



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

**ENSAYES DE MUROS DE BLOQUE HUECO DE CONCRETO CON REFUERZO
INTERIOR ANTE CARGA LATERAL Y ANTE CARGA VERTICAL**

Leonardo E. Flores Corona

Dirección de Investigación
Subdirección de Vulnerabilidad Estructural

Diciembre de 2019

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 Ensayes de muros a compresión	4
2.1.4 Especímenes para ensayos a fuerza horizontal en su plano	5
2.1.5 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.....	10
2.2.4 Resistencia esperada en cada espécimen.....	12
2.3 PREDICCIÓN DE LA RIGIDEZ	13
2.4 INSTRUMENTACIÓN	14
2.4.1 Instrumentación en ensayos a compresión.....	14
2.4.2 Instrumentación en ensayos ante fuerza lateral.....	15
2.5 APLICACIÓN DE CARGAS	16
2.5.1 Marco de carga para ensayos a compresión	16
2.5.2 Marco de carga para ensayos ante fuerza lateral	17
CAPÍTULO 3 RESULTADOS GENERALES DE LOS ENSAYES.....	19
3.1 RESULTADOS DE ENSAYES DE MATERIALES.....	19
3.2 ENSAYES DE MUROS A COMPRESIÓN ANTE CARGA VERTICAL.....	20
3.2.1 Espécimen MBV-1	20
3.2.2 Espécimen MBV-2	21
3.2.3 Espécimen MBV-3	22
3.2.4 Comparación de los tres especímenes	23
3.3 ENSAYES DE MUROS CUADRADOS ANTE FUERZAS SÍSMICAS	24
3.3.1 Espécimen MBC	24
3.3.2 Ensaye del espécimen MBRI-1 ($p_n f_{yh}=0.15$ MPa, $\sigma=0.3$ MPa).....	26
3.3.3 Ensaye del espécimen MBRI-2 ($p_n f_{yh}=0.3$ MPa, $\sigma=0.3$ MPa).....	27
3.3.4 Ensaye del espécimen MBRI-3 ($p_n f_{yh}=0.77$ MPa, $\sigma=0.3$ MPa).....	27
3.3.5 Ensaye del espécimen MBRI-4 ($p_n f_{yh}=0.3$ MPa, $\sigma=0.3$ MPa).....	29
3.3.6 Ensaye del espécimen MBRI-5 ($p_n f_{yh}=0.37$ MPa, $\sigma=0$ MPa).....	29
3.3.7 Ensaye del espécimen MBRI-6 ($p_n f_{yh}=0.37$ MPa, $\sigma=0.6$ MPa).....	30
3.3.8 Comparación de los seis especímenes.....	31
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES	35
4.1 ENSAYES ANTE CARGA VERTICAL.....	35
4.2 ENSAYES ANTE FUERZA LATERAL.....	35
APÉNDICE A RESULTADOS DE ENSAYES DE MATERIALES	37
A.1 GEOMETRÍA Y ENSAYES A COMPRESIÓN DE BLOQUES DE CONCRETO	37
A.2 COMPRESIÓN EN PILAS DE MAMPOSTERÍA	38
A.3 COMPRESIÓN DIAGONAL EN MURETES.....	39
A.4 COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO	41
A.5 COMPRESIÓN EN CILINDROS DE CONCRETO	42
APÉNDICE B CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES.....	45
B.1 CONSTRUCCIÓN DE LA MAMPOSTERÍA DE LOS MUROS.....	45
B.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS ENSAYADOS ANTE CARGA VERTICAL.....	45

B.3 CONSTRUCCIÓN DEL ESPÉCIMEN CONFINADO (MBC) 46
B.4 CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES CON REFUERZO INTERIOR 47
REFERENCIAS..... 49

RESUMEN

Se realizó un estudio de siete muros cuadrados de bloque hueco de concreto reforzados interiormente, de 2.6 m de largo, ensayados ante fuerza horizontal cíclica reversible en su parte superior. Uno de los muros fue de mampostería confinada con castillos, como modelo de comparación, y los otros seis tuvieron diferente refuerzo interior, vertical y horizontal, y diferente carga vertical. Se constató cómo el refuerzo horizontal aumentó la resistencia y capacidad de deformación hasta un orden de dos veces pero limitado al aplastamiento de las piezas y por otro lado se verificó el papel de la carga vertical en la resistencia y capacidad de deformación lateral inelástica de los muros.

ABSTRACT

A study of seven square walls internally reinforced, made of hollow concrete blocks, was performed. A cyclic horizontal loading was applied at the top of walls fixed at bottom as cantilever. One of the walls was reinforced as confined masonry with tie-columns at their edges, and was used as control model. The other six had different vertical and horizontal interior reinforcement, and different vertical load. It was observed how the horizontal reinforcement increased the shear strength and displacement capacity up to an order of two times but limited by the crushing of the blocks. The effect of the vertical load on the resistance and inelastic lateral deformation capacity was studied.

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, tanto cuasiestáticos como dinámicos a escala; esto 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, los ensayos realizados en el CENAPRED, en la UNAM así como en muchas instituciones en los últimos años han incluido el estudio de muros de mampostería confinada (muros reforzados por castillos y dalas), y hay una brecha de tiempo importante en cuanto a los últimos ensayos realizados a muros reforzados interiormente (con acero en celdas rellenas de mortero o concreto y con refuerzo horizontal entre hiladas).

Por lo tanto en el CENAPRED se ha propuesto un estudio para revisar la influencia de las principales variables de refuerzo en el caso de los principales mecanismos resistentes (carga vertical y fuerzas horizontales cíclicas en su plano), y acotado a un solo tipo de pieza de uso muy común en la sociedad como lo es el bloque de concreto de doble hueco.

Se estudiará experimentalmente el comportamiento de muros de mampostería de un solo tipo de piezas de concreto que son de baja resistencia pero representativas de lo que se puede encontrar en el mercado. En una futura etapa se podrán incluir ensayos de piezas de las mismas dimensiones pero con alto control de calidad y características resistentes superiores.

1.1 OBJETIVOS

- Verificar experimentalmente la resistencia a carga vertical y ante carga horizontal cíclica reversible de muros de mampostería de bloque doble hueco de concreto con distintas cuantías de refuerzo interior.
- Comparar los resultados de resistencia con una predicción teórica de ésta según las normas de diseño de mampostería del reglamento de construcciones de la Ciudad de México.
- Verificar la recomendación de colocar el refuerzo horizontal recto pasando por los huecos de las piezas en vez de colocarlo sobre sus caras laterales cubiertas de mortero.
- 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 contó con un lote de bloques huecos de concreto adquiridos para un estudio previo con los cuales se realizaron los diez muros de mampostería, siete de ellos cuadrados sometidos a fuerza horizontal cíclica y tres ante carga vertical creciente hasta la falla. Los bloques son de doble hueco comunes en el mercado resultando de resistencias bajas a la compresión como después se confirmó. La geometría de las piezas se muestra en la Figura 2.1 con dimensiones nominales de 12×19×39 cm (ancho, altura y largo).

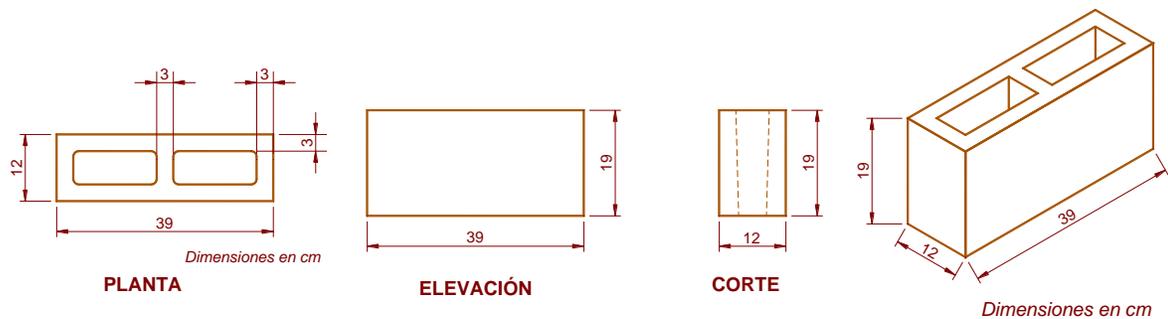


Figura 2.1 Piezas de concreto vibrocomprimido doble hueco

2.1.2 Probetas para ensayos de materiales

Para caracterizar a los bloques se realizaron ensayos de piezas a compresión según la norma mexicana NMX-C-063, las cuales se cabecearon con yeso especial de alta resistencia en sus caras horizontales.

La resistencia de diseño a compresión de los muros se obtiene de ensayos de probetas construidas con piezas unidas por la junta de mortero horizontal. Estas probetas se denominan pilas y están descritas en la norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE.

Para evaluar la resistencia de muros de mampostería ante fuerza horizontal se realizó el ensayo de especímenes cuadrados de tamaño reducido (muretes) sometidos a compresión a lo largo de una de sus diagonales. Dicho ensayo 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.

Las pilas y muretes, de tres hiladas de altura, que se muestran esquemáticamente en la Figura 2.2.

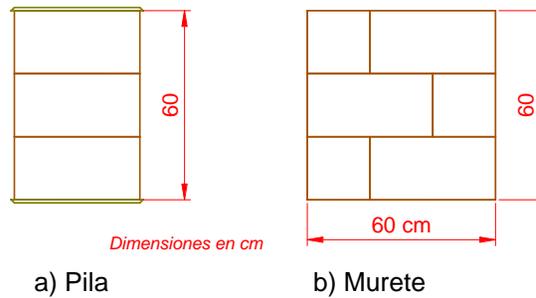


Figura 2.2 *Probetas para ensaye a compresión de piezas*

Siguiendo los requerimientos de las normas de mampostería del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2017), así como la norma mexicana de ensaye de muretes y pilas (Onncce, 2010) el tamaño mínimo del murete debe ser de una y media piezas en la base y el número de hiladas necesario para que sea cuadrado. En la Figura 2.3 se muestra la geometría del ensaye a compresión diagonal de muretes en un marco de carga armado especialmente para ello en el laboratorio.

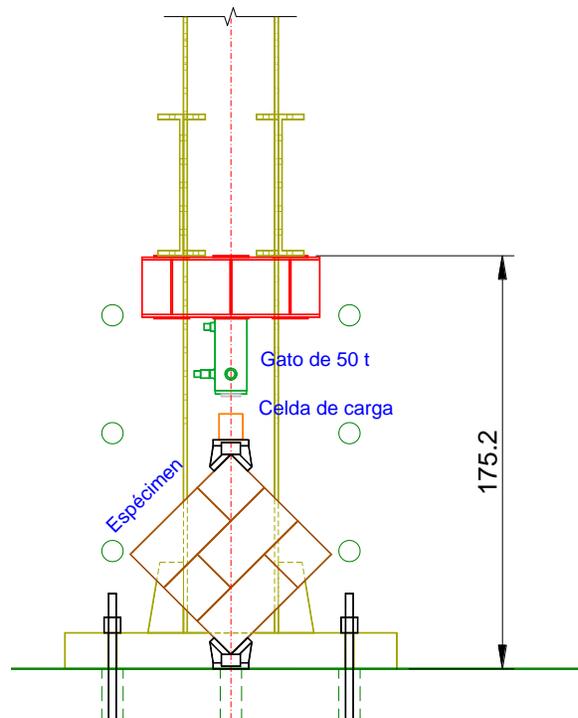


Figura 2.3 *Dimensiones de los muretes a compresión diagonal*

2.1.3 Ensayes de muros a compresión

Para caracterizar el mecanismo de resistencia a compresión de muros completos, que incluyen celdas reforzadas con acero vertical y rellenas de concreto de relleno, se propuso el ensaye de tres muros de altura completa. Los muros se hicieron de 140 cm de ancho y la altura de un muro típico de vivienda, con 12 piezas que sumaron 240 cm. El ancho se propuso para incluir algunos huecos verticales reforzados ya que se considera importante estudiar la participación del refuerzo vertical y el relleno de mortero. Dichos especímenes se construyeron sobre una base más amplia para darle anclaje a las barras de refuerzo. En la Figura 2.4 se muestra la geometría de las probetas propuestas para el ensaye de compresión de muro de altura completa.

El número y características de los especímenes serán como se resume en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Número y características de especímenes ensayados a compresión

No.	Nombre	Refuerzo vertical	Refuerzo horizontal
1	MBV-0	- - -	2-5/32@40 cm
2	MBV-1	2#3	2-5/32@40 cm
3	MBV-2	3#5	2-5/32@40 cm

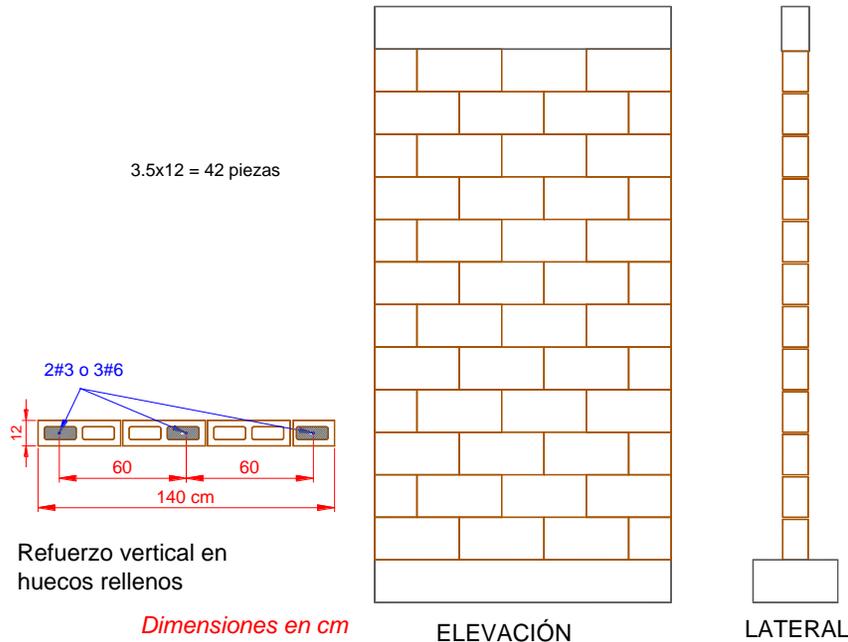


Figura 2.4 Dimensiones de los especímenes para ensayo a compresión

2.1.4 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 ensayo de muros a tamaño natural ensayados ante fuerza horizontal cíclica que representaría el efecto de un sismo.

