateral en el plano del muro corresponde a la carga resistente del muro cuando se presenta el primer agrietamiento por tensión diagonal.

$$R = F_R(0.5v'_m + 0.3\sigma)A_T f < F_R 1.5v'_m A_T f \quad (1)$$

donde

$$f = \begin{cases} 1.5 & \text{si } H/L \leq 0.2 \\ 1.0 & \text{si } H/L \geq 1.0 \end{cases}$$

Interpolando para casos intermedios de H/L . Para efectos de la evaluación con el Apéndice A de la NTC-Mampostería se usa $F_R = 1$, y el valor de diseño de la resistencia a compresión diagonal de la mampostería v'_m . Para el cálculo de v'_m se utilizó el valor promedio de los ensayos y el coeficiente de variación reglamentario ($c_v = 0.2$).

Muros con refuerzo horizontal

Cuando el muro tiene refuerzo horizontal, la resistencia se calcula como

$$R = V_a k_0 k_1 + V_s \quad (2)$$

$$V_a = F_R (0.5 v'_m + 0.3 \sigma) A_T f < F_R 1.5 v'_m A_T f$$

$$V_s = F_R \eta_s (p_h f_{yh})_e A_T \quad (3)$$

donde

$$k_0 = \begin{cases} 0.75 & \text{si } f'_m \geq 90 \text{ kg/cm}^2 \\ 0.55 & \text{si } f'_m \leq 60 \text{ kg/cm}^2 \end{cases}$$

Interpolando para valores intermedios de f'_m :

$$k_1 = 1 - \alpha (p_h f_{yh})_e$$

donde $\alpha = 0.045$ y

$$(p_h f_{yh})_e = p_h f_{yh} < 0.1 f'_m f_{an}$$

y f_{an} es la fracción de área efectiva de la pieza. En el caso que nos ocupa $f_{an} = 0.76$; $p_h = A_s / (s \times t)$, siendo A_s de acero horizontal utilizado en las juntas, s , la separación vertical de dicho refuerzo, en los muros MH8R-2 y MH8R-3, a cada dos hiladas, $s = 41$ cm y para el muro MH8R-4, a cada hilada, $s = 21$ cm; f_{yh} el esfuerzo de fluencia especificado del refuerzo horizontal (= 6000 kg/cm²).

Tabla 7 Resistencia calculada, R , con $F_R = 1$, para criterios de aceptación NTC-Mampostería

Concepto	BH8R-1	BH8R-2	BH8R-3	BH8R-4
Materiales:				
f'_m (kg/cm ²)	132.5	137.2	139.1	123.0
v'_m (kg/cm ²)	11.4	8.5	12.5	8.1
Geometría:				
L (cm)	252	252	252	252
H (cm)	256	256	256	254
H/L	1.02	1.02	1.02	1.01
A_T (cm ²)	3024	3024	3024	
Refuerzo:				
A_s (cm ²)	--	0.316 (1v ¼")	0.633 (2v ¼")	0.633 (2v ¼")
s (cm)	--	41	41	21
$p_h f_{yh}$ (kg/cm ²)	--	3.86	7.72	15.08
Resistencia:				
f	0.99	0.99	0.99	1.0

$1.5v'_m A_T f$ (kg)	51365	38093	56283	36409
k_0	--	1.3	1.3	1.3
k_1	--	0.83	0.65	0.58
$0.1f'_m f_{an}$ (kg/cm ²)	--	10.42	10.57	9.35
$(p_h f_{yh})_e$ (kg/cm ²) (+)	--	3.86	7.72	9.35
η_s	--	0.75	0.75	0.75
R (kg)	21972 (eq.1)	27607 (eq. 2)	37544 (eq. 2)	30870

$t = 12$ cm $f_{an} = 0.76$

(+) se usó el valor nominal de $f_{yh} = 6000$ kg/cm²

Para el cálculo de v'_m se utilizó el coeficiente de variación reglamentario $c_v = 0.2$

Para el cálculo de f'_m se utilizó el coeficiente de variación reglamentario $c_m = 0.15$

Resumen de resultados

Tabla 8 Criterios de aceptación por muro

Criterio	BH8R-1	BH8R-2	BH8R-3	BH8R-4
A.9.2 $\theta_{max} > \gamma_{max}/2$	$ 0.0051 > 0.0025$ ok	$0.0051 > 0.005$ ok	$0.007 > 0.005$ ok	$0.0063 > 0.005$ ok
	$ -0.0039 > 0.0025$ OK(*)	$ -0.005 > 0.005$ ok	$ -0.007 > 0.005$ ok	$ -0.0064 > 0.005$ ok
A.9.2 $ R_{max} > R$	$31742 > 21972$ ok	$39648 > 27607$ ok	$44810 > 37544$ ok	$43802 > 30870$ ok
	$ -25529 > 21972$ ok	$ -38722 > 27607$ ok	$ -41947 > 37544$ ok	$ -43995 > 30870$ ok
A.9.3 $\frac{R_{\gamma max}}{R_{max}} > 0.6$ o 0.8	$0.86 > 0.6$ ok(*)	$1.0 > 0.8$ ok	$0.95 > 0.8$ ok	$0.99 > 0.8$ ok
	$0.92 > 0.6$ ok(*)	$0.99 > 0.8$ ok	$0.94 > 0.8$ ok	$1.0 > 0.8$ ok
A.9.4 $\frac{k_{\gamma max}}{k_0} > 0.1$	$0.27 > 0.1$ ok	$0.37 > 0.1$	$0.36 > 0.1$ ok	$0.15 > 0.1$
A.9.5 $\frac{\theta_{max}}{\theta_y} > 1 + 4(Q - 1)$	$3.2 < 5$ no(+)	$2.6 < 5$ no	$2.8 < 5$ no	$3.0 < 5$ no
	$3.2 < 5$ no(+)	$2.4 < 5$ no	(---)	$4.4 < 5$ no

(+) Suficiente para $Q = 1.5$. (*) errata en el informe con muros MH8R1-a MH8R3.

