



**Sistema Nacional de Protección Civil
Centro Nacional de Prevención de Desastres**

**ENSAYES DE MUROS DE BLOQUE DE CONCRETO DE RESISTENCIA ALTA, CON
DIFERENTE MODALIDAD DE REFUERZO**

Leonardo E. Flores Corona¹
José Álvaro Pérez Gómez²
Juan José Pérez Gavilán Escalante³

Dirección de Investigación

¹Subdirección de Vulnerabilidad Estructural

²Industrial Bloquera Mexicana

³Instituto de Ingeniería de la UNAM

Diciembre de 2020

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	1
CAPÍTULO 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL	3
2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ESPECÍMENES	3
2.1.1 Piezas de mampostería.....	3
2.1.2 Probetas para ensayos de materiales.....	3
2.1.3 Especímenes para ensayos a fuerza horizontal en su plano	5
2.1.4 Propiedades nominales de los materiales.....	7
2.2 PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA.....	8
2.2.1 Resistencia a compresión	8
2.2.2 Resistencia a flexocompresión.....	8
2.2.3 Resistencia a cortante.....	9
2.2.4 Resistencia esperada en cada espécimen.....	11
2.3 PREDICCIÓN DE LA RIGIDEZ.....	12
2.4 INSTRUMENTACIÓN	13
2.5 APLICACIÓN DE CARGAS	13
2.5.1 Marco de carga	13
2.5.2 Historia de carga	14
CAPÍTULO 3 RESULTADOS GENERALES DE LOS ENSAYES.....	17
3.1 RESULTADOS DE ENSAYES DE MATERIALES.....	17
3.2 ENSAYES DE MUROS ANTE FUERZAS SÍSMICAS.....	18
3.2.1 Espécimen MBRI-7 ($p_{hf,yh}=0$).....	18
3.2.2 Ensaye del espécimen MBRI-8 ($p_{hf,yh}=3$ kg/cm ²).....	19
3.2.3 Espécimen MBRI-9 ($p_{hf,yh}=5.7$ kg/cm ²).....	20
3.2.4 Espécimen MBRI-10 ($p_{hf,yh}=7.5$ kg/cm ²).....	21
3.2.5 Espécimen MBRI-11 ($p_{hf,yh}=11.3$ kg/cm ²).....	22
3.2.6 Espécimen MBRI-12 ($p_{hf,yh}=5.7$ kg/cm ²).....	23
3.2.7 Comparación de los seis especímenes.....	24
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES	27
AGRADECIMIENTOS.....	27
APÉNDICE A RESULTADOS DE ENSAYES DE MATERIALES	29
A.1 GEOMETRÍA Y ENSAYES A COMPRESIÓN DE BLOQUES DE CONCRETO	29
A.2 COMPRESIÓN EN PILAS DE MAMPOSTERÍA	30
A.3 COMPRESIÓN DIAGONAL EN MURETES.....	31
A.4 COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO.....	33
APÉNDICE B CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES.....	35
B.1 CIMENTACIÓN Y CABEZAL	35
B.2 CONSTRUCCIÓN DEL ESPÉCIMEN CONFINADO (MBC-2)	36
B.3 CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES CON REFUERZO INTERIOR	37
B.4 CONSTRUCCIÓN DEL ESPÉCIMEN MBRI-12, PIEZAS RANURADAS “OPEN-END”.....	38
B.4.1 Características del espécimen	38
B.4.2 Consideraciones en el cálculo de la resistencia.....	39
B.4.3 Proceso constructivo.....	39
REFERENCIAS.....	41

RESUMEN

Se ensayaron siete muros a tamaño natural de mampostería reforzada interiormente, construidos con bloques huecos de concreto de resistencia alta a compresión. Uno de los muros fue de mampostería confinada con castillos, como modelo de comparación, y los otros seis se reforzaron interiormente, manteniendo el mismo refuerzo vertical y variando el refuerzo horizontal colocado cada dos hiladas en las juntas horizontales de mortero. Para el refuerzo horizontal se usaron alambres estirados en frío de esfuerzo de fluencia $f_{yh} = 6000 \text{ kg/cm}^2$, dando el producto de la cuantía p_h por el esfuerzo de fluencia valores de: $p_h \times f_{yh} = 0, 3, 5.7, 7.5, 11.3 \text{ kg/cm}^2$ y con mortero convencional (1:¼:3), salvo el último espécimen que usó mortero industrializado y piezas especiales con una ranura en la cara del extremo para colocarlas donde hay refuerzo vertical.

Los ensayos se realizaron con carga vertical constante de 3 kg/cm^2 y aplicando carga lateral cíclica reversible en la parte superior de los muros. Los especímenes se instrumentaron con medidores externos y deformímetros eléctricos adheridos a alambres y barras de refuerzo. Como conclusión se verificó la aplicabilidad de las fórmulas de diseño incluidas en las normas de mampostería, NTCM de 2020 para muros con piezas de concreto reforzados interiormente, donde la contribución del refuerzo horizontal está limitada por resistencia a compresión de la mampostería. Se comprobó la participación del refuerzo horizontal en el aumento de la resistencia y capacidad de deformación hasta un orden de dos veces la del muro sin refuerzo horizontal. Finalmente, se comprobó un desempeño del espécimen con piezas ranuradas similar al equivalente de piezas sin ranura.

ABSTRACT

Five full-scale reinforced masonry walls, built with hollow concrete blocks with high compressive strength, were tested. The variable studied was the amount of horizontal reinforcement placed every two courses in the horizontal mortar joints, with cold drawn wires with yield stress $f_{yh} = 6000 \text{ kg/cm}^2$, giving the product of the: $p_h \times f_{yh} = 0, 3, 5.7, 7.5$ and 11.3 kg/cm^2 with conventional mortar (1:¼:3), and the last wall made with pre-dosified mortar and a special kind of block with an open end to insert in the vertical steel bar. The tests were carried out with a constant vertical load of 3 kg/cm^2 and applying a reversible cyclical lateral load on the upper part of the walls. The specimens were instrumented with external transducers and electrical strain gauges attached to wires and reinforcing bars. As a conclusion, the applicability of the design formulas included in the Mexico City Building Code (2017) was verified, where the contribution of the horizontal reinforcement is limited by the compressive strength of the masonry. The participation of the horizontal reinforcement in increasing the strength and deformation capacity was observed up to an order of twice that of the wall without horizontal reinforcement. Finally, the performance of the specimen with open-end masonry units was similar to the control specimen.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El estudio experimental del comportamiento estructural de muros de mampostería ha tenido un avance constante en las últimas décadas con series de ensayos experimentales lo que ha llevado a la actualización de las normas de diseño de mampostería del reglamento de construcciones de la Ciudad de México en sus versiones de 2004 y 2017.

Sin embargo, en los últimos años no se ha incluido el estudio de muros de bloque con refuerzo horizontal entre las hiladas. Por lo tanto, en el CENAPRED se propuso el estudio del comportamiento de muros de bloque hueco de concreto estudiando las principales variables en la modalidad de mampostería con refuerzo interior. En una primera etapa se ensayaron ante fuerza lateral cíclica muros de bloque hueco de concreto de resistencia a compresión baja, en los cuales se varió la cuantía de refuerzo horizontal, la carga vertical mantenida durante cada ensayo y el detalle de anclaje de los alambres horizontales (Flores, 2019).

En esta segunda etapa del proyecto se estudió el comportamiento de muros de mampostería de piezas de concreto de resistencia alta a compresión, reforzados con distinta cuantía de acero horizontal entre las hiladas, y manteniendo la misma carga vertical.

Adicionalmente se incluyó un espécimen elaborado con bloques de concreto especiales denominadas “open end”, (desarrollo de IBM) con ranuras en una o dos paredes transversales de la pieza, pegadas con un mortero seco predosificado superior a un tipo I denominado Pegablock-Stonecrete®. El objetivo de este ensayo adicional fue revisar si su desempeño era equivalente a un muro idéntico pero con piezas convencionales doble hueco de similar resistencia, revisando si pudieran presentarse fallas locales en las piezas ranuradas que dieran lugar a afectación de la resistencia del muro o en su capacidad de distorsión.

1.1 OBJETIVOS

- Verificar experimentalmente la resistencia ante carga horizontal cíclica reversible de muros de mampostería de bloque de concreto en la modalidad de refuerzo interior, variando las cuantías de refuerzo horizontal.
- Comparar el comportamiento de muros con refuerzo interior con el de un espécimen de comparación de mampostería confinada y sin refuerzo horizontal.
- Verificar la predicción teórica de resistencia según las normas de diseño de mampostería del 2020 del reglamento de construcciones de la Ciudad de México.
- Evaluar la rigidez inicial y la degradación de rigidez con el daño en los especímenes.
- Comparar el comportamiento de un espécimen con un mortero industrializado de alto desempeño y piezas especiales con ranuras en las caras contra el de su equivalente con bloques y mortero convencional.
- En su caso recomendar modificaciones al procedimiento de diseño y/o construcción si se determina que mejorará la respuesta estructural.

CAPÍTULO 2

PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ESPECÍMENES

2.1.1 Piezas de mampostería

Las piezas que se usaron fueron bloques lisos doble hueco de concreto, con dimensiones de fabricación de 120 mm de ancho, 200 mm de alto y 400 mm de largo. Cinco de los muros se elaboraron con mortero de proporcionamiento en volumen de cemento, cal y arena de 1:¼:3, correspondiente a mortero Tipo I, y un muro con mortero seco predosificado. Para comparación se construyó un muro adicional pero de mampostería confinada (sin refuerzo horizontal), denominado MBC-2. La geometría de las piezas se muestra en la Figura 2.1.

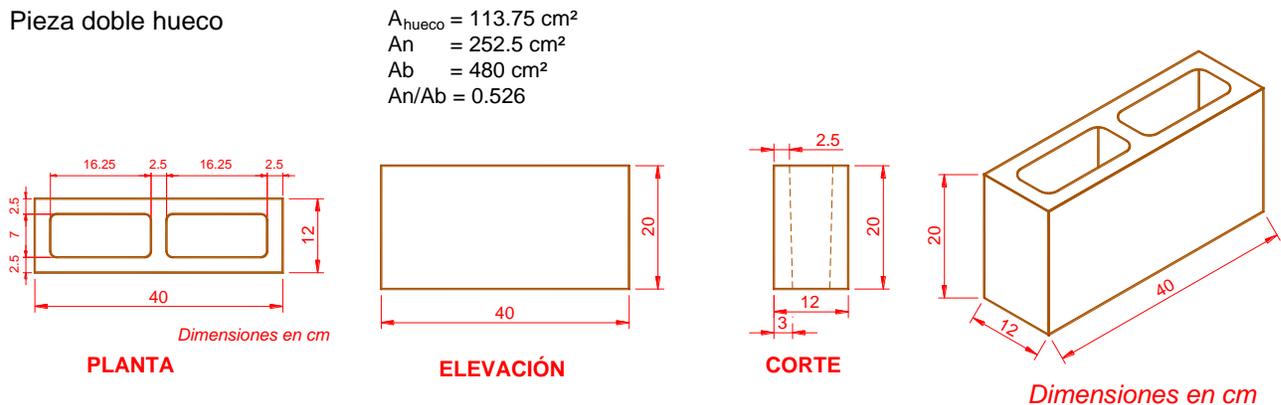


Figura 2.1 Piezas de concreto vibrocomprimido doble hueco (ver pieza ranurada en el Apéndice B)

2.1.2 Probetas para ensayos de materiales

Para caracterizar las propiedades de los materiales utilizados como mampostería, mortero, concreto y acero de refuerzo se realizaron ensayos de laboratorio acorde a lo que piden las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería (NTCM) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (ahora Ciudad de México), y que refieren a diversas normas mexicanas de especificaciones y métodos de ensaye (CDMX, 2020). Para los bloques se realizaron ensayos de compresión de piezas según la norma mexicana NMX-C-036-ONNCCE (Onncce, 2013), las cuales se cabecearon con yeso y cemento especial de alta resistencia en sus caras horizontales.

La resistencia de diseño a compresión de los muros se obtuvo de ensayos de probetas construidas con los bloques unidos por el mortero usado en los muros. Estas probetas se denominan pilas y están descritas en la norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE (Onncce, 2010).

Para evaluar la resistencia de muros de mampostería ante fuerza horizontal se realizó el ensaye de especímenes cuadrados de tamaño reducido (muretes) sometidos a compresión a lo largo de una de sus diagonales, siguiendo también la norma NMX-C-464-ONNCCE. Dicho ensaye genera un agrietamiento a lo largo de la diagonal cargada que puede o no combinarse con una falla por adherencia y deslizamiento entre las juntas de mortero y las piezas.

Siguiendo los requerimientos de las normas de mampostería (CDMX, 2020), así como la norma mexicana de ensaye de muretes y pilas (Onncce, 2010) el tamaño mínimo del murete debía ser de una y media piezas en la base y el número de hiladas necesario para que sea cuadrado y las pilas tener al menos tres piezas y una relación altura a espesor de entre 2 y 5. Por ello las pilas y muretes se construyeron de tres hiladas de altura, se muestran esquemáticamente en la Figura 2.2.

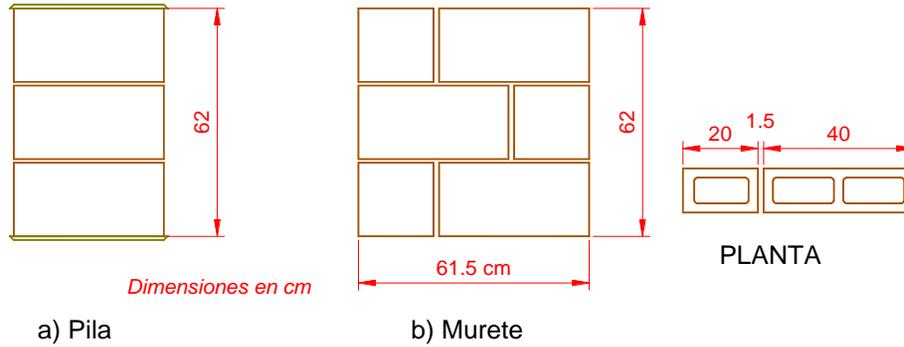


Figura 2.2 *Probetas para ensayo a compresión y compresión diagonal de mampostería*

En la En la Figura 2.3 se muestra la geometría del ensayo a compresión diagonal de muretes en un marco de carga armado especialmente para ello en el laboratorio ya que por el tamaño del espécimen no era factible ensayarlo en la máquina universal.

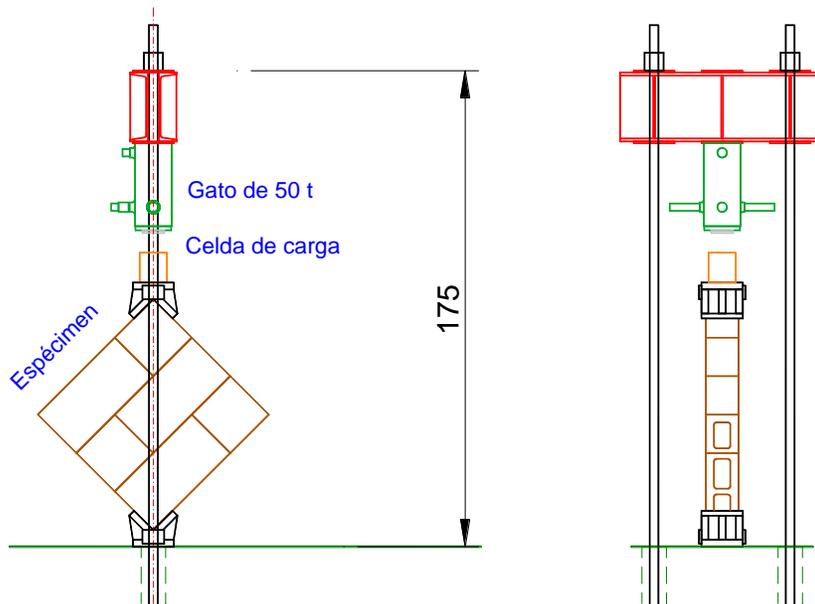


Figura 2.3 *Montaje del ensayo de muretes a compresión diagonal*

Para cada muro se construyeron simultáneamente al mismo tres probetas de pilas y tres de muretes. El número de especímenes se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Número y características de pilas y muretes

No.	Espécimen	Pilas	Muretes	Número de probetas
1	MBRI-7	Pila-1, 2, 3	Mur-1, 2, 3	3
2	MBRI-8	Pila-4, 5, 6	Mur-4, 5, 6	3
3	MBRI-9	Pila-7, 8, 9	Mur-7, 8, 9	3
4	MBRI-10	Pila-10, 11, 12	Mur-10, 11, 12	3
5	MBRI-11	Pila-13, 14, 15	Mur-13, 14, 15	3
6	MBRI-12	Pila-16, 17, 18	Mur-16, 17, 18	3
7	MBC-2	Pila-19, 20, 21	Mur-19, 20, 21	3
Total de cada tipo:				21

2.1.3 Especímenes para ensayos a fuerza horizontal en su plano

Para fines de caracterizar el comportamiento ante fenómenos como sismo y viento, que producen fuerzas horizontales, se realizó la construcción y ensaye de muros a tamaño natural ensayados ante fuerza horizontal cíclica que representaría el efecto de un sismo.