2.1.4.1 Variables de estudio

Las variables a estudiar se identificaron como las siguientes:

- Resistencia de las piezas: se usó en esta etapa una sola resistencia de piezas (baja resistencia).
- Mortero en las hiladas: se incluyó solo mortero tipo I.
- Relación de aspecto: se estudió solo muros cuadrados ($H/L = 1$). Un estudio más profundo incluiría estudiar muros cortos y muros largos.
- Tipo de ensayo: muros de carga ante fuerza horizontal cíclica reversible cuasi-estática.
- Carga vertical: se considera un aspecto fundamental en la resistencia, por lo que se propuso ensayar un muro sin carga vertical (solo el peso del cabezal superior), otro con carga vertical media representativa de un muro de planta baja de un edificio de 3 pisos y uno con carga equivalente a 6 pisos de altura.
- Refuerzo vertical. Tres especímenes se construyeron con refuerzo en los extremos en dos celdas consecutivas como lo que piden las normas de mampostería; de estos se reforzaron: uno sin

refuerzo a lo largo del muro, otro con armado representativo a cada 80 cm, y uno más con una cuantía alta de refuerzo cada 40 cm. El modelo con armado cada 80 cm se consideró como el modelo patrón para comparación.

- Refuerzo horizontal. Se usó una cuantía mínima, una media y una máxima de refuerzo horizontal. Un espécimen se repitió pero con el refuerzo horizontal embebido en el mortero de pega colocado sobre las caras de las piezas, y desviado en los extremos para entrar en el hueco reforzado.
- Castillos externos. La mampostería con refuerzo interior no lleva castillos externos, sin embargo, se ensayó un muro adicional de mampostería confinada con fines de comparación.

2.1.4.2 Geometría y refuerzo

Considerando las anteriores variables se ha reducido el número de combinaciones a los especímenes mostrados en la Tabla 2.2, todos de 260×240 cm:

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

No.	Nombre	Modalidad de refuerzo	Refuerzo en extremos	Refuerzo vertical	Refuerzo horizontal	Anclaje en extremos	Esfuerzo vertical
1	MBRI-1	Refuerzo int.	2#3	- - -	1-5/32@40	Recto	3 kg/cm ²
2	MBRI-2	Refuerzo int.	2#3	2#3	2-5/32@40	Recto	3
3	MBRI-3	Refuerzo int.	2#3	4#3	2-5/32@20	Recto	3
4	MBRI-4	Refuerzo int.	2#3	2#3	2-5/32@40	Desviado	3
5	MBRI-5	Refuerzo int.	2#3	2#3	2-5/32@40	Recto	0
6	MBRI-6	Refuerzo int.	2#3	2#3	2-5/32@40	Recto	6
7	MBC	Confinado	castillos 4#6	- - -	- - -	- - -	3

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 concreto de 45×40 cm. En la Figura 2.5 se muestra la geometría representativa de los muros y el refuerzo vertical en elevación, mientras que se muestra la sección transversal en planta en la Figura 2.6.

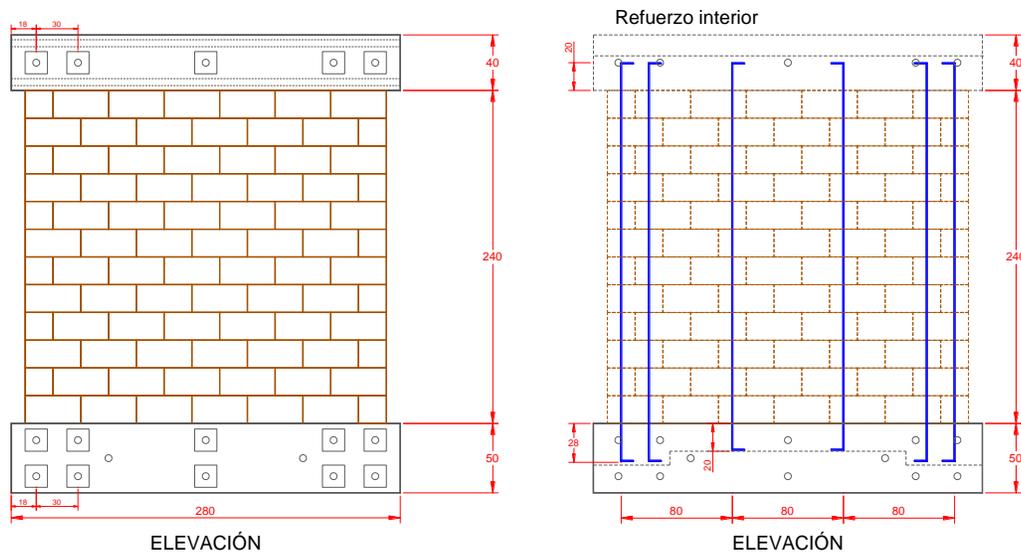


Figura 2.5 Geometría de los especímenes para ensaye ante carga lateral

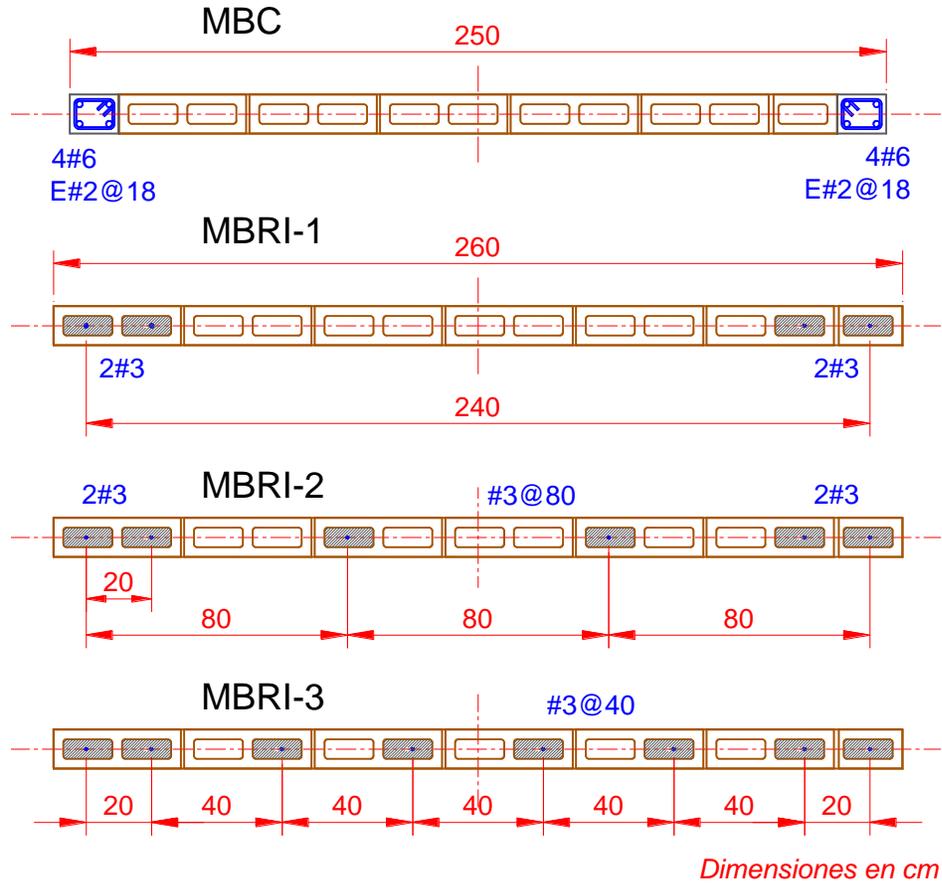


Figura 2.6 Armado vertical de los especímenes

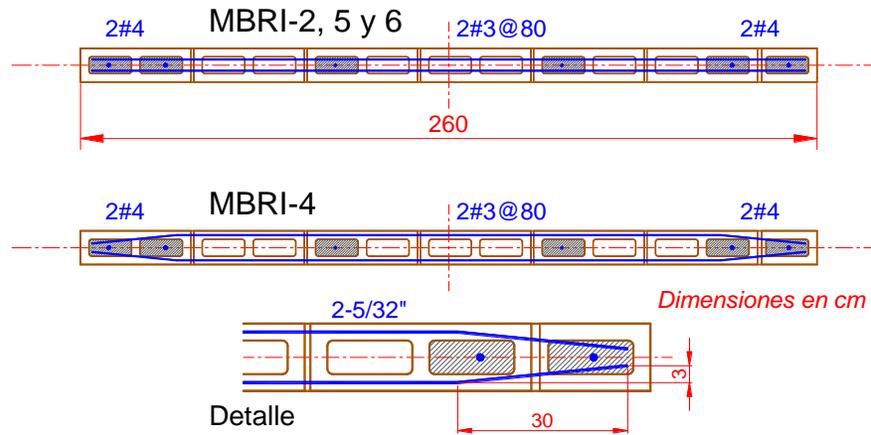


Figura 2.7 Alambres de refuerzo horizontal de los especímenes

2.1.5 Propiedades nominales de los materiales

Las propiedades nominales de los materiales a usar son:

* Concreto de vigas de cimentación	$f_c' = 400 \text{ kg/cm}^2$
* Concreto de anclaje a cabezal y cim	$f_c' = 300 \text{ kg/cm}^2$
* Concreto de castillos	$f_c' = 200 \text{ kg/cm}^2$
* Piezas concreto	$f_p' = 40 \text{ kg/cm}^2$
	$f_m' = 20 \text{ kg/cm}^2$
	$v_m' = 2 \text{ kg/cm}^2$
* Mortero de relleno	$f_c = 125 \text{ kg/cm}^2$
* Acero vertical	$f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$
* Acero horizontal	$f_y = 6000 \text{ kg/cm}^2$

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, 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 (GDF, 2017) como:

$$P_R = F_R F_E (f_m' A_T + \Sigma A_s f_y) \quad (1)$$

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 tomó $F_E = 1$ en este estudio;

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.

Tabla 2.3 Resistencias nominales de los especímenes a compresión pura

No.	Especímen	Armado	A_s cm ²	$P_{R,max}$ t	P_R t	Nota
1	MBV-1	- - -	0		33.6	
2	MBV-2	2#3	1.42	42	39.6	
3	MBV-3	3#5	5.94	42	42.0	El cálculo sin $P_{R,max}$ fue $P_R = 58.5 \text{ t}$

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:

$$M_R = F_R A_s f_y d' + 0.3 P_u d, \quad \text{si } P_u < P_R/3 \quad (2)$$

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 se obtienen los resultados de la Tabla 2.4. 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 2.6 m: $V_{MR} = M_R/2.6$.

Tabla 2.4 Resistencias nominales a flexo-compresión con cálculo simplificado

No.	Especímen	Armado	A_s cm ²	d cm	P t	P_R t	M_0 t-m	M_R , simple t-m	V_{MR} , simple t
1	MBRI-1	2#3	1.42	240	9.36	52.0	13.1	19.9	7.64
2	MBRI-2	2#4	2.54	240	9.36	54.6	23.5	30.2	11.62
3	MBRI-3	2#4	2.54	240	9.36	54.6	23.5	30.2	11.62
4	MBRI-4	2#4	2.54	240	9.36	54.6	23.5	30.2	11.62
5	MBRI-5	2#4	2.54	240	1.44	54.6	23.5	24.5	9.42
6	MBRI-6	2#4	2.54	240	18.72	54.6	23.5	36.1	13.87
7	MBC	4#4	5.08	243	9.0	71.9	50.1	56.7	21.80

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 2.8.

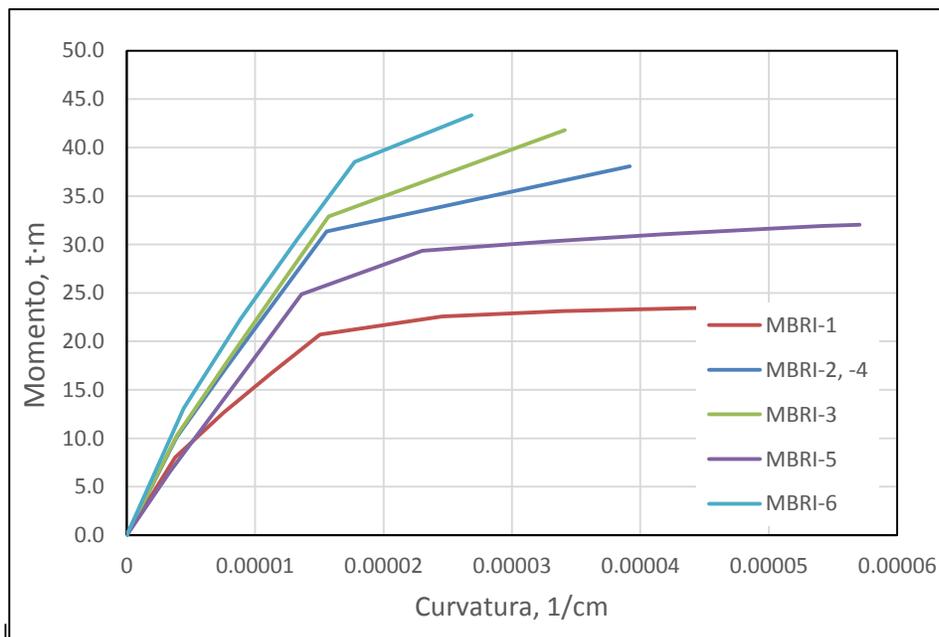


Figura 2.8 Diagramas momento-curvatura en la base de los especímenes

En la Tabla 2.5 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 2.8. 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 2.5 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	MBRI-1	13.8	9.36	22.7	8.7
2	MBRI-2	29.7	9.36	35.9	13.8
3	MBRI-3	33.8	9.36	38.2	14.7
4	MBRI-4	29.7	9.36	35.9	13.8
5	MBRI-5	29.7	1.44	30.8	11.9
6	MBRI-6	29.7	18.72	37.6	14.5
7	MBC	50.6	9.0	61.3	23.6

Tabla 2.6 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	MBRI-1	14.0	9.36	20.7	23.6	9.1
2	MBRI-2	30.6	9.36	31.3	38.1	14.6
3	MBRI-3	35.5	9.36	32.9	41.8	16.1
4	MBRI-4	30.6	9.36	31.3	38.1	14.6
5	MBRI-5	30.6	1.44	24.8	32.0	12.3
6	MBRI-6	30.6	18.72	38.5	43.3	16.7
7	MBC	53.2	9.0	60.4	63.9	24.6

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:

$$V_{mR} = F_R (0.5v_m' A_T + 0.3P) \cdot f \leq 1.5F_R v_m' A_T \cdot f \quad (3)$$

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 está suponiendo una resistencia nominal a cortante de $v_m' = 0.35$ MPa (3.5 kg/cm²), para bloques huecos de concreto de peso medio. Las dimensiones de la mayoría de los muros son las mismas:

$$A_T = L \cdot t = 12 \times 260 = 3120 \text{ cm}^2; \quad \text{y} \quad P = \sigma A_T, \quad \text{donde } \sigma \text{ toma valores de } 0, 3 \text{ o } 6 \text{ kg/cm}^2$$

b) Contribución de la resistencia a cortante del refuerzo horizontal

Para los casos en que se use refuerzo horizontal las NTC-M dan la siguiente ecuación:

$$V_{sR} = F_R \eta p_h f_{yh} A_T \quad (4)$$

$$p_h = \frac{A_{sh}}{s_h \cdot t} \quad (5)$$

donde

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

En los especímenes MBRI-1, 2, 5 y 6 se colocará en cada junta reforzada uno o dos alambres de 4 mm (5/32 pulg), con área de $a_s = 0.124 \text{ cm}^2$, y en el modelo MBRI-3 dos alambres de 6.3 mm (1/4 pulg), colocando en todos los casos el refuerzo cada dos hiladas (40 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 $p_h f_{yh} \geq 3 \text{ kg/cm}^2$.