Discusión de resultados

Materiales

Piezas

El peso volumétrico neto de las piezas de 1822.9 kg/m³ es mayor que el mínimo especificado en la norma de 1700 kg/m³.

La resistencia de las piezas promedio de 190.9 kg/cm^2 es significativamente mayor al valor mínimo promedio establecido por la NTC-Mampostería para piezas macizas o multiperforadas de arcilla o concreto de 150 kg/cm^2 .

Mortero

Los valores promedio obtenidos de la resistencia a compresión del mortero, resultaron bajos para los muros MH8R-2 y MH8R-3, menores a 180 kg/cm^2 , no así para el muro MH8R-1 y MH8R-4 que alcanzaron los 242 kg/cm^2 y 262 kg/cm^2 , respectivamente. Una posible explicación de la diferencia en la resistencia es que en el caso de los cubos de los muros MH8R-2 y MH8R-3, los cubos tardaron varias semanas en ensayarse, especialmente los del muro MH8R-3, lo que pudo significar una pérdida de humedad en los especímenes. La variabilidad de la resistencia al interior de cada muro es adecuada, como se observa en el coeficiente de variación menor 0.15, pero la variabilidad de la resistencia entre muros fue más elevada con un $CV=0.305$ (ver Tabla cubos de mortero en el Apéndice A).

Mampostería f'_m

La resistencia promedio de diseño a compresión de la mampostería de 133 kg/cm^2 , es elevada si se compara con la resistencia mínima de piezas macizas y mortero Tipo I que es de 50 kg/cm^2 de acuerdo a la NTC-Mampostería. El coeficiente de variación de la resistencia experimental al interior de los muros fue menor 0.15 y 0.052 en el promedio de la resistencia de los muros.

Mampostería v'_m

La resistencia de diseño promedio de los cuatro muros resultó de 10.1 kg/cm^2 . El coeficiente de variación de la resistencia al interior de los muros fue ≤ 0.2 y solo un poco mayor entre el promedio de la resistencia de los muros $CV=0.216$.

Gm/Em

El promedio de este valor calculado con el valor estimado por muro fue de 0.28. Este es un valor mayor al propuesto por la NTC-Mampostería que contempla que $G_m = 0.2E_m$

Resistencia

La resistencia a corte de los muros, como se esperaba, fue muy elevada y en todos los casos analizados fue mayor a la predicción hecha con las expresiones de la norma para mampostería confinada, con valores de diseño y factor de reducción de la resistencia igual a la unidad. En el muro MH8R-1, fue 44% mayor en el sentido positivo y 16% en el negativo. Para los otros muros la resistencia experimental respecto a la de diseño fue mayor en 44%, 40%, 19%, 12% y 41%, 43%, en el sentido positivo y negativo de esos muros, respectivamente.

Degradación de la resistencia

En el muro MH8R-1 sin refuerzo, la degradación de la resistencia se presentó casi de manera inmediata después de la resistencia. Se considera que este comportamiento es el normal para un muro sin refuerzo horizontal.

El muro MH8R-2 tuvo una degradación de la resistencia rápida, aunque logró alcanzar una deformación a la falla mayor que la observada en el muro MH8R-1, 14% y 40% mayor en el sentido positivo y negativo, respectivamente. Aunque el muro MH8R-2 tuvo una mayor resistencia, con

relación a su capacidad a deformación, se comportó, para todo efecto práctico, como un muro sin refuerzo horizontal.

No fue así con el muro MH8R-3. El incremento de la deformación a la falla fue sustancial, 96% mayor que el muro MH8R-1 y 72% mayor que el muro MH8R-2, en ambos casos en el sentido positivo.

En el caso del muro MH8R-4 se comporta de forma muy similar al muro MH8R-3 en el sentido positivo, con una pequeña disminución de la deformación a la falla, < 10% en ambas direcciones.

Capacidad de deformación

La deformación a la resistencia fue apropiada, como requiere la norma, ésta se alcanzó después de la deformación admisible. Ese hecho garantiza que, a la deformación admisible, el muro tiene un comportamiento estable.

Agrietamiento

Quizá uno de los aspectos más relevantes de los ensayos, es que el agrietamiento, se propagó principalmente por las juntas, en los muros MH8R1 a MH8R3. Este hecho por sí mismo implica un agrietamiento menos denso, aun en el caso del muro que no tuvo refuerzo horizontal, si se compara con los agrietamientos de muros con piezas de menor tamaño, por ejemplo, de $12 \times 12 \times 24$ cm (Cruz et al. 2019). En el muro MH8R4, sin embargo, el agrietamiento se propagó por las juntas y las piezas.

Otro hecho de gran relevancia fue el ancho de las grietas, que alcanzó los 14 mm a la falla en el muro MH8R3. Sin embargo, en el muro MH8R4, a la falla llegó a 8 mm, pero hasta la resistencia este no alcanzó los 2 mm. El ancho del agrietamiento en los muros MH8R2 y MH8R3 fue atípico para muros con refuerzo horizontal; sin embargo, el ancho y patrón de agrietamiento del muro MH8R4 fue más acorde con lo observado en otros ensayos de muros con refuerzo horizontal.

