



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

**ENSAYES ANTE FUERZA LATERAL DE MUROS CONFINADOS DE BLOQUE  
MULTIPERFORADO DE CONCRETO**

Leonardo E. Flores Corona<sup>1</sup>  
José Álvaro Pérez Gómez<sup>2</sup>

**Dirección de Investigación**

<sup>1</sup>Subdirección de Vulnerabilidad Estructural

<sup>2</sup>Industrial Bloquera Mexicana

Diciembre de 2020



# CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	1
<b>CAPÍTULO 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>3</b>
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 Geometría de los muros.....	5
2.1.4 Propiedades nominales de los materiales.....	6
2.2 PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA.....	6
2.2.1 Resistencia a compresión .....	6
2.2.2 Resistencia a flexocompresión.....	7
2.2.3 Resistencia a cortante.....	8
2.2.4 Resistencia esperada en cada espécimen.....	10
2.3 PREDICCIÓN DE LA RIGIDEZ.....	10
2.4 INSTRUMENTACIÓN .....	11
2.5 APLICACIÓN DE CARGAS .....	12
2.5.1 Marco de carga .....	12
2.5.2 Historia de carga .....	13
<b>CAPÍTULO 3 RESULTADOS GENERALES DE LOS ENSAYES.....</b>	<b>15</b>
3.1 RESULTADOS DE ENSAYES DE MATERIALES.....	15
3.2 ENSAYES DE MUROS ANTE FUERZAS SÍSMICAS.....	16
3.2.1 Espécimen MC4-BH8.....	16
3.2.2 Espécimen MC5-BH8.....	17
3.2.3 Espécimen MC6-BH8.....	18
3.3 COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS TRES ESPECÍMENES.....	19
3.4 COMPARACIÓN DE LA RIGIDEZ TEÓRICA CON LA EXPERIMENTAL.....	20
<b>CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES .....</b>	<b>23</b>
<b>APÉNDICE A RESULTADOS DE ENSAYES DE MATERIALES .....</b>	<b>25</b>
A.1 GEOMETRÍA Y ENSAYES A COMPRESIÓN DE BLOQUES DE CONCRETO .....	25
A.2 COMPRESIÓN EN PILAS DE MAMPOSTERÍA .....	27
A.3 COMPRESIÓN DIAGONAL EN MURETES .....	28
A.4 COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO.....	30
A.5 COMPRESIÓN EN CILINDROS DE CONCRETO .....	31
<b>APÉNDICE B CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES.....</b>	<b>35</b>
B.1 CIMENTACIÓN Y HABILITADO DEL ACERO .....	35
B.2 MORTERO PARA PEGA DE LAS PIEZAS.....	36
B.3 CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES .....	36
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>39</b>



## **RESUMEN**

Se realizó un estudio de tres muros cuadrados de mampostería confinada de bloque multiperforado de concreto de 2.55 m de longitud, ensayados ante fuerza horizontal cíclica reversible aplicada en su parte superior. El primer muro se construyó con mortero convencional tipo I y los otros dos con mortero industrializado, de los cuales el último llevó alambres de refuerzo horizontal entre las hiladas. Se verificó la predicción teórica de la resistencia según las normas de mampostería de la ciudad de México para piezas de alta resistencia partiendo de resultados de ensayos de muretes a compresión diagonal, así como la comparación del uso de mortero industrializado contra el convencional. Se constató cómo el refuerzo horizontal aumentó la resistencia y capacidad de deformación hasta un orden del 30% del espécimen sin refuerzo.

## **ABSTRACT**

Three confined masonry of multi-perforated concrete block walls were tested. The walls were squared of 2.55 m in length, tested against reversible cyclical horizontal loading applied in their upper part. The first wall was built with conventional type I mortar and the other two with industrialized mortar, of which the last one carried horizontal reinforcing wires between the courses. The theoretical prediction of resistance was verified according to the masonry standards of Mexico City Building Code, based on the results of tests of diagonal compression walls, as well as the comparison of the use of industrialized mortar against conventional mortar. It was verified how the horizontal reinforcement increased the shear strength and deformation capacity to an order of 30% of the specimen without reinforcement.



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

En México el uso de la mampostería como sistema estructural ha sido la solución que la sociedad ha preferido para edificaciones por el relativo bajo costo que implican. El desarrollo del conocimiento en ingeniería estructural y diseño sismorresistente ha permitido mejorar las normatividades sobre el diseño de estructuras de mampostería actualizándose las normas de construcción gracias a campañas de ensayos experimentales de sistemas estructurales. Desde los años 1970 se definieron criterios y expresiones de cálculo para predecir la resistencia y capacidad de deformación de los sistemas estructurales y, en el caso de la resistencia a fuerza cortante, se han basado en la obtención de un esfuerzo cortante resistente con la prueba de muretes pequeños a compresión diagonal. No obstante, la mampostería estudiada en aquellos años era predominantemente de baja resistencia, por lo que ha existido la duda de si con materiales modernos de alta resistencia y superior desempeño siguen siendo válidos los cálculos con las expresiones disponibles.

En años recientes se han desarrollado campañas de ensayos para estudiar el comportamiento de muros de mampostería elaborados con piezas de alta resistencia (Lizárraga y Pérez Gavilán, 2011 y 2014), en particular los beneficios del uso de alambres de refuerzo horizontal en muros de mampostería confinada de piezas de alta resistencia, lo que llevó a la modificación de las ecuaciones que estiman la contribución a la resistencia a cortante del refuerzo horizontal (Cruz y otros, 2019).

En este trabajo se estudia el comportamiento de muros de mampostería de piezas de concreto multiperforado con altas resistencias a compresión y cortante, comparando dos tipos de mortero y el uso de refuerzo horizontal colocado entre las hiladas.

### 1.1 OBJETIVOS

- Estudiar el comportamiento de muros confinados de piezas multiperforadas de concreto, comparando los resultados de resistencia con la predicción teórica según las normas de diseño de mampostería de 2020 del reglamento de construcciones de la Ciudad de México.
- Comparar el comportamiento de un espécimen con un mortero industrializado de alto desempeño con el de su equivalente con mortero hecho en obra.
- Verificar experimentalmente la resistencia ante carga horizontal cíclica reversible de muros de mampostería de bloque de concreto con una cuantía alta de refuerzo horizontal y compararlo con un muro sin dicho refuerzo.
- Evaluar la rigidez inicial y la degradación de rigidez con el daño en los especímenes.
- En su caso recomendar modificaciones al procedimiento de diseño y/o construcción si se determina que mejorará la respuesta estructural.





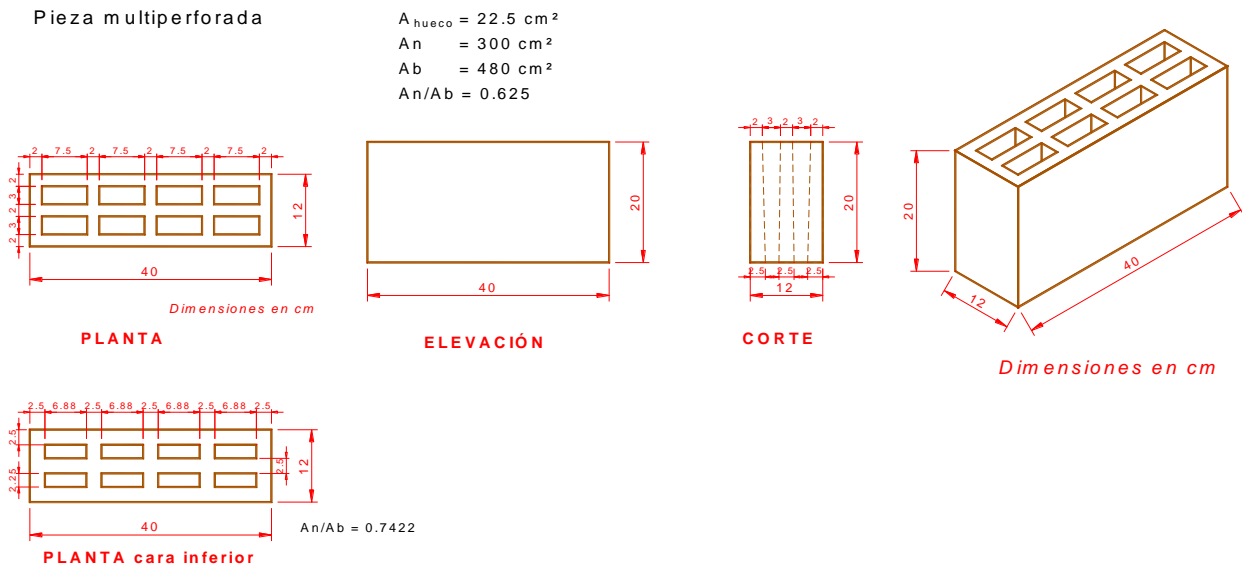
## CAPÍTULO 2

### PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ESPECÍMENES

##### 2.1.1 Piezas de mampostería

Para este estudio se usaron bloques de concreto del tipo multiperforado; la geometría de las piezas se muestra en la Figura 2.1 con dimensiones nominales de 12×20×40 cm (ancho, altura y largo).



**Figura 2.1 Piezas de concreto vibrocomprimido multiperforado BH8 (dimensiones nominales)**

##### 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 (CDMX, 2020) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (Ciudad de México), y que refieren a diversas normas mexicanas de especificaciones y métodos de ensaye. 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 piezas unidas por mortero. 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.



### 2.1.3 Geometría de los muros

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

#### 2.1.3.1 Variables de estudio

Las variables a estudiar se identificaron como las siguientes:

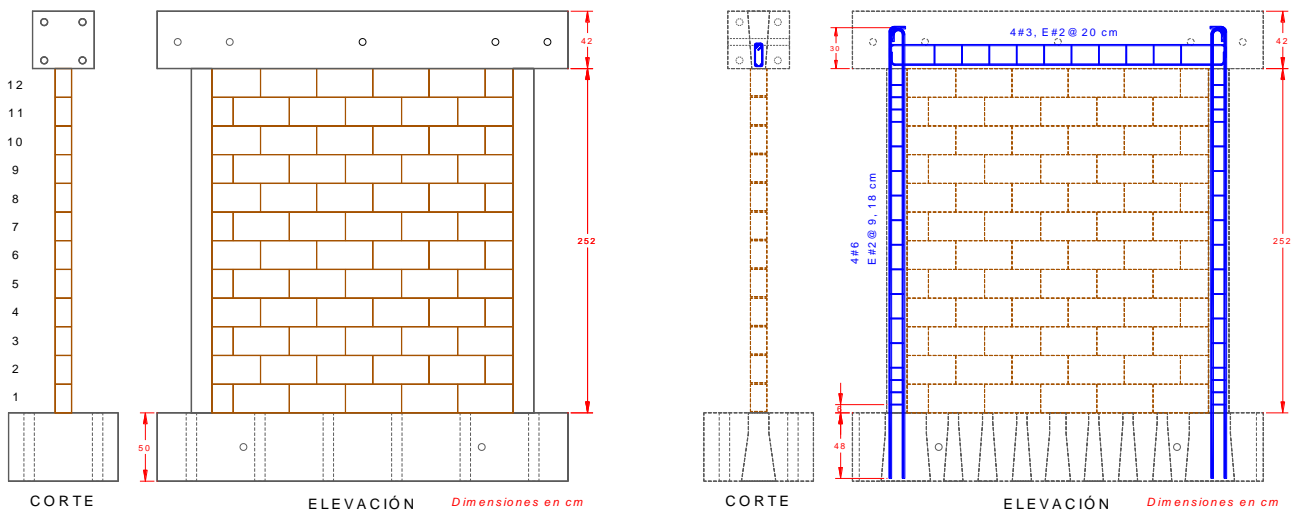
- Mortero de pega: se estudió mortero tipo I hecho en obra dosificado 1:¼:3 y mortero industrializado Pegablock® de Stonecrete®.
- Relación de aspecto: se estudiará solo muros cuadrados ( $H/L = 1$ ).
- Tipo de ensayo: muros de carga ante fuerza horizontal cíclica reversible cuasi-estática.
- Refuerzo horizontal: uno de los muros fabricados con mortero industrializado llevó refuerzo horizontal mediante alambres del No. 2 (de 0.63 cm de diámetro, es decir, ¼ pulgada).
- Castillos externos: reforzados con cuatro barras longitudinales del número 6 (diámetro de 1.9 cm) diseñados para evitar la falla por flexión.