η eficiencia del refuerzo:

$$\eta = \frac{V_{mR}}{F_R p_h f_{yh} A_T} (k_0 k_1 - 1) + \eta_s \quad (6)$$

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

$$k_1 = 1 - \alpha p_h f_{yh} \quad (7)$$

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 $f_m' < 60 \text{ kg/cm}^2$.

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.

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 sería

$$f_{nm} = A_{nT} / A_T, \quad A_{nT} = A_T - n_h A_{hueco} \quad (8)$$

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 $A_{hueco} = 89.14 \text{ cm}^2$.

c) 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:

$$V_R = V_{mR} + V_{sR} \quad (9)$$

En la Tabla 2.7 se muestran los resultados del cálculo de la resistencia a cortante.

Tabla 2.7 Resistencias nominales a cortante de los especímenes

No.	Especímen	Refuerzo horizontal	p_h	$p_h \times f_{yh}$ kg/cm ²	nominal $p_h \cdot f_{yh}$ kg/cm ²	η	P t	V_{mR} t	V_{sR} t	V_R t
1	MBRI-1	1-5/32@40	0.00026	1.55	0	0	9.36	8.67	0	8.67
2	MBRI-2	2-5/32@40	0.00052	3.1	3	0.484	9.36	8.67	4.53	13.20
3	MBRI-3	2-1/4@40	0.00132	7.9	3	0.499	9.36	8.67	4.67	13.34
4	MBRI-4	2-5/32@40	0.00052	3.1	3	0.484	9.36	8.67	4.53	13.20
5	MBRI-5	5/32+3/16@40	0.00063	3.8	3	0.420	1.44	6.17	4.02	10.19
6	MBRI-6	5/32+3/16@40	0.00063	3.8	3	0.549	18.72	11.61	5.14	16.75
7	MBC	- - -	0	0	0	0	9.0	8.15	0	8.15

Nota: a pesar de que el espécimen MBR-3 cuenta con una gran cuantía de refuerzo horizontal, el cálculo con las NTC-Mampostería limita la resistencia al aplastamiento de la mampostería por lo que da un valor de V_{sR} semejante a los muros con menos refuerzo y misma carga vertical.

2.2.3.2 Resistencia a cortante por fricción

Se puede calcular con los criterios de la sección 2.5.10 de las NTCC (GDF, 2004). La resistencia V_R será la menor de:

$$\begin{aligned}
 &F_R \mu (A_{vf} f_y + N_u) \\
 &F_R [14A + 0.8(A_{vf} f_y + N_u)] \\
 &F_R 0.25 f_c' A
 \end{aligned} \tag{10}$$

A_{vf} es el área de refuerzo por cortante por fricción. En este caso será la de las barras que cruzan la sección crítica. A es el área de concreto del plano crítico ($A = t L$), N_u es la fuerza a compresión normal al plano ($N_u = P$), y $\mu = 1.0$ equivale al coeficiente de fricción igual a la unidad para concreto colado contra concreto endurecido.

Usando factor de reducción unitario ($F_R = 1$) y para el caso mínimo de armado del espécimen MBRI-1 con 4#3 ($A_{vf} = 2.84 \text{ cm}^2$) tenemos:

$$\begin{aligned}
 1 (1) [2.84 \times 4200 + 9360] / 1000 &= 21.3 \text{ t} \\
 1 [14(3120) + 0.8(2.84 \times 4200 + 9360)] / 1000 &= 60.7 \text{ t} \\
 1 (0.25)(20)(3120) / 1000 &= 15.6 \text{ t (rige)}
 \end{aligned}$$

En forma similar se calcula la resistencia para los demás especímenes. El resumen en términos de fuerza cortante se presenta en la Tabla 2.8.

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 2.8 se enlistan las resistencias y se anota como V_{min} la que predominará.

Tabla 2.8 Resistencias teóricas ante la fuerza horizontal

No.	Especímen	$V_{R,fricc}$ t	V_R t	V_{Mp} t	V_{min} t	Modo de falla
1	MBRI-1	15.6	8.67	9.1	8.67	cortante
2	MBRI-2	15.6	13.20	14.6	13.20	cortante
3	MBRI-3	15.6	13.34	16.1	13.34	cortante
4	MBRI-4	15.6	13.20	14.6	13.20	cortante
5	MBRI-5	15.6	10.19	12.3	10.19	cortante
6	MBRI-6	15.6	16.75	16.7	15.6	deslizamiento-cortante
7	MBC	15.0	8.15	18.0	8.15	cortante

2.3 PREDICCIÓN DE LA RIGIDEZ

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

$$Rig = V / \delta_h \quad (11)$$

La deformación teórica, δ_h , en el rango elástico 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:

$$\delta_h = \frac{VH^3}{3E_m I} + \frac{VH}{G_m A_v} \quad (12)$$

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 un cálculo preliminar se tomará el módulo de elasticidad como $E = 800f_m'$, el módulo de cortante se permite calcular como $G_m = 0.2E_m$. El momento de inercia de la sección bruta de mampostería sin tomar en cuenta el acero de refuerzo es:

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

$$E_c = 8000 \sqrt{f_c'} = 113,137 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_m = 800 f_m' \text{ y } G_m = 0.2. \text{ Para piezas de concreto, donde } f_m' = 20 \text{ kg/cm}^2 \text{ (nominal),}$$

por tanto: $E_m = 16000 \text{ kg/cm}^2$, $G_m = 3200 \text{ kg/cm}^2$,

Para estimar el momento de inercia de la sección del muro MBC se tomaron en cuenta los castillos mediante la sección transformada. Sea la relación de módulos de elasticidad, n :

$$n = E_c / E_m = 113137 / 16000 = 7.07$$

Se obtiene el momento de inercia como:

$$I = t \cdot L_m^3 / 12 + 2n [b_c h_c^3 / 12 + A_c (L - h_c)^2 / 4] \quad (13)$$

donde

$L_m = L - 2h_c$ longitud de mampostería entre castillos,

b_c, h_c ancho y peralte de los castillos, respectivamente.

Para el caso de los muros con refuerzo interior se obtuvo el momento de inercia como:

$$I = t \cdot L^3 / 12 \quad (14)$$

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 2.9. 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 2.9 Rigideces teóricas con propiedades nominales

No.	Especímen	Sección	$b_c \times h_c$ cm	t cm	L cm	A_v cm ²	I cm ⁴	Rig t/cm
1	MBRI-1	Rectangular	---	12	260	2600	17,576,000	22.1
2	MBRI-2	Rectangular	---	12	260	2600	17,576,000	22.1
3	MBRI-3	Rectangular	---	12	260	2600	17,576,000	22.1
4	MBRI-4	Rectangular	---	12	260	2600	17,576,000	22.1
5	MBRI-5	Rectangular	---	12	260	2600	17,576,000	22.1
6	MBRI-6	Rectangular	---	12	260	2600	17,576,000	22.1
7	MBC	Con castillos	12×15	12	260	3000	45,840,704	32.0

2.4 INSTRUMENTACIÓN

2.4.1 Instrumentación en ensayos a compresión

Para obtener la gráfica desplazamiento–fuerza y de ésta la gráfica deformación unitaria contra esfuerzo vertical, era necesario medir los desplazamientos verticales adicionalmente a la medición de la carga aplicada. La gráfica de comportamiento permitiría evaluar la etapa de comportamiento elástico (o de proporcionalidad entre fuerzas y deformaciones) y la etapa de falla, así como determinar la rigidez ante carga vertical del sistema.

Para la instrumentación externa de los especímenes ensayados a compresión se colocaron medidores de desplazamiento vertical en la parte superior del muro, así como en los extremos y el centro del mismo. Las barras de refuerzo vertical instrumentarán con deformímetros eléctricos (“strain gauge”).

En la Figura 2.9 se muestra el arreglo de instrumentos colocados tanto internamente como en la parte exterior de los especímenes.

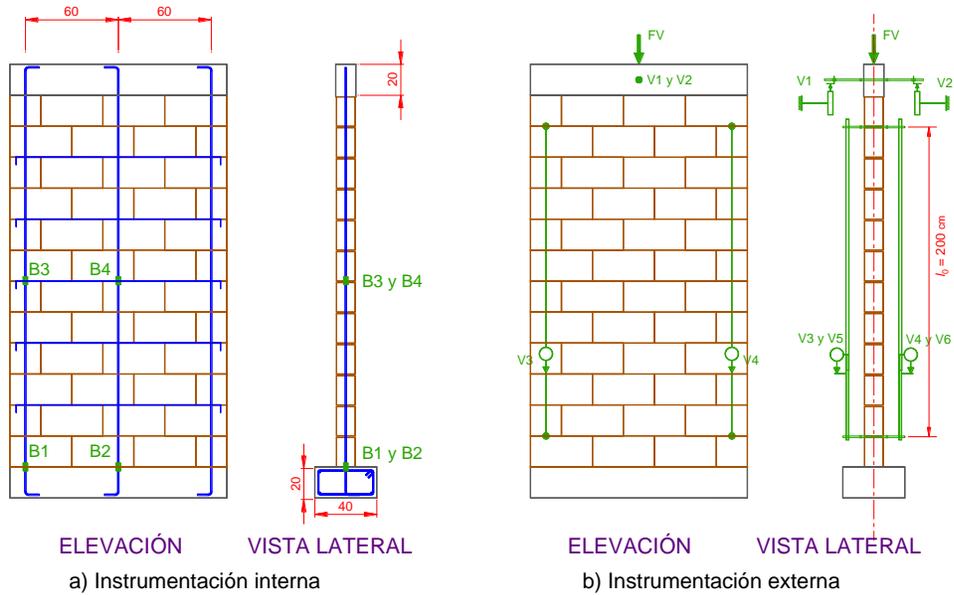


Figura 2.9 Instrumentación del espécimen ante carga vertical

2.4.2 Instrumentación en ensayos ante fuerza lateral

Para los especímenes ensayados ante carga lateral 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 2.10 se muestra el arreglo de la instrumentación externa.

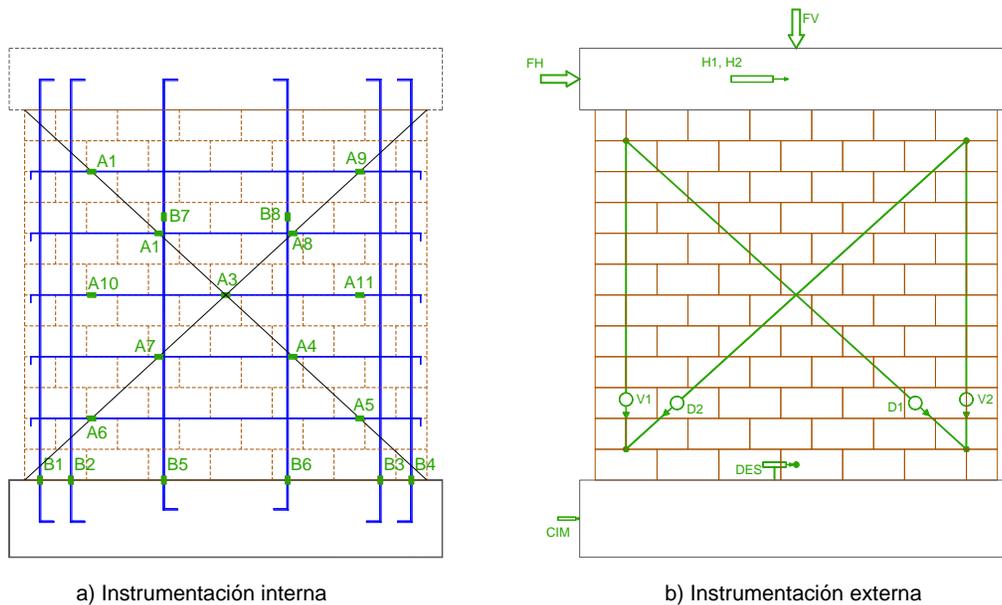


Figura 2.10 Instrumentación en modelos ensayados a carga lateral

2.5 APLICACIÓN DE CARGAS

2.5.1 Marco de carga para ensayos a compresión

2.5.1.1 Máquina universal para ensayar probetas pequeñas

Dada la geometría de los especímenes hará uso de la máquina universal para el ensaye probetas de tamaño reducido como son las de piezas solas y pilas formadas por tres piezas, así como el ensaye de cubos de mortero. En la Figura 2.11 se muestra la máquina universal para ensaye a compresión.