El refuerzo tiene, comúnmente, el efecto de mantener el ancho de las grietas en niveles muy bajos, menores a 1 mm. Las grietas en los muros reforzados logran, usualmente, propagarse a través de las piezas y de las juntas logrando una gran densidad de grietas por unidad de área. En los ensayos de los muros MH8R2 y MH8R3, la propagación a través de las piezas fue escasa y el refuerzo no pudo controlar el ancho del agrietamiento. Al incrementarse el ancho de las grietas, en esos muros, se produjo, eventualmente, la fractura de los alambres de refuerzo. Una vez que el primer alambre se fracturó, el fenómeno se repitió ya que el ancho de las grietas tendió a incrementarse aún más. En esos dos muros, además, las grietas diagonales cruzaron la base de los castillos produciendo la falla. Este hecho fue, nuevamente, atípico, dada la cantidad de refuerzo transversal en los extremos de los castillos. En el muro MH8R4 se observaron muy pocas grietas y de escaso ancho en los extremos de los castillos. Mas daño se observó en la dala especialmente en el extremo proximal.

El ancho del agrietamiento también tuvo el efecto de producir una flexión apreciable de los castillos de los muros MH8R2 y MH8R3. En el caso del muro MH8R4, esto no se observó dada la reducción del ancho del agrietamiento y el incremento de la sección de los castillos de 15 a 20 cm.

Degradación de la rigidez de ciclo

La pérdida de rigidez de ciclo con la deformación fue bastante baja, en los primeros tres muros, en comparación con los resultados del ensaye del muro MH8R4 y de otros muros con otro tipo de mampostería (Cruz et al 2019). Este hecho es bastante significativo, y se atribuye al tipo de agrietamiento descrito anteriormente. Los muros, al sufrir un agrietamiento menos profuso mantienen su rigidez lateral por más tiempo.

Ductilidad

La ductilidad de los muros fue el único de los parámetros evaluados de acuerdo al apéndice A de la Norma, que resultó escaso.

Las envolventes en el caso de los muros MH8R-1 y MH8R-2, muestran una degradación de la resistencia rápida, que es un indicio de una escasa capacidad de deformación que se traduce en una baja ductilidad. La escasa densidad del agrietamiento produjo un menor daño y deformaciones a la resistencia relativamente bajas.

En el caso del muro MH8R-3, ya se mencionó, alcanzó una deformación considerable a la falla. Llama la atención, sin embargo, que, con el criterio de la Norma, la ductilidad del muro, utilizando los parámetros del modelo elastoplástico equivalente no fue suficiente. Dos razones parecen explicar ese resultado. 1) que la resistencia se presentó a una deformación relativamente baja, solo 37% mayor que la de los dos muros anteriores. Sin embargo, la deformación a la fluencia fue 53% mayor que la del muro MH8R-1 en el sentido positivo y 200% mayor en el sentido negativo. Al comparar con el muro MH8R-2, los incrementos fueron 29% y 75%. Esto quiere decir que, bajo el criterio de la Norma, la ductilidad del muro MH8R-3 efectivamente se redujo, si la comparamos con la del muro MH8R-1 y apenas se incrementó respecto a la del muro MH8R-2. En el caso del muro MH8R-4, aunque la ductilidad mejoró, el comportamiento fue muy similar al del muro MH8R3, en el sentido positivo, y alcanzó una ductilidad de 4.4 en el sentido negativo, solo 12% escasa.

Es necesario hacer notar que para el cálculo de la ductilidad se toma la deformación a la resistencia máxima. Sin embargo, la deformación a la resistencia máxima no se modifica sustancialmente con la cantidad de refuerzo horizontal. Lo que sí aumenta en forma importante con la cantidad de refuerzo efectivo es la deformación a la falla, θ_u .

Conclusiones

Con base en los resultados se pueden generar las siguientes conclusiones:

Los muros de mampostería confinados con castillos externos, contruidos con piezas multiperforadas de concreto con un área neta del 76% y un mortero mejorado con resina, cumplieron satisfactoriamente con los criterios establecidos en el apéndice A de la Norma de mampostería de la CDMX con excepción de la ductilidad.

La resistencia de los muros fue muy alta, en congruencia con las propiedades mecánicas de la mampostería.

La resistencia de los muros puede calcularse, en forma segura, con las expresiones provistas por la Norma para muros confinados de mampostería.

Los resultados sugieren que el tamaño de las piezas y su alta resistencia, produjeron que el agrietamiento en los muros, aun contando con refuerzo horizontal, se propagara por las juntas.

Ese fenómeno produjo una densidad de grietas escasa, que se tradujo en una degradación de la rigidez de ciclo menor a la observada en muros hechos con mampostería de piezas de menor tamaño y propiedades mecánicas similares.

El refuerzo aumentó significativamente la resistencia en los muros MH8R-2 y MH8R-3; sin embargo, el refuerzo no fue capaz de mantener el ancho de las grietas bajo control en estos muros. El ancho de las mismas se incrementó con la deformación lateral, eventualmente provocando la fractura de los alambres de refuerzo.

Adicionalmente al tamaño de las piezas, el comportamiento descrito de los primeros tres muros ensayados (MH8R-1 a MH8R-3), pudo deberse, en el primer caso, a la falta de refuerzo horizontal y en el caso de los dos últimos, a la separación del refuerzo, que fue de 410 mm, cercana al valor máximo permitido por la norma de 450 mm.

La reducción en la separación del refuerzo a 210 mm (a cada hilada) y el aumento de la cuantía al doble, produjo un cambio sustancial en el comportamiento del muro MH8R-4. El agrietamiento fue mucho más uniforme en la cara del muro y su ancho se mantuvo menor a 2 mm hasta la resistencia, alcanzando 8 mm solo cerca de la falla del muro. Este comportamiento se vio reflejado en una degradación de ciclo mucho mayor que en los muros anteriores. La reducción del ancho de las grietas permitió que los alambres no se fracturaran.