#### 2.1.3.2 Dimensiones y refuerzo

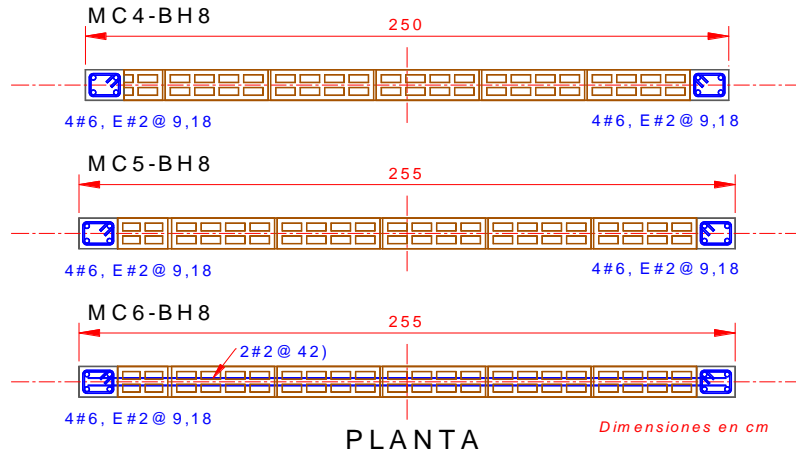
Considerando las anteriores variables los especímenes estudiados son los mostrados en la Tabla 2.2. El primer muro en construir fue el MC4; sin embargo, no se había tomado en cuenta la longitud de 40 cm de las piezas al anclar el refuerzo de los castillos por lo que el largo del muro quedo de  $L=250$  cm, esta longitud se consiguió con un ajuste recortando una pieza de cada hilada. Los siguientes muros tuvieron cinco y media piezas de 40 cm y cinco juntas verticales, más dos castillos de 15 cm, por lo que el largo nominal de los muros fue de  $L = 255$  cm. La altura, con 12 hiladas de 20+1 cm fue de 252 cm.

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

No.	Nombre	Castillos	Refuerzo horizontal	$p_h \times f_{yh}$ kg/cm <sup>2</sup>	Mortero
1	MC4-BH8	4#6	---	0	tipo I
2	MC5-BH8	4#6	---	0	industrializado
3	MC6-BH8	4#6	2(1/4) @ 42	7.5	industrializado



**Figura 2.4 Geometría de los especímenes**



**Figura 2.5 Sección transversal y armado de los castillos**

## 2.1.4 Propiedades nominales de los materiales

Las propiedades nominales de los materiales fueron:

* Concreto de vigas de cimentación	$f_c'$	= 600 kg/cm <sup>2</sup>
* Concreto de anclaje a cabezal y cim	$f_c'$	= 250 kg/cm <sup>2</sup>
* Concreto de castillos	$f_c'$	= 250 kg/cm <sup>2</sup>
* Piezas concreto multiperforadas	$f_p'$	= 150 kg/cm <sup>2</sup>
	$f_m'$	= 120 kg/cm <sup>2</sup>
	$v_m'$	= 10 kg/cm <sup>2</sup>
* Acero vertical	$f_y$	= 4200 kg/cm <sup>2</sup>
* Acero horizontal	$f_{yh}$	= 6000 kg/cm <sup>2</sup>

## 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, es 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:

$$P_R = F_R F_E (f_m' A_T + \Sigma A_s f_y) \quad (2.1)$$

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)
- $\Sigma A_s$  suma de todas las áreas del refuerzo vertical de los castillos;
- $f_y$  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 castillo 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:

$$M_R = F_R A_s f_y d' + 0.3 P_u d, \quad \text{si } P_u < P_R/3 \quad (2.2)$$

donde

- $F_R$  factor de resistencia, se tomará 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  $P$ .

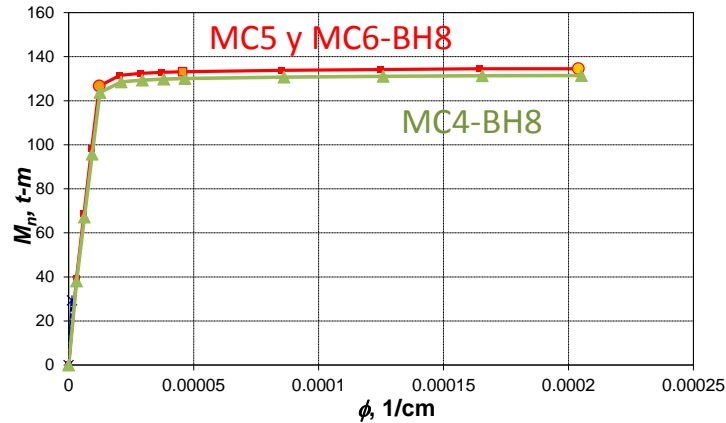
Tomando en cuenta la geometría de los especímenes y las propiedades nominales de los materiales (con  $f_m' = 120 \text{ kg/m}^2$ ) se obtienen los resultados de la Tabla 2.3. El cortante asociado al momento resistente se calculó dividiendo el momento entre la altura del muro hasta la elevación de aplicación de la carga que es de 2.72 m:  $V_{MR} = M_R/2.72$ .

Para este cálculo más refinado se puede construir un diagrama de interacción momento-carga axial y obtener el momento resistente para la carga axial de interés, o bien el cálculo del diagrama momento-curvatura para una carga vertical establecida.

**Tabla 2.3 Resistencias nominales a flexo-compresión con cálculo simplificado**

No.	Especímen	Armado	$A_s$ cm <sup>2</sup>	L cm	d cm	P t	$P_R$ t	$M_0$ t-m	$M_{R, \text{ simple}}$ t-m	$V_{MR, \text{ simple}}$ t
1	MC4-BH8	4#6	11.4	250	243	15.0	319.0	112.5	123.4	45.4
2	MC5-BH8	4#6	11.4	255	248	15.3	324.1	114.9	126.3	46.4
3	MC6-BH8	4#6	11.4	255	248	15.3	324.1	114.9	126.3	46.4

Para este cálculo más refinado se puede construir un diagrama de interacción momento-carga axial y obtener el momento resistente para la carga axial de interés, o bien el cálculo del diagrama momento-curvatura para una carga vertical establecida. Para realizar este último cálculo se procedió a hacer un análisis discretizando la mampostería y el concreto en fibras, tomando en cuenta todas las barras de acero, tanto a tensión como a compresión, y usando un modelo del comportamiento del acero elasto-plástico perfecto. Con estas consideraciones se construyeron los diagramas momento-curvatura mostrados en la Figura 2.6.



**Figura 2.6** Diagramas momento-curvatura en la base de los especímenes

En la Tabla 2.4 se dan los parámetros principales del cálculo de diagramas momento-curvatura mostrados en la figura anterior. En dicha tabla  $M_y$  es el momento de fluencia (cuando la primera barra a tensión alcanza el esfuerzo de fluencia,  $f_y$ ),  $M_p$  es el momento plástico, es decir, el máximo momento flexionante desarrollado cuando la mampostería o el concreto se aplastan a compresión. Un cálculo adicional se realizó suponiendo que no había carga vertical (flexión pura). Los valores de  $M_y$  y de  $M_p$  son puntos pertenecientes a las curvas de la Figura 2.6. El cortante asociado al momento máximo se calculó dividiendo el momento entre la altura de 2.6 m:  $V_{Mp} = M_p/2.6$ .

**Tabla 2.4** Resistencias nominales a flexión de los especímenes, con diagrama interacción M-P

No.	Especímen	$M_{P, P=0}$ t·m	P t	$M_p$ t·m	$V_{Mp}$ t
1	MC4-BH8	113.6	15.0	131.3	48.3
2	MC5-BH8	115.9	15.3	134.4	49.4
3	MC6-BH8	115.9	15.3	134.4	49.4

**Tabla 2.5** Resistencias nominales a flexión de los especímenes, con diagrama momento-curvatura

No.	Especímen	$M_{P, P=0}$ t·m	P t	$M_y$ t·m	$M_p$ t·m	$V_{Mp}$ t
1	MC4-BH8	114.4	15.0	123.7	131.4	48.3
2	MC5-BH8	116.8	15.3	126.7	134.6	49.5
3	MC6-BH8	116.8	15.3	126.7	134.6	49.5

De las tres tablas anteriores se observa coincidencia de resultados confirmándolos. De ellos el cálculo aproximado con el método optativo de las NTC-M, para muros a flexo-compresión (ec. 2.2), resultó del lado conservador y con un error de solo 6% respecto a los cálculos más refinados.

## 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 tomará el cálculo de las NTC-M. La expresión es:

$$V_{mR} = F_R (0.5v_m' A_T + 0.3P) \cdot f \leq 1.5F_R v_m' A_T \cdot f \quad (2.3)$$

donde

$F_R$  factor de resistencia, se tomará igual a 1.0 para la predicción en estos ensayos;

$v_m'$  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  $v_m' = 1$  MPa (10 kg/cm<sup>2</sup>) para piezas multiperforadas BH8.

Con el esfuerzo vertical  $\sigma = 5$  kg/cm<sup>2</sup> las cargas axiales son:

$A_T = L \cdot t = 12 \times 250 = 3000$  cm<sup>2</sup>;  $P = \sigma \cdot A_T = 15$  t, para el espécimen MC4,  
 $A_T = 12 \times 255 = 3060$  cm<sup>2</sup>; y  $P = 15.3$  t, para los especímenes MC5 y MC6.

a) Contribución de la resistencia a cortante del refuerzo horizontal

Para muros con refuerzo horizontal las NTC-M dan la siguiente ecuación:

$$V_{sR} = F_R \eta p_h f_{yh} A_T \quad (2.4)$$

$$p_h = \frac{A_{sh}}{s_h \cdot t} \quad (2.5)$$

donde

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

$$\eta = \frac{V_{mR}}{F_R p_h f_{yh} A_T} (k_0 k_1 - 1) + \eta_s \quad (2.6)$$

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

$$k_1 = 1 - \alpha p_h f_{yh} \quad (2.7)$$

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

$\eta_s$  factor que vale  $\eta_s = 0.55$  cuando  $f_m' \leq 6$  MPa (60 kg/cm<sup>2</sup>) y 0.75 si  $f_m' \geq 6$  MPa (60 kg/cm<sup>2</sup>).  
 Si  $p_h f_{yh} > 0.1 f_{an} f_m'$  entonces se multiplica  $\eta_s$  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 multiperforadas de este estudio  $f_{an} = 0.625$ .

En el espécimen MC6 se colocaron dos alambres 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.

El producto de la cuantía por el esfuerzo de fluencia debe ser  $p_h f_{yh} \geq 3$  kg/cm<sup>2</sup>.

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:

$$V_R = V_{mR} + V_{sR} \quad (2.8)$$

En la Tabla 2.6 se muestran los resultados del cálculo de la resistencia a cortante.

**Tabla 2.6 Resistencia nominal cortante de los especímenes**

No.	Especímen	Refuerzo horizontal	$p_h$	$p_h \cdot f_{yh}$ kg/cm <sup>2</sup>	diseño $p_h \cdot f_{yh}$	$\eta$	$P$ t	$V_{mR}$ t	$V_{sR}$ t	$V_R$ t
-----	-----------	---------------------	-------	--	------------------------------	--------	----------	---------------	---------------	------------

<i>kg/cm<sup>2</sup></i>										
1	MC4-BH8	---	---	0	0	0	15	19.5	0	19.5
2	MC5-BH8	---	---	0	0	0	15.3	20.0	0	20.0
3	MC6-BH8	2(1/4) @ 42	0.00126	7.5	7.5	0.625	15.3	20.0	14.4	34.4

### 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:

$$\begin{aligned}
 & F_R \mu (A_{vf} f_y + N_u) \\
 & F_R [ 14A + 0.8(A_{vf} f_y + N_u) ] \\
 & F_R 0.25 f_c' A
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

$A_{vf}$  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

$\mu$  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  $f_m' = 120 \text{ kg/cm}^2$ .

Se usará un factor de reducción unitario ( $F_R = 1$ ) y se consideraron los castillos con 4#6 ( $A_{vf} = 11.4 \text{ cm}^2$ ):

$$\begin{aligned}
 1 (1) [ 2 \times 11.4 \times 4200 + 15000 ] / 1000 &= 110.8 \text{ t} \\
 1 [ 14(3000) + 0.8(2 \times 11.4 \times 4200 + 15000) ] / 1000 &= 130.6 \text{ t} \\
 F_R 0.25 f_m' A_T = 1 (0.25) (120 \times 3000) / 1000 &= 90.0 \text{ t (rige)}
 \end{aligned}$$

En forma similar se calculó la resistencia para los otros especímenes. El resumen en términos de fuerza cortante se presenta en la Tabla 2.7.

### 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. Como cálculo más exacto para la falla por flexión (para  $V_{Mp}$ ) se tomó el del análisis momento curvatura. En la Tabla 2.7 se enlistan las resistencias y se anota como  $V_{min}$  la que predominaría.