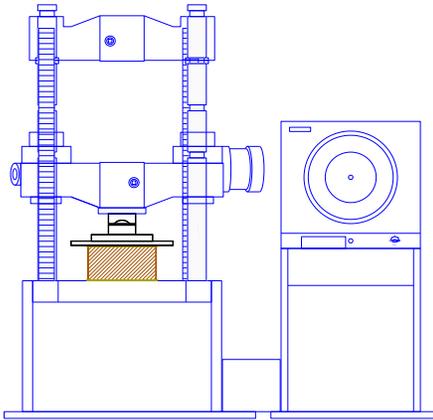


Figura 2.11 *Ensaye de piezas y probetas de tamaño reducido en la máquina universal*

2.5.1.2 Marco de carga para especímenes grandes

Para los especímenes ante carga vertical se realizó el ensaye en un marco de carga configurado sobre la losa de reacción del laboratorio, dotado de uno gatos de 50 t. Se muestra en la Figura 2.12 el arreglo del marco de carga en dos vistas.

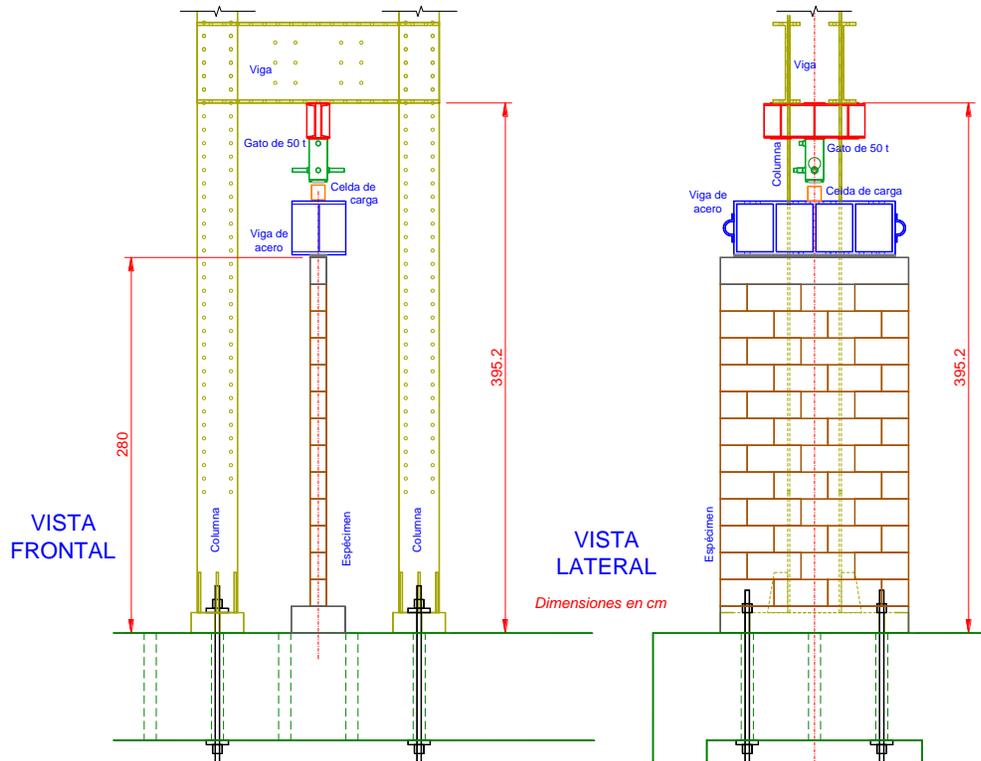


Figura 2.12 Marco de carga para ensaye a compresión de especímenes

2.5.2 Marco de carga para ensayos ante fuerza lateral

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 2.13 se presenta el marco de carga.

2.5.2.1 Historia de carga

Siguiendo las recomendaciones del apéndice A de las NTC-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, el 3 y 4 la mitad la carga resistente, y en el 5 se buscó generar el agrietamiento o daño visible. A partir de aquí se controló por deformación con incrementos de distorsión de 0.002 y sus respectivas repeticiones. La historia de carga usada es la mostrada en la Figura 2.14.

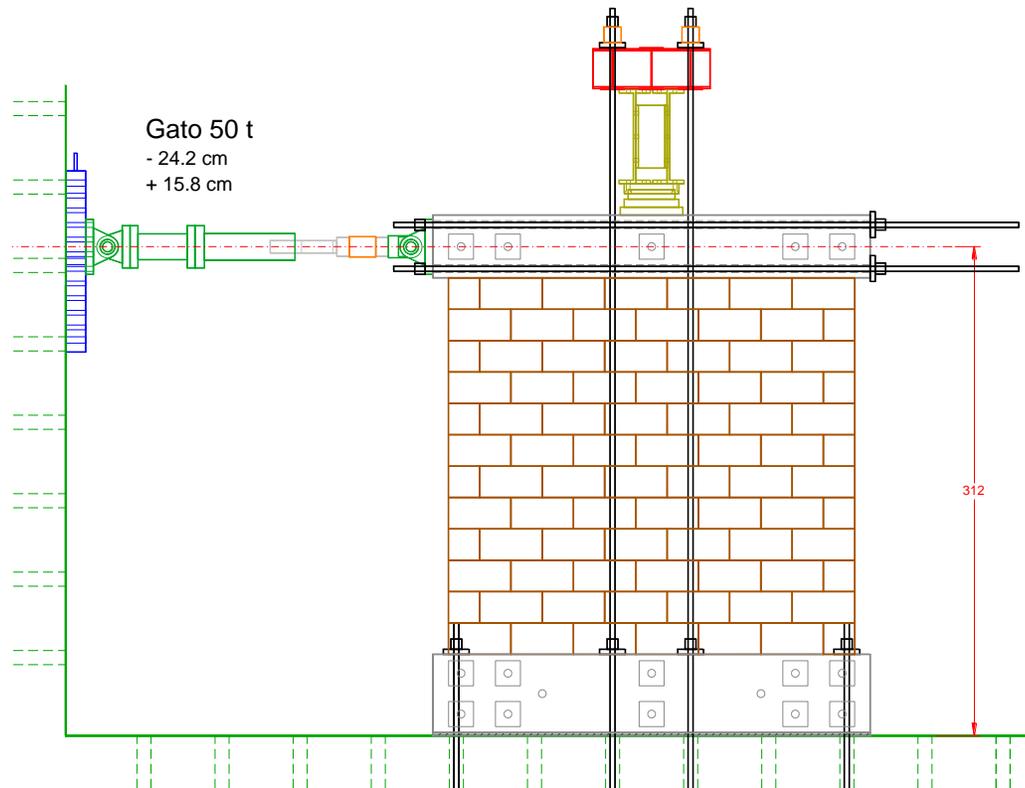
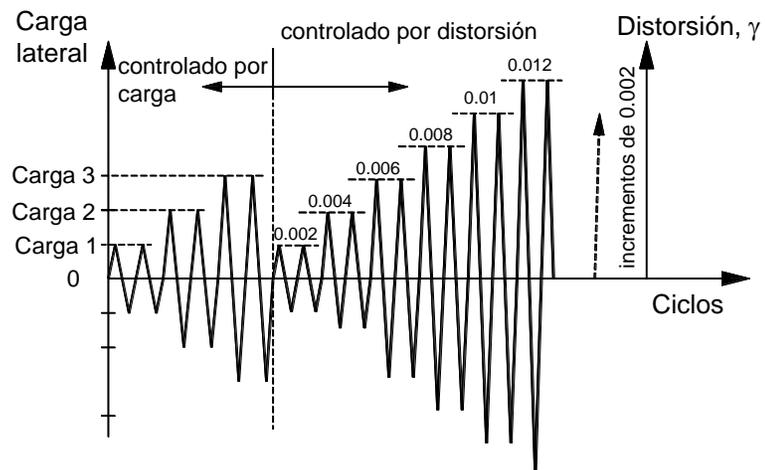


Figura 2.13 Marco de aplicación de cargas para ensaye ante fuerza horizontal



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 agrietamiento (experimental)

Figura 2.14 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 11.8×19.5×39 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 se muestran los resultados promedio en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resumen de los resultados de ensayos de materiales

Tipo de ensaye	Propiedad	Variable	Valor
Compresión en piezas	Media	f_p	50.4 kg/cm ²
	Coefficiente de variación	C_p	0.28
	Resistencia de diseño	f_p'	28.8 kg/cm ²
	Resistencia nominal	$f_{p\ nom}$	60 kg/cm ²
Compresión en pilas	Media	f_m	34.1 kg/cm ²
	Coefficiente de variación	C_m	0.27
	Resistencia de diseño	f_m'	21.4 kg/cm ²
	Resistencia nominal	$f_{m\ nom}$	15 kg/cm ²
Compresión diagonal en muretes	Media	V_m	5.2 kg/cm ²
	Coefficiente de variación	C_v	0.19
	Resistencia de diseño	V_m'	3.51 kg/cm ²
	Resistencia nominal	$V_{m\ nom}$	3.5 kg/cm ²
Compresión en mortero	Media	$f_{i\ prom}$	127.6 kg/cm ²
	Resistencia nominal	$f_{i\ nom}'$	125 kg/cm ²
Compresión en concreto de castillos del MBC	Media	f_c'	179 kg/cm ²
	Coefficiente de variación	C_c	0.04
	Resistencia nominal	$f_{c\ nom}'$	150 kg/cm ²

Tabla 3.2 Propiedades promedio de materiales por muro

Espécimen	f_j kg/cm ²	$f_{m\ prom}$ kg/cm ²	$V_{m\ prom}$ kg/cm ²
MBC	192	30.5	4.71
MBRI-2 y 4	98	32.3	4.80
MBRI-5 y 6	116	35.7	5.92
MBV-1, 2 y 3		37.5	- - -

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 A COMPRESIÓN ANTE CARGA VERTICAL

Para caracterizar la resistencia a compresión de muros a tamaño natural, con una longitud suficiente para que contuvieran celdas reforzada, con separación representativa de la usada en muros en la práctica profesional, se construyeron tres especímenes que se sometieron a carga vertical hasta la falla.

El procedimiento de ensaye se formuló aplicando una historia de carga aplicando una carga creciente al 25% de la resistencia teórica, descargando y aplicando una nueva carga hasta el 50% de dicha resistencia. A continuación se retiró la instrumentación colocada en los muros para protegerla de un posible colapso, dejando únicamente los medidores verticales en la parte superior de los muros que están montados a salvo de ese posible colapso.

3.2.1 Espécimen MBV-1

Este espécimen era de mampostería simple, sin ningún refuerzo vertical ni horizontal. La carga estimada teórica era de 23.5 t que incluía un factor de esbeltez de $F_E = 0.7$. Tras hacer los dos ciclos de carga al 25 y 50% de la resistencia teórica (6 y 12 t), se retiraron los instrumentos externos y se llevó a una nueva carga hasta 36.8 t donde se decidió volver a bajar la carga y hacer un nuevo ciclo. Cabe señalar que el gato hidráulico vertical era de 50 t y que, en caso de ser rebasado se tendría que reformular el sistema de carga para poner, por ejemplo, dos gatos de 50 t cada uno sumando 100 t.

Se llevó a un nuevo ciclo de carga hasta la falla que se alcanzó a los 488 kN (49.79 t), justo antes de llegar a la capacidad del gato de 50 t. Estando prácticamente en esta carga no se observaban agrietamientos ni otro daño en el muro, pero sí se pudo observar que la gráfica deformación–carga empezó a perder proporcionalidad a las 46 t aproximadamente, y pasando las 48 t la curva prácticamente tenía pendiente horizontal. En el video tomado se aprecia un fuerte patrón de grietas instantes antes del colapso total súbito. En la Figura 3.1 se muestra una secuencia del colapso del espécimen. La gráfica del ensaye se muestra en la Figura 3.2.



Figura 3.1 Secuencia de la falla y colapso del espécimen MBV-1

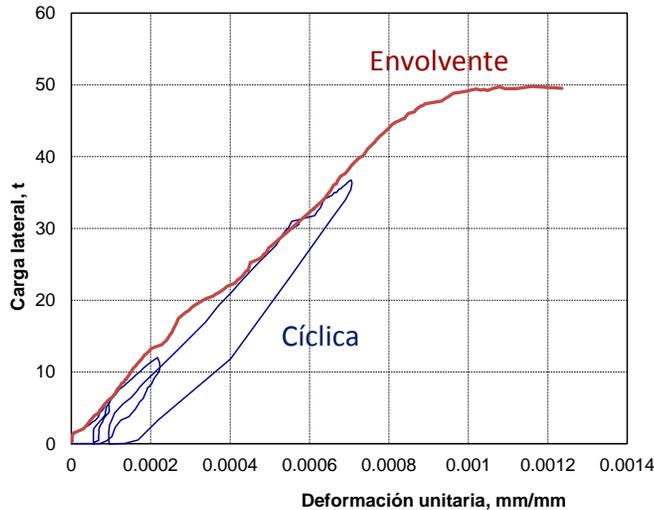


Figura 3.2 Gráfica carga-deformación del espécimen MBV-1

3.2.2 Especimen MBV-2

Este muro representó un caso intermedio entre un muro sin refuerzo (mampostería simple) y un muro correctamente reforzado. En efecto, el MBV-2 no cumple con la separación máxima del refuerzo vertical de 80 cm o $6t = 72$ cm, ya que las dos barras de refuerzo de los extremos distaban 120 cm, además de que solo había una celda reforzada en cada extremo y no dos como lo piden las NTC-M. La intención fue tener un caso con muy poco refuerzo vertical para considerar su aportación a la resistencia así como la del concreto de relleno en las celdas reforzadas. Horizontalmente se reforzó con dos alambres de 5/32" cada dos hiladas.