Dado el cambio de ambas variables, cuantía y separación del refuerzo, en el muro MH8R-4, no puede determinarse cuál fue el efecto de cada variable por separado.

Aunque se aumentó la cuantía sustancialmente y se incrementó la sección de los castillos, la resistencia no aumentó, con respecto al muro MH8R-3. Este fenómeno estuvo de acuerdo con lo contemplado por la norma, que predijo la resistencia con valores de las propiedades mecánicas experimentales de forma satisfactoria.

El incremento en la sección de los castillos redujo en forma significativa la deformación del refuerzo longitudinal de los mismos.

El criterio de la norma para valorar la ductilidad parece subestimar la capacidad de deformación plástica de los muros MH8R-3 y MH8R-4. Esto se debe a que la deformación a la resistencia, no cambia sustancialmente con la cuantía (Tabla 4), aunque sí la deformación final a la falla. Dado que el criterio de la norma para calcular la ductilidad se basa en la deformación a la resistencia, explica, en parte, porque el criterio de la norma no puede reconocer dicha capacidad de deformación.

La evidencia de que la adherencia del refuerzo y mortero no fue muy alta, permite atribuir la rotura de los alambres, en los muros MH8R-2 y MH8R-3, al tipo de agrietamiento observado en esos muros. Como se describió arriba, dicho agrietamiento, escaso y por las juntas, fue más bien determinado por el tamaño de las piezas y la separación y cuantía del refuerzo.

Por lo anterior, puede afirmarse que el uso de la resina en el mortero no tuvo un efecto significativo en el comportamiento del muro después del agrietamiento.

Referencias

I. Cruz O., J. J. Pérez Gavilán, L. E. Flores (2019), “Experimental study of in-plane shear strength of confined concrete masonry walls with joint reinforcement”, Engineering Structures, Vol 182, pp 213-226

Computational Inelasticity, J.C. Simo y T. J. R. Hughes, 1997, Springer-Verlag New York. Inc.

Anexo A Resultado de los ensayos de los materiales

Pilas

	L	H	t	H/t	Fac esbtz	P	P coor	fm	W	Peso/m2	Em	CV
Muro-pila	cm	cm	cm			t	t	kg/cm2	kg	kg/m2	kg/cm2	de fm
MR1-P1	40	64.0	12	5.33	1.05	89.83	94.6	187.1	49.93	195.0	91447	
MR1-P2	40	63.3	12	5.28	1.05	77.89	82.0	162.3	49.97	197.4	88425	
MR1-P3	40	63.3	12	5.28	1.05	94.6	99.6	197.1	49.99	197.4	88992	
								182.2			89621	0.098
MR2-P1	40	63.0	12	5.25	1.05	85.56	90.1	178.3			101629	
MR2-P2	40	63.0	12	5.25	1.05	90.53	95.3	188.6			96176	
MR2-P3	40	63.1	12	5.26	1.05	95.5	100.5	199.0			104153	
								188.6			100653	0.055
MR3-P1	40	63.0	12	5.25	1.05	94.82	99.8	197.5	50.17	199.1	101228	
MR3-P2	40	63.2	12	5.27	1.05	84.3	88.7	175.6	50.33	199.1	95998	
MR3-P3	40	63.1	12	5.26	1.05	96.35	101.4	200.7	50.62	200.6	102174	
								191.3	50.2	198.1	99800.3	0.071
MR4-P1	40	63.8	12	5.26	1.05	78.2	82.3	171.5			107520	
MR4-P2	40	63.1	12	5.26	1.05	76.2	80.2	167.1			92594	
MR4-P3	40	63.0	12	5.26	1.05	77.0	81.0	168.9			88891	
								169.1			96335	0.013

Muretes

	L	H	t	d	P	vm	W	Peso/m2	Gm	cv vm	
Muro	cm	cm	cm	cm	t	kg/cm2	kg	kg/m2	kg/cm2		Observ.
MR1-M1	61	62.5	12	87.3	17.43	16.6			28888		a)
MR1-M2	61	62.5	12	87.3	19.1	18.2	73.93	193.9	29696		
MR1-M3	61	62.3	12	87.2	17.38	16.6	73.57	193.6	26418		
						17.2			28334.1	0.054	
MR2-M1	61	62.5	12	87.3	12.90	12.3	73.14	191.8	28871		a)
MR2-M2	61	62.5	12	87.3	14.00	13.4	74.31	194.9	26327		
MR2-M3	61	63.5	12	88.1	13.21	12.5	74.42	192.1	26746		
						12.7			27314.8	0.044	
MR3-M1	61	63.5	12	88.1	21.77	20.6	74.34	191.9	30021		b)
MR3-M2	61	63.5	12	88.1	23.76	22.5	73.81	190.6	21814		c)
MR3-M3	61	63.5	12	88.1	14.06	13.3	73.81	190.6	23390		d)
						18.8		192.4	25075.2	0.200	e)
MR4-M1	62	61	11.8	88.1	10.9	10.5			19794.7		b)
MR4-M2	61.1	62.5	11.8	88.5	14.5	13.9			29895.7		
MR4-M3	61.7	62.2	11.9	88.5	12.7	12.1			26742.9		
						12.1			25478	0.140	
Observaciones											
a) Las pilas de MR1 y MR2 se ensayaron a 1.0 t/min											
b) Las pilas de MR3 y MR4 se ensayaron a 1.5 t/min											
c) Hubo un problema con los LEDS de la parte trasera, se calculo G con los delanteros solamente											
d) Falló primero la junta (afecta mucho al CV)											
e) Se uso CV reglamentario											