2.1.3.1 Variables de estudio

Las variables a estudiar se identificaron como las siguientes:

- Resistencia de las piezas: bloques tipo doble hueco de concreto de resistencia alta.
- Mortero de pega: tipo I hecho en obra y mortero industrializado Stonecrete Pegablock®.
- Concreto de relleno: concreto de 150 kg/cm² con grava de TMA=10 mm.
- Relación de aspecto: se estudiará solo muros cuadrados ($H/L = 1$).
- Tipo de ensaye: muros de carga ante fuerza horizontal cíclica reversible cuasi-estática.
- Refuerzo vertical.
 - El muro confinado por castillos no llevan refuerzo vertical a lo largo del muro. Los castillos se reforzaron con cuatro barras del no. 4.
 - Los especímenes con refuerzo interior llevaron dos barras del no. 6 en celdas consecutivas de los bordes verticales, una en cada celda; en la parte media del muro (el alma) se colocó un arreglo de barras verticales cada 60 cm lo que implicó reforzar y rellenar una celda y dejar los siguientes dos huecos libres. La excepción es el espécimen MBRI-7 que solo llevó el refuerzo vertical de los bordes.
- Refuerzo horizontal.
 - El muro confinado no llevó refuerzo horizontal.
 - La serie de muros con refuerzo interior varió en la cuantía de acero horizontal, desde nulo refuerzo, cuantía mínima, una intermedia y dos valores mayores que superan lo que se considera como máximo en el cálculo de su contribución a la resistencia.

2.1.3.2 Geometría y refuerzo

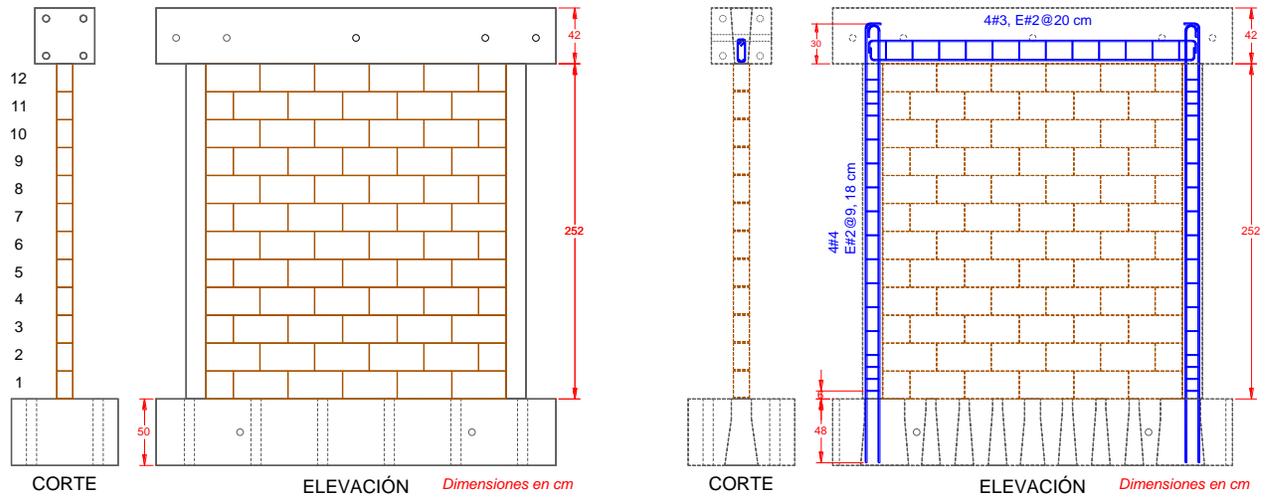
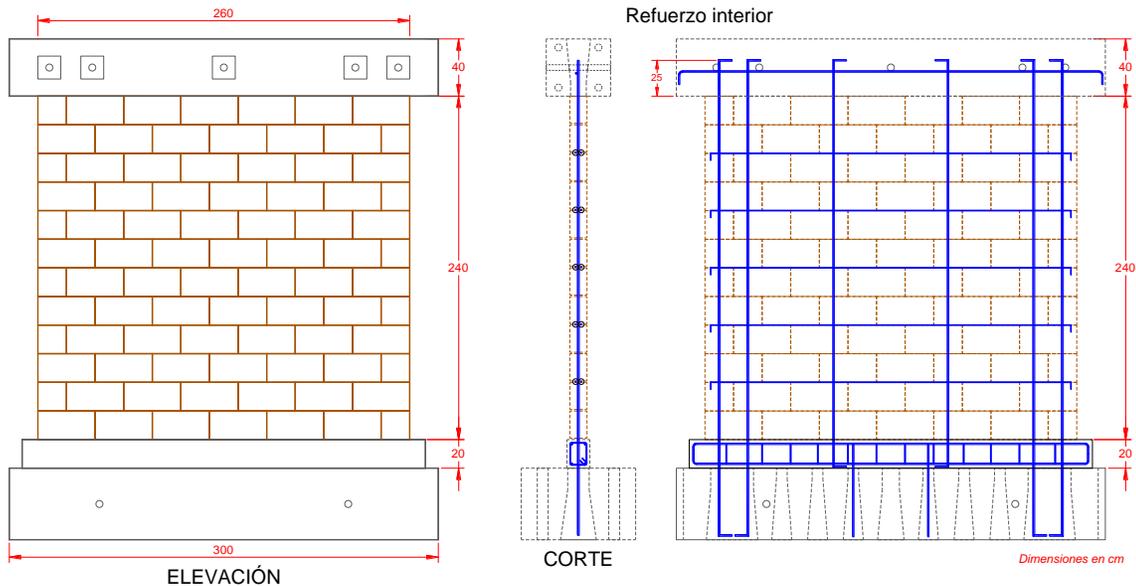
Considerando las anteriores variables se redujo el número de combinaciones a los especímenes mostrados en la Tabla 2.2; los de refuerzo interior midieron 266×252 cm y el confinado fue de 255×252 cm, todos con una carga vertical que corresponde a un esfuerzo de 0.3 MPa (3 kg/cm²):

La nomenclatura de MBRI significa: “Muro de Bloque de concreto con Refuerzo Interior” y un número consecutivo que continúa la numeración de los especímenes ensayados por Flores (2019). El muro confinado fue el MBC-2 (Muro de Bloque Confinado) siendo el ‘2’ ya que el primero se hizo también en 2019.

Tabla 2.2 Número y características de especímenes ensayados a carga lateral cíclica

No.	Nombre	Refuerzo en extremos	Refuerzo vertical	Refuerzo horizontal	$\rho_h \times f_{yh}$ kg/cm ²	Mortero
1	MBRI-7	2#6	- - -	- - -	0	tipo I
2	MBRI-8	2#6	3#3	2(5/32) @42	3.0	tipo I
3	MBRI-9	2#6	3#3	5/32 + 2(3/16) @42	5.7	tipo I
4	MBRI-10	2#6	3#3	2(1/4) @ 42	7.5	tipo I
5	MBRI-11	2#6	3#3	3(1/4) @ 42	11.3	tipo I
6	MBRI-12	2#6	3#3	5/32 + 2(3/16) @42	5.7	industr.
7	MBC-2	castillos 4#4	- - -	- - -	0	tipo I

Los muros se desplantaron sobre vigas de cimentación de concreto reforzado de 80×50 cm y se les conectó en su parte superior una viga o cabezal de 45×42 cm. En la Figura 2.4 se muestra la geometría de los muros, mientras que la sección transversal y su armado se muestran en la Figura 2.5.

**Figura 2.4 a) Geometría del espécimen confinado MBC-2****Figura 2.4 b) Geometría y armado de los especímenes con refuerzo interior**

Nótese que el espécimen MBRI-7 no tiene refuerzo vertical a lo largo del muro, solo lleva en los extremos para evitar la falla por flexión. Aunque ese refuerzo no cumple los requisitos de mampostería reforzada interiormente se consideró útil para comparar la contribución del refuerzo horizontal directamente contra un muro sin él. También se compara con el muro confinado MBC-2 que tampoco tiene refuerzo horizontal.

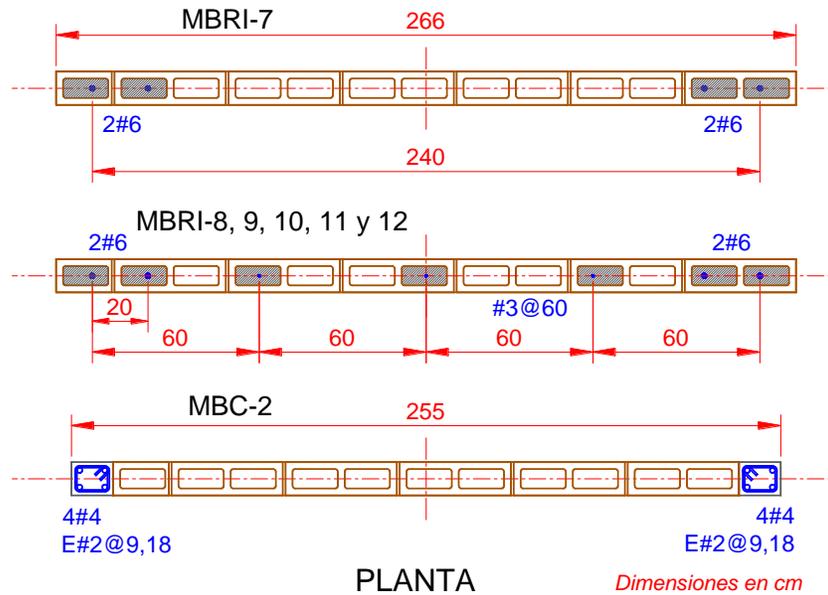


Figura 2.5 Sección transversal y armado vertical de los especímenes

El refuerzo horizontal se colocó mediante dos o tres alambres en una misma junta horizontal de mortero separada cada dos hiladas. El diámetro de los alambres se varió para lograr las cuantías de refuerzo horizontal deseadas, p_h . En la Figura 2.6 se muestra el acomodo del refuerzo horizontal colocado recto y anclado a las celdas reforzadas de los extremos.

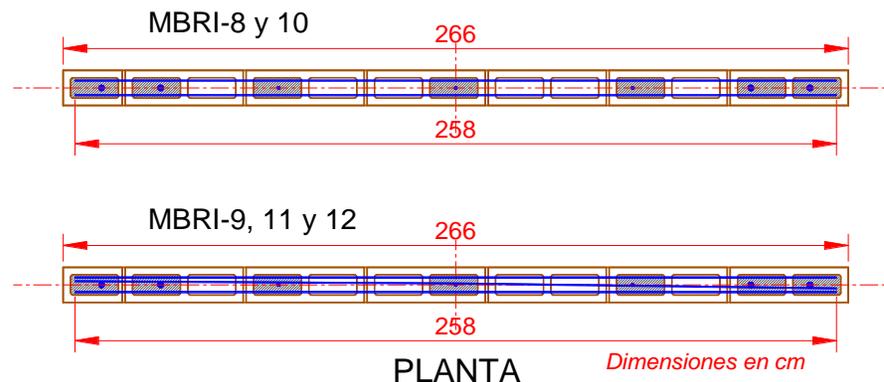


Figura 2.6 Refuerzo horizontal mediante alambres de acero estirado en frío

2.1.4 Propiedades nominales de los materiales

El concreto de relleno de las celdas verticales se dosificó para lograr una resistencia a compresión f_c' de 12.5 MPa (125 kg/cm²), para ello se utilizó grava con un TMA de 10 mm (³/₈ pulg) y un aditivo fluidificante.

Para el cálculo preliminar de las resistencias nominales de los muros se supusieron los siguientes valores de diseño: $f_m' = 5$ MPa (50 kg/cm²) y $v_m' = 0.35$ MPa (3.5 kg/cm²).

Para el refuerzo vertical en el interior del muro, así como el de las dalas, se utilizaron barras corrugadas con esfuerzo de fluencia nominal f_y de 420 MPa (4200 kg/cm²). El refuerzo horizontal se resolvió con alambres corrugados horizontales, con diámetros de 3.97, 4.76 y 6.35 mm (5/32, 3/16 y 1/4 de pulgada) y esfuerzo nominal de fluencia de $f_{yh} = 600$ MPa (6000 kg/cm²), del tipo estirado en frío.

Las propiedades nominales de los materiales fueron consideradas al inicio del estudio y para el diseño del ensaye en cuanto a la resistencia y posible deformación estimada. Los valores usados fueron:

* Concreto de vigas de cimentación	f_c'	= 60 MPa	(600 kg/cm ²)
* Concreto de anclaje a cabezal y cim	f_c'	= 25 MPa	(250 kg/cm ²)
* Concreto de castillos del MBC-2	f_c'	= 25 MPa	(250 kg/cm ²)
* Concreto de relleno	f_c'	= 12.5 MPa	(125 kg/cm ²)
* Piezas concreto doble hueco	f_p'	= 7 MPa	(70 kg/cm ²)
	f_m'	= 5 MPa	(50 kg/cm ²)
	v_m'	= 0.35 MPa	(3.5 kg/cm ²)
* Acero vertical	f_y	= 420 MPa	(4200 kg/cm ²)
* Acero horizontal	f_{yh}	= 600 MPa	(6000 kg/cm ²)

2.2 PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA

Para la planeación del ensaye, diseño del marco de carga, selección de los instrumentos y establecimiento de la historia de carga, fue necesario contar de antemano con la mejor predicción posible del comportamiento: resistencia máxima, deformación cuando se generen los agrietamientos o fluencia y deformación máxima (giros, desplazamientos).

Para el cálculo de la resistencia del muro se estimó que podría llegar a presentarse uno de tres posibles modos de falla: 1) por flexión, 2) por tensión diagonal debido a fuerzas cortantes y 3) por deslizamiento de la base. En las siguientes secciones se presenta una estimación de las resistencias estimadas.

2.2.1 Resistencia a compresión

La resistencia a carga vertical P_R se calcula con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, NTC-M (CDMX, 2020) como:

$$P_R = F_R F_E (f_m' A_T + \Sigma A_s f_y) \leq P_{R,m\acute{a}x} \quad (2.1)$$

en muros con refuerzo interior:

$$P_{R,m\acute{a}x} = 1.25 F_R F_E f_m' A_T \quad (2.2)$$

donde

F_R factor de resistencia (se tomará $F_R = 1$ para los ensayes; normalmente es 0.6);

F_E factor de excentricidad y esbeltez; se puede tomar como 0.7 para muros sin excentricidad;

A_T área de la sección transversal del muro (área en planta = longitud por espesor del muro, $L \times t$, incluye los castillos en caso de tenerlos)

ΣA_s suma de todas las áreas del refuerzo vertical a lo largo del muro;

f_y esfuerzo de fluencia de la correspondiente barra de refuerzo vertical.

2.2.2 Resistencia a flexocompresión

El modo de falla por flexión puede ocurrir si las barras en el extremo a tensión fluyen y/o se aplasta el extremo del muro a compresión.

Para la resistencia a momento y carga axial se puede construir un diagrama momento-curvatura para la carga axial considerada. También se puede construir el diagrama de interacción momento-carga vertical.

Un cálculo simple de la resistencia a la flexión se puede realizar usando el método optativo que vienen en las NTC-M para muros a flexo-compresión (CDMX, 2020):

$$M_R = F_R A_s f_y d' + 0.3 P_u d, \quad \text{si } P_u < P_R/3 \quad (2.3)$$

donde

- F_R factor de resistencia, se tomó igual a 1.0 para la predicción en estos ensayos (normal 0.7);
 A_s área del refuerzo colocada en cada extremo;
 d' distancia entre los centroides del acero colocado en los extremos del muro;
 d peralte efectivo (distancia del centroide del acero a tensión al borde a compresión); y
 P_u carga axial de diseño sobre el muro, en este caso será la carga colocada sin factorizar P .

Tomando en cuenta la geometría de los especímenes y las propiedades nominales de los materiales se obtienen los resultados de la Tabla 2.3. El cortante asociado al momento resistente se calculó dividiendo el momento entre la altura del muro hasta la elevación de aplicación de la carga que es de 2.72 m: $V_{MR} = M_R/2.72$.

Tabla 2.3 Resistencias nominales a flexo-compresión con cálculo simplificado

No.	Espécimen	Ref. en extremos	A_s cm ²	d cm	P t	P_R t	M_0 t-m	$M_{R, \text{ simple}}$ t-m	$V_{MR, \text{ simple}}$ t
1	MBRI-7	2#6	5.7	246	9.58	139.7	54.1	61.2	22.5
2	MBRI-8	2#6	5.7	246	9.58	139.7	54.1	61.2	22.5
3	MBRI-9	2#6	5.7	246	9.58	139.7	54.1	61.2	22.5
4	MBRI-10	2#6	5.7	246	9.58	139.7	54.1	61.2	22.5
5	MBRI-11	2#6	5.7	246	9.58	139.7	54.1	61.2	22.5
6	MBRI-12	2#6	5.7	246	9.58	139.7	54.1	61.2	22.5
7	MBC-2	Castillo 4#4	5.08	248	9.18	137.0	51.2	58.0	21.3

2.2.3 Resistencia a cortante

2.2.3.1 Cortante por tensión diagonal

a) Contribución de la resistencia a cortante de la mampostería

Para predecir la resistencia de los especímenes se tomó el cálculo de las NTCM (2020). La expresión es:

$$V_{mR} = F_R (0.5 v_m' A_T + 0.3 P) \cdot f \leq 1.5 F_R v_m' A_T \cdot f \quad (2.4)$$

donde

- F_R factor de resistencia, se tomó igual a 1.0 para la predicción en estos ensayos (normal 0.7);
 v_m' resistencia a compresión diagonal de la mampostería;
 A_T área transversal del muro;
 P carga axial sobre el muro;
 f factor que toma en cuenta la relación de aspecto; para muros cuadrados $f = 1$.