La carga estimada teórica era de 39.6 t, que era la resistencia básica de la mampostería (33.6 t) más la contribución del acero de refuerzo vertical $\Sigma A_s f_y = 2 \times 0.71 \times 4200 / 1000 = 5.96$ t. Sin embargo, se replanteó la resistencia esperada corrigiéndola con la obtenida en el modelo anterior MBV-1 tomando como resistencia de mampostería simple $P_{R,simple} = 50$ t y sumándole la contribución del acero, es decir una nueva estimación de $P_R = 56$ t. Para esta prueba se cambió el gato vertical de 50 t por uno de 400 t.

Se plantearon entonces los dos ciclos de carga al 25 y 50% de la resistencia ajustada cargándolo primero a 14 t, donde se decidió retirar los instrumentos externos por protección, y a continuación se subió a 30 t (un poco mayor que el 50%). Finalmente se llevó a la falla subiendo la carga hasta que llegó a 58.5 t.

A las 57 t la gráfica deformación–carga empezó a perder proporcionalidad y el mecanismo de falla se dio con un paulatino aplastamiento de la parte superior del muro, con el pandeo hacia a fuera de las dos barras verticales de los extremos lo cual desconchó el concreto de relleno y la mampostería de las piezas que lo contenían. La resistencia o carga máxima alcanzada fue de 574 kN (58.5 t). Cabe destacar que no hubo un colapso súbito como ocurrió con el espécimen MBV-1 de mampostería simple.

En la Figura 3.9 se muestra el aspecto final del espécimen y el detalle del daño severo por aplastamiento en las últimas hiladas. En la Figura 3.10 se muestra la gráfica de carga–desplazamiento vertical medido en la parte superior del muro.



Figura 3.3 Daño en el estado final de la falla del espécimen MBV-2

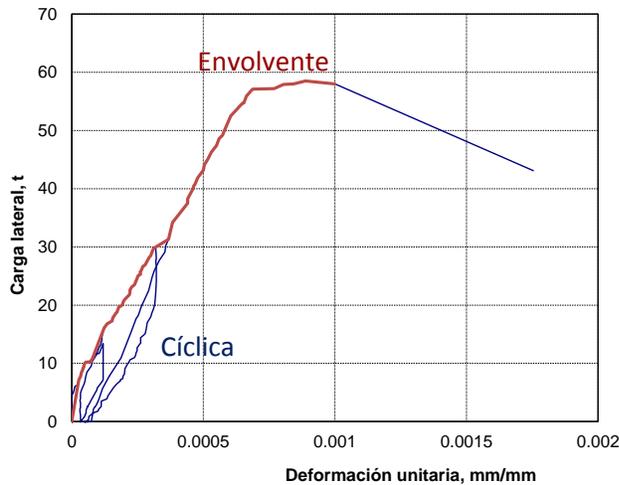


Figura 3.4 Gráfica carga-deformación del espécimen MBV-2

3.2.3 Especimen MBV-3

El tercer espécimen representó un muro con una cuantía más alta de refuerzo. Aunque no se colocaron las dos celdas de cada extremo reforzadas con acero vertical, se supuso que representaría la parte interna de un muro correctamente reforzado con barras del no. 5 (1.6 cm de diámetro) a cada 60 cm, siendo una cuantía mayor que la mínima $p_v f_{yv} = 0.0027 \times 4200 = 11.6 \text{ kg/cm}^2 \gg 3 \text{ kg/cm}^2$. Horizontalmente se reforzó con dos alambres de 1/4" cada dos hiladas.

La carga estimada teórica original, con resistencias nominales, era de 42 t, que resultó ser el tope que establecen las NTC-M ya que $P_R \leq 1.25 F_R F_{Ej_m} A_T$, y que es menor que la resistencia de mampostería más la del acero ya que cuenta con mucho refuerzo vertical. Nuevamente se replanteó la resistencia esperada corrigiéndola con la obtenida del modelo MBV-1 tomando como $P_{R, simple} = 50 \text{ t}$, sumándole la contribución del acero $\Sigma A_s f_y = 24.9 \text{ t}$, es decir una nueva estimación de $P_R = 75 \text{ t}$.

Se plantearon entonces los dos ciclos de carga, primero a 20 t, retirando los instrumentos externos por protección, y a continuación se subió a 40 t. Finalmente se llevó a la falla llegando a la carga máxima y falla con 763 kN (77.8 t).

A las 75.5 t la gráfica deformación–carga empezó a perder proporcionalidad y el mecanismo de falla se dio con un aplastamiento de la parte superior del muro similar al ocurrido en el espécimen MBV-2, el pandeo de las barras verticales de los extremos hacia los extremos del muro y la del centro hacia una cara del espécimen. En la Figura 3.5 se muestra el aspecto final del espécimen con el daño severo por aplastamiento. En este caso tampoco hubo colapso súbito y la paulatina falla se pareció a la del MBV-2.



Figura 3.5 Daño en el estado final de la falla del espécimen MBV-3

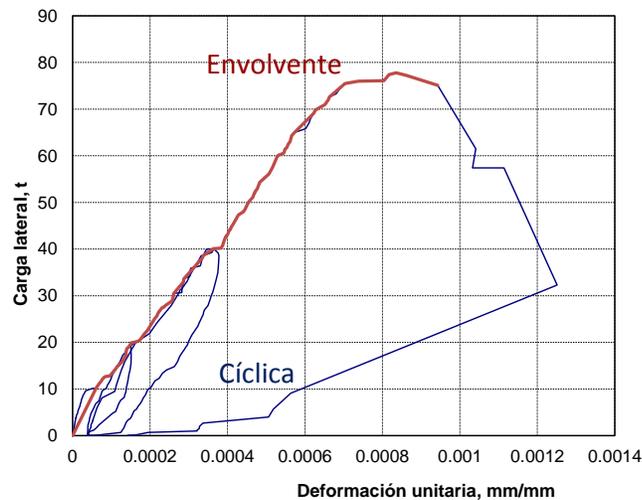


Figura 3.6 Gráfica carga-deformación del espécimen MBV-3

3.2.4 Comparación de los tres especímenes

En la Figura 3.7 se muestra las envolventes de los tres especímenes ensayados. Se identifica que en general tienen un comportamiento aproximadamente lineal hasta cerca de la falla donde inicia un mecanismo de aplastamiento de la mampostería y concreto de relleno. La rigidez vertical (pendiente de

la curva en la parte elástica) crece conforme los modelos tienen más refuerzo vertical y, por supuesto, más celdas rellenas de concreto. Cabe notar que el modelo MBV-1, de mampostería simple, llegó a una deformación mayor antes de colapsarse, en comparación con los otros dos especímenes. Este comportamiento es idéntico al observado en un estudio de muros de mampostería confinada ante carga vertical (que incluía un modelo sin castillos), publicado por Flores y otros (2003) y León y otros (2004).

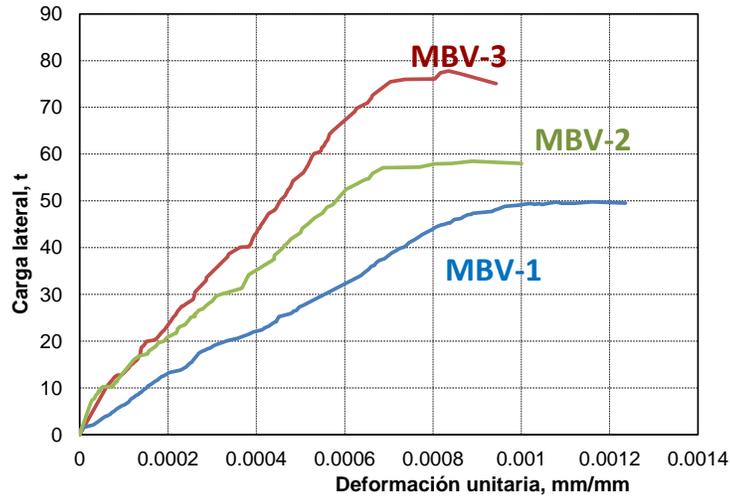


Figura 3.7 Comparativa de las envolventes de los tres especímenes

En la Tabla 3.3 se muestra la comparación de las resistencias teóricas con las experimentales. Cabe recordar que las resistencias nominales se calcularon usando una resistencia de la mampostería de $f_m' nominal = 20 \text{ kg/cm}^2$ siendo que el valor medido en ensayos de las pilas resultó de $f_m' = 23.8 \text{ kg/cm}^2$, es decir casi el mismo valor.

Tabla 3.3 Resistencias nominales y experimentales de los especímenes a compresión pura

No.	Especímen	Armado	Nominal	Corregida	Experimental	$P_{R \text{ exp}} / P_{R \text{ nom}}$
			P_R t	P_R t	P_R t	
1	MBV-1	---	33.6	50	49.8	1.5
2	MBV-2	2#3	39.6	56	58.5	1.5
3	MBV-3	3#5	42.6	75	77.8	1.8

El criterio que se tomó, después del primer ensaye, fue aprovechar la resistencia real del muro de mampostería simple MBV-1 con un valor de 50 t para sumarle la contribución del acero y llegar a predicciones de 56 y 75 t para los modelos MBV-2 y MBV-3, respectivamente, las cuales coincidieron excelentemente con las resistencias obtenidas de 58.5 y 77.8 t, respectivamente. Hay que considerar que se despreció la contribución del concreto de relleno en dichos modelos y aun así la exactitud del cálculo fue notablemente buena.

3.3 ENSAYES DE MUROS CUADRADOS ANTE FUERZAS SÍSMICAS

3.3.1 Especímen MBC

El espécimen MBC fue el único muro confinado con castillos externos para usarlo de comparación; también fue el único que no contó con refuerzo horizontal entre las hiladas. La carga vertical aplicada

correspondió a un esfuerzo de $\sigma=0.3$ MPa (3 kg/cm²). En la Figura 3.8 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).

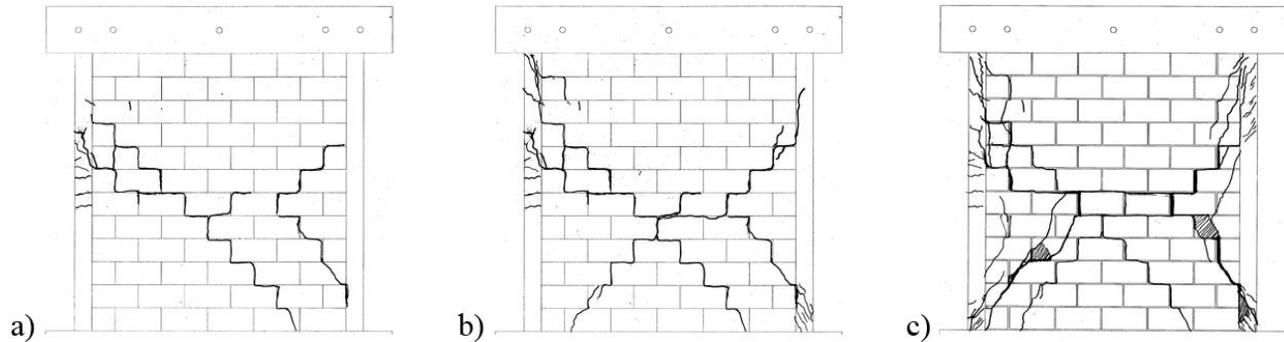


Figura 3.8 Secuencia de daño del espécimen MBC

En la Figura 3.9 se muestra el aspecto del daño final del espécimen, observándose el patrón de agrietamiento diagonal principal con pocas grietas muy abiertas y la penetración de las grietas inclinadas en los extremos de los castillos, en especial dañando la parte baja de los castillos. 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 positivos definidos así cuando el gato hidráulico empujaba hacia el oeste (hacia la derecha en las fotos) resultando de $V_{\text{máx}}^{(+)} = 8.58$ t para una distorsión de $D_{\text{vmáx}} = 0.0019$ mm/mm, y para los ciclos negativos (el cuadrante con carga y distorsión negativa, cuando el gato jala hacia la izquierda) fue de $V_{\text{máx}}^{(-)} = -7.55$ t y $D_{\text{vmin}} = -0.00083$ mm/mm.

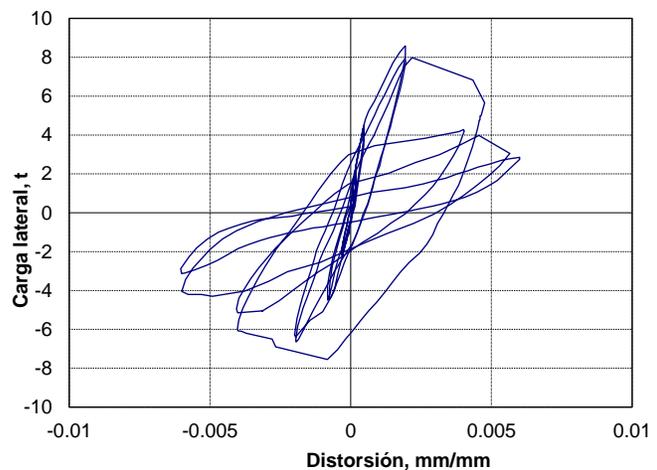


Figura 3.9 Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MBC

3.3.2 Ensaye del espécimen MBRI-1 ($p_h f_{yh} = 0.15 \text{ MPa}$, $\sigma = 0.3 \text{ MPa}$)

Todos los demás especímenes, desde el MBRI-1 hasta el MBRI-6 fueron de mampostería reforzada interiormente (sin castillos) y con distinta cuantía de refuerzo horizontal. El espécimen MBRI-1 contaba solo con las barras del no. 3 (de 3/8 pulg o 0.95 cm de diámetro) en dos celdas consecutivas en los extremos y ningún refuerzo vertical en la zona central del muro. Se reforzó horizontalmente con un solo alambre de 5/32 pulg (0.4 mm de diámetro) cada dos hiladas, lo que da una cuantía resistente de $p_h f_{yh} = 0.15 \text{ MPa}$ (1.55 kg/cm²), que representa la mitad de la cuantía mínima que piden las NTCM (2017). En la Figura 3.10 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).

La resistencia se alcanzó para los ciclos negativos con $V_{m\acute{a}x}^{(-)} = -10.55 \text{ t}$ para una distorsión de -0.00401 mm/mm , y para los ciclos positivos de $V_{m\acute{a}x}^{(+)} = 10.28 \text{ t}$ y 0.00367 mm/mm .