Piezas

	L	t	P	Esfuerzo
	cm	cm	t	kg/cm2
PZ-1	40	12	92.7	193.10
PZ-2	40	12	85.6	178.29
PZ-3	40	12	96.4	200.81
PZ-4	40	12	99.0	206.25
PZ-5	40	12	84.4	175.90
				190.87

Cilindros de castillos

	H	d	H/d	A	P	Esfuerzo	E	
	cm	cm		cm2	t	kg/cm2	kg/cm2	
MR1-K1	20	10	2	78.5	23.69	301.6	130220	
MR1-K2	20	10	2	78.5	27.06	344.5	155695	
						323.1	142957	
MR2-K1	20	10	2	78.5	26.69	339.8	167733	
MR2-K2	20	10	2	78.5	25.27	321.7	142362	
						330.8	155047	
MR3-K1	20	10	2	78.5	27.36	348.4	180995	
MR3-K2	20	10	2	78.5	27.66	352.2	180633	
						350.3	180814	
MR4-K1	20	10.0	2	79.2	39.6	500	190474	a)
MR4-K2	20	10.1	2	80.5	40.1	498	179646	
MR4-K3	20	10.0	2	79.2	34.9	441	198769	
					38.2	480		
MR4-K4	20	10.0	2	78.5	32.1	409	189110	
MR4-K5	20	10.0	2	78.5	35.6	453	182442	b)
MR4-K6	20	10.0	2	78.5	37.4	476	190967	
					35.0	446	187506	
					36.6	462.8	188568	c)
					CV	0.077	0.036	
	a) castillo distal							
	b) castillo proximal (al muro fuerte)							
	c) promedios y CV de ambos castillos de MR4							

Cubos de mortero

	H cm	B cm	A cm ²	P t	Esfuerzo kg/cm ²	Observ.	CV	
MR1-C1	5	5	25	5.949	238.0	MTS		
MR1-C2	5	5	25	6.566	262.6	MTS		
MR1-C3	5	5	25	5.632	225.3	MTS		
					242.0		0.064	
MR2-C1	5	5	25	4.488	179.5	MTS		
MR2-C2	5	5	25	4.335	173.4	MTS		
MR2-C3	5	5	25	3.593	143.7	MTS		
					165.5		0.094	
MR3-C1	5	5	25	2.66	106.4	satec		
MR3-C2	5	5	25	4.23	169.2	satec		
MR3-C3	5	5	25	3.12	124.8	satec		
					133.5		0.198	
MR4-C1	5	5	25	5160	206.4	CENAPRED		a)
MR4-C2	5	5	25	5980	239.2	CENAPRED		
MR4-C3	5	5	25	6180	247.2	CENAPRED		
MR4-C4	5	5	25	6580	263.2	CENAPRED		
MR4-C5	5	5	25	5280	211.2	CENAPRED		
MR4-C6	5	5	25	5780	231.2	CENAPRED		
				5827	233.1			
MR4-C1	5	5	25	6700	268.0	CENAPRED		b)
MR4-C2	5	5	25	6700	268.0	CENAPRED		
MR4-C3	5	5	25	6720	268.8	CENAPRED		
MR4-C4	5	5	25	7840	313.6	CENAPRED		
MR4-C5	5	5	25	8200	328.0	CENAPRED		
MR4-C6	5	5	25	7500	300.0	CENAPRED		
				7277	291.1			
				6552	262.1	CV	0.14	
	Observaciones						0.305	c)
	Se indica el equipo donde se realizó el ensaye							
	a) primer tercio del muro MR4							
	b) segundo tercio del muro							
	c) CV de la resistencia promedio de los muros							

Cilindros de losas

	H	d	H/d	A	P	Esfuerzo
	cm	cm		cm ²	t	kg/cm ²
MR1-L1	20	10	2	78.5	25.68	327.0
MR1-L2	20	10	2	78.5	24.97	317.9
						322.4
MR2-L1	20	10	2	78.5	27.92	355.5
MR2-L2	20	10	2	78.5	27.9	355.2
						355.4
MR3-L1	20	10	2	78.5	26.77	340.8
MR3-L2	20	10	2	78.5	29.68	377.9
						359.4
MR4-L1	20	10.1	2	79.4	37.5	472.3
MR4-L2	20	10.0	2	79.1	38.4	485.5
MR4-L4	20	10.0	2	79.0	36.6	463.2
						473.7

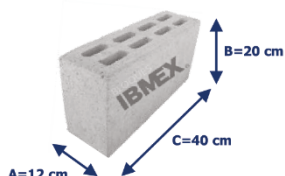
ANEXO B Ficha técnica de Block Multiperforado macizo (BH8S)



Block Multiperforado Macizo

12x20x40 BH8S

Es una pieza de 8 huecos de forma prismática y caras lisas con un 76% de solidez clasificada como maciza, producida de manera industrializada a base de vibrocompactación, manteniendo una uniformidad en la apariencia de las piezas y una mínima contracción por secado.



Pieza accesoria
Mitad 12x20x20

Cumple con las normas
NMX-C-404-ONNCE 2012
"Block, tabique, tabicón o ladrillo para
uso estructural"

Otros tamaños disponibles

15x20x40
20x20x40

Usos

- Construcción de edificaciones verticales en zonas sísmicas.
- Construcción de viviendas para condominio vertical de 3 o mas niveles de altura.
- Ideal para zonas de seguridad o cubos de escalera y pasillos debido al tiempo de resistencia al fuego.
- En muros de carga y divisorios donde se requiere un alto valor de aislamiento acústico.