Se supuso preliminarmente una resistencia nominal a cortante de $v_m' = 0.35$ MPa (3.5 kg/cm²). Las áreas transversales y cargas verticales fueron:

$$A_T = L \cdot t = 12 \times 266 = 3192 \text{ cm}^2; \quad \sigma = 3 \text{ kg/cm}^2, \quad P = \sigma \cdot A_T = 9.58 \text{ t, para muros con refuerzo interior,}$$

$$A_T = 12 \times 255 = 3060 \text{ cm}^2; \quad \text{y} \quad \sigma = 3 \text{ kg/cm}^2, \quad P = 9.18 \text{ t, para el muro confinado.}$$

a) Contribución de la resistencia a cortante del refuerzo horizontal

Para los casos en que se colocó refuerzo horizontal las NTCM dan la siguiente ecuación:

$$V_{sR} = F_R \eta p_h f_{yh} A_T \quad (2.5)$$

$$p_h = \frac{A_{sh}}{s_h \cdot t} \quad (2.6)$$

donde

- p_h cuantía de acero horizontal;
 A_{sh} área de acero en cada junta reforzada;
 s_h separación de alambres horizontales;
 η eficiencia del refuerzo:

$$\eta = \frac{V_{mR}}{F_R p_h f_{yh} A_T} (k_0 k_1 - 1) + \eta_s \quad (2.7)$$

k_0 constantes; en este caso $k_0 = 1.3$ para muros cuadrados, y

$$k_1 = 1 - \alpha p_h f_{yh} \quad (2.8)$$

pero se debe cumplir que $k_1 \geq (1 - 0.1 f_{an} f_m' \alpha)$

η_s factor que vale $\eta_s = 0.55$ cuando $f_m' \leq 6$ MPa (60 kg/cm²) y 0.75 si $f_m' \geq 6$ MPa (60 kg/cm²), en este caso se tomó preliminarmente 0.55 ya que se usó un $f_m' = 5$ MPa (50 kg/cm²).

Si $p_h f_{yh} > 0.1 f_{an} f_m'$ entonces se multiplica η_s por $0.1 f_{an} f_m' / p_h f_{yh}$;

f_{an} cociente del área neta y el área bruta de las piezas para muros confinados. En el caso de los muros de piezas doble hueco de este estudio $f_{an} = 0.526$.

f_{nm} cociente entre el área neta y el área bruta del muro con refuerzo interior, considerando las piezas con celdas rellenas como macizas. En las ecuaciones anteriores se reemplaza f_{an} por f_{nm} .

El cálculo práctico de dicho factor es:

$$f_{nm} = A_{nT} / A_T, \quad A_{nT} = A_T - n_h A_{hueco} \quad (2.9)$$

A_{nT} es el área neta total definida aquí como el área transversal $A_T = t \cdot L$ menos el área de los huecos no rellenos ($n_h =$ número de dichos huecos). Para estas piezas un solo hueco tiene un área promedio de $A_{hueco} = 113.8$ cm². Para los muros MBRI-8 a 12 se tuvieron seis huecos por lo que $f_{nm} = (3192 - 6 \times 113.8) / 3192 = 0.786$.

En los especímenes MBRI-8, 9, 10, 11 y 12 se colocó en cada junta reforzada dos o tres alambres a cada dos hiladas ($s_h = 42$ cm). La separación máxima permitida del refuerzo horizontal es de seis hiladas o 45 cm, por lo que se cumple.

Por cuantía mínima el producto de la cuantía por el esfuerzo de fluencia debe ser $p_h f_{yh} \geq 3$ kg/cm².

b) Resistencia a fuerza cortante

La resistencia esperada en el muro con refuerzo horizontal es la suma de la contribución de la mampostería más la del refuerzo:

$$V_R = V_{mR} + V_{sR} \quad (2.10)$$

En la Tabla 2.4 se muestran los resultados del cálculo de la resistencia a cortante.

Tabla 2.4 Resistencias nominales a cortante de los especímenes

No.	Especímen	Refuerzo horizontal	ρ_h	$\rho_h \times f_{yh}$ kg/cm ²	diseño $\rho_h \cdot f_{yh}$ kg/cm ²	η	$\frac{P}{t}$	$\frac{V_{mR}}{t}$	$\frac{V_{sR}}{t}$	$\frac{V_R}{t}$
1	MBRI-7	---	0	0	0	0	9.58	8.7	0	8.74
2	MBRI-8	2(5/32) @42	0.00050	3.0	3.0	0.664	9.58	8.7	6.35	15.09
3	MBRI-9	5/32 + 2(3/16) @42	0.00098	5.7	5.7	0.412	9.58	8.7	7.51	16.25
4	MBRI-10	2(1/4) @ 42	0.00129	7.5	5.9	0.399	9.58	8.7	7.51	16.25
5	MBRI-11	3(1/4) @ 42	0.00193	11.3	5.9	0.399	9.58	8.7	7.51	16.25
6	MBRI-12	5/32 + 2(3/16) @42	0.00098	5.7	5.7	0.412	9.58	8.7	7.51	16.25
7	MBC-2	---	0	0	0	0	9.18	8.2	0	8.17

2.2.3.2 Resistencia a cortante por fricción

Se puede calcular con los criterios de la sección 2.5.10 de las NTCC (CDMX, 2020). La resistencia V_R será la menor de:

$$\begin{aligned}
 &F_R \mu (A_{vf} f_y + N_u) \\
 &F_R [14A + 0.8(A_{vf} f_y + N_u)] \\
 &F_R 0.25 f_c' A
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

A_{vf} área de refuerzo por cortante por fricción (barras que cruzan la sección crítica);

A se toma para elementos de concreto como el área del plano crítico pero para aplicarlo a muros de mampostería se tomará como el área total ($A = A_T = t L$);

N_u fuerza a compresión normal al plano ($N_u = P$); y

μ coeficiente de fricción suponiendo el de concreto contra concreto se toma como $\mu = 1.0$. Además, en vez de usar la resistencia del concreto f_c' se usará la de la mampostería f_m' , aún en el caso del muro confinado.

Se usó un factor de reducción unitario ($F_R = 1$) y se muestra el cálculo para el caso mínimo de armado vertical del espécimen MBRI-7 con 4#6 ($A_{vf} = 11.4 \text{ cm}^2$):

$$\begin{aligned}
 1 (1) [11.4 \times 4200 + 958] / 1000 &= 57.5 \text{ t} \\
 1 [14(3192) + 0.8(11.4 \times 4200 + 9576)] / 1000 &= 90.7 \text{ t} \\
 1 (0.25)(70)(3192) / 1000 &= 55.9 \text{ t (rige)}
 \end{aligned}$$

En forma similar se calcula la resistencia para los demás especímenes. El resumen en términos de fuerza cortante se presenta en la Tabla 2.5.

2.2.4 Resistencia esperada en cada espécimen

Considerando los tres modos de falla planteados se hace el resumen en donde el modo predominante será el que requiera una menor fuerza cortante para ser desarrollado. En la Tabla 2.5 se enlistan las resistencias y se anota como V_{min} la que predominará.

Tabla 2.5 Resistencias teóricas ante la fuerza horizontal

No.	Especímen	$\frac{V_{R,fricc}}{t}$	$\frac{V_R}{t}$	$\frac{V_{Mp}}{t}$	$\frac{V_{min}}{t}$	Modo de falla
1	MBRI-7	55.9	9.6	23.5	9.6	cortante
2	MBRI-8	55.9	16.6	23.5	16.6	cortante
3	MBRI-9	55.9	20.2	23.5	20.2	cortante
4	MBRI-10	55.9	20.2	23.5	20.2	cortante
5	MBRI-11	55.9	20.2	23.5	20.2	cortante

6	MBRI-12	55.9	20.2	23.5	20.2	cortante
7	MBC-2	51.9	8.9	22.3	8.9	cortante

2.3 PREDICCIÓN DE LA RIGIDEZ

Se puede calcular la rigidez como el cociente de la fuerza entre el desplazamiento que produce:

$$Rig = V / \delta_h \quad (2.12)$$

La deformación teórica en el rango elástico, δ_h , se puede calcular con las fórmulas conocidas de la Mecánica de Materiales para el caso de una viga en voladizo con una carga en su extremo. La deformación horizontal, δ_h , se calcula como:

$$\delta_h = \frac{VH^3}{3E_m I} + \frac{VH}{G_m A_v} \quad (2.13)$$

donde:

- V fuerza cortante horizontal al nivel de la losa,
- H altura del muro,
- E_m módulo de elasticidad de la mampostería,
- G_m módulo de rigidez a cortante,
- I momento de inercia de la sección transversal del muro, y
- A_v área de cortante de la sección transversal del muro.

Para el cálculo nominal inicial se tomó el módulo de elasticidad como $E = 800f_m'$, y el módulo de cortante como $G_m = 0.2E_m$. El momento de inercia de la sección bruta de mampostería (rectangular) sin tomar en cuenta el acero de refuerzo es:

$$I = t \cdot L^3 / 12 \quad (2.14)$$

Para el momento de inercia del muro con castillos se consideró la contribución de estos transformando la sección de concreto a mampostería. En el caso de los muros con refuerzo interior se usó el momento de inercia de la sección rectangular bruta. Las propiedades nominales tomadas son:

$$E_m = 800 f_m' \text{ y } G_m = 0.2. \text{ Para piezas de concreto, donde } f_m' = 70 \text{ kg/cm}^2 \text{ (nominal),}$$

$$E_m = 56,000 \text{ kg/cm}^2, G_m = 11,200 \text{ kg/cm}^2$$

Para el momento de inercia del muro con castillos externos se consideró la sección transformada. Sea la relación de módulos de elasticidad, n :

$$n = E_c / E_m = 126491 / 56000 = 2.26$$

Se obtiene el momento de inercia como:

$$I = t \cdot L_m^3 / 12 + 2n [b_c h_c^3 / 12 + A_c (L - h_c)^2 / 4] \quad (2.15)$$

donde

- $L_m = L - 2h_c$ longitud de mampostería entre castillos,
- b_c, h_c ancho y peralte de los castillos, respectivamente.

El área de cortante de un muro confinado con castillos se puede calcular como el área transversal $A_v = A_T = t \cdot L$; por su parte el área de cortante de un muro sin castillos será la de una sección rectangular dividiendo el área entre el factor de forma que vale $FF = 1.2$, por tanto $A_v = t \cdot L / FF$.

Los resultados del cálculo de la rigidez inicial usando propiedades nominales del concreto se presentan en la Tabla 2.6. Cabe señalar que todos los especímenes con refuerzo interior (MBRI-1 a 6) tienen la misma

sección y el mismo material por lo que la rigidez teórica resulta ser la misma al considerar el área bruta del muro sin incluir el refuerzo vertical.

Tabla 2.6 Rigideces teóricas con propiedades nominales

No.	Espécimen	Sección cm	f_c' kg/cm ²	f_m' kg/cm ²	$b_c \times h_c$ cm	t cm	L cm	A_v cm ²	I cm ⁴	Rig t/cm
1	MBRI-7	Rectangular		70	---	12	266	2660	18,821,096	74.0
2	MBRI-8	Rectangular		70	---	12	266	2660	18,821,096	74.0
3	MBRI-9	Rectangular		70	---	12	266	2660	18,821,096	74.0
4	MBRI-10	Rectangular		70	---	12	266	2660	18,821,096	74.0
5	MBRI-11	Rectangular		70	---	12	266	2660	18,821,096	74.0
6	MBRI-12	Rectangular		70	---	12	266	2660	18,821,096	74.0
7	MBC-2	Con castillos	250	70	12x15	12	255	2440	23,115,334	75.0

2.4 INSTRUMENTACIÓN

Para medir deformaciones relativas y absolutas se diseñó un esquema de instrumentación de los especímenes. Internamente se pegaron deformímetros eléctricos (“strain gauge”) en barras y alambres de refuerzo; externamente se colocaron medidores horizontales en la parte superior, medidores verticales en los extremos del muro y equipo para la medición de las diagonales. Un instrumento para detectar el posible deslizamiento en la base se colocó en la parte inferior del muro. En la Figura 2.7 se muestra el arreglo de instrumentos colocados tanto internamente como en la parte exterior de los especímenes.

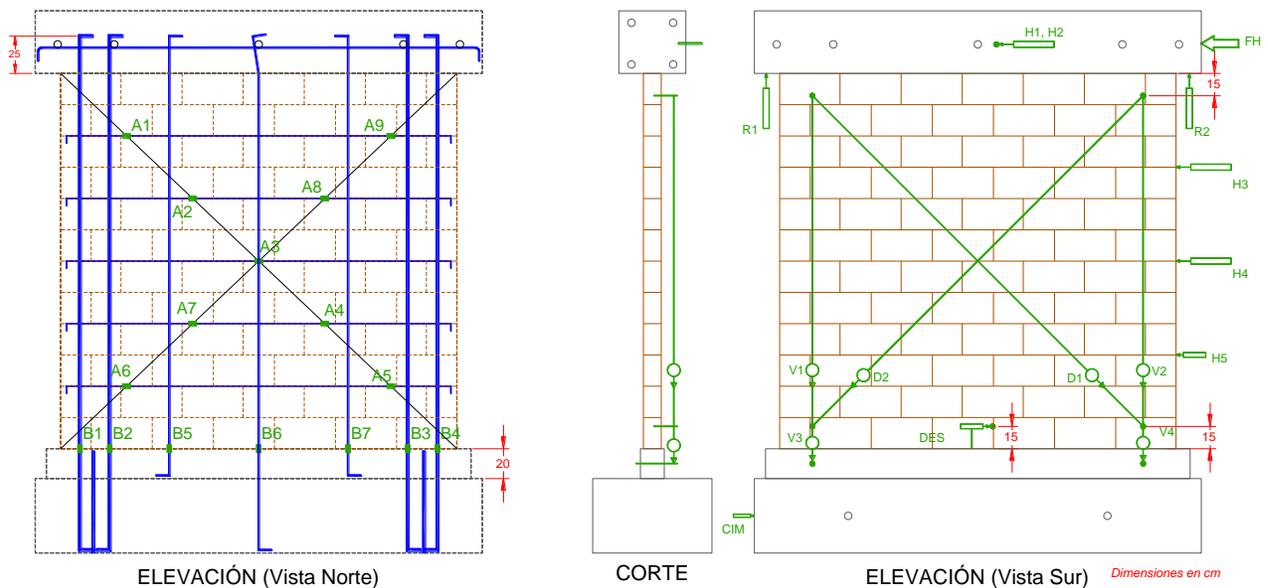


Figura 2.7 Instrumentación de los especímenes (ejemplo de muro con refuerzo interior MBRI-8)

2.5 APLICACIÓN DE CARGAS

2.5.1 Marco de carga

Las cargas se aplicaron mediante una carga lateral cíclica reversible producida por un gato hidráulico conectado a la viga “cabezal” conectada en la parte superior de los muros. La carga vertical sobre los

especímenes se aplicó con una viga de acero y un peso muerto colgado a uno de los lados del muro, ejerciendo una reacción sobre el modelo. En la Figura 2.8 se presenta el marco de carga.

2.5.2 Historia de carga

Siguiendo las recomendaciones del apéndice A de las NTCM (CDMX, 2020), se realizó la prueba en forma cíclica reversible con una repetición de cada ciclo para cada nivel de carga o deformación.

En los ciclos 1 y 2 se aplicó la cuarta parte de la carga resistente estimada (a cortante o carga de agrietamiento), el 3 y 4 la mitad de dicha carga, y en el 5 se aplicó la carga estimada para el agrietamiento pero controlando por desplazamiento que se estimó con la rigidez experimental (real) del ciclo anterior y la carga estimada de agrietamiento, V_{agr} , siendo la deformación $\delta_{agr} = V_{agr} / Rigidez$ (o a distorsión $\gamma_{agr} = \delta_{agr} / H$). El ciclo 6 es repetición por desplazamiento del ciclo 5.

A partir de aquí se controló por desplazamiento incrementando y repitiendo una vez a distorsión de 0.001, 0.002, 0.004, 0.006 mm/mm, etc., con incrementos de 0.002 y sus respectivas repeticiones. Si se llegaba al caso en que γ_{agr} fuera mayor a 0.001 mm/mm entonces se saltaba dicha deformación y se continuaba directo a 0.002 mm/mm. La historia de carga es la mostrada en la Figura 2.9.