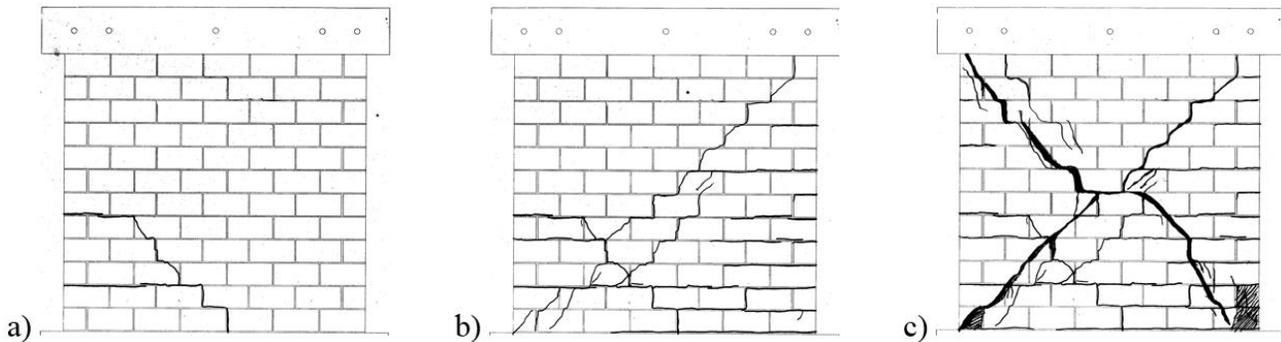


Figura 3.10 Secuencia de daño del espécimen MBRI-1

En la Figura 3.11 se muestra el aspecto del daño final del espécimen y la gráfica de histéresis. Se observa un patrón de agrietamiento donde predominan las dos grietas inclinadas 45° que atraviesan las diagonales del muro cuadrado.

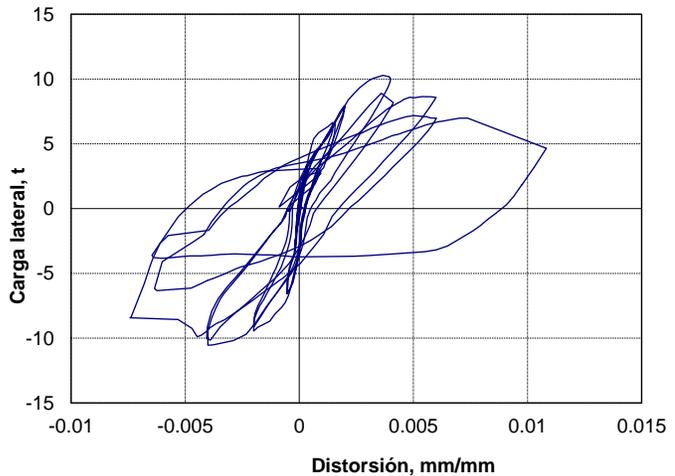


Figura 3.11 Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MBRI-1

3.3.3 Ensaye del espécimen MBRI-2 ($p_h f_{yh} = 0.3 \text{ MPa}$, $\sigma = 0.3 \text{ MPa}$)

El espécimen MBRI-2 fue el modelo “pivote” para comparar con otros especímenes. Contaba con barras verticales del no. 4 (1.27 cm de diámetro) en cada una de dos celdas en los extremos, y dos barras del no. 3 en la parte central. En este y los siguientes especímenes se construyeron las cadenas de desplante arriba de la viga de cimentación para darle anclaje a las barras verticales centrales. El espécimen se reforzó horizontalmente con dos alambres de 5/32 pulg (0.4 cm de diámetro) cada dos hiladas resultando $p_h f_{yh} = 0.3 \text{ MPa}$ (3.1 kg/cm²), lo que representa la cuantía mínima que piden las NTCM (2017). En la Figura 3.12 se muestra la secuencia de agrietamiento del espécimen.

La resistencia se alcanzó para una carga de $V_{máx}^{(+)} = 16.35 \text{ t}$ para una distorsión de 0.00592 mm/mm, y para los ciclos negativos de $V_{máx}^{(-)} = -15.8 \text{ t}$ y -0.00587 mm/mm.

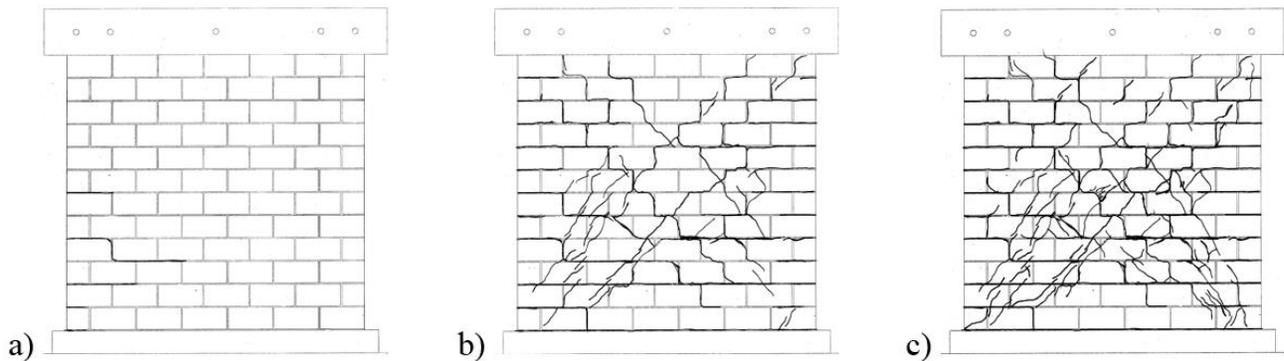


Figura 3.12 Secuencia de daño del espécimen MBRI-2

En la Figura 3.13 se muestra el aspecto del daño final del espécimen y la gráfica de histéresis. Se observa un patrón de agrietamiento más distribuido, donde predominan las dos grietas inclinadas 45° que atraviesan las diagonales del muro.

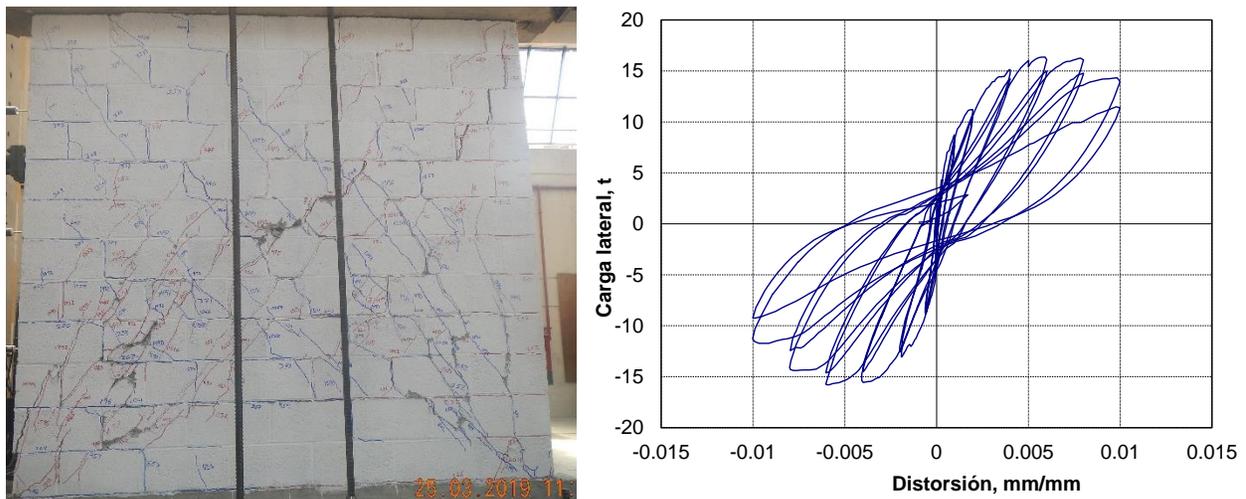


Figura 3.13 Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MBRI-2

3.3.4 Ensaye del espécimen MBRI-3 ($p_h f_{yh} = 0.77 \text{ MPa}$, $\sigma = 0.3 \text{ MPa}$)

El espécimen MBRI-3 se diseñó para contener una cuantía alta de refuerzo horizontal y vertical; la serie para comparar las cuantías de refuerzo fue la de los especímenes MBRI-1, MBRI-2 y MBRI-3. Se armó

con barras verticales del no. 4 en cada una de dos celdas en los extremos, y cuatro barras del no. 3 en la parte central. Se reforzó horizontalmente con dos alambres de ¼ pulg (0.63 cm de diámetro) cada dos hiladas, con esfuerzo de fluencia $f_{yh} = 600$ MPa (6000 kg/cm²) resultando $p_{hfyh} = 0.77$ MPa (7.9 kg/cm²) resultando más del doble de lo que se usó en el espécimen anterior. En la Figura 3.14 se muestra la secuencia de agrietamiento del espécimen.

La resistencia se alcanzó para una carga de $V_{máx}^{(+)} = 18.3$ t para una distorsión de 0.00587 mm/mm, y para los ciclos negativos de $V_{máx}^{(-)} = -17.25$ t y la misma distorsión, pero negativa, de -0.00587 mm/mm.

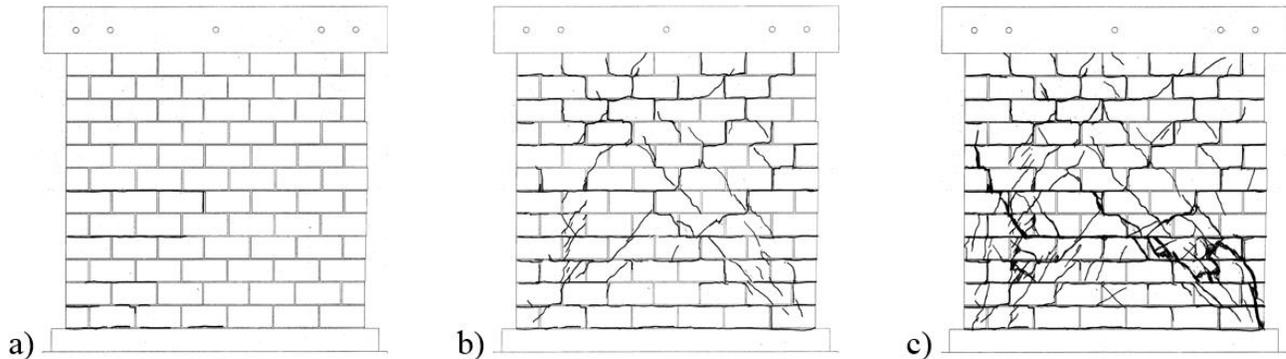


Figura 3.14 Secuencia de daño del espécimen MBRI-3

En la Figura 3.15 se muestra el aspecto del daño final del espécimen y la gráfica de histéresis. En este ensayo el modelo se llevó hasta distorsiones muy elevadas observando un notorio aplastamiento de las piezas en las zonas de grietas para una distorsión de 0.008 mm/mm (es decir 0.8%), hasta llegar a ciclos con gran daño para distorsiones de $\pm 1\%$ aunque con una caída de la resistencia de un 20% en promedio.

Al continuar con el ensayo a una deformación de 1.2% se comenzaron a pandear las barras verticales de los extremos fracturando las piezas y llegando en la repetición de este ciclo a un colapso del espécimen por la carga vertical. En la foto de la Figura 3.15 se observa el modelo poco antes del colapso, con un patrón de agrietamiento y daño severo con la pérdida de las piezas de la esquina inferior oeste (a la derecha).

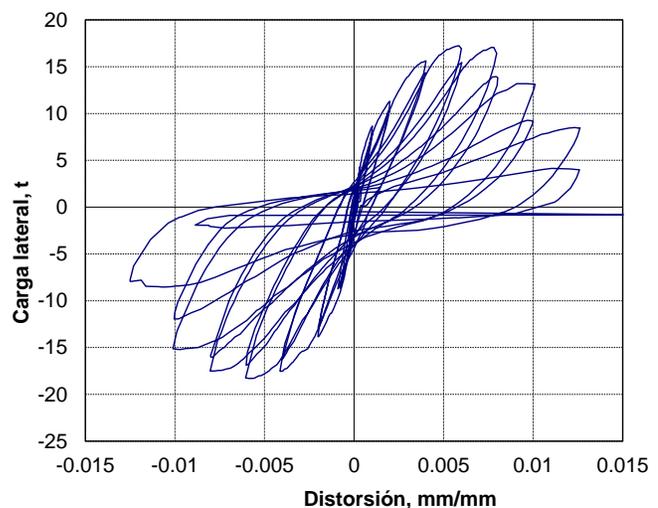


Figura 3.15 Patrón de daño antes del colapso y curva de histéresis del espécimen MBRI-3

3.3.5 Ensaye del espécimen MBRI-4 ($p_h f_{yh} = 0.3 \text{ MPa}$, $\sigma = 0.3 \text{ MPa}$)

El espécimen MBRI-4 se diseñó para comparar con el MBRI-2, siendo idénticos en todas las características menos en la colocación del refuerzo horizontal y su anclaje a los extremos del muro. El armado es con barras verticales del no. 4 en los extremos y dos barras del no. 3 en la parte central, y con dos alambres horizontales de 5/32 pulg (0.4 mm de diámetro) cada dos hiladas, teniendo un $p_h f_{yh} = 0.3 \text{ MPa}$ (3.1 kg/cm²). En la Figura 3.16 se muestra la secuencia de agrietamiento del espécimen.

La resistencia se alcanzó para una carga de $V_{máx}^{(+)} = 15.55 \text{ t}$ para una distorsión de 0.00601 mm/mm, y para los ciclos negativos de $V_{máx}^{(-)} = -14.33 \text{ t}$ y distorsión de -0.00579 mm/mm.