Especificaciones técnicas

Medida nominal (AxBxC)	12x20x40 cm
Peso promedio por pieza	14.5 kg
Resistencia promedio a compresión de la pieza (fp)	≥150kg/cm ²
Área Neta	76%
Absorción inicial máxima	< 5 g/(cm ² x min ^{1/2})
Absorción máxima Total en 24 h	< 12 %
Contracción por secado	< 0.065 %
TOLERANCIAS DIMENSIONALES A = ± 2 mm; B = ± 3 mm; C = ± 2mm	



Especificaciones técnicas con nuestra solución Piensa²



Piezas por m ²	12 pzas/m ²
Resistencia de diseño a compresión (f _m) NMX-C-464-ONNCE	120 kg/cm ²
Resistencia de diseño a compresión diagonal (v _m) NMX-C-464-ONNCE	12 kg/cm ²
Módulo de elasticidad (E _m) *	96,000 kg/cm ²
Módulo de rigidez (G _m) *	19,200 kg/cm ²
Factor de comportamiento sísmico (Q) para muros confinados con piezas macizas	2
Rendimiento con Pegablock, mortero superior a tipo I, (f'c=240kg/cm ²)	25 kg/m ² 15.5 L/m ²
Peso del sistema (block + mortero) sin acabados	199 kg/m ² 1,658 kg/m ³
Resistencia al Fuego	1.5 h
Aislamiento Acústico (Sound Trasmission Class)	50 dB
Distorsión límite para seguridad de vida δ _{sv}	0.010

* Calculados conforme a la NTCM E_m=800 f'_m y G_m=0.2E_m

IBMEX® Es una Marca Registrada de Industrial Bloquera Mexicana
Antigua Carretera Federal México-Puebla Km 21.100 No. 755, Los Reyes La Paz, Edo de Mexico.
Teléfono: 55-5858-0370

Anexo C Apéndice A del NTC-Mampostería de la CDMX

APÉNDICE NORMATIVO A CRITERIO DE ACEPTACIÓN DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS A BASE DE MAMPOSTERÍA DISEÑADOS POR SISMO

A.1 Definiciones

A.1.1 *Distorsión*

Rotación del eje vertical del muro bajo carga lateral, con respecto a la vertical. Se puede obtener dividiendo el desplazamiento lateral aplicado a nivel de losa, y medido a la mitad de la longitud del muro, entre la altura del entrepiso.

A.1.2 *Ductilidad*

Cociente entre la distorsión a la resistencia del espécimen y la distorsión a la fluencia del modelo elastoplástico equivalente.

A.1.3 *Espécimen*

Estructura probada en el laboratorio que representa el arreglo común del refuerzo y condiciones de borde.

A.1.4 *Resistencia*

Máxima capacidad de carga en un ciclo o para una distorsión determinada. Puede ser medida o calculada.

A.1.5 *Rigidez de ciclo*

Pendiente de la secante que une los puntos de máxima distorsión, en sentidos positivo y negativo, para un mismo ciclo.

A.2 Notación

H	altura no restringida del muro, mm (cm)
n	número de niveles
Q	factor de comportamiento sísmico
R	resistencia lateral de diseño calculada del espécimen con un factor de resistencia unitario, N (kg)
R_a	resistencia lateral aproximada del espécimen, N (kg)
$R_{máx}$	resistencia (carga lateral máxima) del espécimen medida en laboratorio, N (kg)
R_y	resistencia de fluencia del modelo elastoplástico equivalente, kN (kg)
$R_{y_{máx}}$	resistencia experimental obtenida de la envolvente a la distorsión máxima admisible dividida entre 2, kN (kg)
Δ	desplazamiento lateral aplicado en la parte superior del espécimen y medido a la mitad de la longitud del muro, mm (cm)
$\gamma_{máx}$	Distorsión límite de entrepiso
θ	distorsión
$\theta_{máx}$	distorsión a la resistencia del espécimen, medida experimentalmente.
θ_y	distorsión a la fluencia del modelo elastoplástico equivalente
θ_u	distorsión a la falla experimental o última, cuando la resistencia del muro es $0.8R_{máx}$
λ	factor de sobrerresistencia de las conexiones.

A.3 Alcance

A.3.1 En este apéndice se establece el criterio de aceptación de sistemas constructivos a base de muros de mampostería que sean diseñados para resistir las fuerzas inducidas por los sismos. La aceptación se apoya en evidencia experimental de su desempeño, así como en análisis matemáticos.

A.3.2 El comportamiento del sistema constructivo evaluado deberá ser, al menos, igual al exhibido por la mampostería diseñada y construida según las modalidades de esta norma, y hecha con piezas macizas o huecas.

A.3.3 Se deberá establecer, mediante las pruebas de laboratorio de los especímenes, la resistencia a carga lateral, la capacidad de desplazamiento lateral, la ductilidad y la rigidez lateral.

A.3.4 El espécimen de prueba deberá mantener su integridad estructural y su capacidad de carga vertical a una distorsión al menos igual a $\gamma_{max}/2$.

A.4 Criterio de diseño de los especímenes

A.4.1 Antes de realizar las pruebas, se deberá contar con un proceso de diseño, en cuyo desarrollo se hayan incluido el comportamiento no lineal de los materiales, el efecto de conexiones y refuerzo, así como la influencia de las cargas cíclicas reversibles. Si el desarrollo del proceso requiere de pruebas preliminares, éstas no serán parte de las pruebas para aceptación objeto del Apéndice.

A.4.2 Los especímenes se diseñarán con este proceso de diseño. Se determinará la resistencia lateral calculada, R , a partir de las propiedades geométricas especificadas, de los esfuerzos de fluencia especificados del acero, de las resistencias de la mampostería especificadas y concreto (si aplica), de un análisis de compatibilidad de deformación y usando un factor de resistencia unitario.