**Tabla 2.7 Resistencias teóricas ante la fuerza horizontal**

No.	Espécimen	$V_{R,fricc}$ t	$V_R$ t	$V_{Mp}$ t	$V_{min}$ t	Modo de falla
1	MC4-BH8	90.0	19.5	48.3	19.5	cortante
2	MC5-BH8	91.8	20.0	49.5	20.0	cortante
3	MC6-BH8	91.8	34.4	49.5	34.4	cortante

## 2.3 PREDICCIÓN DE LA RIGIDEZ

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

$$Rig = V / \delta_h \tag{2.10}$$



La deformación teórica en el rango elástico,  $\delta_h$ , 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,  $\delta_h$ , se calcula como:

$$\delta_h = \frac{VH^3}{3E_m I} + \frac{VH}{G_m A_v} \quad (2.11)$$

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  $E = 800f_m'$ , el módulo de cortante como  $G_m = 0.2E_m$ . Las propiedades nominales tomadas fueron:

$$E_c = 8000 \sqrt{f_c'} = 126,491 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_m = 800 f_m' \text{ para piezas de concreto, donde } f_m' = 120 \text{ kg/cm}^2 \text{ (nominal), y } G_m = 0.2E_m.$$

$$E_m = 96,000 \text{ kg/cm}^2, G_m = 19,200 \text{ kg/cm}^2$$

Para el momento de inercia de los muros con castillos externos se toman estos en cuenta mediante la sección transformada. Sea la relación de módulos de elasticidad,  $n$ :

$$n = E_c / E_m = 126491 / 96000 = 1.32$$

Se obtiene el momento de inercia como:

$$I = t \cdot L_m^3 / 12 + 2n [ b_c h_c^3 / 12 + A_c (L - h_c)^2 / 4 ] \quad (2.12)$$

donde

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

Cuando la rigidez del concreto de los castillos es mayor que la de la mampostería el área de cortante se puede calcular como el área transversal  $A_v = A_T = t \cdot L$ .

Los resultados del cálculo de la rigidez inicial usando propiedades nominales de los materiales se presentan en la Tabla 2.8.

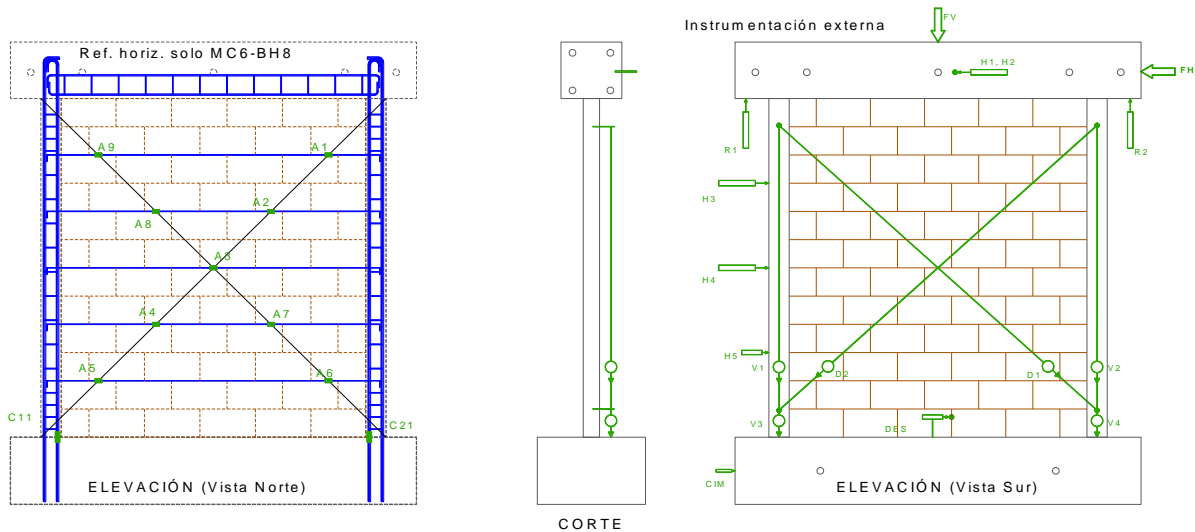
**Tabla 2.8 Rigideces teóricas con propiedades nominales**

No.	Espécimen	$f_c'$ kg/cm <sup>2</sup>	$f_m'$ kg/cm <sup>2</sup>	$b_c \times h_c$ cm	$t$ cm	$L$ cm	$A_v$ cm <sup>2</sup>	$I$ cm <sup>4</sup>	Rig t/cm
1	MC4-BH8	250	160	12x15	12	250	3000	17,205,773	119.8
2	MC5-BH8	250	160	12x15	12	255	3060	18,230,039	124.0
3	MC5-BH8	250	160	12x15	12	255	3060	18,230,039	124.0

## 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.

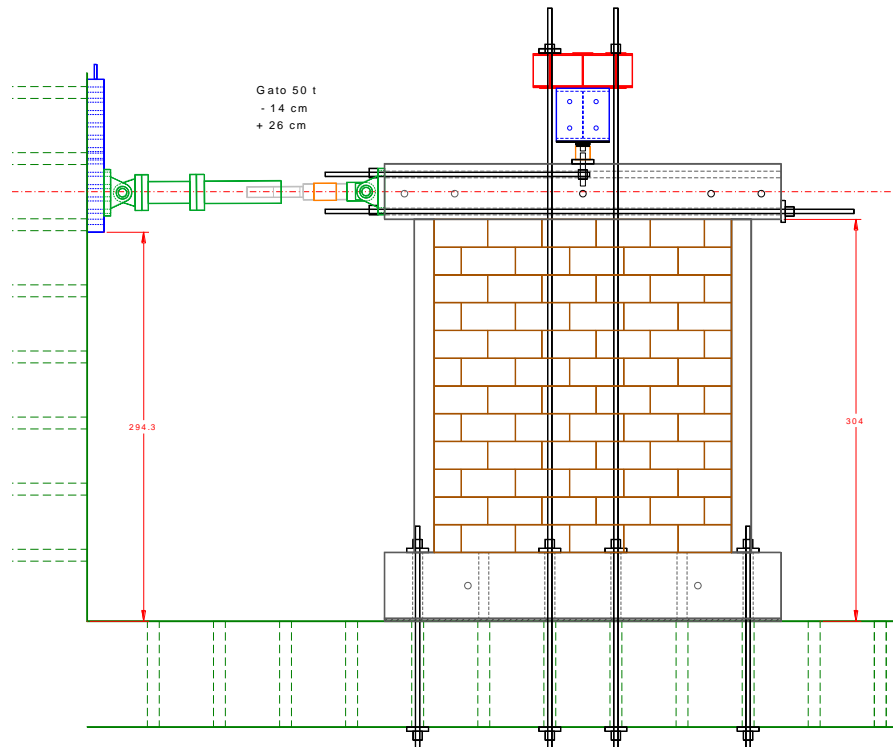


**Figura 2.7 Instrumentación de los especímenes (refuerzo horizontal solo en MC6-BH8)**

## 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.



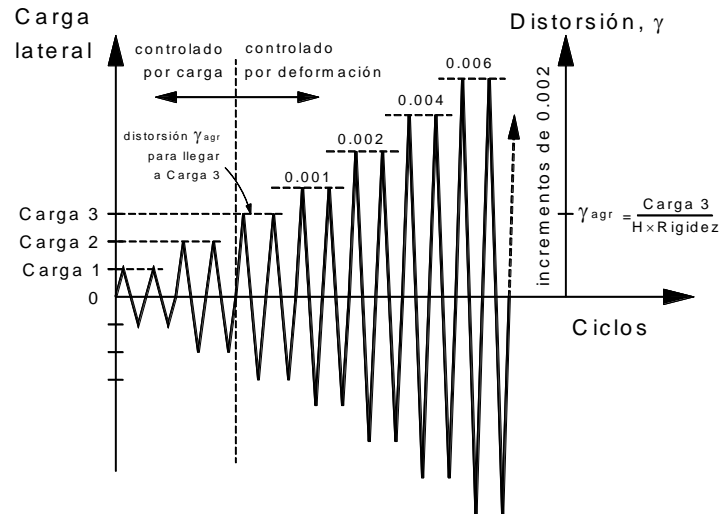
**Figura 2.8 Marco de aplicación de cargas para ensayo ante fuerza horizontal**

## 2.5.2 Historia de carga

Siguiendo las recomendaciones del apéndice A de las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería, 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  $\gamma_{agr}$  es mayor a 0.001 mm/mm entonces se saltaría dicha deformación y se continuaría directo a 0.002 mm/mm. La historia de carga es la mostrada en la Figura 2.9.



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 con coeficientes de variación de menos del 1%.

Se ensayaron también muestras cúbicas del mortero usado en la etapa constructiva, así como el ensaye 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. Los promedios de las piezas, pilas y muretes con bloques multiperforados se muestran en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Resumen de los resultados de ensayos de bloques multiperforados**

Tipo de ensaye	Propiedad	Variable	Valor
Compresión en bloques multiperforados, piezas enteras	Media	$f_p$	140.4 kg/cm <sup>2</sup>
	Coefficiente de variación	$C_p$	0.06
	Resistencia de diseño	$f_p'$	93.6 kg/cm <sup>2</sup>
	Resistencia nominal	$f_{p\ nom}$	150 kg/cm <sup>2</sup>
Compresión en bloques multiperforados, mitades de piezas	Media	$f_p$	166.1 kg/cm <sup>2</sup>
	Coefficiente de variación	$C_p$	0.14
	Resistencia de diseño	$f_p'$	110.7 kg/cm <sup>2</sup>
	Resistencia nominal	$f_{p\ nom}$	150 kg/cm <sup>2</sup>
Compresión en pilas de bloques multiperforados unidos con mortero tipo I (1:¼:3)	Media	$f_m$	146.3 kg/cm <sup>2</sup>
	Coefficiente de variación	$C_m$	0.02
	Resistencia de diseño	$f_m'$	106.4 kg/cm <sup>2</sup>
	Resistencia nominal	$f_{m\ nom}$	120 kg/cm <sup>2</sup>
Compresión en pilas de bloques multiperforados unidos con mortero industrializado	Media	$f_m$	125.2 kg/cm <sup>2</sup>
	Coefficiente de variación	$C_m$	0.18
	Resistencia de diseño	$f_m'$	86.8 kg/cm <sup>2</sup>
	Resistencia nominal	$f_{m\ nom}$	120 kg/cm <sup>2</sup>
Compresión diagonal en muretes de bloques multiperforados unidos con mortero tipo I (1:¼:3)	Media	$V_m$	14.0 kg/cm <sup>2</sup>
	Coefficiente de variación	$C_v$	0.11
	Resistencia de diseño	$V_m'$	9.34 kg/cm <sup>2</sup>
	Resistencia nominal	$V_{m\ nom}$	10 kg/cm <sup>2</sup>
Compresión diagonal en muretes de bloques multiperforados unidos con mortero industrializado	Media	$V_m$	14.8 kg/cm <sup>2</sup>
	Coefficiente de variación	$C_v$	0.09
	Resistencia de diseño	$V_m'$	9.80 kg/cm <sup>2</sup>
	Resistencia nominal	$V_{m\ nom}$	10 kg/cm <sup>2</sup>
Compresión en mortero tipo I (1:¼:3)	Media	$f_{j\ prom}$	91.3 kg/cm <sup>2</sup>
	Resistencia nominal	$f_{j\ nom}$	180 kg/cm <sup>2</sup>
Compresión en mortero industrializado	Media	$f_{j\ prom}$	153.1 kg/cm <sup>2</sup>
	Resistencia nominal	$f_{j\ nom}$	180 kg/cm <sup>2</sup>

**Tabla 3.2 Propiedades promedio de materiales por muro**

Espécime n	$f_j$ kg/cm <sup>2</sup>	$f_{m\ prom}$ kg/cm <sup>2</sup>	$f_m'$ kg/cm <sup>2</sup>	$E_m$ kg/cm <sup>2</sup>	$V_{m\ prom}$ kg/cm <sup>2</sup>	$V_m'$ kg/cm <sup>2</sup>	$G_m$ kg/cm <sup>2</sup>	$f_c'$ castillos kg/cm <sup>2</sup>	$E_c$ castillos kg/cm <sup>2</sup>
MC4-BH8	91.3	146.3	106.4	79,528	14.0	9.34	---	182.5	154,845
MC5-BH8	144.8	109.5	77.5	81,340	13.9	8.81	33,119	294.9	164,665

MC6-BH8	159.4	140.9	102.5	88,475	15.8	10.46	30,988	304.0	170,209
---------	-------	-------	-------	--------	------	-------	--------	-------	---------

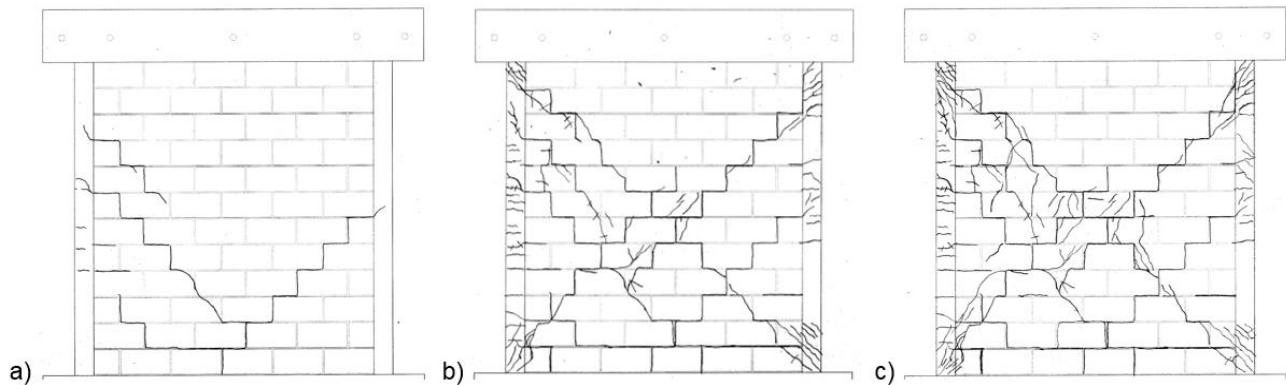
En el Apéndice A se presenta con detalle los tipos de ensaye que se realizaron para cada probeta muestreada durante la construcción de los especímenes.