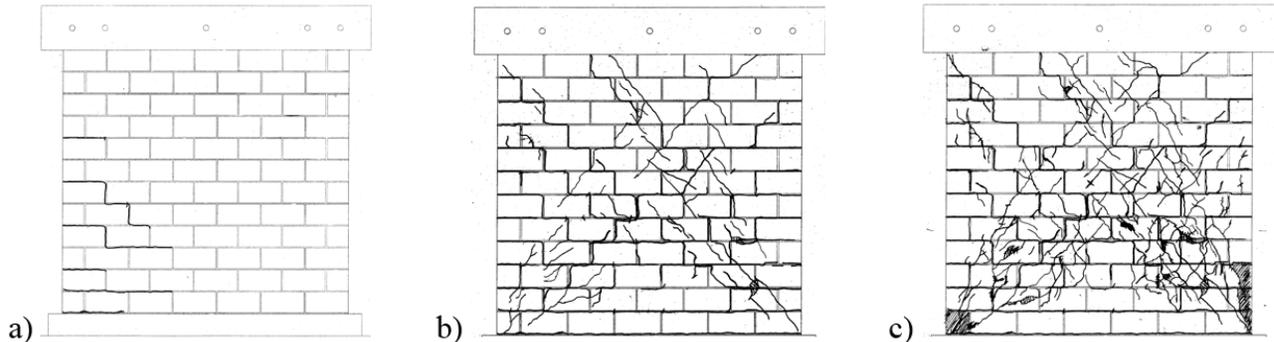


Figura 3.16 Secuencia de daño del espécimen MBRI-4

En la Figura 3.17 se muestra el aspecto del daño final del espécimen y la gráfica de histéresis. Se observa un patrón de agrietamiento similar al del espécimen MBRI-2. En este espécimen las esquinas inferiores, fracturadas y aplastadas, se dislocaron y se salieron de su lugar.

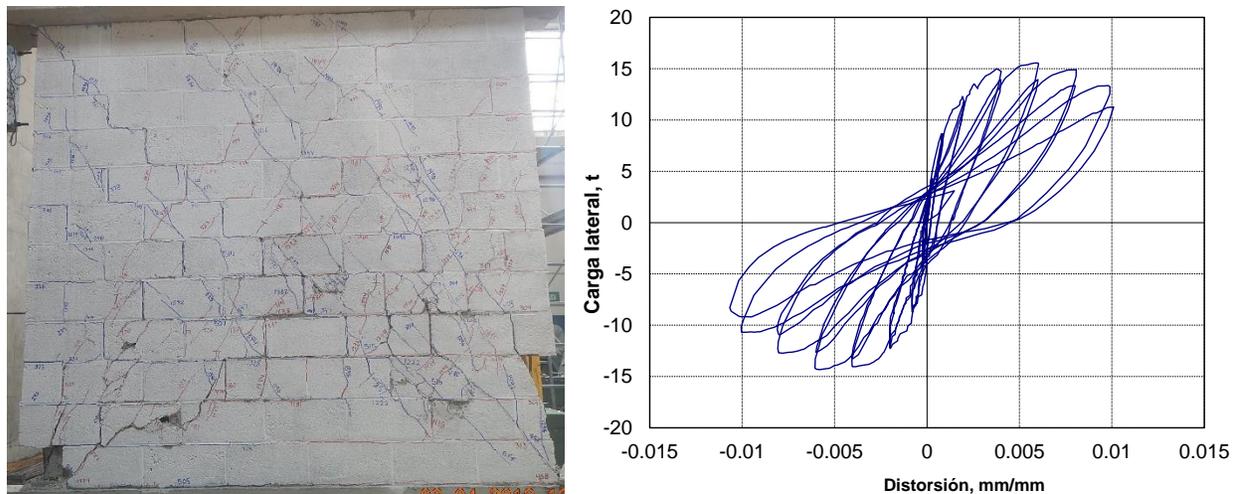


Figura 3.17 Patrón de daño antes del colapso y curva de histéresis del espécimen MBRI-4

3.3.6 Ensaye del espécimen MBRI-5 ($p_h f_{yh} = 0.37 \text{ MPa}$, $\sigma = 0 \text{ MPa}$)

El espécimen MBRI-5 fue parte de una serie de tres muros para comparar el efecto de la carga vertical (MBRI-2, MBRI-5 y MBRI-6), siendo idéntico su refuerzo vertical y muy parecido el refuerzo horizontal, donde se tuvo dos alambres horizontales cada dos hiladas, uno de 5/32 pulg y otro de 3/16 pulg (0.48 mm de

diámetro), con lo cual $p_{hf_{yh}} = 0.37 \text{ MPa}$ (3.8 kg/cm^2). En la Figura 3.18 se muestra la secuencia de agrietamiento del espécimen.

En este caso no se colocó carga vertical, sin embargo, el muro recibió el peso del cabezal de concreto por lo que la carga vertical para fines de cálculos y ajustes de los resultados se tomó como $\sigma = 0.05 \text{ MPa}$ (0.46 kg/cm^2).

La resistencia se alcanzó para una carga en los ciclos negativos de $V_{máx}^{(-)} = -13.4 \text{ t}$ para una distorsión de -0.00421 mm/mm , y para los ciclos positivos de $V_{máx}^{(+)} = 11.83 \text{ t}$ y distorsión de 0.00602 mm/mm .

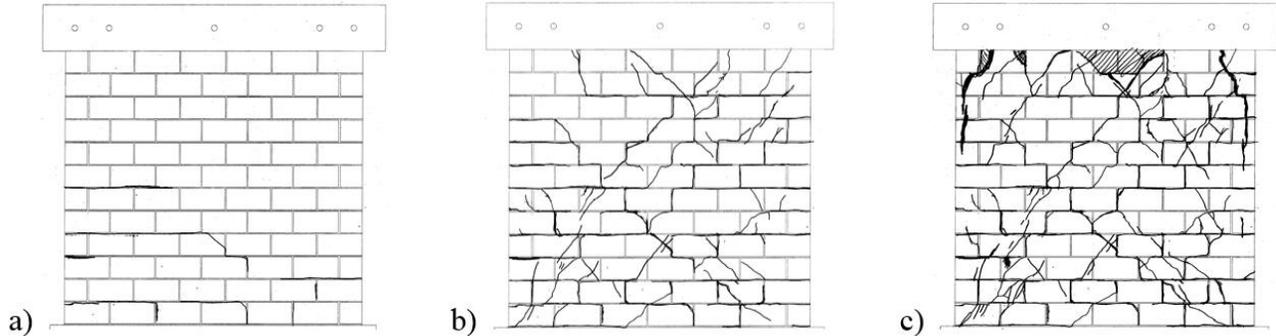


Figura 3.18 Secuencia de daño del espécimen MBRI-5

En la Figura 3.19 se muestra el aspecto del daño final del espécimen y la gráfica de histéresis. Se observa un patrón de agrietamiento similar al del espécimen MBRI-2. En este espécimen se observó un daño considerable en las esquinas superiores del espécimen, así como un aplastamiento de las piezas en contacto con el cabezal, al centro del modelo.

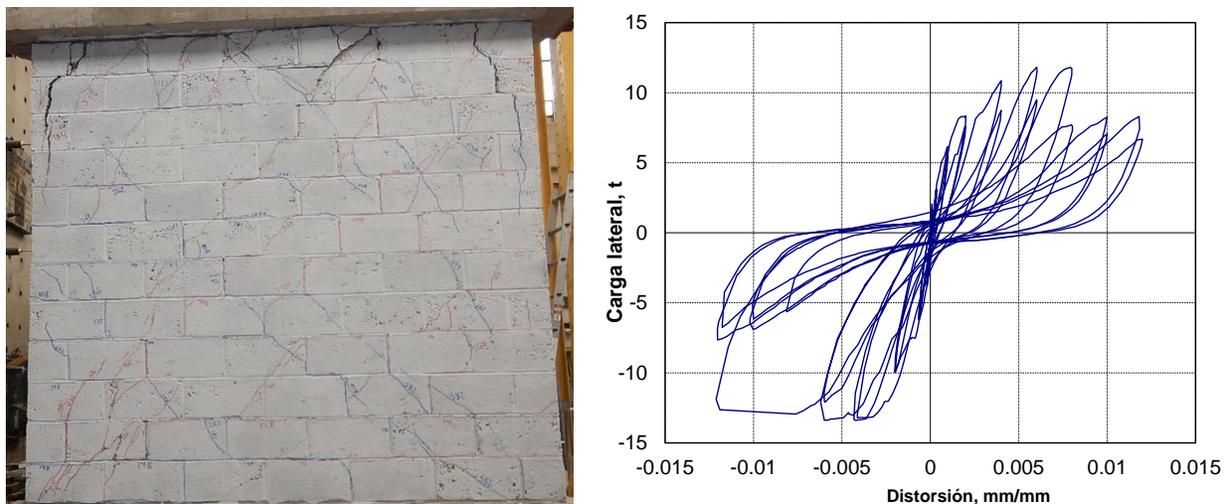


Figura 3.19 Patrón de daño antes del colapso y curva de histéresis del espécimen MBRI-5

3.3.7 Ensaye del espécimen MBRI-6 ($p_{hf_{yh}} = 0.37 \text{ MPa}$, $\sigma = 0.6 \text{ MPa}$)

El espécimen MBRI-6 completó la serie de tres muros para comparar el efecto de la carga vertical y es idéntico al espécimen MBRI-5, con lo cual $p_{hf_{yh}} = 0.37 \text{ MPa}$ (3.8 kg/cm^2), pero a este muro se le aplicó una carga vertical equivalente a un esfuerzo de $\sigma = 0.6 \text{ MPa}$ (6 kg/cm^2). En la Figura 3.20 se muestra la secuencia de agrietamiento del espécimen.

La resistencia se alcanzó para una carga de $V_{m\acute{a}x}^{(+)} = 18.55 \text{ t}$ con una distorsión de 0.00572 mm/mm , y para los ciclos negativos de $V_{m\acute{a}x}^{(-)} = -17.33 \text{ t}$ y distorsión de -0.00597 mm/mm .

En la Figura 3.21 se muestra el aspecto del daño final del espécimen y la gráfica de histéresis. Se observa un patrón de agrietamiento distribuido; sin embargo, cuando se hacía el ciclo a 0.008 mm/mm se dio una falla súbita cayendo la carga de 16 a 12 t mostrando un daño considerable con una grieta diagonal principal de 10 mm de grueso. Después de completar el ciclo negativo se llevaba a la repetición al ciclo positivo pero se decidió detener la prueba por mostrar inicios del pandeo de la barra extrema del lado comprimido (lado oeste).

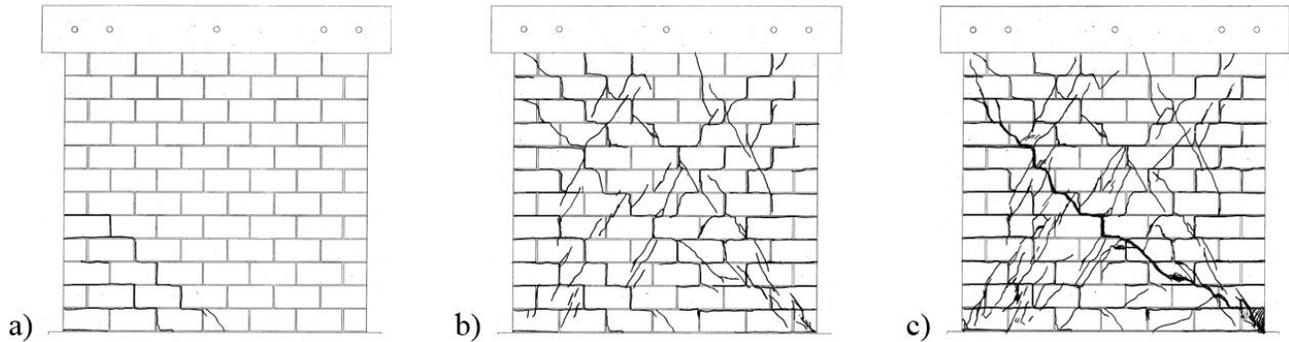


Figura 3.20 Secuencia de daño del espécimen MBRI-6

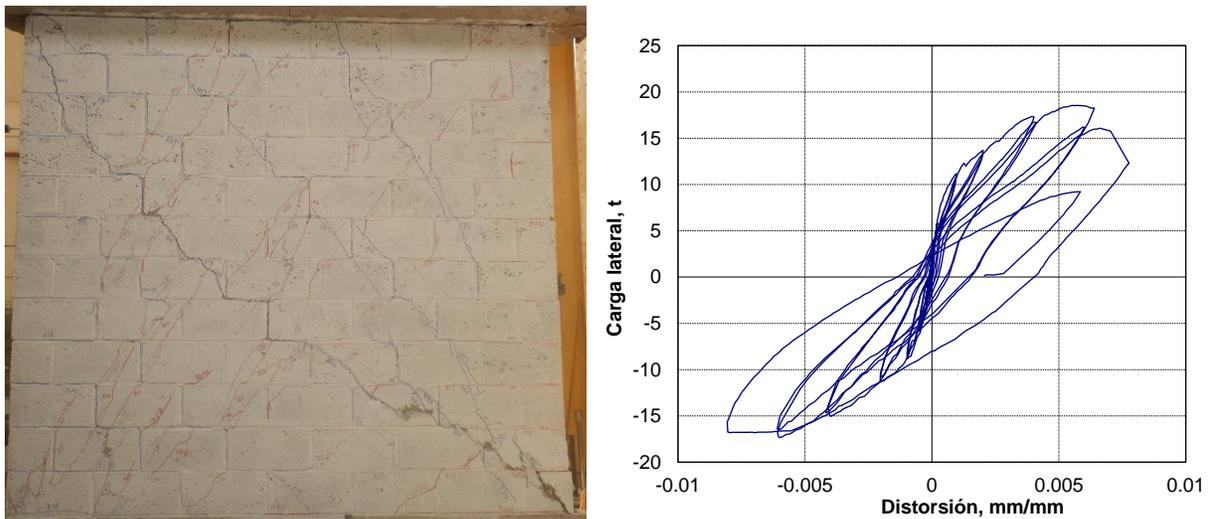


Figura 3.21 Patrón de daño antes del colapso y curva de histéresis del espécimen MBRI-6

3.3.8 Comparación de los seis especímenes

En la Tabla 3.4 se enlistan los datos de los principales resultados de los ensayos realizados

Tabla 3.4 Comparativa de los resultados para los siete especímenes

Especímen	$\frac{V_{agr}}{t} = \frac{V_{mR}}{t}$	$\frac{V_R}{t} = \frac{V_{mR} + V_{sR}}{t}$	$\frac{V_{max}^{(+)}}{t}$	$\frac{V_{max}^{(-)}}{t}$	$\frac{V_{agr}^{(+)}}{t}$	$\frac{V_{agr}^{(-)}}{t}$	$\frac{V_{m\acute{a}x}^{(+)}}{V_R}$	$\frac{V_{m\acute{a}x}^{(-)}}{V_R}$
-----------	--	---	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------

MBRI-1	8.67	8.67	10.28	-10.55	8.38	-8.68	1.19	1.22
MBRI-2	8.67	13.20	16.35	-15.80	11.20	-13.05	1.24	1.20
MBRI-3	8.67	13.34	18.30	-17.25	11.30	-8.70	1.37	1.29
MBRI-4	8.67	13.20	15.55	-14.33	8.68	-8.70	1.18	1.09
MBRI-5	6.17	10.19	11.83	-13.4	8.28	-7.53	1.16	1.31
MBRI-6	11.61	16.75	18.55	-17.33	9.83	-9.60	1.11	1.03
MBC	8.15	8.15	8.58	-7.55	5.23	-4.50	1.05	0.93

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 excepto en el modelo confinado MBC. Por otro lado, en el caso de la resistencia o fuerza cortante máxima se obtuvo un valor real aproximadamente un 10% superior a la predicha, del lado conservador aunque, nuevamente, la predicción para el espécimen MBC dio ligeramente menor en los ciclos negativos.