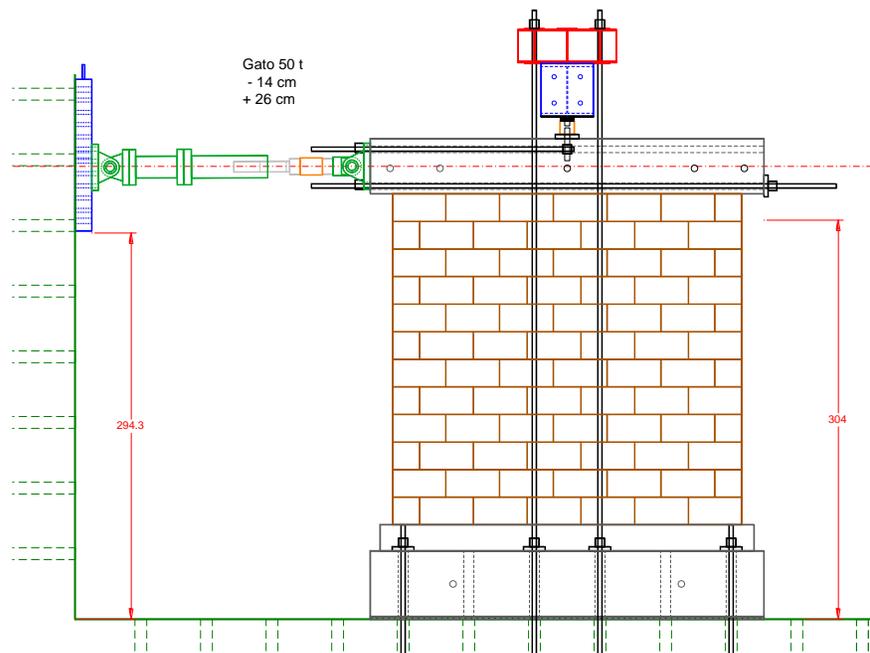
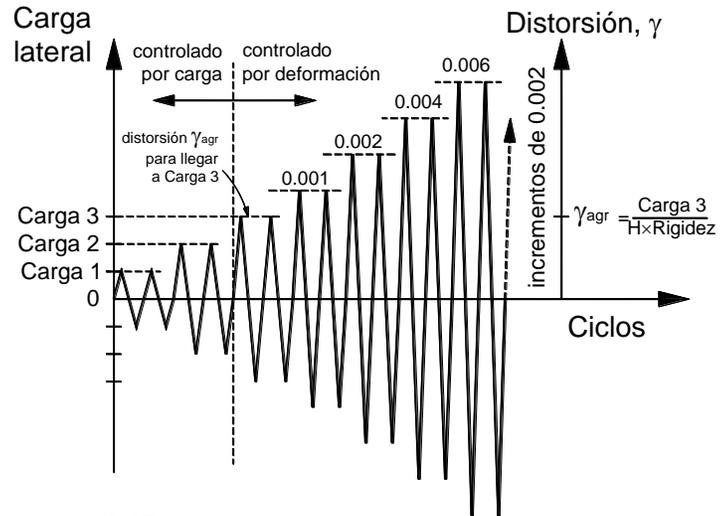


Figura 2.8 Marco de aplicación de cargas para ensayo ante fuerza horizontal



Carga 1 = 0.25 veces la carga calculada de fluencia o agrietamiento
 Carga 2 = 0.5 veces la carga calculada de fluencia o agrietamiento
 Carga 3 = carga de fluencia o agrietam. Se controla por deformación

Figura 2.9 Historia de carga

CAPÍTULO 3

RESULTADOS GENERALES DE LOS ENSAYES

3.1 RESULTADOS DE ENSAYES DE MATERIALES

Para el estudio se programaron muestreos y ensayos de todos los materiales utilizados en la construcción de los especímenes. En las etapas previas se midieron, pesaron y ensayaron a compresión bloques individuales dando dimensiones promedio de 11.9×20.0×40.0 cm.

Se ensayaron también muestras cúbicas del mortero usado en todas las etapas constructivas, así como el ensayo a compresión de cilindros del concreto de los castillos, dalas y anclaje en la cimentación.

Los muretes, pilas y cilindros de concreto se instrumentaron para obtener las gráficas de esfuerzo contra deformación y de ellos obtener los módulos de cortante y de elasticidad correspondientes.

Como resumen los resultados promedio de las piezas, pilas y muretes de bloques doble hueco se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resumen de los resultados de ensayos de bloques doble hueco

Tipo de ensaye	Propiedad	Variable	Valor
Compresión en bloques doble hueco, piezas enteras	Resistencia media	f_p	108 kg/cm ²
	Coefficiente de variación	C_p	0.13
	Resistencia de diseño	f_p'	72 kg/cm ²
	Resistencia nominal	$f_{p\ nom}$	60 kg/cm ²
Compresión en bloques doble hueco, mitades de pieza	Resistencia media	f_p	110.4 kg/cm ²
	Coefficiente de variación	C_p	0.09
	Resistencia de diseño	f_p'	73.6 kg/cm ²
	Resistencia nominal	$f_{p\ nom}$	70 kg/cm ²
Compresión en pilas de piezas doble hueco	Resistencia media	f_m	73.9 kg/cm ²
	Coefficiente de variación	C_m	0.23
	Resistencia de diseño	f_m'	53.8 kg/cm ²
	Resistencia nominal	$f_{m\ nom}$	50 kg/cm ²
Compresión diagonal en muretes, piezas doble hueco	Resistencia media	V_m	4.41 kg/cm ²
	Coefficiente de variación	C_v	0.23
	Resistencia de diseño	V_m'	2.83 kg/cm ²
	Resistencia nominal	$V_{m\ nom}$	3.5 kg/cm ²
Compresión en mortero 1:¼:3	Resistencia media	$f_{i\ prom}$	209 kg/cm ²
	Resistencia nominal	$f_{i\ nom}$	125 kg/cm ²

Tabla 3.2 Propiedades experimentales de materiales por muro

Espécimen	f_j kg/cm ²	$f_{m\ prom}$ kg/cm ²	f_m' kg/cm ²	E_m kg/cm ²	$V_{m\ prom}$ kg/cm ²	V_m' kg/cm ²
MBRI-7	163	102.0	74.2	58,194	3.66	2.44
MBRI-8	107	93.9	68.3	62,506	4.92	3.11
MBRI-9	269 ²	58.5	42.6	35,734	3.64	2.43
MBRI-10	217 ²	63.0	45.8	41,880	3.30	1.98
MBRI-11	242 ²	68.1	49.5	53,442	5.89	3.91
MBRI-12	254 ²	60.7	44.2	54,406	4.18	2.43
MBC-2	233 ²	71.4	51.9	46,975	5.05	3.09

² Cubos de mortero curados por inmersión en agua

En el Apéndice A se presenta con detalle los tipos de ensaye que se realizaron para cada probeta muestreada durante la construcción de los especímenes.

3.2 ENSAYES DE MUROS ANTE FUERZAS SÍSMICAS

3.2.1 Espécimen MBRI-7 ($p_{rh}f_{yh}=0$)

El espécimen MBRI-7 fue el único muro sin refuerzo horizontal para usarlo de comparación; también fue el único que no contó con refuerzo vertical en la parte central. La carga vertical aplicada correspondió a un esfuerzo de $\sigma=0.3$ MPa (3 kg/cm^2). En la Figura 3.1 se muestra la secuencia de agrietamiento del espécimen mostrándose las primeras grietas (a), un patrón de daño intermedio correspondiente aproximadamente a la resistencia (carga máxima) (b), y el estado final de daño (c).

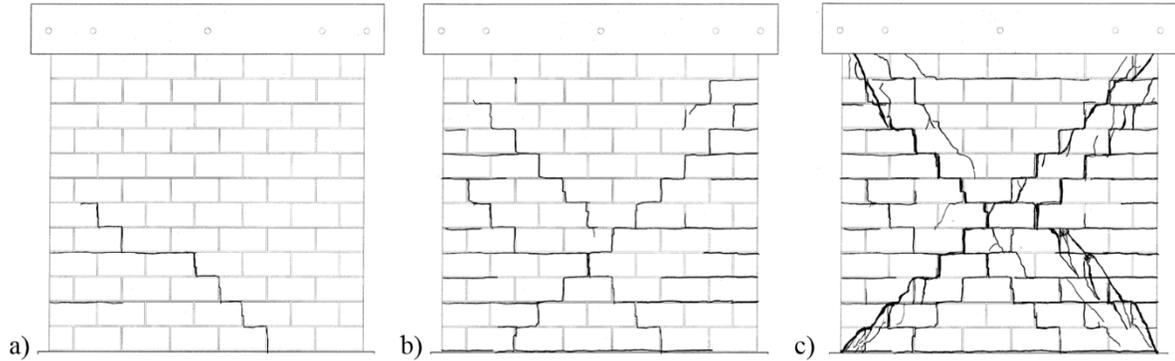


Figura 3.1 Secuencia de daño del espécimen MBRI-7

En la Figura 3.2 se muestra el aspecto del daño final del espécimen, observándose el patrón de agrietamiento diagonal principal con pocas grietas muy abiertas. Se presenta también la gráfica de histéresis, que muestra las mediciones a lo largo del ensayo de las distorsiones de entrepiso contra la fuerza cortante horizontal.

Se define la distorsión de entrepiso como el cociente del desplazamiento horizontal medido a la altura de la losa entre la altura del entrepiso hasta dicho instrumento: $\text{Distorsión} = \delta_{\text{horiz}} / H$. La resistencia se define como la carga máxima registrada y se alcanzó para los ciclos positivos definidos así cuando el gato hidráulico empujaba hacia el oeste (hacia la derecha en las fotos) resultando de $V_{\text{máx}}^{(+)} = 14.4 \text{ t}$ para una distorsión de $D_{V_{\text{máx}}} = 0.0039 \text{ mm/mm}$, y para los ciclos negativos (el cuadrante con carga y distorsión negativa, cuando el gato jala hacia la izquierda) fue de $V_{\text{máx}}^{(-)} = -13.93 \text{ t}$ y $D_{V_{\text{mín}}} = -0.0027 \text{ mm/mm}$.

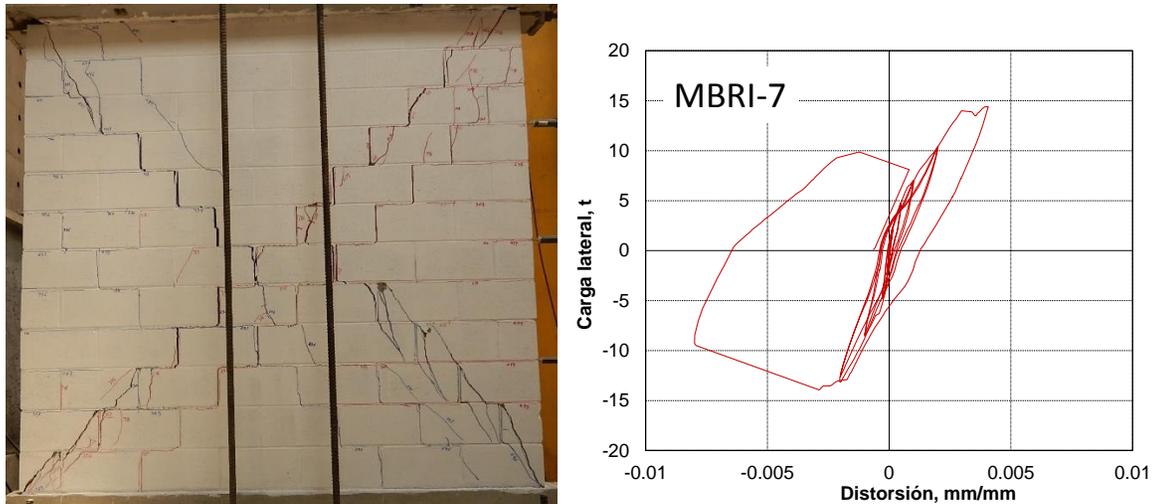


Figura 3.2 Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MBRI-7

3.2.2 Ensayo del espécimen MBRI-8 ($p_{hf_{yh}}=3 \text{ kg/cm}^2$)

Los demás especímenes de la serie, desde el MBRI-8 hasta el MBRI-12 fueron de mampostería reforzada interiormente (sin castillos), con distinta cuantía de refuerzo horizontal y exactamente el mismo refuerzo vertical para eliminar esa variable en los resultados. El armado vertical constaba de dos celdas reforzadas en los extremos, cada una con una barra del no. 6 (1.9 cm de diámetro), y tres barras del No. 3 (9.5 mm de diámetro) en la parte interna, separadas cada 60 cm.

El espécimen MBRI-8 se reforzó horizontalmente con dos alambres de 5/32 pulg (3.97 mm de diámetro) cada dos hiladas, lo que dio una cuantía resistente de $p_{hf_{yh}} = 0.3 \text{ MPa}$ (3 kg/cm²), que representa la cuantía mínima que piden las NTCM (CDMX, 2020). En la Figura 3.4 se muestra la secuencia de agrietamiento del espécimen mostrándose las primeras grietas (a), un patrón de daño intermedio correspondiente aproximadamente a la resistencia (carga máxima) (b), y el estado final de daño (c).

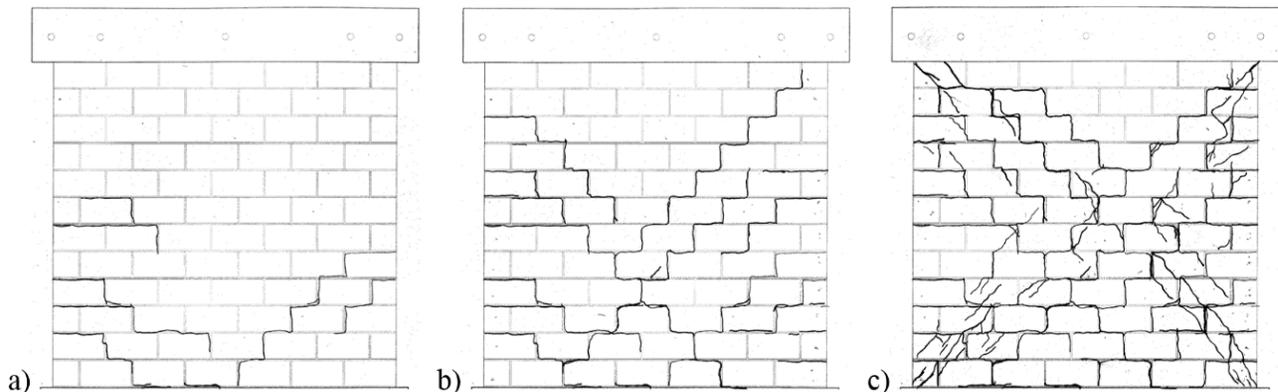


Figura 3.3 Secuencia de daño del espécimen MBRI-8

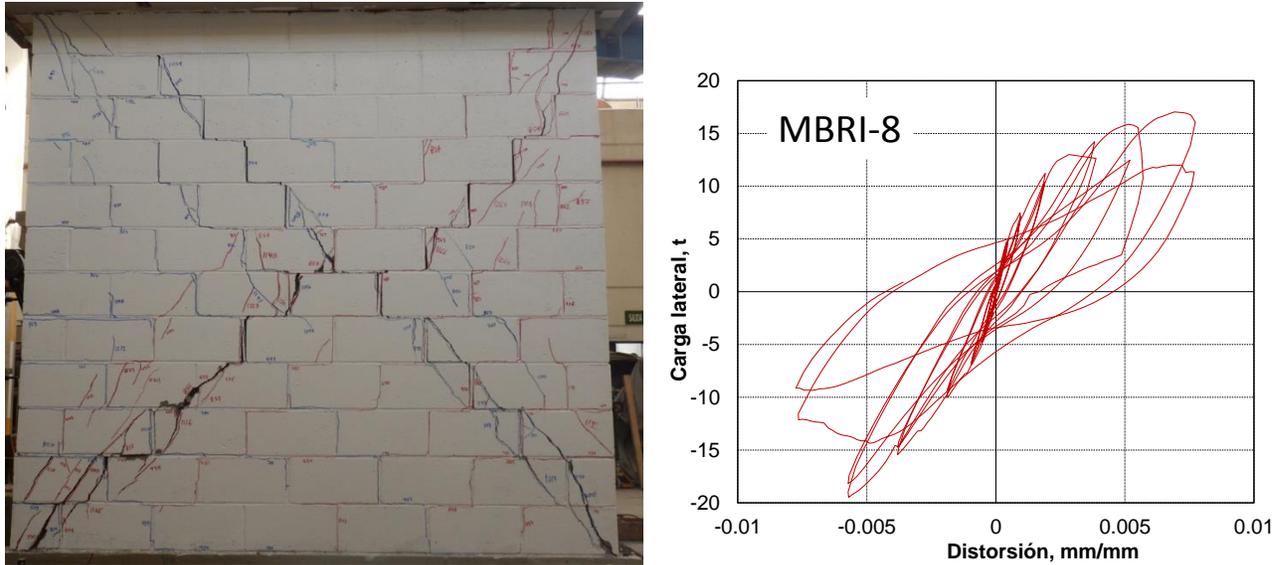


Figura 3.4 Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MBRI-8

La resistencia se alcanzó para una carga positiva de $V_{máx}^{(+)} = 17.04$ t para una distorsión de 0.0062 mm/mm, y para los ciclos negativos de $V_{máx}^{(-)} = -19.48$ t y -0.005 mm/mm. En la Figura 3.4 se muestra el aspecto del daño final del espécimen, observándose el patrón de agrietamiento diagonal principal con pocas grietas muy abiertas. La gráfica de histéresis muestra la caída de la resistencia en el ciclo de repetición final.