### 3.2 ENSAYES DE MUROS ANTE FUERZAS SÍSMICAS

#### 3.2.1 Espécimen MC4-BH8

El espécimen MC4-BH8 no contaba con refuerzo horizontal y fue pegado con mortero convencional dosificado como Tipo I con una mezcla 1:¼:3 (cemento, cal, arena) para usarlo de comparación. La carga vertical aplicada correspondió a un esfuerzo de  $\sigma = 0.5 \text{ MPa}$  ( $5 \text{ kg/cm}^2$ ).

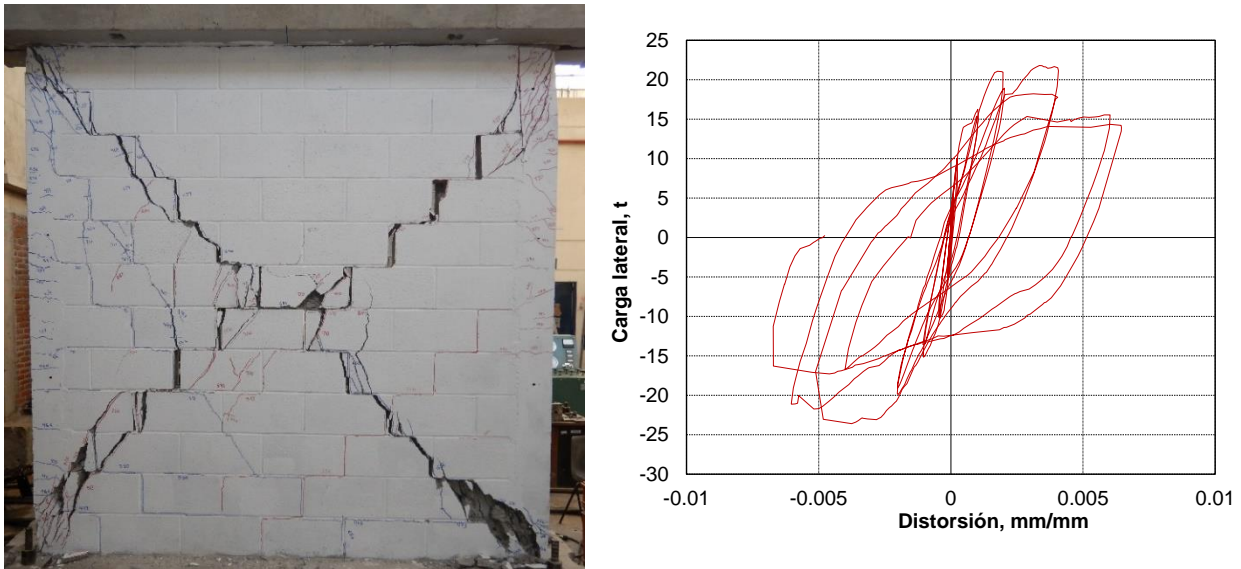
Tras los primeros ciclos sin daño se empezaron a formar las primeras grietas en escalera en la parte inferior, con una carga de  $-10.2 \text{ t}$  en el ciclo  $-3$ , pero fue en el ciclo  $+5$ , donde se presentó un agrietamiento importante con pérdida de rigidez notoria, con una carga de  $14 \text{ t}$ , que denominaremos cortante de agrietamiento inclinado,  $V_{agr}^{(+)}$ . Se consideró el agrietamiento para los ciclos negativos cuando se llegó a la carga de  $V_{agr}^{(-)} = -15.2 \text{ t}$  en el ciclo  $-5$ . 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 MC4-BH8**

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 ensaye 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 negativos definidos así cuando el gato hidráulico jalaba hacia el este (hacia la izquierda en las fotos), resultando de  $V_{máx}^{(+)} = -23.6 \text{ t}$  para una distorsión de  $D_{Vmáx} = 0.0040 \text{ mm/mm}$ , y para los ciclos positivos (el cuadrante con carga y distorsión positivo, cuando el gato empuja hacia la derecha) fue de  $V_{máx}^{(-)} = 21.8 \text{ t}$  y  $D_{Vmín} = -0.0038 \text{ mm/mm}$ .

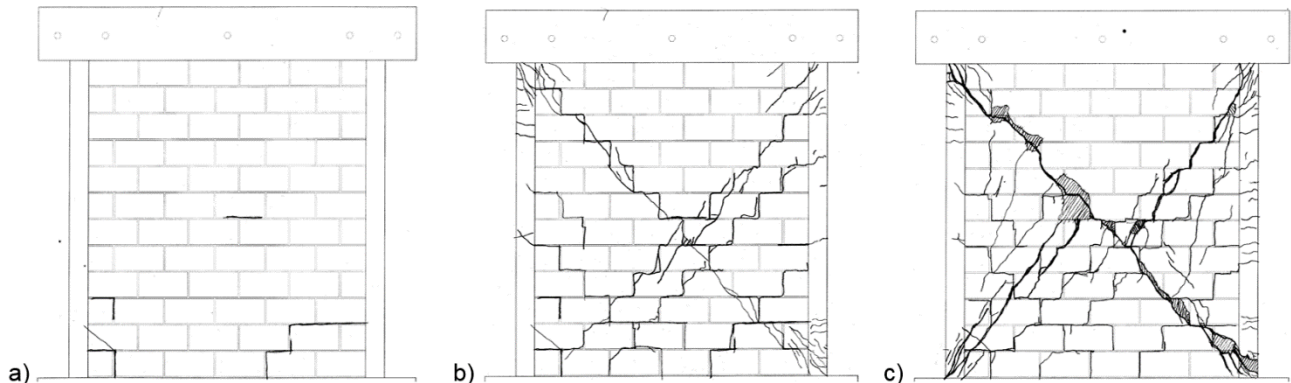


**Figura 3.2** Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MC4-BH8

### 3.2.2 Especimen MC5-BH8

Los dos especímenes restantes, MC5 y MC6 fueron construidos con mortero industrializado. La longitud tomó en cuenta el largo de los bloques de 40 cm más las juntas verticales de 1 cm por lo que quedó de longitud  $L=255$  cm.

En la Figura 3.3 se muestra la secuencia de agrietamiento del espécimen mostrándose las primeras grietas (a), el patrón de daño correspondiente a la resistencia (carga máxima) (b), y el estado final de daño (c).

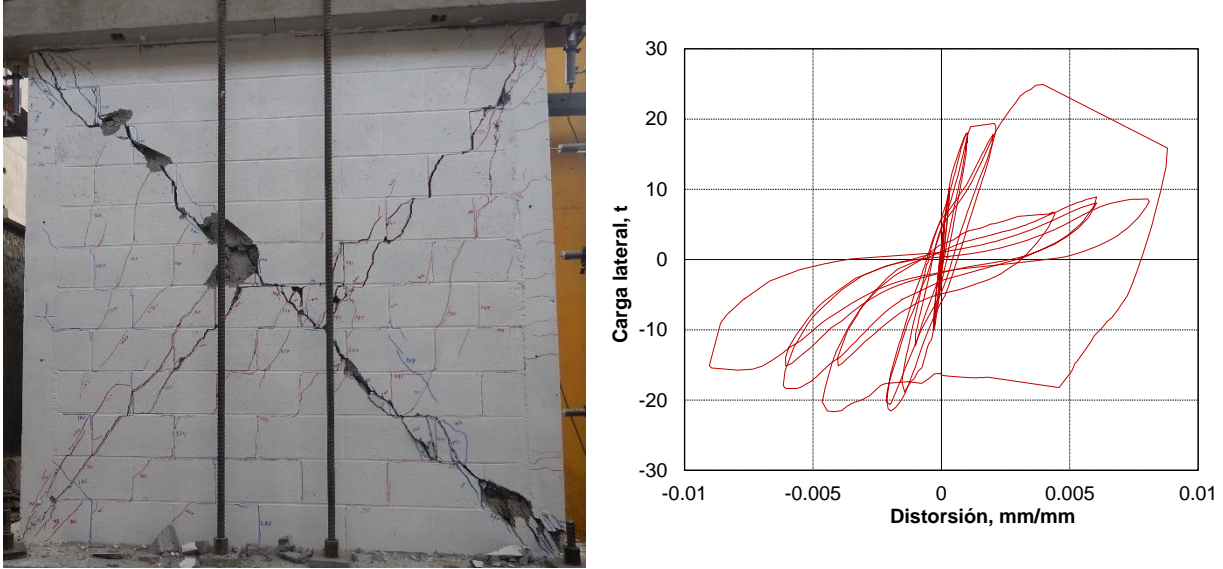


**Figura 3.3** Secuencia de daño del espécimen MC5-BH8

El primer agrietamiento notorio se dio en el ciclo +5 con una carga de 17.8 t y en el ciclo +7 se generó un agrietamiento inclinado que cambió en forma notoria la rigidez, con una carga de 18.9 t. Para el ciclo negativo se consideró el agrietamiento con una carga de -15.5 t. La resistencia se alcanzó para los ciclos positivos con  $V_{máx}^{(+)} = 24.93$  t y una distorsión de 0.00396 mm/mm, y para los ciclos negativos de  $V_{máx}^{(-)} = -21.65$  t y -0.0042 mm/mm.

Cuando se realizaba el ciclo +7 para llegar a la distorsión de 0.004 el modelo falló y no fue posible controlarlo llegando a una deformación de 0.0088 mm/mm, tras lo cual se hicieron los ciclos a distorsiones de  $\pm 0.004$ ,  $\pm 0.006$  y  $\pm 0.008$ . En la Figura 3.4 se muestra el aspecto del daño final del espécimen y la gráfica de

histéresis. Se observa un patrón de agrietamiento donde predominan dos grietas inclinadas 45° que atraviesan las diagonales del muro y que penetraron en los extremos de los castillos.

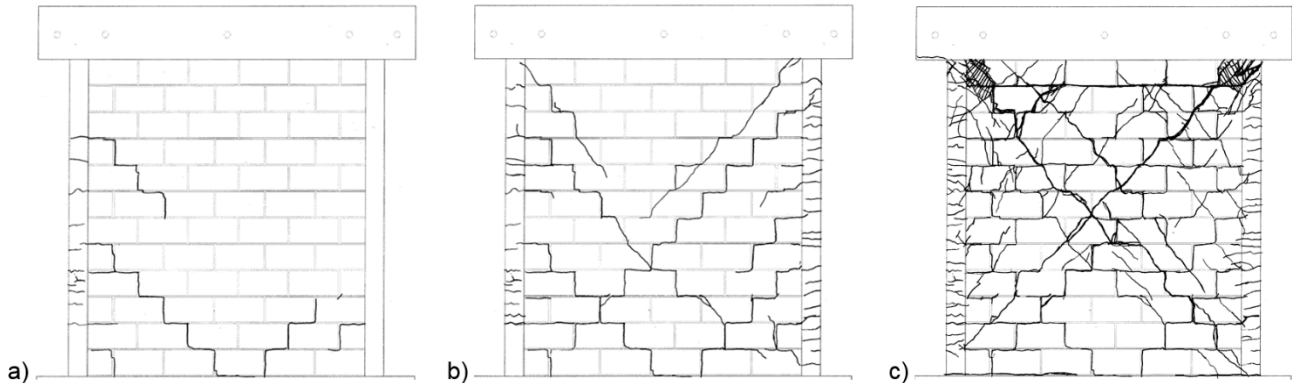


**Figura 3.4** Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MC5-BH8

### 3.2.3 Especimen MC6-BH8

El espécimen MC6-BH8 fue construido con mortero industrializado y se reforzó horizontalmente con dos alambres de 1/4 pulg (6.35 mm de diámetro) cada dos hiladas, lo que dio una cuantía resistente de  $p_{ih}f_{yh} = 0.56$  MPa (5.7 kg/cm<sup>2</sup>).