A.4.3 Se diseñarán los especímenes de manera tal que la resistencia lateral asociada a la falla de la conexión más débil sea λ veces la resistencia lateral aproximada del espécimen, R_a . El término conexión se refiere, por ejemplo, a la unión entre muros transversales u oblicuos, a la unión del espécimen con la cimentación y con sistemas de piso o techo, y a la unión entre elementos que proporcionan resistencia, rigidez o confinamiento, como es el caso de castillos en la mampostería confinada. El valor mínimo del factor de sobrerresistencia de las conexiones, λ , será 1.3.

A.4.4 La resistencia lateral aproximada del espécimen, R_a , se calculará usando el proceso de diseño del sistema, a partir de las propiedades geométricas y mecánicas reales (medidas), con un factor de resistencia unitario, incluyendo, si aplica, los efectos de endurecimiento por deformación del acero.

A.5 Especímenes de pruebas

A.5.1 Se probará, al menos, un espécimen para cada configuración característica del refuerzo, o condiciones de borde.

A.5.2 Los especímenes se diseñarán y construirán a una escala que permita reproducir fielmente los fenómenos de transmisión de carga, en particular en las conexiones y bordes. La menor escala permitida será un medio.

A.5.3 Se deberán reproducir las condiciones de borde (restricciones a giros o desplazamientos) de la configuración estudiada.

A.6 Laboratorio

A.6.1 Las pruebas se llevarán a cabo en un laboratorio de reconocido prestigio y que cuente con equipos calibrados. El programa experimental y los análisis de datos deberán ser por el Instituto para la Seguridad de las Construcciones de la Ciudad de México quien podrá aprobar el sistema si lo considera apropiado.

A.7 Protocolo de ensayo

A.7.1 Los especímenes serán probados bajo la serie de ciclos a deformación controlada de la fig. A.7.1.

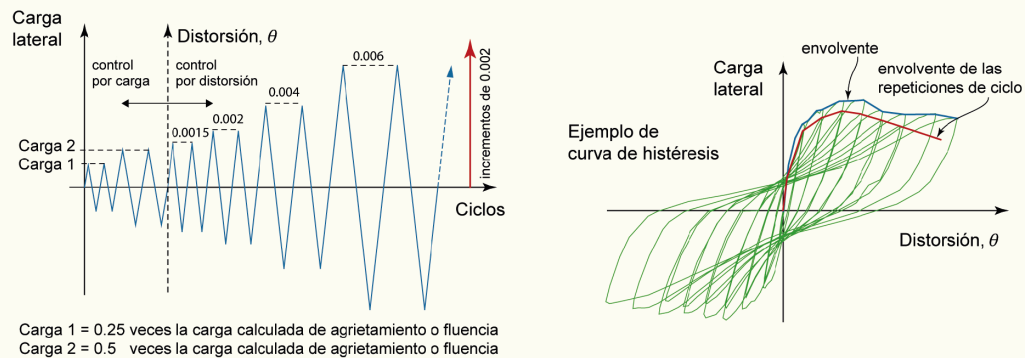


Figura A.7.1 – Historia de carga y curva carga lateral–distorsión

A.7.2 Las pruebas se harán bajo una carga vertical constante que represente las acciones permanentes del Reglamento consistentes con el uso que se pretende dar al sistema constructivo, así como con la magnitud (número de niveles).

A.7.3 Para cada distorsión se aplicarán dos ciclos. Los dos primeros pares de ciclos se aplicarán controlando por carga, y corresponderán a la cuarta parte y a la mitad de la carga calculada de agrietamiento inclinado del muro o de fluencia del refuerzo vertical. A partir de ahí se aplicarán las distorsiones de la fig. A.7.1 hasta alcanzar la falla o la resistencia se reduzca un 20% respecto a la carga máxima.

A.7.4 La fuerza lateral cíclica alternada se aplicará de modo que su distribución sea sensiblemente uniforme a lo largo del muro. Se aceptará que la fuerza lateral se aplique en los extremos superiores opuestos del muro, según el semiciclo que se trate.

A.7.5 Durante los ensayos se llevará, al menos, un registro gráfico que defina la curva carga lateral–distorsión, uno fotográfico del espécimen al término de cada pareja de ciclos a una misma distorsión y uno escrito con la fecha de prueba, nombre del operador y la información de los sucesos relevantes ocurridos durante el ensaye, tales como agrietamientos, desprendimientos, fracturas, ruidos, fugas de aceite, y otros.

A.8 Informe de pruebas

A.8.1 El informe de las pruebas deberá contener, como mínimo, lo siguiente:

A.8.2 Fecha de la prueba, nombre del laboratorio, operadores y autores, nombre del supervisor y del patrocinador.

A.8.3 Teoría usada para calcular la resistencia (con factor de resistencia unitario) y el valor predicho. Si se espera más de un modo de falla, se deberán incluir las teorías y resistencias asociadas a cada modo de falla.

A.8.4 Detalles de los especímenes ensayados: dimensiones, cuantía y detallado de refuerzo, así como de la construcción. Se deberán incluir figuras claras e ilustrativas.

A.8.5 Propiedades de los materiales, tanto aquellas especificadas en el diseño, como las medidas mediante probetas en el laboratorio.

A.8.6 Descripción del arreglo para aplicación de la carga, con fotos o figuras.

A.8.7 Tipo, localización y propósito de los sensores usados en la instrumentación. Se deberán incluir, si aplica, las características del sistema de captura de datos. Se presentarán fotos y figuras.

A.8.8 Gráfica de la historia de distorsiones aplicada al espécimen.