3.2.3 Especimen MBRI-9 ($p_{hf_{yh}} = 5.7$ kg/cm²)

El espécimen MBRI-9 se reforzó horizontalmente con dos alambres de 3/16 pulg (4.76 mm de diámetro) más un tercer alambre de 5/32 pulg, colocados los tres cada dos hiladas, dando una cuantía resistente de $p_{hf_{yh}} = 0.56$ MPa (5.7 kg/cm²), siendo casi el doble que la del espécimen anterior. En la Figura 3.5 se muestra la secuencia de agrietamiento del espécimen. La resistencia se alcanzó para los ciclos negativos con un cortante de $V_{máx}^{(-)} = -22.83$ t para una distorsión de -0.0057 mm/mm, y para los ciclos positivos de $V_{máx}^{(+)} = 22.03$ t y 0.0076 mm/mm.

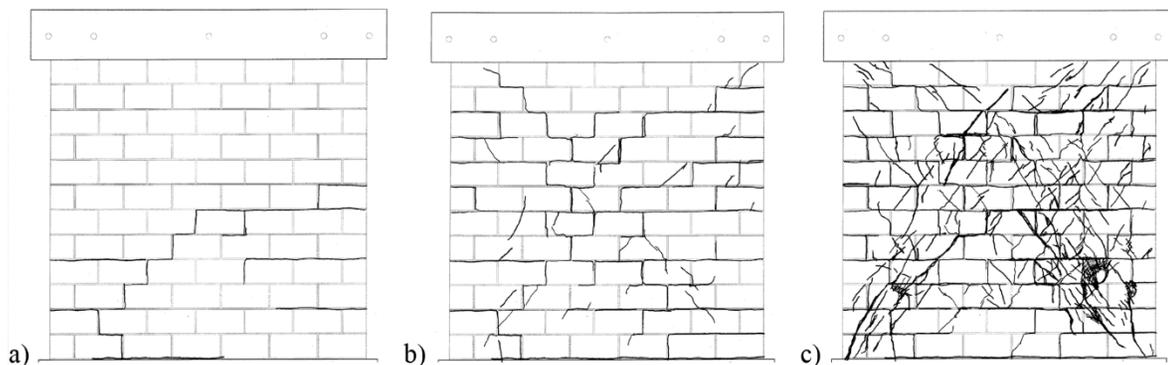


Figura 3.5 Secuencia de daño del espécimen MBRI-9

En la Figura 3.6 se muestra el aspecto del daño final del espécimen y la gráfica de histéresis. El espécimen se ensayó aplicándole ± 16 ciclos, hasta la distorsión de ± 0.008 mm/mm, presentándose un deterioro considerable en el ciclo ± 15 y en la repetición a la última distorsión perdió más de la mitad de la resistencia, exhibiendo un daño muy severo con aplastamiento de mampostería en la parte inferior.

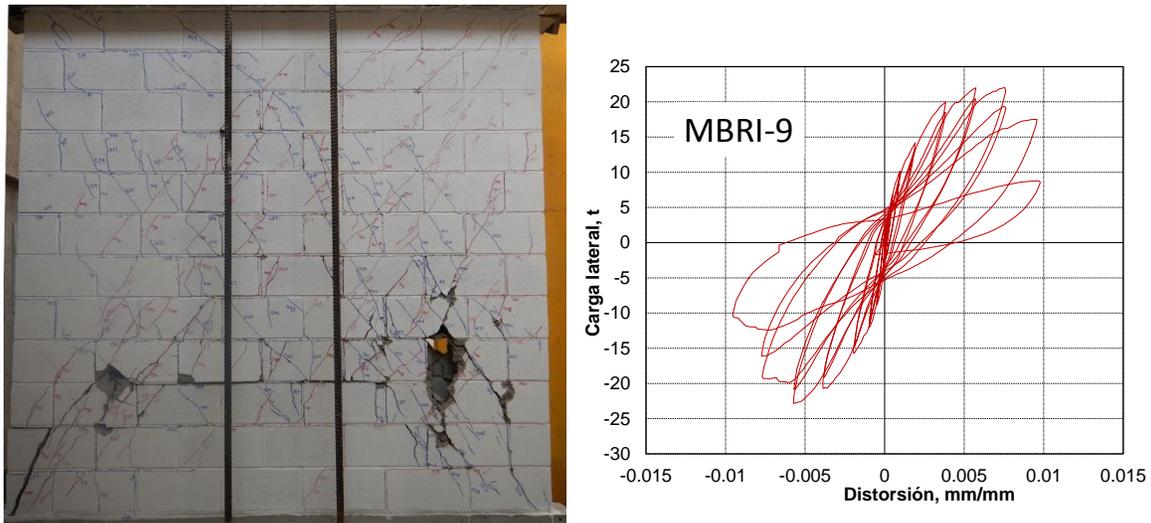


Figura 3.6 Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MBRI-9

3.2.4 Especimen MBRI-10 ($p_{hf,yh} = 7.5 \text{ kg/cm}^2$)

El espécimen MBRI-10 se reforzó horizontalmente con dos alambres del No. 2, o (6.35 mm, o ¼ pulg) cada dos hiladas, dando una cuantía resistente de $p_{hf,yh} = 0.74 \text{ MPa}$ (7.5 kg/cm^2). En la Figura 3.7 se muestra la secuencia de agrietamiento del espécimen. La resistencia se alcanzó para las cargas de $V_{máx}^{(+)} = 20.93 \text{ t}$ y $V_{máx}^{(-)} = -20.73 \text{ t}$, para distorsiones de $\pm 0.0058 \text{ mm/mm}$.

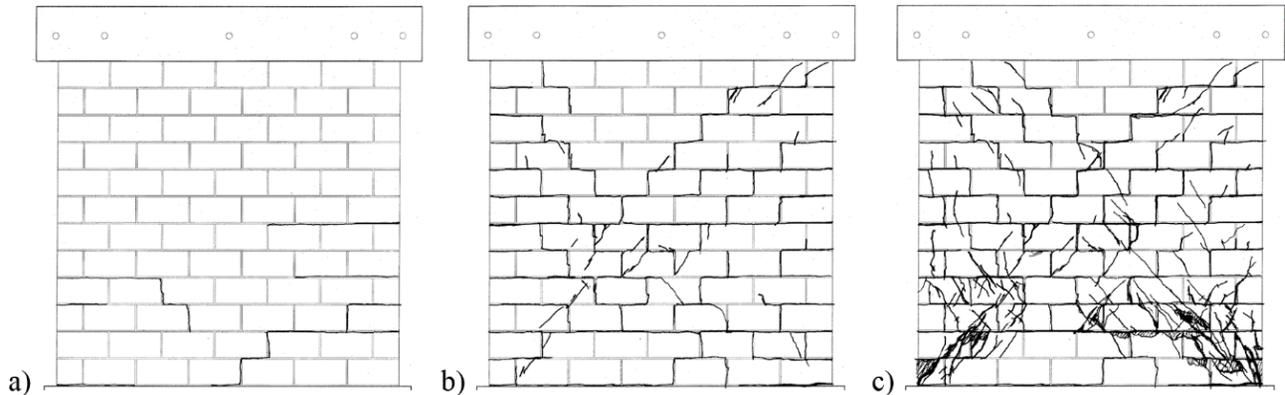


Figura 3.7 Secuencia de daño del espécimen MBRI-10

En la Figura 3.8 se muestra el patrón de grietas final del espécimen y la gráfica de histéresis. Después de llegar al ciclo ± 14 , con distorsión de ± 0.006 se estaba realizando el incremento a $+0.008$, pero estando a punto de llegar se generó la falla por aplastamiento de la mampostería en la parte inferior derecha sin poder controlar la carga, llegando a 0.0092 mm/mm . Después de la descarga se decidió dar por terminado el ensaye.

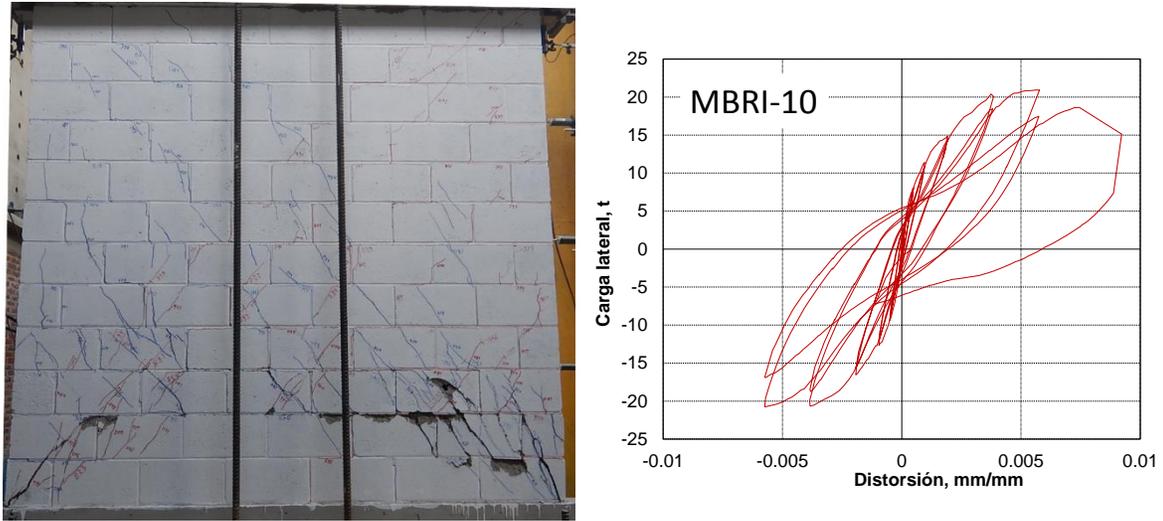


Figura 3.8 Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MBRI-10

3.2.5 Especimen MBRI-11 ($p_{hf_{yh}} = 11.3 \text{ kg/cm}^2$)

El espécimen MBRI-11 fue el muro con la mayor cuantía de refuerzo horizontal con tres alambres del No. 2 (¼ pulg) cada dos hiladas, dando $p_{hf_{yh}} = 1.11 \text{ MPa}$ (11.3 kg/cm^2). En la Figura 3.9 se muestra la secuencia de agrietamiento del espécimen. La resistencia en los ciclos positivos fue $V_{máx}^{(+)} = 26.05 \text{ t}$ para una distorsión de 0.0058 mm/mm , y para los ciclos negativos de $V_{máx}^{(-)} = -22.28 \text{ t}$ y -0.0054 mm/mm . En la Figura 3.10 se muestra el aspecto del daño final del espécimen y la gráfica de histéresis.

El espécimen se llevó a 16 ciclos completos, con distorsiones de $\pm 0.008 \text{ mm/mm}$, presentándose el aplastamiento de la mampostería en las esquinas inferiores. Se dio por terminado el ensaye por el daño severo de la mampostería y por la reducción de la resistencia mostrada en el último ciclo.

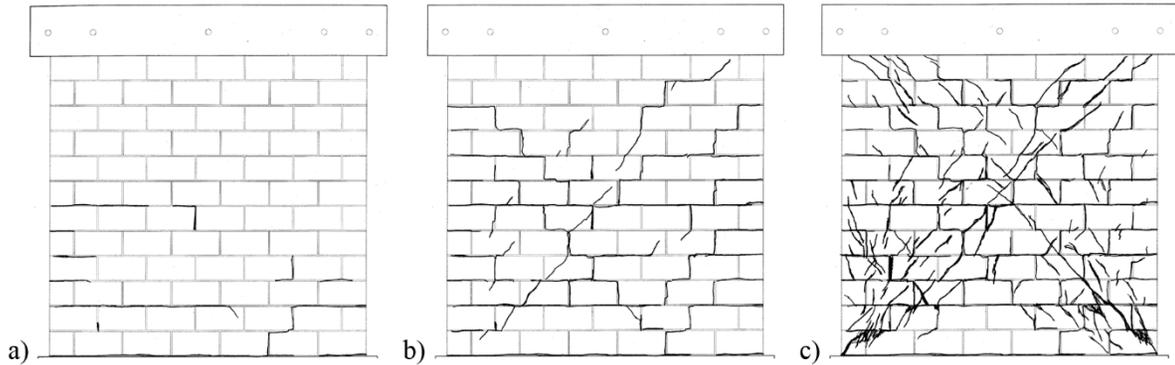


Figura 3.9 Secuencia de daño del espécimen MBRI-11

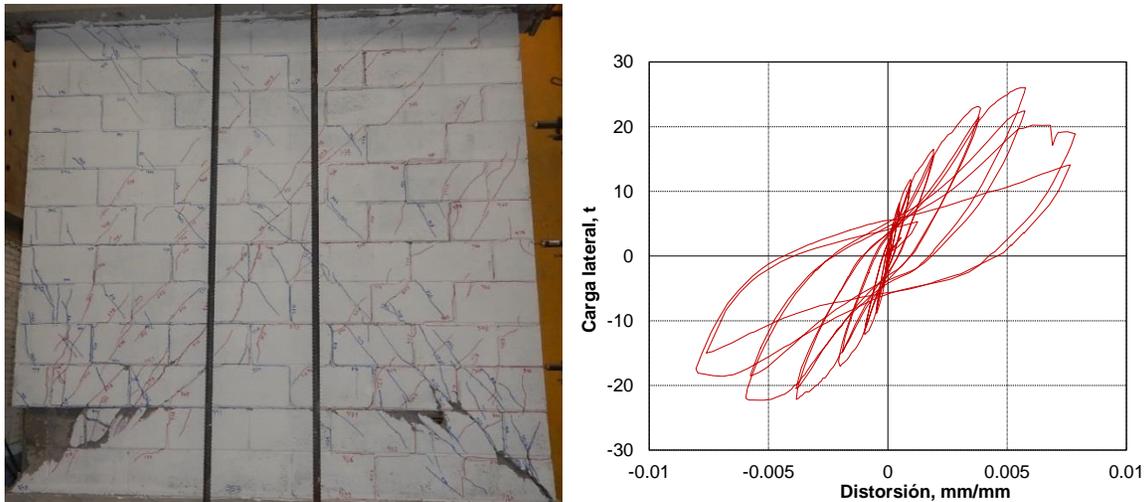


Figura 3.10 Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MBRI-11

3.2.6 Especimen MBRI-12 ($p_{hf_{yh}} = 5.7 \text{ kg/cm}^2$)

El espécimen MBRI-12 fue un modelo adicional que se hizo equivalente al espécimen MBRI-9 para poder ser comparado, con idéntica cuantía de refuerzo horizontal de dos alambres de 3/16 pulg y uno de 5/32 pulg y, por lo tanto, con la misma cuantía resistente de $p_{hf_{yh}} = 0.56 \text{ MPa}$ (5.7 kg/cm^2). La diferencia fue que este muro se construyó con mortero industrializado predosificado marca Stonecrete Pegablock® y con piezas elaboradas desde fábrica con una ranura en la cara del extremo y otras piezas ranuradas en esa cara y en la pared transversal central, con el objetivo de poder ser colocadas donde hay una o dos barras verticales sin tener que elevar las piezas para ensartarlas en el extremo de aquellas. En el Apéndice B se explica el sistema constructivo con piezas fabricadas por Industrial Bloquera Mexicana denominadas “open-end”.

En la Figura 3.11 se muestra la secuencia de agrietamiento del espécimen. El primer agrietamiento se presentó por grietas horizontales del lado de tensión y una grieta en escalera, para la carga de 7.3 t y distorsión de 0.0036 mm/mm en el ciclo positivo y para -8.28 t y -0.00035 mm/mm en los ciclos negativos. La resistencia se alcanzó para los ciclos positivos con un cortante de $V_{máx}^{(+)} = 25.2 \text{ t}$, para una distorsión de 0.0057 mm/mm, y para los ciclos negativos de $V_{máx}^{(-)} = -23.83 \text{ t}$ y -0.0045 mm/mm.

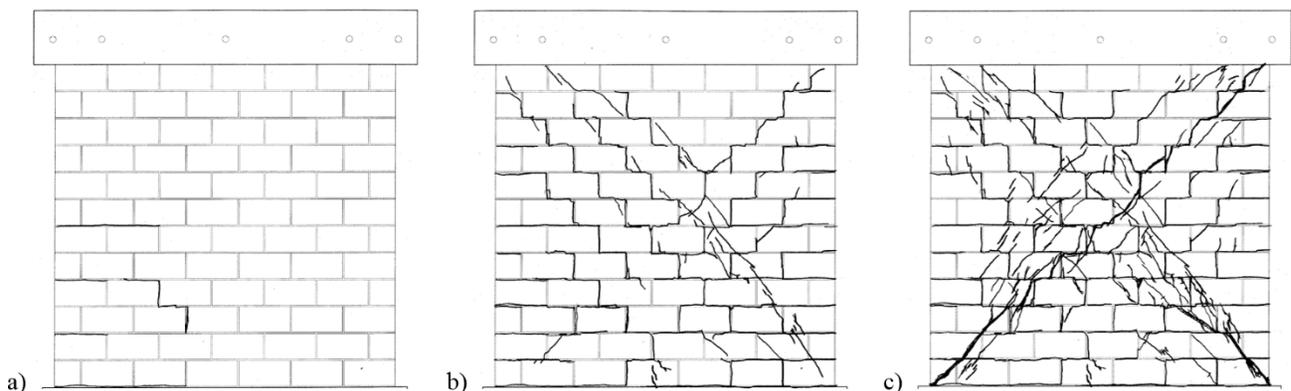


Figura 3.11 Secuencia de daño del espécimen MBRI-12

En la Figura 3.12 se muestra el aspecto del daño final del espécimen y la gráfica de histéresis. El espécimen se ensayó aplicándole ± 14 ciclos, hasta la distorsión de $\pm 0.006 \text{ mm/mm}$, presentándose un

agrietamiento importante en el último ciclo aplicado llegando a ancho de grietas en pico de 8 mm. Se decidió reparar el espécimen por lo que se dio por terminado el ensaye para no causar más daño.