Se registró el primer agrietamiento notorio para el ciclo negativo -5 con una carga de -16 t, y en los positivos para el ciclo +7 con 18.8 t. En la Figura 3.5 se muestra la secuencia de agrietamiento del espécimen mostrándose las primeras grietas (a), un patrón de daño intermedio correspondiente a la resistencia (carga máxima) (b), y el estado final de daño (c).

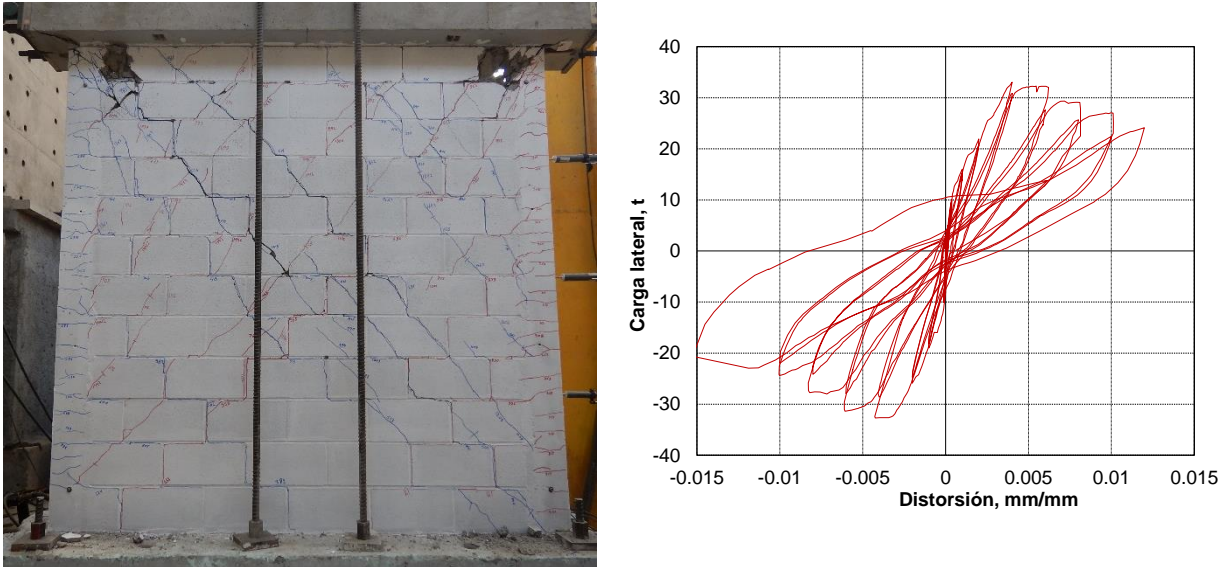


**Figura 3.5** Secuencia de daño del espécimen MC6-BH8

La resistencia se alcanzó para los ciclos positivos con  $V_{máx}^{(+)} = 33$  t para una distorsión de 0.004 mm/mm, y para los ciclos negativos de  $V_{máx}^{(-)} = -32.7$  t y 0.0043 mm/mm.



En la Figura 3.6 se muestra el aspecto del daño final del espécimen y la gráfica de histéresis. Se observa un patrón de agrietamiento con grietas inclinadas  $45^\circ$  bien distribuidas en el muro y una concentración del daño en las dos esquinas superiores.



**Figura 3.6** Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MC6-BH8

### 3.3 COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS TRES ESPECÍMENES

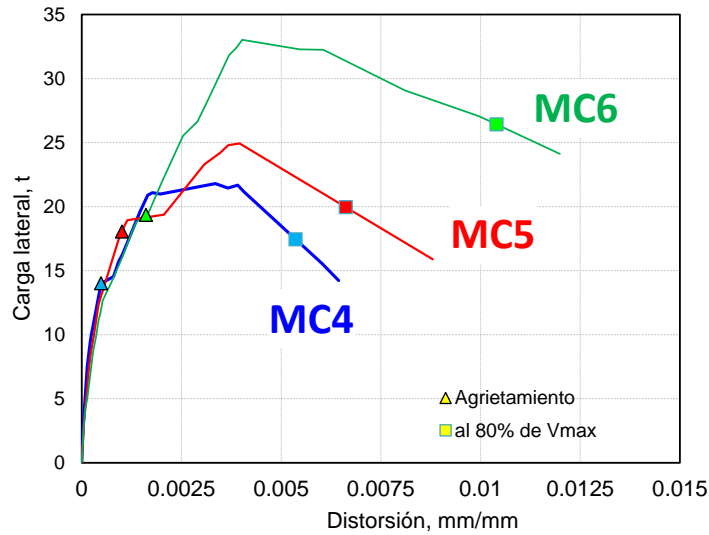
En la Tabla 3.3 se enlistan los datos de los principales resultados de los ensayos realizados

**Tabla 3.3** Comparativa de los resultados para los tres especímenes

Especímen	$V_{mR}$ t	$V_R$ = $V_{mR}+V_{sR}$ t	$V_{max}^{(+)}$ t	$V_{max}^{(-)}$ t	$V_{agr}^{(+)}$ t	$V_{agr}^{(-)}$ t	$V_{max}^{(+)}/V_R$	$V_{max}^{(-)}/V_R$
MC4-BH8	19.5	19.5	21.8	23.6	14.0	-15.2	1.12	1.21
MC5-BH8	20.0	20.0	24.9	21.6	17.8	-15.5	1.25	1.08
MC6-BH8	20.0	34.5	33.0	32.7	18.8	-16.0	0.96	0.95

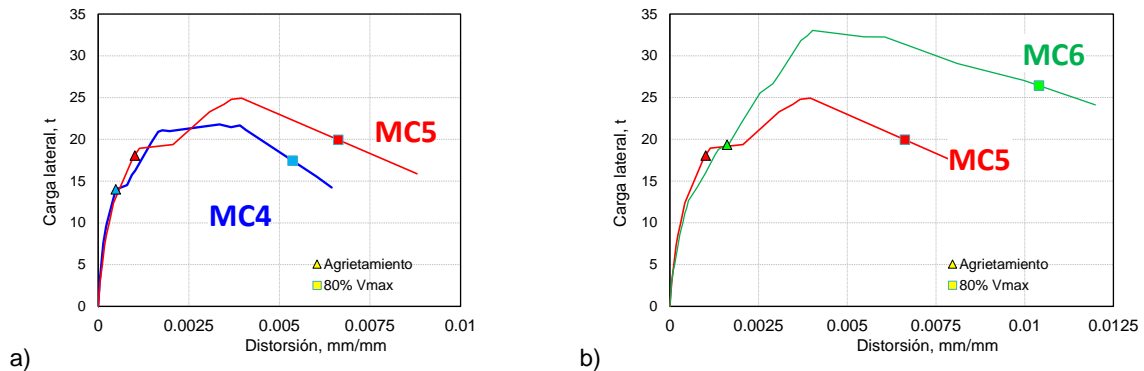
Se observa que la predicción del agrietamiento,  $V_{agr}$ , para el cálculo teórico usando el valor nominal de  $v_m' = 10 \text{ kg/cm}^2$ , quedó por arriba del valor observado experimentalmente; sin embargo, la resistencia de los muros sin refuerzo superó en más de 10% el cálculo teórico con valores nominales. En el caso del muro con refuerzo horizontal se predijo con gran exactitud la resistencia del espécimen (a pesar de que quedara ligeramente debajo de la predicción).

En la Figura 3.7 se presentan las envolventes de los ciclos positivos de los tres especímenes a fin de poder visualizar la comparación de los dos modelos. Se observa la contribución del refuerzo horizontal al comparar los especímenes que no tenían refuerzo y el MC6-BH8 que tenía una cuantía importante de refuerzo horizontal.



**Figura 3.7 Envolventes positivas de los especímenes**

Para un desglose por tipo de variable a estudiar se presenta, en la Figura 3.8, la comparación del espécimen MC4-BH8 sin refuerzo horizontal y con mortero convencional contra el espécimen MC5-BH8, así como la comparación de los dos especímenes con el mismo tipo de mortero pero sin y con refuerzo horizontal (MC5-BH8 contra el MC6-BH8).



**Figura 3.8 Comparación de las envolventes de los especímenes:**  
**a) muros sin refuerzo horizontal con dos tipos de morteros,**  
**b) muros de mortero industrializado sin y con refuerzo horizontal**

### 3.4 COMPARACIÓN DE LA RIGIDEZ TEÓRICA CON LA EXPERIMENTAL

Para verificar el cálculo teórico de la rigidez de cada espécimen se determinó la rigidez experimental de los mismos obtenida de la curva de histéresis carga contra desplazamiento lateral superior. Se cuenta con la envolvente de la histéresis con lo que la rigidez se puede determinar como la pendiente del primer tramo de esta (rigidez tangente inicial) o la pendiente de una recta que parte del origen y que corta a la envolvente en un punto definido con algún criterio.

La dificultad radica en con cuál criterio definir el punto donde se calcula la rigidez. Si bien la rigidez inicial podría tomarse como la rigidez tangente a la curva envolvente en su inicio (y calcularse con el primer punto carga-desplazamiento medido), puede llegar a cometerse errores porque las primeras lecturas están sujetas a imprecisiones del dispositivo de carga, del apoyo y sujeción del modelo o bien por errores de

medición a pequeñas escalas que pueden deberse al montaje de instrumentos o a que éstos no se movilizan libremente por una mínima fricción a niveles muy bajos de deformación.

Por todo ello conviene definir un nivel de deformación de mayores magnitudes pero de tal forma que los resultados puedan equipararse a un comportamiento elástico lineal de la parte inicial de la prueba.

Se propusieron cuatro criterios que son los siguientes:

- 1) Rigidez calculada del origen al pico del primer ciclo positivo y negativo (dos valores que se promedian),  $Rig_{1er}$
- 2) Rigidez de ciclo,  $Rig_{Ciclo}$ , definida como la pendiente de la recta que une a los dos picos de un ciclo. Se toman los semiciclos positivo y negativo del primer ciclo que, según el protocolo de ensaye, se definió para alcanzar el 25% de la carga de agrietamiento por tensión diagonal.
- 3) Rigidez secante calculada del origen al punto del primer agrietamiento inclinado,  $Rig_{Agr}$ . En este estudio el agrietamiento seleccionado fue el de patrones con trayectoria inclinada siguiendo sensiblemente la diagonal del muro. Se presenta un promedio para ciclos positivo y negativo.
- 4) Finalmente, la rigidez secante entre el origen y un punto sobre la envolvente para una carga del 40 por ciento de la resistencia (carga máxima alcanzada),  $Rig_{40\%}$ , esto para las envolventes positivas y negativas, cada una con su respectiva resistencia y reportando el promedio.

En la Tabla 3.4 se incluyen los resultados de las rigideces medidas.

**Tabla 3.4 Rigideces experimentales medidas con tres criterios diferentes**

Especimen	Primer ciclo					Arietamiento inclinado importante			Al 40% de la resistencia	
	Ciclo	Paso	$Rig_{1er}$ , t/cm	Prom t/cm	$Rig_{Ciclo}$ t/cm	Paso	$Rig_{Agr}$ , t/cm	Prom t/cm	$Rig_{40\%}$ , t/cm	Prom t/cm
MC4-BH8	(+)	25	229	199	195	349	111	84	182	157
	(-)	65	168			393	56		131	
MC5-BH8	(+)	20	172	170	170	381	69	68	127	134
	(-)	59	167			441	68		140	
MC6-BH8	(+)	23	143	325	224	514	46	85	83	103
	(-)	59	508			358	124		124	

En la Tabla 3.5 se comparan los resultados experimentales de la Tabla 3.4 con las predicciones con propiedades nominales de los materiales ( $Rig_{nominal}$ ) de la Tabla 2.8; dichas propiedades nominales fueron;  $E_c = 126,491 \text{ kg/cm}^2$ ,  $E_m = 96,000 \text{ kg/cm}^2$ ,  $G_m = 19,200 \text{ kg/cm}^2$ . En la misma Tabla 3.5 se repiten los cálculos de  $Rig_{teórica}$  pero usando los módulos de elasticidad y de cortante medidos experimentalmente en ensayos de pilas, cilindros de concreto y muretes.