A.8.9 Descripción del desempeño observado durante los experimentos, con fotos del espécimen inmediatamente después de algún suceso relevante. Al menos, se incluirán fotos correspondientes al primer agrietamiento inclinado, a la formación de un patrón estable de agrietamiento, a la distorsión asociada a la resistencia medida, a la distorsión asociada a una caída del 20 por ciento de la resistencia medida y al final de la prueba. Se deberá reportar el agrietamiento máximo del agrietamiento diagonal.

A.8.10 Gráfica de la curva carga lateral–distorsión (fig. A.7.1).

A.8.11 Gráfica de la curva rigidez de ciclo–distorsión (fig. A.8.11).

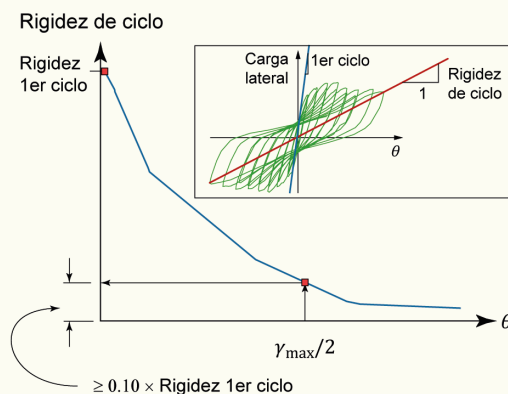


Figura A.8.11 – Degradación de rigidez de ciclo

A.8.12 El modelo elastoplástico equivalente de la envolvente, en ambas direcciones, de la curva de fuerza cortante contra distorsión, definido por la distorsión a la fluencia θ_y y la fuerza lateral de fluencia R_y . El modelo elastoplástico equivalente se obtiene de manera que se cumpla que:

- El área bajo la curva del modelo elastoplástico equivalente sea igual al área bajo la curva de la envolvente de la curva fuerza lateral contra distorsión obtenida experimentalmente considerada hasta la distorsión última θ_u ; y
- La ordenada de la intersección de la rama ascendente del modelo elastoplástico equivalente con la envolvente experimental sea $0.6 R_y$ (fig.A.8.12).

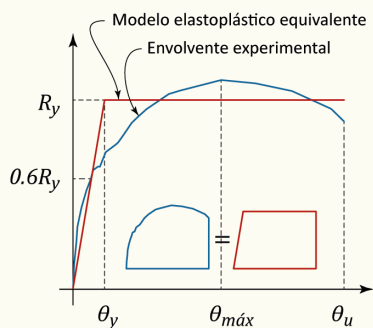


Figura A.8.12 – Modelo elastoplástico equivalente

A.9 Criterio de aceptación

Se considerará que el espécimen satisface el criterio de aceptación si se cumplen todos los criterios siguientes en ambos sentidos de comportamiento cíclico:

A.9.1 La resistencia medida, $R_{m\acute{a}x}$, es menor que λR (fig. A.9.1), donde λ es el factor de sobrerresistencia para las conexiones descrito en A.4. Lo anterior se comprobará por el hecho de que no falle ninguna conexión de las que se señalan en A.4.

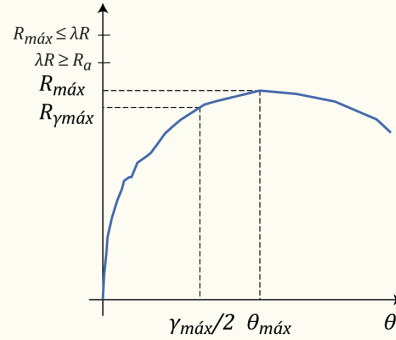


Figura A.9.1 – Resistencia y resistencia a la distorsión máxima admisible

A.9.2 El espécimen alcanza una resistencia, $R_{m\acute{a}x}$, igual o superior a la calculada, R , para una distorsión, $\theta_{m\acute{a}x}$, mayor o igual a $\gamma_{m\acute{a}x}/2$, donde $\gamma_{m\acute{a}x}$ es la distorsión límite de entrepiso especificada en la NTC-Sismo, de acuerdo con el tipo de pieza y a si el muro tiene o no refuerzo horizontal (fig. A.9.1).

A.9.3 El cociente

$$\frac{R_{\gamma m\acute{a}x}}{R_{m\acute{a}x}} \text{ sea mayor o igual a } \begin{cases} 0.6 & \text{para muros sin refuerzo horizontal} \\ 0.8 & \text{para muros con refuerzo horizontal} \end{cases}$$

donde $R_{\gamma m\acute{a}x}$ es la resistencia que corresponde a una distorsión igual a la distorsión $\gamma_{m\acute{a}x}/2$, $\gamma_{m\acute{a}x}$ se define en la NTC-Sismo, dependiendo del tipo de pieza y de si el muro tiene refuerzo horizontal o no (fig. A.9.1).

A.9.4 La rigidez de ciclo para la distorsión $\gamma_{m\acute{a}x}/2$ no sea menor que 0.1 veces la rigidez de ciclo calculada a partir del primer ciclo aplicado en el experimento (fig. A.8.11).

A.9.5 La ductilidad calculada como $\theta_{m\acute{a}x}/\theta_y$ deberá cumplir que

$$\frac{\theta_{m\acute{a}x}}{\theta_y} \geq 1 + 4(Q - 1)$$

donde $\theta_{m\acute{a}x}$ es la distorsión a la resistencia y θ_y es la distorsión a la fluencia del modelo elastoplástico equivalente, como se define en A.8.12, donde Q es el valor máximo admisible del factor de comportamiento sísmico en función del tipo de pieza y de si se incluye refuerzo horizontal, que se indica en la NTC-Sismo.