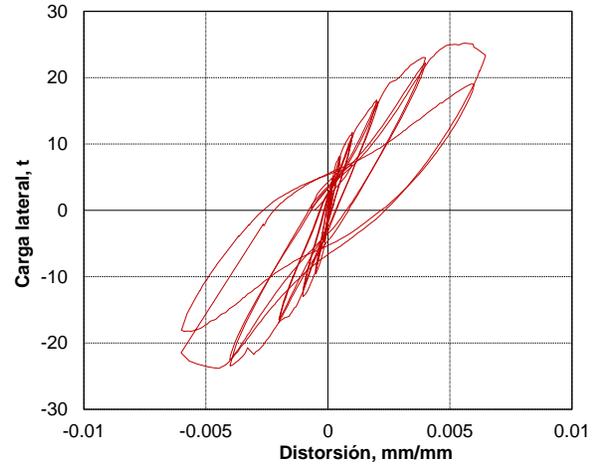


Figura 3.12 Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MBRI-12

3.2.7 Comparación de los seis especímenes

En la Tabla 3.3 se enlistan los datos de los principales resultados de los ensayos realizados.

Tabla 3.3 Comparativa de los resultados para los seis especímenes

Espécimen	$V_{agr} = V_{mR}$ t	V_R $=V_{mR}+V_{sR}$ t	$V_{max}^{(+)}$ t	$V_{max}^{(-)}$ t	$V_{agr}^{(+)}$ t	$V_{agr}^{(-)}$ t	$V_{max}^{(+)}/V_R$	$V_{max}^{(-)}/V_R$
MBRI-7	8.7	8.74	14.40	-13.93	6.30	-6.30	1.6	1.6
MBRI-8	8.7	15.09	17.04	-19.48	11.21	-10.03	1.1	1.3
MBRI-9	8.7	16.25	22.03	-22.83	8.75	-8.80	1.4	1.4
MBRI-10	8.7	16.25	20.93	-20.73	11.40	-12.23	1.3	1.3
MBRI-11	8.7	16.25	26.05	-22.28	13.6	-11.55	1.6	1.4
MBRI-12	8.7	16.25	25.20	-23.83	7.28	-8.28	1.6	1.5
MBC-2	8.17	8.17	12.95	-13.33	8.90	-10.4	1.59	1.63

Se observa que la predicción del agrietamiento, V_{agr} , para el cálculo teórico usando el valor nominal de $v_m' = 3.5 \text{ kg/cm}^2$, fue en su mayoría una buena aproximación a la carga de agrietamiento y del lado conservador. La resistencia o fuerza cortante máxima tuvo valores de entre 30% a 60% superior a la predicha.

En la Figura 13 se presentan las envolventes de los ciclos positivos de todos los especímenes a fin de poder visualizar la comparación de los modelos. Se identifica la contribución del refuerzo horizontal al comparar los especímenes contra el muro MBRI-7 que no tenía dicho refuerzo. El espécimen MBRI-8, con la cuantía mínima de refuerzo horizontal, se comportó esencialmente como el MBRI-7 con un modo de falla por la fractura de los alambres y la abertura de dos grietas diagonales principales. No obstante, alcanzó una mayor resistencia y un notable aumento en la capacidad de deformación respecto al MBRI-7. Los especímenes con cuantías medianas y altas de refuerzo alcanzaron resistencias del orden de un 50 a 100% la del muro sin refuerzo. Los especímenes MBRI-9 y 10 mostraron un comportamiento y resistencia similar, mientras que el

modelo con la mayor cuantía de refuerzo, MBRI-11, llegó a la mayor resistencia pero presentándose como en los dos anteriores la falla por el aplastamiento del puntal de compresión de mampostería.

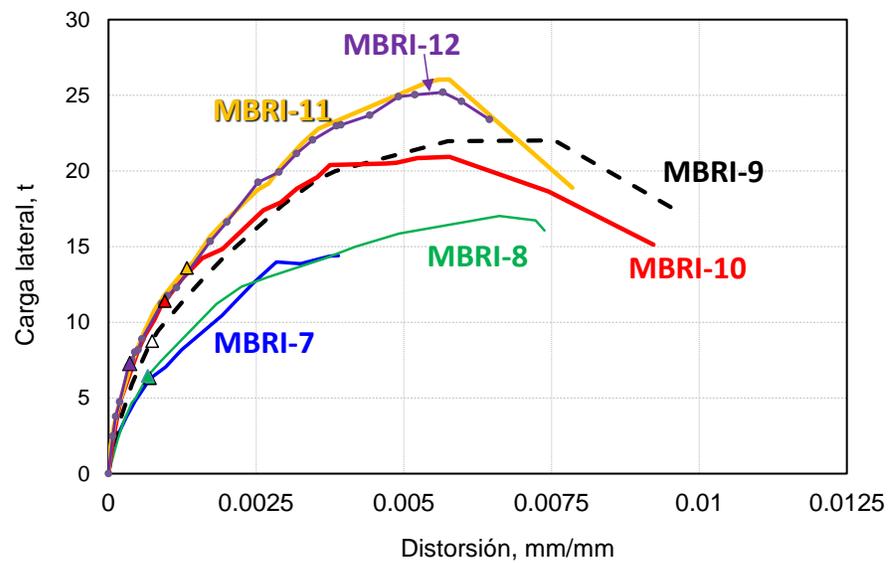


Figura 13 Envolturas positivas de los especímenes

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

Se ensayaron ante carga lateral cíclica cinco especímenes de muros de mampostería a tamaño natural de bloque hueco de concreto reforzados interiormente. Se varió la cuantía de refuerzo horizontal en la serie de muros reforzados. Se verificó la aplicabilidad de las disposiciones para diseño estructural de las normas de mampostería de México (NTCM, 2017). Se llegó a las siguientes conclusiones.

- El modelo sin refuerzo horizontal (MBRI-7) tuvo una resistencia similar a la del muro de comparación confinado (MBC-2); aunque esto no implica que se pudiera usar en la práctica constructiva sí permitió comparar los especímenes correctamente reforzados en su interior considerándolo un muro con cuantía nula de refuerzo horizontal.
- El mecanismo de falla del muro sin refuerzo (MBRI-7) y del que tenía cuantía mínima de refuerzo (MBRI-8) fueron similares, con agrietamiento por tensión diagonal concentrado en dos patrones de grietas diagonales formando una “X”; no obstante, el espécimen con refuerzo mínimo logró desarrollar una notable capacidad de deformación y un aumento de resistencia respecto al primero.
- Los muros con mayor cuantía de refuerzo horizontal, MBRI-9, 10 y 11, presentaron un mecanismo de falla por agrietamiento inclinado debido al cortante, alcanzando mayores resistencias aunque una capacidad de deformación inelástica similar al MBRI-8. En estos casos el mecanismo final fue por aplastamiento de las piezas de mampostería ya dañadas por cortante, concentrado en las esquinas inferiores del muro, donde se concentró la compresión diagonal del tablero y la compresión por flexión.
- Las ecuaciones de diseño fueron acertadas para estimar la resistencia de los modelos, dando resultados del lado conservador. Cabe señalar que en este estudio se continuará con el análisis de los datos y la comparación con los resultados de la serie de muros con piezas de baja resistencia del estudio anterior (Flores, 2019).

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa Industrial Bloquera Mexicana el invaluable apoyo en el suministro de las piezas, materiales para morteros y concreto, acero de refuerzo, así como el apoyo con la mano de obra para realizar este estudio. A los señores albañiles Benito Rangel y Marco Carreón, el laboratorista Carlos Olmos y los y las estudiantes de servicio social que participaron en el proyecto en el Laboratorio de Estructuras Grandes del CENAPRED.

APÉNDICE A

RESULTADOS DE ENSAYES DE MATERIALES

Para el estudio se programaron muestreos y ensayos de todos los materiales utilizados en la construcción de los especímenes. Las piezas fueron ensayadas a compresión simple, y se hicieron ensayos a compresión de pilas y muretes a compresión diagonal. Para el concreto se realizó el ensayo a compresión de cilindros muestreados durante la construcción de los castillos y del concreto de la base y de los rellenos de celdas. Finalmente se ensayaron barras y alambres de acero a tensión.

A.1 GEOMETRÍA Y ENSAYES A COMPRESIÓN DE BLOQUES DE CONCRETO

A.1.1 Geometría de las piezas

Se tomaron muestras de cinco piezas de cada tipo (entera y mitad) de las cuales se tomaron sus dimensiones externas, dando un promedio de:

11.9×20.0×40.0 cm	para piezas enteras doble hueco
11.9×20.0×20.0 cm	para mitades de las piezas doble hueco

con un coeficiente de variación de las medidas del orden del 1%. Por lo tanto, el espesor promedio de los muros se consideró de 11.9 cm (siendo el nominal de 12 cm).

A.1.2 Ensayo de piezas a compresión

Se cabecearon las piezas con un yeso con cemento especial y se ensayaron a compresión, siendo cinco las piezas seleccionadas aleatoriamente de la misma muestra usada para dimensiones. En la Tabla A.1 se muestran los resultados de estos ensayos de piezas doble hueco.

Tabla A.1 Ensayo a compresión de piezas doble hueco, enteras y mitades

Pieza No.	Dimensiones, cm			Peso kg	Área bruta cm ²	Peso Vol. kg/m ³	Carga, kg	Esfuerzo kg/cm ²
	a	b	c					
1	11.9	40.0	20.0	11.623	476.0	1,221	61,400	128.99
2	11.9	40.0	20.0	11.418	476.0	1,199	53,800	113.03
3	11.9	40.0	20.0	11.475	476.0	1,205	47,400	99.58
4	11.9	40.0	20.0	11.376	476.0	1,195	43,500	91.39
5	11.9	40.0	20.0	11.647	476.0	1,223	51,000	107.14
Promedio	11.9	40.0	20.0			1,209		108.0
Coef. variación	0.0	0.0	0.0			0.01		0.13
1	12.0	19.8	19.9	5.973	237.6	1,263	23,950	100.80
2	11.8	20.0	20.0	6.108	236.0	1,294	28,650	121.40
3	11.8	20.0	20.0	5.986	236.0	1,268	25,600	108.47
4	12.0	20.0	20.0	6.155	240.0	1,282	28,850	120.21
5	11.8	20.0	20.0	5.968	236.0	1,264	23,900	101.27
Promedio	11.9	20.0	20.0				1274.4	110.4
Coef. variación	0.009	0.004	0.002				0.01	0.09

El procedimiento de ensayo siguió lo establecido en la norma mexicana NMX-C-036-ONNCCE (ONNCCE, 2004). Para fines de diseño se usa un valor reducido de la resistencia a compresión obtenida en las pruebas f_p' según se especifica en las NTCM (CDMX, 2020). Los valores de diseño se obtienen reduciendo los esfuerzos resultantes de las pruebas en función del coeficiente de variación de las mismas, de forma tal que la probabilidad de que no se alcancen estos valores sea del 2%. Dicho valor se calcula con la expresión A.1.

$$f_p' = \frac{\overline{f_p}}{1 + 2.5 c_p} \tag{A.1}$$

donde:

f_p' resistencia de diseño a compresión;

$\overline{f_p}$ media de las resistencias a compresión de las probetas, referidas al área bruta; y

c_p coeficiente de variación, calculado como el cociente de la desviación estándar entre la media, que para piezas de producción mecanizada con control de calidad, este valor no debe tomarse menor que 0.2.

Para las piezas doble hueco el esfuerzo promedio fue $\overline{f_p} = 10.6$ MPa (108 kg/cm²), y dado que el coeficiente de variación fue de $c_p = 0.13$ en la fórmula A.1 se utilizó el valor de 0.2 con lo cual se obtuvo una resistencia de diseño de $f_p' = 7$ MPa (72 kg/cm²). En el caso de mitades de piezas éstas se consideran piezas accesorias y la norma no exige que se ensayen y solo pide que se tenga el mismo procedimiento de fabricación que las piezas completas con las que trabajarían. No obstante, se cabecearon y ensayaron las mitades de piezas y se obtuvo una resistencia promedio de $\overline{f_p} = 10.8$ MPa (110.4 kg/cm²) y el de diseño $f_p' = 7.2$ MPa (73.6 kg/cm²) por lo que resultó muy casi idéntico a la de las piezas completas.

A.2 COMPRESIÓN EN PILAS DE MAMPOSTERÍA

Para determinar la resistencia a la compresión de la mampostería se prepararon pilas de piezas sobrepuestas unidas con el mismo mortero usado en los muros. Estas pruebas se elaboraron siguiendo la mexicana para ensaye de pilas y muretes NMX-C-486-ONNCCE (2010).

Para la construcción de las pilas se unieron tres piezas con lo cual la relación altura a espesor fue en promedio de 5.26, por lo que el factor correctivo usado fue de 1.05. Las pilas se cabecearon con un yeso especial en las piezas extremas para garantizar una superficie uniforme contra la máquina de ensaye.

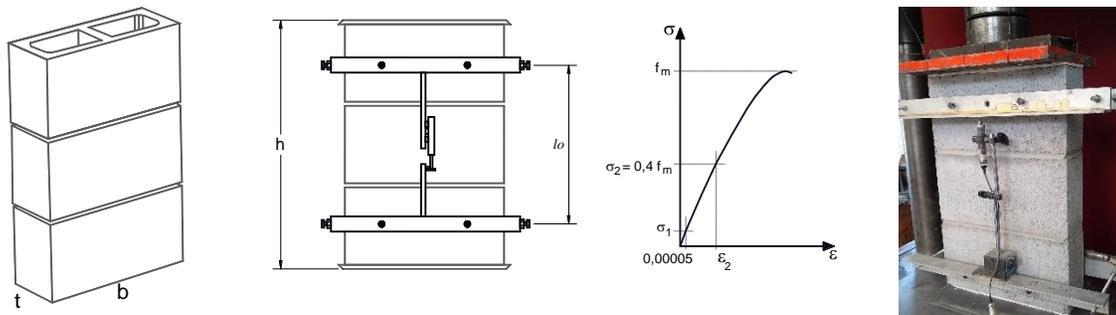


Figura A.1 Esquema del ensaye de pilas a compresión y ejemplo de pila ensayado

La elaboración de los muretes y pilas de cada espécimen se hizo simultáneamente a la construcción del mismo, deteniendo el trabajo a medio muro para colocar las hiladas y piezas con la misma mezcla usada en este. Los ensayos se hicieron cerca de la fecha de ensaye de los especímenes. En la Tabla A.2, se muestra un resumen de los resultados obtenidos.

El módulo de elasticidad se calculó como está definido en la misma norma mexicana, tomado como la pendiente de la secante que pasa por un punto de la gráfica al 40% de la resistencia. En la Tabla A.2 se presenta el módulo de elasticidad de cada pila y una correlación respecto a la resistencia a compresión de dicha pila. La variable ϵ_{fm} es la deformación unitaria registrada en la carga máxima (cuando se midió hasta la falla).