**Tabla 3.5 Comparación entre rigideces teóricas y experimentales**

Especimen	$Rig_{nominal}$ t/cm	$E_m$ kg/cm <sup>2</sup>	$G_m$ kg/cm <sup>2</sup>	$E_c$ kg/cm <sup>2</sup>	$Rig_{teórica}$ t/cm	$Rig_{1er}$ t/cm	$Rig_{Ciclo}$ t/cm	$Rig_{Agr}$ t/cm	$Rig_{40\%}$ t/cm
MC4-BH8	119.8	79528		154845	158.3	199	195	84	157
MC5-BH8	124.0	81340	33119	164665	173.8	170	170	68	134
MC6-BH8	124.0	88475	30988	170209	172.7	325	224	85	103

Analizando primero la diferencia de las rigideces teóricas calculadas con propiedades nominales contra aquellas con propiedades experimentales (módulos de elasticidad y de cortante), se identificó que los módulos de elasticidad de la mampostería medidos en pilas a compresión fueron menores de lo que se había estimado como  $E_m = 800f_m'$ . Por el otro lado, los módulos de elasticidad del concreto, medidos en cilindros a compresión, fueron superiores a los estimados como nominales. En este caso se esperaba un concreto de  $f_c'_{nominal} = 250 \text{ kg/cm}^2$  pero se lograron concretos de mayor resistencia y mayor módulo de elasticidad. Con

esta variabilidad, las rigideces laterales estimadas con valores nominales subestimaron en alrededor de 25% las calculadas con propiedades experimentales.

Con esta predicción corregida se hace la comparación con las rigideces medidas en donde se han descrito cuatro criterios diferentes. Se observa que la rigidez al primer agrietamiento inclinado notable es considerablemente menor que las rigideces teóricas, del orden del 50%, por lo que se concluye que los muros, ante este agrietamiento diagonal, ya han perdido rigidez por los primeros agrietamientos observados previamente, algunos siendo grietas horizontales entre las hiladas inferiores cerca de las esquinas.

La rigidez promedio de los dos primeros semi-ciclos al 25% de la resistencia nominal estimada es muy semejante a la primera rigidez de ciclo (pendiente de la recta que une los picos del primer ciclo positivo y negativo), lo cual era de esperarse porque de los mismos puntos se obtienen ambos criterios. Finalmente, la rigidez secante sobre la envolvente, al 40% de la resistencia, es un dato fácil de calcular y se observó una semejanza entre esta y los criterios de rigidez de ciclo excepto en el tercer modelo que registró una reducción de más de la mitad de la del primero.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES

Se ensayaron ante carga lateral cíclica tres especímenes de muros de mampostería confinada a tamaño natural de bloque multiperforado de concreto 12×20×40 denominados BH8. Se varió el tipo de mortero y el uso de alambres de refuerzo horizontal entre las hiladas. Se verificó la aplicabilidad de las disposiciones para diseño estructural de las normas de mampostería de México (CDMX, 2020). Se llegó a las siguientes conclusiones.

- Los resultados obtenidos de los especímenes MC4-BH8, MC5-BH8 y MC6-BH8, sin refuerzo horizontal y con refuerzo horizontal comprueba las conclusiones de estudios previos hechos por Cruz y otros en 2014, donde la eficiencia del refuerzo horizontal depende de la resistencia a la compresión de la mampostería, que dieron lugar a los cambios a las NTCM-2017 para el diseño a cortante de los muros, ya que las resistencias obtenidas en los especímenes resultaron muy parecidas a las calculadas de manera teórica, utilizando las expresiones de dichas normas y los valores de diseño  $f_m'$  y  $v_m'$  obtenidos en los ensayos de Ponce (2019).
- En el muro MC5-BH8 se observó un incremento de resistencia a cortante respecto al muro MC4-BH8 con relación al cortante teórico en el ciclo positivo  $V_{máx}^{(+)}/V_R$  de un 12% (1.25/1.12) el cual se le puede asociar al mortero prefabricado por tener propiedades superiores al Tipo I cemento : cal : arena
- La resistencia de diseño a cortante  $v_m' = 10$  kg/cm<sup>2</sup> tomada de los ensayos de Ponce y Hernández (2019) permitieron predecir satisfactoriamente la resistencia a cortante de los muros, pero como las resistencias de algunos muretes de los muros resultaron inferiores a 10 kg/cm<sup>2</sup> pero arriba de 9 kg/cm<sup>2</sup> se recomienda utilizar un valor de diseño a cortante de la mampostería para muros BH8 con mortero industrializado y mortero tipo I de  $v_m' = 9$  kg/cm<sup>2</sup>.
- Respecto a la resistencia de diseño a compresión de la mampostería  $f_m'$ , el valor obtenido en las pilas ensayadas con valores de 106.4 y 86.8 kg/cm<sup>2</sup>, resultó inferior al considerado para el cálculo teórico de la resistencia a compresión de 120 kg/cm<sup>2</sup> por lo que para esta resistencia de diseño se recomienda usar un valor de  $f_m'$  de 90 kg/cm<sup>2</sup> el cual, aunque está por arriba de los 86.8 kg/cm<sup>2</sup>, se justifica dado que en esta serie de pilas una de ellas tuvo una falla prematura.



## 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 de pilas y muretes. 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 el cabezal superior. Finalmente se ensayaron barras y alambres de acero a tensión.

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

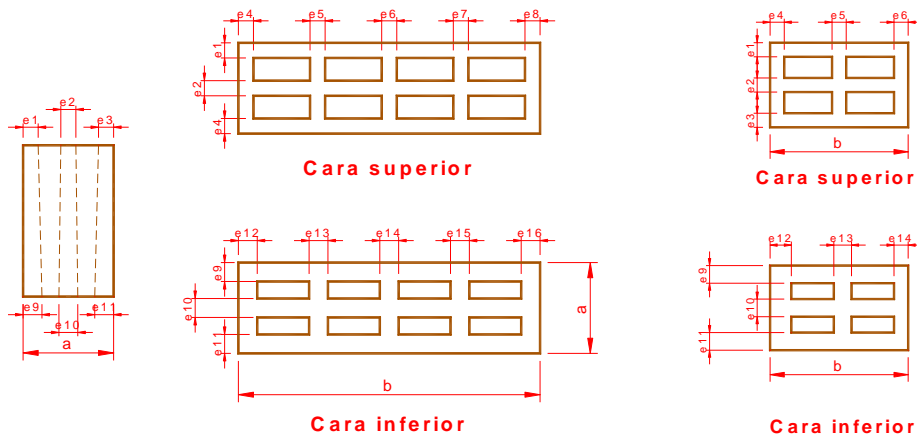
##### A.1.1 Geometría de las piezas

Se tomaron muestras de diez piezas de las dos geometrías, pieza entera y mitad de pieza, de las cuales se tomaron sus dimensiones, dando los promedios de las dimensiones externas:

11.88×20.02×39.98 cm	para piezas enteras multiperforadas
11.97×20.06×19.60 cm	para mitades de las piezas multiperforadas

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

De las diez piezas seleccionadas se midieron los espesores de las paredes de las piezas. En la Figura A.1 se muestra el esquema de las mediciones, tanto en la cara superior respecto a la fabricación como de la cara inferior, siendo la superior la de las dimensiones menores de grosor de pared (y mayor tamaño de huecos). Esta diferencia se debe a que en el molde de fabricación los huecos se moldean con forma de pirámide truncada, con paredes inclinadas para el fácil desmoldeo.



**Figura A.1 Dimensiones de las piezas multiperforadas**

En la Tabla A.1 se presentan las dimensiones de las diez piezas medidas, así como su peso medido en las condiciones ambientales del laboratorio. Con esta información se calculó el peso volumétrico bruto y estimando el área neta en ambas caras se calculó el peso volumétrico para el volumen neto.

Con dichos datos el promedio del área bruta fue de 475 cm<sup>2</sup> mientras que el área neta superior promedió 323.1 cm<sup>2</sup> y la inferior 358.9 cm<sup>2</sup>, por lo que la relación de áreas netas a bruta fue de 0.68 y 0.76,

respectivamente. Según las NTCM (CDMX, 2020) el área neta para fines de cálculo se toma con la cara más desfavorable, es decir  $f_{an} = 0.68$ .

**Tabla A.1 Dimensiones de las piezas multiperforadas enteras**

Pieza No.	Dimensiones, cm																Peso, kg	Área bruta cm <sup>2</sup>	Área neta sup cm <sup>2</sup>	Área neta inf cm <sup>2</sup>	Peso Vol. bruto kg/m <sup>3</sup>	Peso Vol. Neto kg/m <sup>3</sup>			
	a	b	c	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12	e13							e14	e15	e16
1	11.86	40.10	19.95	2.43	2.09	1.96	2.41	1.94	2.26	2.00	2.44	2.93	2.32	2.28	2.78	2.55	2.38	2.60	2.80	13.151	475.6	319.3	358.7	1386	1944
2	11.92	40.00	20.00	1.97	2.11	2.48	2.40	1.94	2.25	2.03	2.39	2.93	2.33	2.35	2.76	2.43	2.30	2.42	2.86	13.764	476.8	321.4	359.4	1443	2022
3	11.90	39.90	20.07	2.00	2.33	2.36	2.40	2.01	2.28	2.06	2.42	2.89	2.49	2.36	2.99	2.13	2.46	2.30	2.81	13.527	474.8	325.1	361.6	1419	1963
4	11.85	39.90	19.69	2.11	2.33	2.36	2.44	1.97	2.26	2.18	2.26	2.65	2.50	2.32	3.33	2.32	2.43	2.24	2.61	13.372	472.8	327.4	354.7	1436	1991
5	11.87	40.00	19.91	1.97	2.26	2.46	2.40	1.91	2.29	2.04	2.40	2.91	2.42	2.28	2.77	2.42	2.29	2.41	2.86	13.347	474.8	324.8	358.7	1412	1962
6	11.80	40.00	20.19	1.98	2.10	2.44	2.39	1.91	2.24	2.03	2.37	2.95	2.33	2.24	2.88	2.25	2.55	2.27	2.75	12.735	472.0	318.6	355.2	1336	1872
7	11.95	40.00	19.94	2.18	2.43	2.11	2.26	2.00	2.25	1.92	2.40	2.38	2.93	2.52	2.85	2.25	2.64	2.13	2.95	12.907	478.0	325.4	366.0	1354	1872
8	11.85	40.00	20.13	2.10	2.33	2.18	2.42	1.97	2.28	2.09	2.29	2.61	2.55	2.37	3.13	2.10	2.62	2.29	2.73	12.661	474.0	322.3	356.8	1327	1852
9	11.89	39.90	20.18	2.32	2.25	1.98	2.45	1.99	2.18	2.43	2.40	2.33	2.44	2.88	2.86	2.35	2.48	2.09	2.95	12.785	474.4	322.5	359.2	1335	1859
10	11.91	40.00	20.18	2.03	2.25	2.39	2.40	2.02	2.23	1.93	2.37	2.85	2.35	2.34	3.09	2.39	2.59	2.19	2.80	12.859	476.4	324.2	358.7	1338	1866
Prom.	11.88	39.98	20.02	2.11	2.25	2.27	2.40	1.97	2.25	2.07	2.37	2.74	2.47	2.39	2.94	2.32	2.47	2.29	2.81	13.1	475.0	323.1	358.9	1379	1920
C Var.	0.00	0.00	0.01	0.08	0.05	0.09	0.02	0.02	0.01	0.07	0.02	0.09	0.07	0.08	0.06	0.06	0.05	0.07	0.04	0.03	0.004	0.01	0.01	0.03	0.03

Finalmente, el peso volumétrico de las piezas, en condición del ambiental del laboratorio (seca), fue de 1,379 kg/m<sup>3</sup> bruto y de 1,920 kg/m<sup>3</sup> para el peso volumétrico neto, que cumple con ser mayor que 1,700 kg/m<sup>3</sup>, según se pide en las NTCM, 2020.

**A.1.2 Ensaye de piezas a compresión**

Se cabecearon piezas con un yeso con cemento especial y se ensayaron a compresión, siendo cinco las piezas seleccionadas de la misma muestra usada para dimensiones. En la Tabla A.2 se muestran los resultados de estos ensayos de piezas multiperforadas enteras y de mitades.