Los valores de diseño se obtuvieron reduciendo los esfuerzos resultantes de las pruebas, de forma tal que la probabilidad de que no se alcancen estos valores sea del 2%. El esfuerzo de diseño, f_m' , se obtuvo aplicando la ecuación A.2, donde $\overline{f_m}$ es el la media de las resistencias y c_m es el coeficiente de variación que no se debe tomar menor que 0.15.

$$f_m' = \frac{\overline{f_m}}{1 + 2.5 c_m} \tag{A.2}$$

Tabla A.2 Resultados de ensayos de pilas a compresión

Pila	Descripción	Dimensiones, cm			Carga kg	f_m^1 kg/cm ²	Promedio	E_m kg/cm ²	E_m/f_m	ϵ_{fm}
		t	b	h						
Pila-1	Espécimen	11.7	40.0	62.9	43,300	97.5	102.0	54,248	556	0.0022
Pila-2	MBRI-7	11.8	40.0	63.0	46,400	103.6		65,612	634	0.0022
Pila-3		11.7	40.0	62.7	46,600	104.9		54,722	522	0.0024
Pila-4	Espécimen	11.9	39.9	62.2	41,150	91.6	93.91	58,232	636	0.0034
Pila-5	MBRI-8	11.8	40.0	62.1	44,000	98.1		54,718	558	0.0024
Pila-6		11.8	39.9	62.1	41,150	92.0		74,568	811	0.0023
Pila-7	Espécimen	11.9	40.0	63.9	29,000	64.2	58.5	40,968	638	0.0033
Pila-8	MBRI-9	11.9	40.0	63.5	26,300	58.2		35,955	618	0.0031
Pila-9		11.8	40.0	63.9	23,800	53.2		30,280	570	0.0032
Pila-10	Espécimen	11.8	40.0	63.5	29,200	65.2	63.0	41,992	644	0.0028
Pila-11	MBRI-10	11.9	40.0	63.6	28,150	62.3		41,176	661	0.0024
Pila-12		11.8	40.0	63.3	27,600	61.6		42,470	689	0.0029
Pila-13	Espécimen	11.8	40.0	63.1	29,600	66.1	68.1	53,878	816	0.0019
Pila-14	MBRI-11	11.8	40.1	62.3	35,250	78.4		53,404	681	0.0025
Pila-15		11.8	40.1	63.0	26,800	59.7		53,044	889	0.0017
Pila-16	Espécimen	11.9	40.0	62.5	26,000	57.5	60.7	57,374	998	0.0021
Pila-17	MBRI-12	11.9	40.0	62.6	28,400	62.8		52,593	837	0.0022
Pila-18		11.9	40.0	63.0	28,000	61.9		53,251	860	0.0025
Pila-19	Espécimen	11.8	40.0	63.2	32,200	71.9	71.4	44,479	619	0.0028
Pila-20	MBC-2	11.8	40.0	63.0	32,300	72.1		48,726	676	0.0025
Pila-21		11.8	40.0	62.7	31,500	70.3		47,720	679	0.0026
Promedios						74.0		50,448	695	0.0025
Coef. de variación						0.23		0.2		

¹ El valor de la resistencia sobre área bruta, f_m , se presenta ya modificado por el factor de corrección debido a la esbeltez (relación h/t), que resultó en promedio cercano a 1.05.

Al aplicar la ecuación A.2, la resistencia de diseño resultó de: $f_m' = 4.6$ MPa (47.23 kg/cm²). En la Figura A.2 se muestran gráficas representativas de los ensayos de pilas a compresión.

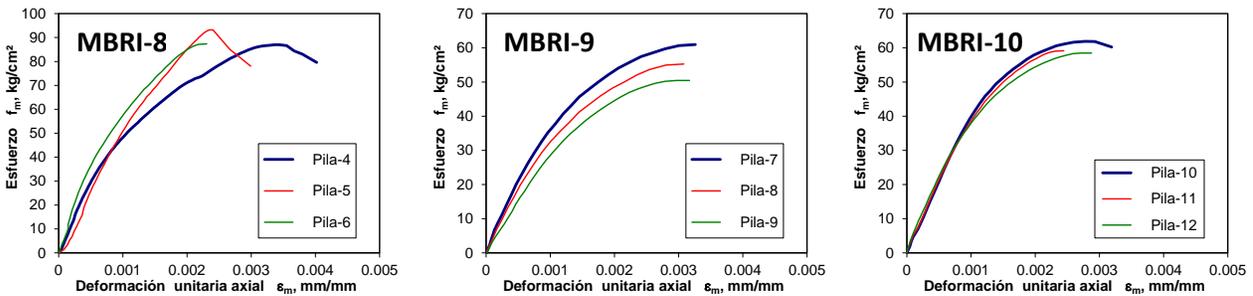


Figura A.2 Gráficas representativas del ensayo de pilas a compresión de piezas doble hueco

A.3 COMPRESIÓN DIAGONAL EN MURETES

Se construyeron tres muretes de mampostería por cada muro usando las mismas piezas y mortero con que se fabricó el mismo y fueron ensayadas a compresión diagonal siguiendo los requisitos de la norma mexicana para ensayo de pilas y muretes NMX-C-486-ONNCCE (2010). Los muretes tuvieron forma cuadrada

con una y media pieza de largo en la base por tres hiladas de altura y se ensayaron aplicando la carga de compresión a través de una de sus diagonales. Para aplicar la carga el murete se usaron dos cabezales de acero para colocarlos en las esquinas cargadas, como se muestra en la Figura A.3.

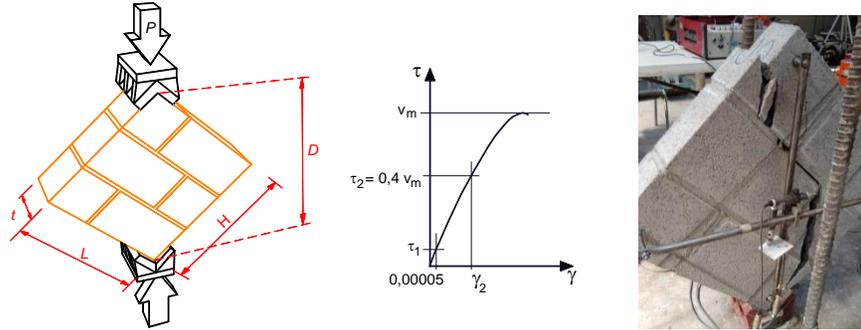


Figura A.3 Esquema de la prueba de murete a compresión diagonal y ejemplo de falla

El objeto de esta prueba es determinar la resistencia a compresión diagonal, v_m , que se toma como esfuerzo resistente a cortante. Para calcular este esfuerzo cortante se divide la carga registrada entre el área de la diagonal ($v = P/A$, donde $A = t D$, según se acota en la Figura A.3).

Se presentó el modo de falla en una trayectoria aproximadamente por la diagonal donde la grieta atravesó algunas piezas. El esfuerzo cortante resistente de diseño v_m' , se calculó utilizando la ecuación A.3 (CDMX, 2020), donde $\overline{v_m}$ es el la media de las resistencias medidas y c_v es el coeficiente de variación que no se debe tomar menor que 0.2.

$$v_m' = \frac{\overline{v_m}}{1 + 2.5 c_v} \tag{A.3}$$

En la Tabla A.3 se presentan los resultados de los muretes ensayados. Las longitudes L y H son el largo y la altura del murete, respectivamente; D es la dimensión de la diagonal cargada y t el espesor del murete, (ver Figura A.3). En la tabla se incluye el cálculo del esfuerzo de diseño para cada probeta.

Tabla A.3 Resultados de ensayos de muretes a compresión diagonal

Murete	Descripción	Dimensiones, cm				Área diag. $A = t \cdot D$, cm ²	Carga P , kg	Esfuerzo v_m , kg/cm ²	Promedio kg/cm ²
		D	t	L	h				
Mur-1	Espécimen	85.5	11.8	61.1	61.6	1008.9	4220	4.18	3.66
Mur-2	MBRI-7	86.7	11.8	61.1	62.5	1023.1	3870	3.78	
Mur-3		86.6	11.8	61.1	62.2	1021.9	3080	3.01	
Mur-4	Espécimen	86.0	11.7	61.0	61.7	1006.2	6200	6.16	4.92
Mur-5	MBRI-8	86.2	11.8	61.1	61.8	1017.2	4750	4.67	
Mur-6		85.9	11.8	61.2	61.7	1013.6	3970	3.92	
Mur-7	Espécimen	86.6	11.9	62.7	61.1	1030.5	4230	4.10	3.64
Mur-8	MBRI-9	86.5	11.9	62.1	61.2	1029.4	2920	2.84	
Mur-9		87.0	12.0	62.1	60.8	1044.0	4150	3.98	
Mur-10	Espécimen	86.7	11.9	61.0	62.5	1031.7	2500	2.42	3.30
Mur-11	MBRI-10	87.0	11.9	61.1	62.5	1035.3	3420	3.30	
Mur-12		86.6	11.9	61.1	62.1	1030.5	4300	4.17	
Mur-13	Espécimen	86.4	11.9	61.3	62.1	1028.2	5920	5.76	5.87
Mur-14	MBRI-11	86.8	11.9	61.3	62.1	1032.9	6620	6.41	
Mur-15		86.8	11.8	61.1	62.3	1024.2	5570	5.44	
Mur-16	Espécimen	86.0	11.8	60.8	62.0	1014.8	3380	3.33	4.18
Mur-17	MBRI-12	85.8	11.8	60.6	62.2	1012.4	5100	5.04	
Mur-18						---	---	---	
Mur-19	Espécimen	86.5	11.9	61.0	62.0	1029.4	6020	5.85	5.05
Mur-20	MBC-2	86.5	11.9	61.0	62.0	1029.4	5900	5.73	
Mur-21		86.0	11.9	61.0	62.0	1023.4	3650	3.57	
Promedio								4.38	
Coeficiente de variación								0.27	

El promedio de los ensayos fue de 0.43 MPa (4.38 kg/cnm²) con un coeficiente de variación de 0.27 que es mayor que el coeficiente de variación mínimo de $c_v = 0.2$. El esfuerzo de diseño general por compresión diagonal con la ecuación A.3 resultó de $v_m' = 0.26$ MPa (2.61 kg/cm²).

Aprovechando las probetas de muretes estas se pesaron y se obtuvieron valores de peso volumétrico bruto resultando de 146 kg/m² de muro.

A.4 COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO

Durante la construcción del modelo se hizo un muestreo del mortero usado para pegar los tabiques. Cada muestra consistió de tres probetas cúbicas de 50 mm de arista las cuales fueron ensayadas a compresión (Figura A.4) siguiendo el procedimiento de la norma mexicana NMX-C-061-ONNCCE (2010).

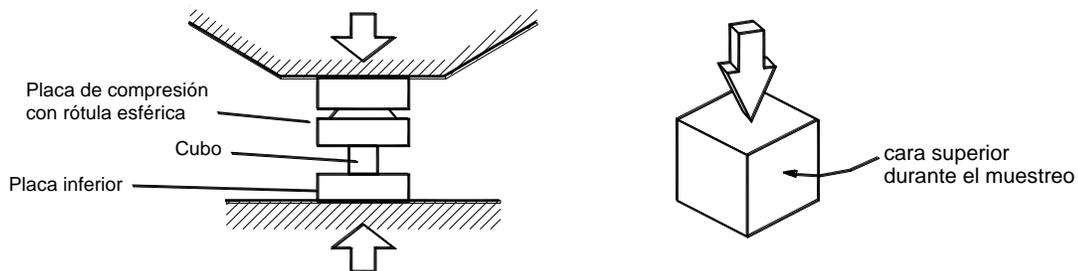


Figura A.4 Ensaye de cubos de mortero

El mortero usado fue elaborado para cumplir con el requisito del mortero tipo I según las NTC Mampostería (CDMX, 2020) dosificado para un proporcionamiento 1:¼:3 (un volumen de cemento, un cuarto de cal y tres veces el volumen de arena). En la Tabla A.4 se resumen los resultados de los ensayos de cubos donde cada dato en cada renglón es el promedio del ensayo de tres cubos tomados de la misma mezcla.

Tabla A.4 Resultados de ensayos a compresión de cubos de mortero (promedios de 3 cubos)

Muestra N°	Espécimen	Descripción	fj kg/cm ²	Promedio kg/cm ²
18	MBRI-7	Hiladas 1 a 5	97.8	162.8
19		Hiladas 6 a 9	118.2	
20		Hiladas ----	178.8	
21		Hiladas 10 a 12	256.4	
1	MBRI-8	Hiladas 1 y 2	105.6	106.7
2		Hiladas 11 y 12	107.9	
37	MBRI-9	Hiladas 1 a 4	254.0	269.5 (curadas)
39		Hiladas 5 a 9½	282.1	
41		Hiladas 5 a 9½	306.7	
43		Hiladas 9½ a 12	235.0	
44	MBRI-10	Hiladas 1 a 4	239.0	216.5 (curadas)
45		Hiladas 5 a 9	209.4	
46		Hiladas 10 a 12	201.1	
47	MBRI-11	Hiladas 1 a 4	250.4	242.3 (curadas)
48		Hiladas 5 a 9	244.4	
49		Hiladas 5 a 9	240.4	
50		Hiladas 10 a 12	234.0	
52	MBRI-12	Hiladas 5 y 6	258.6	254.3 (curadas)
53		Hiladas 5 y 6	274.7	
54		Hiladas 5 y 6	219.2	
55		Hiladas 5 y 6	264.6	
Promedio				
Coeficiente de variación				

El esfuerzo de compresión, promediando los datos de cada muro, fue 20.5 MPa (208.5 kg/cm²), con un coeficiente de variación de promedios de tres cubos de $c_j = 0.3$, por lo que el esfuerzo de diseño resultaría de 11.7 MPa (119 kg/cm²). Cabe hacer notar que se está promediando resultados de cubos que se dejaron curar al ambiente del laboratorio y de cubos curados por inmersión en agua. No obstante, si se considera los promedios de cada espécimen, los cubos curados en agua superan la resistencia de diseño de 12.52 MPa para mortero tipo I.

APÉNDICE B

CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES

B.1 CIMENTACIÓN Y CABEZAL

Para servir de base a los especímenes se usaron cuatro vigas de cimentación construidas y utilizadas en proyectos anteriores, con dimensiones de 80×50×300 cm, teniendo zonas huecas en medio de su anchura para recibir los armados de refuerzo vertical de castillos o barras aisladas. Como parte del proyecto se construyó una viga de cimentación adicional, armada con 8#8 longitudinalmente y juegos de estribos #3 a cada 10 cm em promedio. Fue colada con concreto premezclado de $f'_c = 60$ MPa (600 kg/cm²), resistencia que fue verificada en ensayos de cilindros. En la Figura B.1 se muestra el armado, cimbrado y colado de la viga de cimentación.



Figura B.1 Construcción de una viga de cimentación adicional

Para aplicar la carga horizontal en la parte superior de los especímenes se construyó una viga de concreto de forma desmontable, de sección una vez armado, de 45×42 cm, consistente de dos mitades simétricas, presforzadas, las cuales se unen y dejan un espacio en medio de ellas donde se hace el colado con el refuerzo vertical una vez que el cabezal es colocado sobre cada espécimen. Cada mitad se armó con 4#6 longitudinales en las esquinas y con E#3@20 cm. Se pretensó cada mitad con una barra #8 a una carga de $0.8f_y$. Las dimensiones y armado del cabezal se muestran en la Figura B.2y la construcción en la Figura B.3.

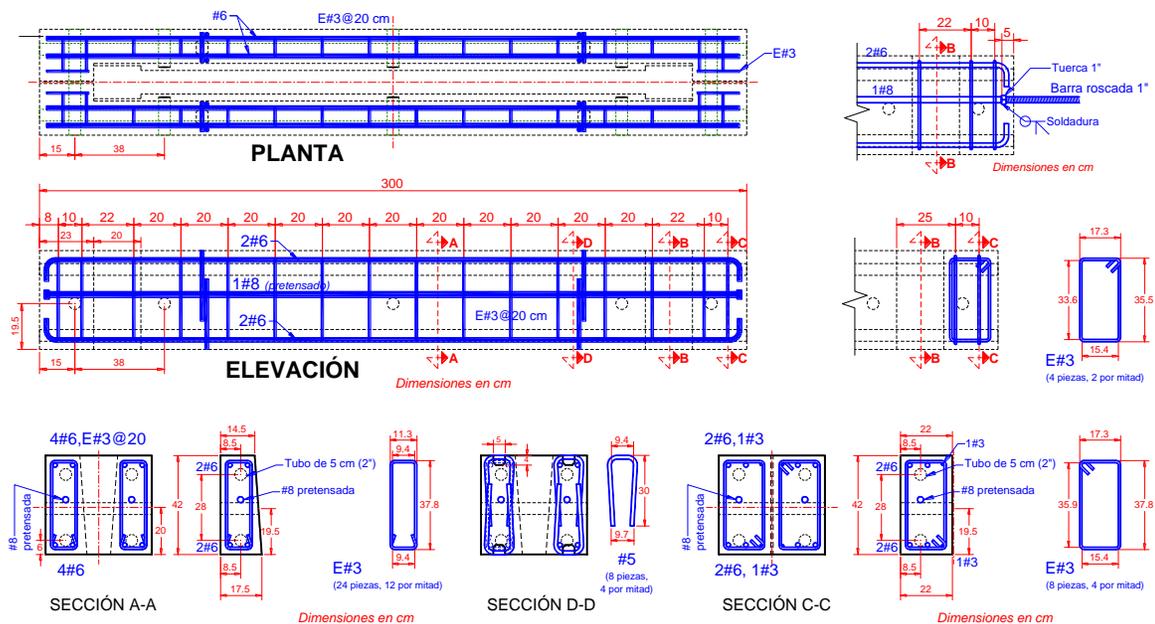


Figura B.2 Detalles de armados del cabezal desmontable

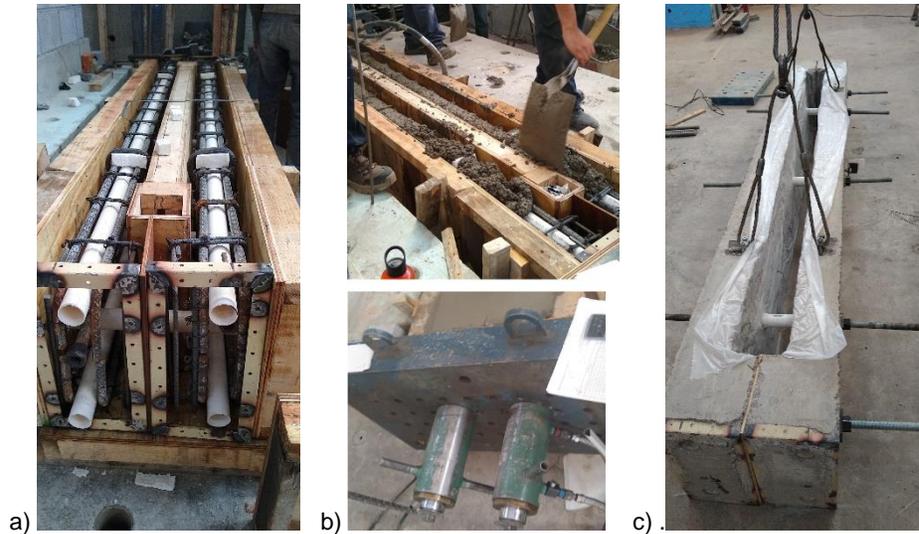


Figura B.3 Construcción del cabezal desmontable:
 a) armado, b) colado y presforzado, c) cabezal terminado

B.2 CONSTRUCCIÓN DEL ESPÉCIMEN CONFINADO (MBC-2)

Las piezas de mampostería se pegaron con un mortero convencional hecho en obra con dosificación por volumen 1:¼:3 que implica un volumen de cemento portland, un cuarto de cal y tres partes de arena limpia y cernida. Se tomaron muestras como cubos de mortero de 5 cm de arista. De los colados de anclaje al cimiento, la cadena de desplante, el cabezal y los castillos, se tomaron muestras cilíndricas del concreto.

Para el espécimen confinado se anclaron los armados de los castillos en la viga de cimentación, se levantaron las hiladas de bloque y se cimbraron y colaron los castillos (Figura B.4). Finalmente se colocó un armado de 4#3 y E#@20 cm en para la dala superior que, no obstante, iba a estar encerrada y embebida en la viga cabezal, elemento presforzado y muy robusto de 45×42 cm de sección.



Figura B.4 Construcción del espécimen MBC-2:
 a) cimentación y armado de castillos, b) construcción de mampostería, c) armado de la dala superior

B.3 CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES CON REFUERZO INTERIOR

Para la construcción de los muros reforzados interiormente se usaron barras verticales continuas a toda la altura de los modelos, ancladas a la viga de cimentación y a la cadena de desplante, por lo que cada bloque hueco que se colocaba debía ensartarse en las barras desde su extremo superior excepto el espécimen MBRI-12 que usó piezas especiales ranuradas. Para la colocación de las piezas el albañil usó una varilla como “garrucha” para subir cada pieza a dicha altura, por lo tanto no se flexionaron las barras ni se unieron con traslape quedando el refuerzo vertical completo y recto.

En los especímenes del MBRI-7 al MBRI-11 se usó mortero convencional con dosificación por volumen 1:¼:3 que representa el mortero tipo I según las NTCM (2020). Se tomaron muestras de cubos de mortero y cilindros del concreto de los anclajes y del relleno de celdas verticales.



Figura B.5 Anclaje a la base del refuerzo vertical, relleno de piezas y colocación de dos o tres alambres horizontales



Figura B.6 Construcción de las hiladas de mampostería

El relleno de las celdas con refuerzo se hizo con concreto fluido elaborado con grava de tamaño máximo de 10 mm. Se rellenaron las celdas cada dos hiladas (42 cm), posterior a lo cual se colocaron los alambres de refuerzo.

Todo el acero de refuerzo horizontal se colocó recto dentro del muro para poder ser anclados con ganchos verticales a 90° dentro de las celdas reforzadas rellenas de concreto, por lo que no se pusieron sobre las caras de los bloques. Las NTCM (CDMX, 2020) permiten pasar los alambres horizontales rectos sin quedar cubiertos de mortero cuando pasan por los huecos sin rellenar (sin embargo, en la práctica es común colocar estos alambres en las paredes de los bloques para que queden recubiertas de mortero).

B.4 CONSTRUCCIÓN DEL ESPÉCIMEN MBRI-12, PIEZAS RANURADAS “OPEN-END”

B.4.1 Características del espécimen

Este espécimen tuvo la particularidad de ser construido con bloque doble hueco tipo OPEN END desarrolladas por Industrial Bloquera Mexicana y pegadas con mortero seco predosificado superior a un tipo I denominado Pegablock-Stonecrete®, también de IBM. El objetivo de este ensaye fue el de revisar si no se presentan fallas locales en las piezas open end que den lugar a alguna afectación en la resistencia del muro o en su capacidad de distorsión.

Los bloques fueron fabricados con la geometría requerida equivalente a dejar ranuras en una o dos de las paredes transversales de las piezas. Se elaboraron tres tipos de piezas, dos de longitud completa de 40 cm y una media pieza, también con la abertura de ranura. Por su geometría se clasifican en: tipo “A”, que tienen la ranura en la cara extrema, y la tipo “C” con ranura en la cara extrema y en la cara o pared central. El espesor de las paredes exteriores e interiores de la pieza es de 25 mm en la cara superior y de 30 mm en la cara inferior; el ancho de la ranura varía de 33 mm arriba a 30 mm abajo. En la Figura B.7 se muestra la geometría de la cara superior de estas piezas.

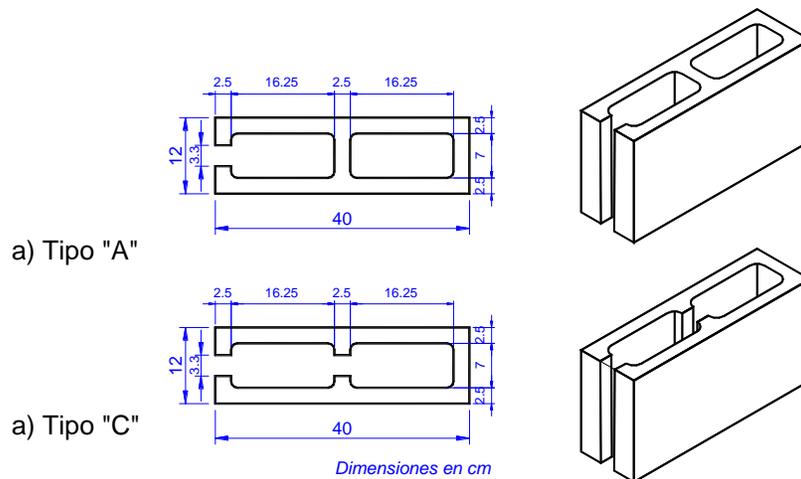


Figura B.7 Piezas ranuradas Open End: a) tipo “A”, b) tipo “B”

Considerando la cara más desfavorable (la cara superior en la fabricación) que tiene el menor espesor de paredes, el área neta nominal de la pieza tipo “A” sería de 244.25 cm² y dada el área bruta de 12×40 = 480 cm², la relación de área neta a bruta tendría que ser de 0.51 %, que cumple con el mínimo requerido en piezas huecas de uso estructural según las NTCM (2020) y la NMX-C-404 (Onncce, 2012).

B.4.2 Consideraciones en el cálculo de la resistencia

No obstante, ya que precisamente la celda con la ranura siempre llevará barras de refuerzo (o ductos de instalaciones) y siempre será rellena con mortero o concreto, entonces no se deberá tomar para fines de diseño como área vacía, sino como parte del área neta. En las ecuaciones de diseño por refuerzo horizontal de las NTCM se usa el factor de área neta f_{an} (CDMX, 2020) y en muros con refuerzo interior se sustituye por el factor para un muro con refuerzo interior se sustituye por el factor f_{nm} (ver sección 2.2.3.1). Se repite aquí la ecuación recomendada:

El cálculo práctico de dicho factor es:

$$f_{nm} = A_{nT} / A_T, \quad A_{nT} = A_T - n_h A_{hueco} \quad (\text{ecuación 2.9})$$

donde A_{nT} es el área neta total $A_T = t \cdot L$ menos el área de los huecos no rellenos. Dado esto no es necesario considerar la pérdida de área por la ranura en el requisito de área neta mínima.

Por otro lado, siendo “piezas accesorias” (NMX-C-404, 2012), no es necesario ensayarlas a compresión, pero, para llevar un buen control de su calidad, es recomendable dicho ensayo. Dada la reducción de área, lo recomendable es comparar el esfuerzo resistente a compresión medido sobre área neta con el de las piezas que sustituye también calculado sobre área neta.

B.4.3 Proceso constructivo

El diseño de estas piezas especiales, fabricadas en planta por vibro compresión y adaptando los moldes para dar la geometría requerida, tiene el objetivo de facilitar el proceso constructivo, ya que se colocan a nivel de la hilada sin requerir subirlas hasta ensartarlas en la parte superior del refuerzo vertical, reduciendo costos y esfuerzo del personal y evitando la mala práctica de doblar las barras de refuerzo en la etapa constructiva para enderezarlas al avanzar la altura del muro. Un ejemplo de dichos problemas constructivos se muestra en la que será parte de una norma mexicana sobre procedimientos constructivos (en proceso de declararse su vigencia).

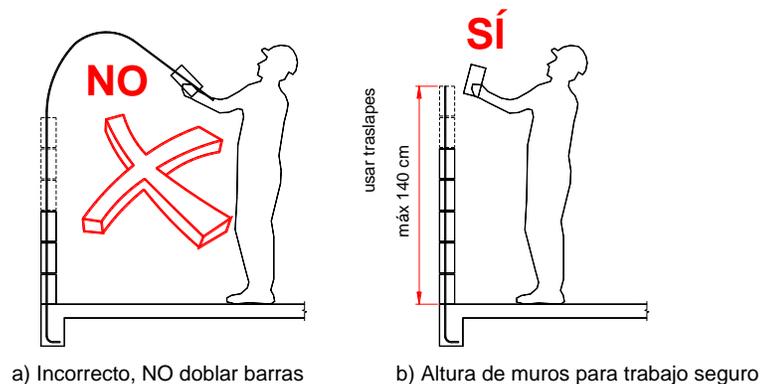


Figura B.8 Requisitos de construcción de muros (Proy de NMX, 2020)

En el citado proyecto de norma mexicana de procedimientos constructivos se incluye como opción el uso de piezas con ranura para la colocación en donde hay barras de refuerzo vertical como se muestra en la Figura B.9.

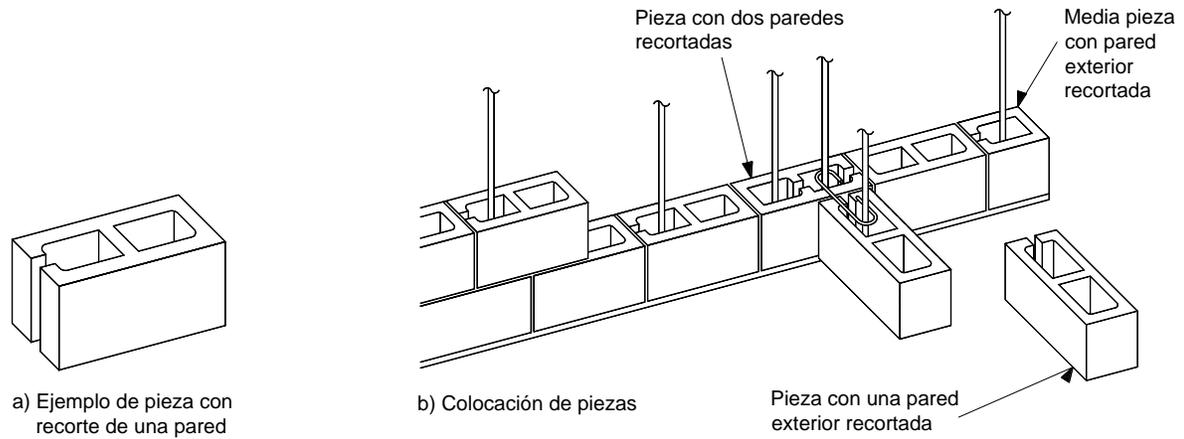


Figura B.9 Requisitos de construcción de muros (Proy de NMX, 2020)

En la Figura B.10 se muestra el avance en la construcción del espécimen MBRI-12, y cómo se insertan las piezas donde hay una (pieza tipo “C”) o dos celdas con barras (tipo “A”). Se usó mortero industrializado Pegablock® para unir las piezas y se rellenaron las celdas con el concreto que se usó en todo el proyecto experimental, usando agregado grueso de 10 mm de tamaño máximo. En la construcción se inspeccionó y constató que el concreto llenaba toda la celda y la zona de la ranura.

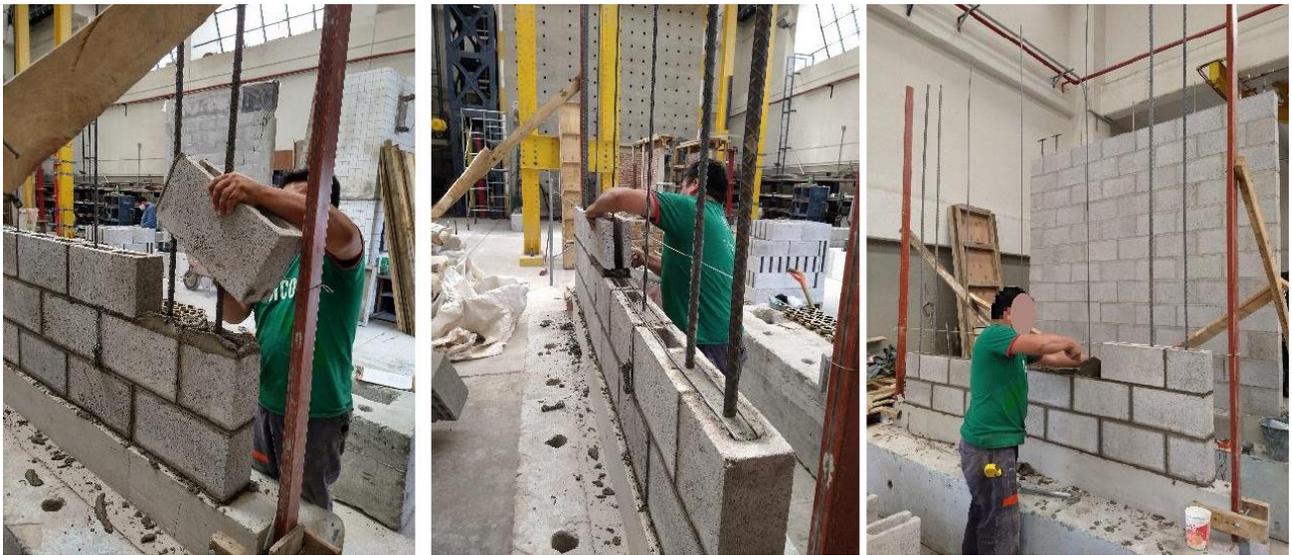


Figura B.10 Construcción con piezas ranuradas Open End (Pérez, 2020)

REFERENCIAS

Flores L.E. (2019-a), “Ensayes de muros de bloque hueco de concreto con refuerzo interior ante carga lateral y ante carga vertical”, Informe Interno, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, diciembre, 49 pp.

Flores L.E. (2019-b), “Ensayes de muros de bloque hueco de concreto con refuerzo interior ante carga lateral”, Memorias del XXII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Monterrey, N.L. México, 20 a 23 de noviembre, art VII-07, 26 pp.

Flores L.E., Pérez J.A, Pérez Gavilán J.J (2021), “Ensaye de muros de bloque hueco de concreto de resistencia alta con refuerzo interior, variando el refuerzo horizontal”, Memorias del XXII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Aguascalientes, Ags., 18 a20 de febrero de 2021, 17 pp.

Gobierno de la Ciudad de México (CDMX, 2017), “Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería”, Gaceta Oficial de la Ciudad de México, No. 220-Bis, 15 de diciembre de 2017, pp. 614-688.

Gobierno de la Ciudad de México (CDMX, 2020), “Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería con comentarios”, Gaceta Oficial de la Ciudad de México, No. 454, 19 de octubre de 2020, pp. 29-157.

NMX-C-083-ONNCCE (2014), “Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes – Método de ensayo”, Norma Mexicana, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 10 pp.

NMX-C-128-ONNCCE (2013), “Industria de la construcción – Concreto sometido a compresión – Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson”, Norma Mexicana, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 12 pp.

NMX-C-404-ONNCCE (2012), “Industria de la construcción – Mampostería – Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – Especificaciones y métodos de ensayo”, Norma Mexicana, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 16 pp.

NMX-C-464-ONNCCE (2010), “Industria de la construcción – Mampostería – Determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes, así como determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o de concreto – Método de ensayo”, Norma Mexicana, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 23 pp.

Proy-NMX-C-559-ONNCCE (2020), “Industria de la Construcción – Mampostería – Procedimientos Constructivos para Muros de Mampostería – Requisitos”, Proyecto de Norma Mexicana, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 65 pp

Pérez J.A. (2020), “Reporte del muro de block reforzado interiormente con piezas open en denominado MBRI-12 ensayado en el Cenapred el 18 de agosto de 2020”, Reporte de ensaye, Industrial Bloquera Mexicana, 26 de agosto de 2020, 6 pp.