**Tabla A.2 Ensaye a compresión de piezas multiperforadas enteras y mitades**

Pieza No.	Dimensiones, cm			Peso kg	Área bruta cm <sup>2</sup>	Peso Vol. kg/m <sup>3</sup>	Carga, kg	Esfuerzo kg/cm <sup>2</sup>
	a	b	c					
1	11.86	40.10	19.95	13.151	475.6	1,386	60,000	126.16
2	11.92	40.00	20.00	13.764	476.8	1,443	69,500	145.76
3	11.90	39.90	20.07	13.527	474.8	1,419	66,200	139.42
4	11.85	39.90	19.69	13.372	472.8	1,436	68,800	145.51
5	11.87	40.00	19.91	13.347	474.8	1,412	68,800	144.90
Promedio								140.4
Coef. variación								0.06
1	12.00	19.63	20.38	6.893	235.6	1,436	33,800	143.49
2	11.92	19.54	20.07	6.874	232.9	1,470	32,700	140.39
3	11.95	19.62	19.98	6.853	234.4	1,463	41,000	174.92
4	11.92	19.55	19.99	6.931	233.0	1,488	46,000	197.39
5	12.00	19.64	19.93	7.027	235.7	1,496	41,100	174.39
Promedio								166.1
Coef. variación								0.14

El procedimiento de ensaye 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.

$$f_p' = \frac{\overline{f_p}}{1 + 2.5 c_p} \quad (\text{A.1})$$

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.

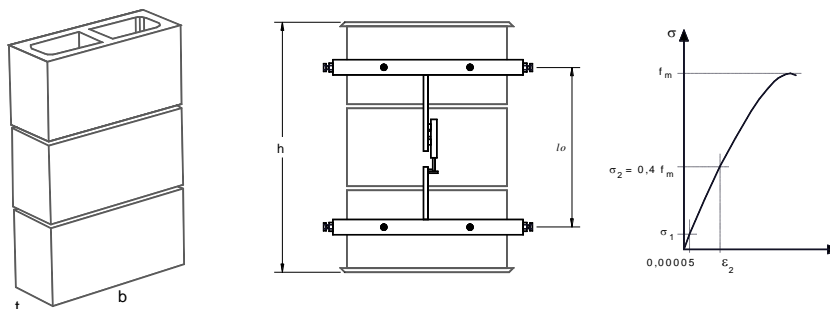
Para las piezas multiperforadas enteras el esfuerzo resistente promedio fue  $\overline{f_p} = 13.8$  MPa (140 kg/cm<sup>2</sup>), y dado que el coeficiente de variación fue de  $c_p = 0.06$  en la fórmula A.1 se utilizó el valor de 0.2 con lo cual se obtuvo una resistencia de diseño en las piezas enteras de  $f_p' = 9.18$  MPa (93.6 kg/cm<sup>2</sup>).

Las mitades se consideran piezas accesorias y no requieren ser evaluadas; sin embargo, se ensayaron con el mismo cuidado que las piezas enteras resultando una resistencia promedio de  $\overline{f_p} = 16.3$  MPa (166 kg/cm<sup>2</sup>), con  $c_p = 0.14$ , y de diseño  $f_p'_{\text{mitades}} = 10.9$  MPa (110.7 kg/cm<sup>2</sup>).

## 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, 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.2** Esquema del ensaye de pilas a compresión

La elaboración de los muretes y pilas de cada espécimen se hizo simultáneamente a la construcción del muro correspondiente, deteniendo el trabajo a media construcción para colocar las hiladas de las probetas con la misma mezcla usada en el muro. Los ensayos se hicieron cerca de la fecha de ensaye de los muros. En la Tabla A.3 se muestra un resumen de los resultados obtenidos.

El módulo de elasticidad se calcula como está definido en la misma norma mexicana, como la pendiente de la secante que pasa por un punto de la gráfica al 40% de la resistencia. En la Tabla A.3 se presenta el módulo de

elasticidad de cada pila y una correlación respecto a la resistencia a compresión de dicha probeta. La variable  $\epsilon_{im}$  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.

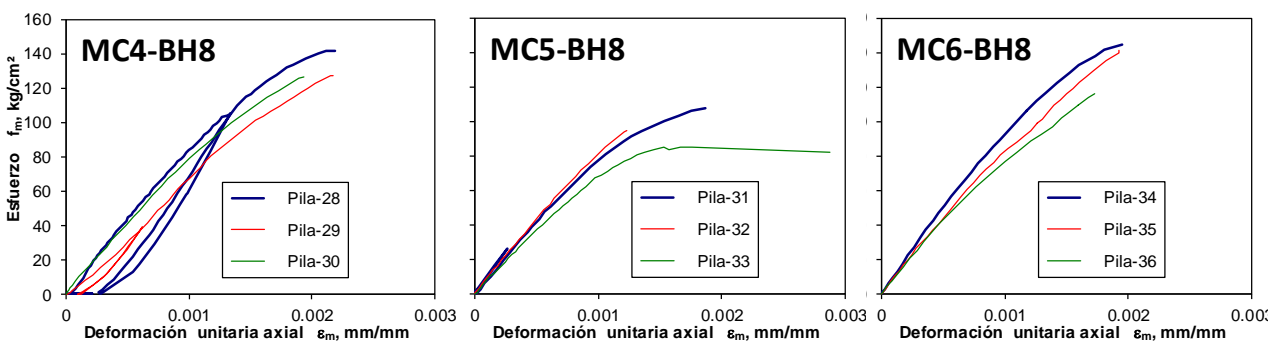
$$f_m' = \frac{\overline{f_m}}{1 + 2.5 c_m} \tag{A.2}$$

**Tabla A.3 Resultados de ensayos de pilas a compresión de bloques multiperforados**

Pila	Descripción	Dimensiones, cm			Carga kg	$f_m$ kg/cm <sup>2</sup>	Promedio	$E_m$ kg/cm <sup>2</sup>	$E_m/f_m$	$\epsilon_{im}$
		t	b	h						
Pila-28	Espécimen	11.8	40.0	62.4	67000	149	146.3	91,412	612	0.00219
Pila-29	MC4	11.8	40.0	63.3	64400	144		66,554	463	---
Pila-30	mortero 1:¼:3	11.8	40.0	63.0	65300	146		80,617	553	---
Pila-31	Espécimen	11.8	40.0	62.9	50800	113	109.5	81,538	719	0.00187
Pila-32	MC5	11.8	40.0	62.8	56200	125		87,806	700	---
Pila-33	mort. industrial.	11.9	40.0	62.9	40600	90		74,675	832	0.00176
Pila-34	Espécimen	11.8	40.0	62.4	68200	152	140.9	100,039	658	0.00196
Pila-35	MC6	11.8	40.0	62.8	66600	148		84,981	572	0.00193
Pila-36	mort. industrial.	11.8	40.0	62.8	54700	122		80,404	659	0.00173
Promedios							132.3	83,114	641	0.0019
Coef. de variación							0.15	0.12		0.09

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.

Por lo tanto, la resistencia a compresión de diseño de todas las piezas, al aplicar la ecuación A.2, resultó de  $f_m' = 9.4$  MPa (96.1 kg/cm<sup>2</sup>). Cabe señalar que en los ensayos de piezas multiperforadas se usaron dos tipos de mortero, el tipo I según las NTCM con dosificación 1:¼:3 (cemento, cal, arena) y un mortero industrializado.

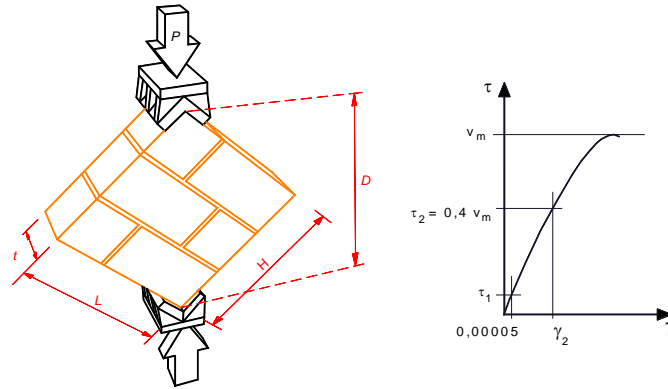


**Figura A.3 Gráficas del ensayo de pilas a compresión de piezas multiperforadas**

### A.3 COMPRESIÓN DIAGONAL EN MURETES

Se construyeron tres muretes de mampostería por cada espécimen usando las mismas piezas y mortero con que se fabricó el muro 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.4.



**Figura A.4 Esquema de la prueba de murete a compresión diagonal**

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 ( $v_m = P/A$ , donde  $A = t D$ , según se acota en la Figura A.4).

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.

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

En la Tabla A.4 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.4). En la tabla se incluye el cálculo del esfuerzo de diseño para cada probeta.

**Tabla A.4 Resultados de ensayos de muretes a compresión diagonal**

Murete	Descripción	Dimensiones		Área diag. $A = t \cdot D$ , cm <sup>2</sup>	Carga $P$ , kg	Esfuerzo $v_m$ , kg/cm <sup>2</sup>	Promedio kg/cm <sup>2</sup>	Módulo de cortante, $G_m$ kg/cm <sup>2</sup>	Promedio kg/cm <sup>2</sup>
		$D$	$t$						
Mur-28	Especimen MC4-BH8	86.5	11.8	1020.7	12450	12.20	14.0	---	---
Mur-29		85.7	11.8	1011.3	15290	15.12			
Mur-30		85.8	11.8	1012.4	14890	14.71			
Mur-31	Especimen MC5-BH8	87.0	11.9	1035.3	17050	16.47	13.9	31,185	33,119
Mur-32		86.6	11.8	1021.9	15250	14.92			
Mur-33		86.4	11.8	1019.5	10500	10.30			
Mur-34	Especimen MC6-BH8	86.0	11.9	1023.4	19540	19.09	15.8	34,158	30,988
Mur-35		86.0	12.0	1032.0	13120	12.71			
Mur-36		86.2	11.9	1025.8	15890	15.49			
Promedio							14.56	32,054	
Coeficiente de variación							0.07	0.09	

La medición de las deformaciones por cortante de los tres muretes del espécimen MC4-BH8 no fueron satisfactorias y se cambió el marco de instrumentación para los muretes de los otros dos especímenes, por lo que no se incluyen resultados de los primeros.

El promedio de los ensayos fue de 1.43 MPa (14.56 kg/cm<sup>2</sup>) con un coeficiente de variación de 0.07; por lo que, considerando el coeficiente de variación mínimo de  $c_v = 0.2$ , el esfuerzo de diseño por compresión diagonal con la ecuación A.3 resultó de  $v_m' = 0.95$  MPa (9.7 kg/cm<sup>2</sup>).

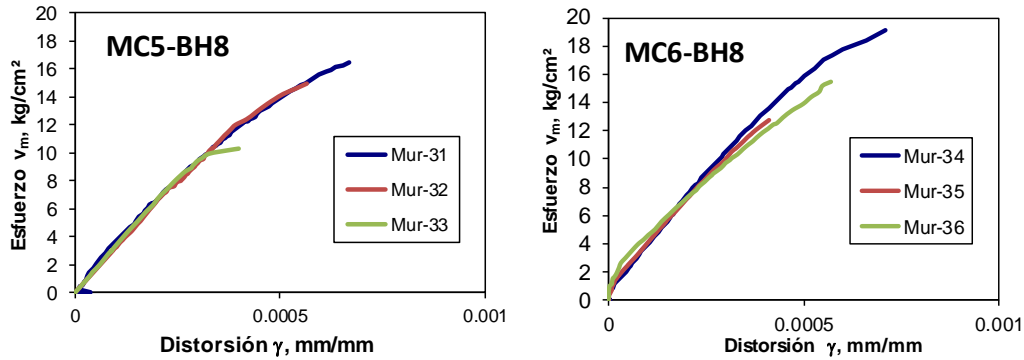


Figura A.5 Gráficas del ensayo de muretes a compresión diagonal

#### 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.6) siguiendo el procedimiento de la norma mexicana NMX-C-061-ONNCCE (2010).

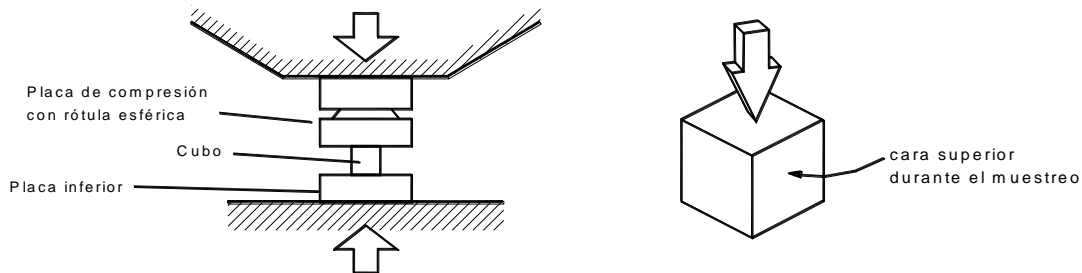


Figura A.6 Ensayo de cubos de mortero

Para el pegado de piezas del espécimen MC4-BH8 se usó mortero convencional elaborado en el lugar, dosificado para un proporcionamiento 1:¼:3 (cemento, cal, arena en volumen) correspondiente a mortero tipo I según las NTC Mampostería (CDMX, 2020). Los especímenes MC5 y MC6 se fabricaron usando mortero industrializado predosificado Stonecrete®. En la Tabla A.5 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.

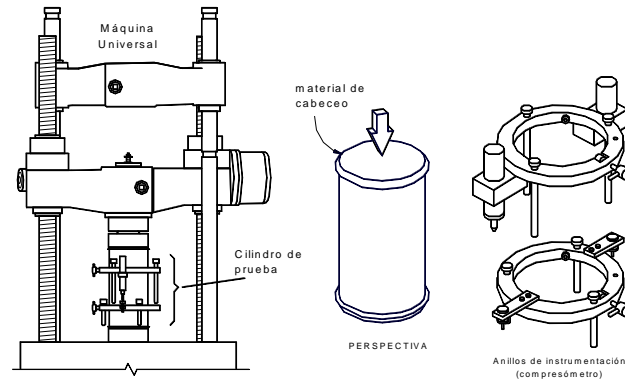
**Tabla A.5 Resultados de ensayos a compresión de cubos de mortero**

Muestra N°	Espécimen	Mortero	fj kg/cm <sup>2</sup>	Promedio kg/cm <sup>2</sup>	Promedio kg/cm <sup>2</sup>
3	Hiladas 1, 2 y 3 Espécimen MC4	común 1:¼:3	146.9	148.7	91.3
			151.0		
			148.1		
4	Hiladas 4 a 10 Espécimen MC4	común 1:¼:3	48.4	48.6	
			52.1		
			45.2		
5	Hiladas 4 a 10 Espécimen MC4	común 1:¼:3	57.9	59.0	
			59.7		
			59.3		
6	Hiladas 11 y 12 Espécimen MC4	común 1:¼:3	101.5	109.0	
			111.0		
			114.5		
7	Hiladas 1, 2 y 3 Espécimen MC5	industrializado	193.3	190.9	
			184.4		
			194.9		
8	Hiladas 4 a 8 Espécimen MC5	Industrializado	123.7	108.7	
			120.5		
			82.0		
9	Hiladas 4 a 8 Espécimen MC5	industrializado	115.2	134.7	
			133.8		
			155.0		
11	Hiladas 1 y 2 Espécimen MC6	industrializado	107.1	115.0	
			106.9		
			130.8		
12	Hiladas 3 a 5 Espécimen MC6	Industrializado	161.6	149.3	
			163.9		
			122.3		
14	Hiladas 6 a 9 Espécimen MC6	industrializado	187.7	168.6	
			159.6		
			158.4		
16	Hiladas 10 a 12 Espécimen MC6	industrializado	192.3	204.7	
			216.8		
			205.1		
Promedio			130.6		
Coeficiente de variación			0.38		

El esfuerzo de compresión promedio fue de 12.8 MPa (130.6 kg/cm<sup>2</sup>), con un coeficiente de variación de  $c_j = 0.38$ . Cabe hacer notar que, aunque el proporcionamiento del mortero fue 1:¼:3 correspondiente a tipo I, la resistencia de diseño fue muy baja, siendo no solo menor a 125 kg/cm<sup>2</sup> sino incluso menor a 75 kg/cm<sup>2</sup> (del mortero tipo II), por lo que solo le queda ser clasificado como mortero tipo III.

### A.5 COMPRESIÓN EN CILINDROS DE CONCRETO

En la Figura A.7 se muestra un esquema del cilindro de 10×20 cm, de la instrumentación utilizada, así como de la máquina de prueba. El ensaye se ajustó a la norma mexicana NMX-C-083 (ONNCCE, 2014) y la medición de las deformaciones y cálculo de módulo de elasticidad siguió lo establecido en la norma NMX-C-128 (ONNCCE, 2013), aunque los ensayos se realizaron a una edad cercana a la fecha del ensaye (más de 28 días). Los cilindros se cabecearon con un yeso con cemento especial para este uso, para garantizar la distribución uniforme de esfuerzos. La prueba fue monótonamente creciente hasta la falla y se controló por carga, con una velocidad constante de 12 t/min.



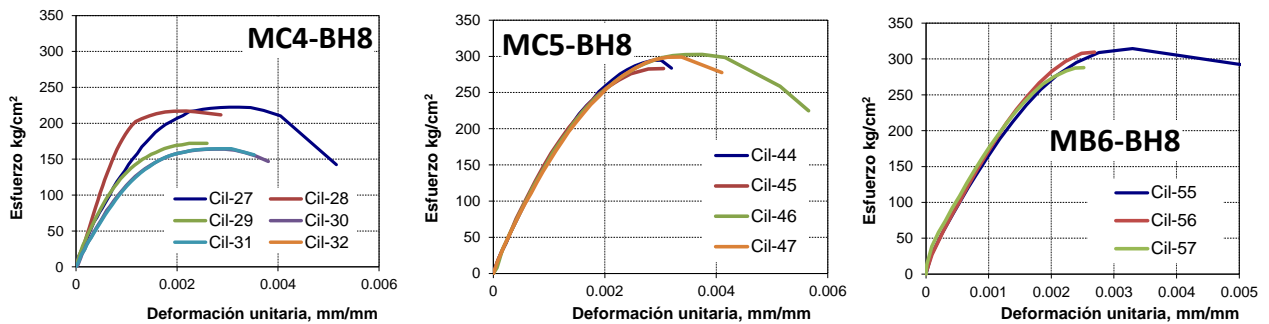
**Figura A.7 Ensaye de cilindros de concreto**

En la Tabla A.6 se muestra el resumen de los resultados de los ensayos de cilindros de concreto.

**Tabla A.6 Resultados de ensayos de cilindros de concreto de castillos**

Nombre	Descripción	Área cm <sup>2</sup>	Peso Vol t/m <sup>3</sup>	Carga kg	Esfuerzo f <sub>c</sub> ' kg/cm <sup>2</sup>	E <sub>c</sub> kg/cm <sup>2</sup>	E <sub>c</sub> / √f <sub>c</sub> '	Promedio f <sub>c</sub> ' kg/cm <sup>2</sup>	Promedio E <sub>c</sub> kg/cm <sup>2</sup>
Cil-27	Castillos espécimen MC4-BH8	81.4	2.02	18,100	222.4	141,295	9,475	182.5	154,845
Cil-28		82.0	2.01	17,800	217.0	211,519	14,359		
Cil-29		82.8	1.99	14,250	172.2	162,672	12,397		
Cil-30		82.6	1.96	13,550	164.1	133,179	10,398		
Cil-31		82.0	1.94	13,500	164.6	125,562	9,788		
Cil-45	Castillos espécimen MC5-BH8	82.8	2.00	24,400	294.6	159,458	9,291	294.9	164,665
Cil-46		83.3	1.98	23,600	283.2	170,882	10,154		
Cil-47		81.5	2.02	24,650	302.6	170,464	9,800		
Cil-48		81.4	2.00	24,350	299.2	157,855	9,126		
Cil-55	Castillos espécimen MC6-BH8	82.2	2.00	25850	314.5	165,539	9,335	304.0	170,209
Cil-56		80.4	2.08	24900	309.6	173,631	9,869		
Cil-57		81.6	1.91	23500	287.9	171,458	10,105		
Promedio			1.99				10,341	262.3	163,240
Coeficiente de variación			0.02						

Las gráficas esfuerzo–deformación unitaria axial de los ensayos se presentan en la Figura A.8.



**Figura A.8 Gráficas esfuerzo – deformación unitaria de ensayos de cilindros**

También se presentan los módulos de elasticidad calculados como la pendiente de la secante entre un punto de la gráfica esfuerzo-deformación con deformación unitaria de 0.00005 y el punto al 40% de la resistencia del cilindro según la Norma Mexicana NMX-C-128-ONNCCE (2014).

El promedio de los módulos de elasticidad en los castillos fue de 16,014 MPa (163,240 kg/cm<sup>2</sup>) como se muestra en la Tabla A.6.





## APÉNDICE B

### CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES

#### B.1 CIMENTACIÓN Y HABILITADO DEL ACERO

Se utilizaron dos vigas de cimentación previamente usadas en otros proyectos y se construyó una viga adicional. Dichas vigas tienen el objetivo de ser reutilizables por lo que se les deja una serie de huecos en la parte central donde entrarían los armados de castillos, refuerzo vertical o conectores y se rellenarían de concreto. En la Figura 2.1 se muestra el proceso de armado, cimbrado y colado de la viga.



**Figura B.1** Viga de cimentación nueva

Como parte del diseño se usaron barras de diámetro poco convencional en los castillos, siendo del No. 6 (1.59 cm de diámetro) para evitar la falla por flexión. Dichas barras se doblaron con el equipo mecánico del laboratorio del CENAPRED para hacer los ganchos a 90° y 180° y usando una sola barra doblada dentro de la cimentación para formar cada dos barras de los castillos. En la parte superior se armó una dala convencional de cuatro barras del No. 3 (0.95 cm) que quedó embebida en el centro de la viga cabezal formada por dos mitades y donde se rellenó de concreto.



**Figura B.2** Armado de castillos, dala superior y detalle de los ganchos de las barras verticales

## B.2 MORTERO PARA PEGA DE LAS PIEZAS

En el espécimen MC4-BH8 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 cernida. Los especímenes MC5-BH8 y MC6-BH8 se construyeron con mortero industrializado de la marca Stoncrete®. Se tomaron muestras como cubos de mortero de 5 cm de arista.



**Figura B.3** Pegado de las piezas del muro con mortero tipo I, o con mortero industrializado premezclado

## B.3 CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES

Las barras verticales de los castillos se anclaron en los huecos de las vigas de cimentación que se rellenaron de concreto (ver Figura B.2).

Se procedió a la construcción hilada por hilada pegando piezas con el mortero de cada espécimen. En el caso del espécimen MC6-BH8 se colocaron dos barras del No. 2 (0.63 cm de diámetro) a cada dos hiladas, con los ganchos de sus extremos dentro de los castillos. Finalizada la construcción del muro se dejaba fraguar un día y se colocaba la cimbra de los castillos de altura completa.



**Figura B.4** Mampostería completa con 12 hiladas; cimbrado de los castillos y detalle





**Figura B.5 Colocación del cabezal superior y muro terminado**

De los colados de anclaje al cimiento, la cadena de desplante, el cabezal y los castillos se tomaron muestras cilíndricas. Asimismo, durante la construcción de los muros se hacía un alto a la mitad de la altura y se elaboraron las pilas y muretes correspondientes, usando la misma mezcla con la que se pegaron las piezas en cada muro.



## REFERENCIAS

- Cruz A.I., Pérez Gavilán J.J., Flores L.E. (2019), “Experimental study of in-plane shear strength of confined concrete masonry walls with joint reinforcement”, *Journal of Engineering Structures*, Elsevier, Art. 182 (2019) 213–226, 14 pp.
- Cruz A.I., Pérez Gavilán J.J., Flores L.E. (2014), “Estudio experimental sobre la contribución del refuerzo horizontal a la resistencia de muros de mampostería confinada”, *Memorias del XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jal., México, 12 pp.
- Decanini L.D., Ochat E.E. (1988), “Influencia de las características del mortero en el comportamiento de la mampostería de bloques huecos de hormigón - acciones verticales y horizontales”, *VIII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*, Vol. 2, Buenos Aires, Argentina, pp. 283-301.
- Flores L. (2006), “Catálogo de Características de Gatos, Vigas, Placas y otros elementos del LEG, CENAPRED”, documento interno, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, febrero, 18 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.
- Lizárraga J.F., Pérez Gavilán J.J. (2011), “Análisis no lineal de muros de mampostería confinada utilizando la homogenización del material”, *Memorias del XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, Ags., México, 19 pp.
- Lizárraga J.F., Pérez Gavilán J.J. (2014), “Estudio experimental de muros de mampostería confinada desplantados sobre traveses de concreto”, *Memorias del XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jal., México, 15 pp.
- NMX-C-036-ONNCCE (2013), “Industria de la construcción – Mampostería – Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines – Método de ensayo”, Norma Mexicana, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 9 pp.
- 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.