En la Figura 3.22 se presentan las envolventes de los ciclos positivos de todos los especímenes a fin de poder visualizar la comparación de los dos modelos. Se observa claramente la contribución del refuerzo horizontal al comparar los especímenes con los dos muros MBC que no tenía este refuerzo y el MBRI-1 que tenía una cuantía menor que la mínima. Por su parte el MBRI-5 alcanzó una resistencia media debido a la falta de carga vertical. Los demás especímenes tienen comportamiento muy similar.

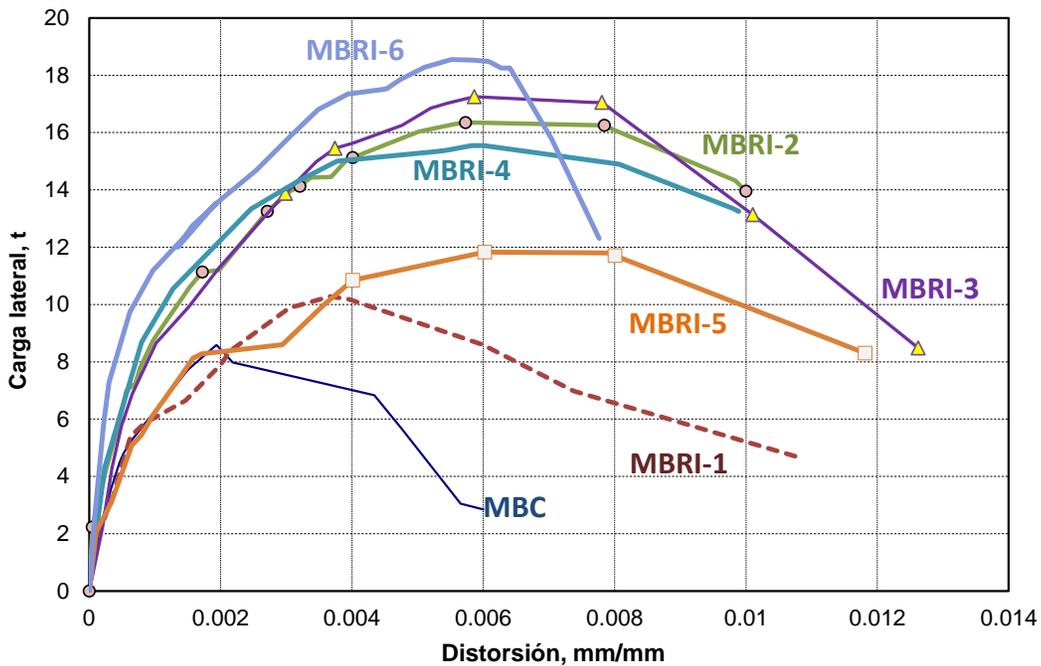


Figura 3.22 Envolventes positivas de los especímenes

Para un desglose por tipo de variable a estudiar se presenta, en la Figura 3.23, la comparación del espécimen MBC de mampostería confinada contra dos especímenes, uno el MBRI-2 que cumple con el refuerzo interior según las NTCM (2017) y, ya que el MBC no tiene refuerzo horizontal, se puede comparar con el MBRI-1 que no tenía acero vertical en la parte media del panel y que contaba con una mínima cantidad de refuerzo horizontal.

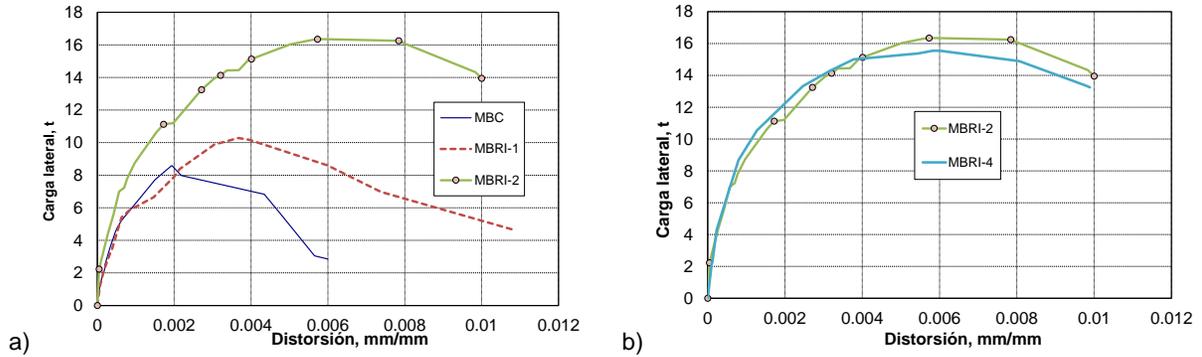


Figura 3.23 Comparación de las envolventes de los especímenes:
a) muro confinado y sim refuerzo horizontal con muro con cuantía menor a la mínima,
b) especímenes MBRI-2 y MBRI-4 que difieren solo en el anclaje del refuerzo horizontal

En la Figura 3.24 se muestra la comparación de las envolventes de dos series compuestas por tres especímenes cada una. En la Figura 3.24a se muestran los muros MBRI-1, MBRI-2 y MBRI-3 que contaban con distinta cuantía de refuerzo horizontal, manteniendo el mismo refuerzo vertical y la misma carga vertical de $\sigma = 0.3 \text{ MPa}$ (3 kg/cm^2). Los productos de las cuantías por el esfuerzo de fluencia fueron: $p_{hf}f_{yh} = 1.55, 3.1$ y 7.9 kg/cm^2 , respectivamente. Se puede observar una marcada diferencia entre el espécimen MBRI-1 que tenía menos de la cuantía mínima que piden las NTCM (que es 3 kg/cm^2) comparado con MBRI-2 que cumple con el refuerzo mínimo; sin embargo, el aumento a más del doble del área de refuerzo horizontal en el espécimen MBRI-3 no tuvo prácticamente ningún efecto en la resistencia ni capacidad de deformación inelástica.

Esta situación se ha identificado en diversos estudios previos sobre la contribución del refuerzo horizontal en muros de mampostería confinada (Alcocer y otros, 1997; Aguilar y Alcocer, 2001; Cruz y otros, 2014) ya que, cuando se sobrepasa un límite de refuerzo, el mecanismo de falla migra de la tensión diagonal y fluencia del refuerzo horizontal al del aplastamiento de las piezas de baja resistencia a la compresión. En efecto, en la sección del cálculo de la resistencia se obtenía un valor máximo de diseño de $p_{hf}f_{yh} = 3 \text{ kg/cm}^2$ sin importar que se tuviera mucho refuerzo, esto debido a que ese producto es superior al límite que marcan las NTCM, 2017 de $0.15 f_n f_m'$.

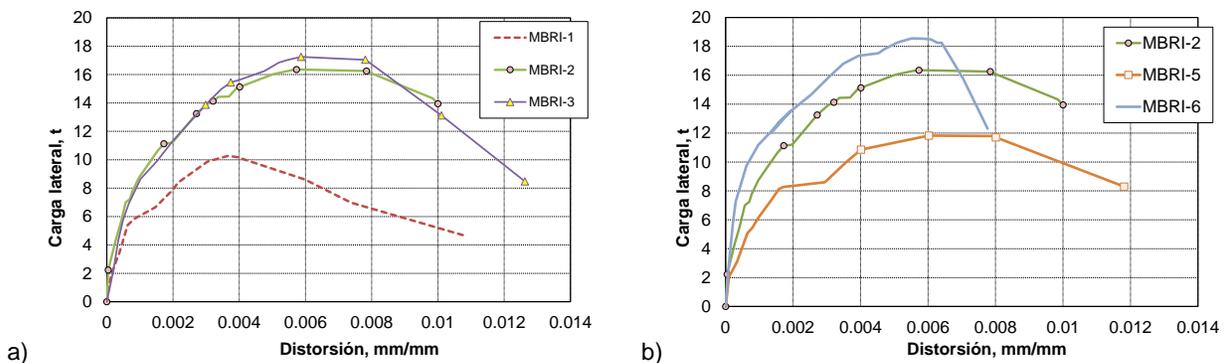


Figura 3.24 Comparación: **a) muros con distinta cuantía de refuerzo horizontal, misma carga vertical**
b) muros con distinta carga vertical, refuerzo horizontal muy similar

Finalmente, en la Figura 3.24b se muestra la comparación de tres especímenes con distinta carga vertical: MBRI-5, MBRI-2 y MBRI-6, con esfuerzos verticales de $\sigma = 0.46, 3$ y 6 kg/cm^2 , respectivamente (carga vertical de $P = 1.44, 9.36$ y 18.72 t). En el cálculo de resistencia se ha reconocido la contribución de la carga vertical P , como se calculó con la ec. 4: $V_{mR} = F_R (0.5v_m' A_T + 0.3P) \cdot f$.

Al comparar las predicciones del cortante resistente V_R , con la resistencia experimental enlistadas en la Tabla 3.4, se observan valores para MBRI-5, MBRI-2 y MBRI-6, de $V_R = 10.2, 13.2$ y 16.8 t y se obtuvieron valores de $V_{m\acute{a}x}^{(+)} = 11.83, 16.35$ y 18.55 t, respectivamente, que están del lado conservador y son relativamente cercanos a los predichos. La relación de la resistencia obtenida a la predicha fue $V_{m\acute{a}x}^{(+)} / V_R = 1.16, 1.24$ y 1.11 , respectivamente.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

4.1 ENSAYES ANTE CARGA VERTICAL

Se ensayaron ante carga vertical tres especímenes de mampostería a tamaño natural de bloque hueco de concreto, uno sin refuerzo (mampostería simple) y los otros dos con poca y mucha cantidad de acero vertical y horizontal. Se comparó la resistencia obtenida con la predicción aplicando las ecuaciones de las normas de mampostería de México (NTCM, 2017). En los cálculos se asumió un factor de resistencia y uno de excentricidad y esbeltez unitarios ($F_R F_E = 1.0$), considerando que el ensayo estaba controlado y con restricciones para deformaciones fuera del plano de los muros.

Se llegó a las siguientes conclusiones.

- El comportamiento presentado respecto a la deformación vertical fue aproximadamente lineal hasta cerca de la falla donde inicia un mecanismo de aplastamiento de la mampostería y concreto de relleno.
- La rigidez vertical (pendiente de la curva en la parte elástica) creció conforme los modelos tienen más refuerzo vertical y celdas rellenas de concreto. Cabe notar que el modelo MBV-1, de mampostería simple, llegó a una deformación mayor antes de colapsarse, en comparación con los otros dos especímenes. Este comportamiento es congruente con el observado en muros de mampostería confinada.
- La resistencia nominal a compresión de la mampostería que se tomó antes de los ensayos fue de 20 kg/cm^2 , que coincidió muy cercanamente con la obtenida en las pilas hechas junto con los especímenes y ensayadas a compresión ($f_m' = 23.8 \text{ kg/cm}^2$); no obstante, la resistencia obtenida en los ensayos de los muros fue del orden del 50% superior a la calculada. En particular se identificó esta diferencia para el modelo de mampostería simple.
- Tomando de base la resistencia del muro de mampostería simple, el cálculo corregido de la resistencia de los muros reforzados coincidió excelentemente al sumar la contribución de las barras de acero verticales prediciéndose valores de 56 y 75 t y obteniéndose 58.5 y 77.8 t para los modelos MBV-2 y MBV-3, respectivamente.
- En los cálculos se despreció la contribución del concreto de relleno en dichos modelos y aun así la exactitud del cálculo fue notablemente buena.

4.2 ENSAYES ANTE FUERZA LATERAL

Se ensayaron ante carga lateral cíclica seis especímenes de muros de mampostería a tamaño natural de bloque hueco de concreto reforzadas interiormente y un muro confinado a modo de comparación. Se varió la cuantía de refuerzo horizontal en la serie de muros reforzados, así como el valor de la carga vertical aplicada externamente al muro. Dos de los muros variaban sólo en la posición de los alambres de refuerzo horizontal y su anclaje en las celdas reforzadas de los extremos del muro. 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 confinado tuvo un comportamiento adecuado conforme a los estudios ampliamente realizados para dicha modalidad de refuerzo, sin embargo, todos los especímenes reforzados interiormente lograron resistencias a carga lateral mucho mayores y capacidad de deformación lateral inelástica que duplicó o triplicó la presentada por el primero. No obstante, estas diferencias entre el

muro confinado y los reforzados interiormente se atribuye al empleo del refuerzo horizontal, mismo que es posible usar también en muros confinados logrando dichos beneficios (Cruz y otros, 2014).

- Por lo explicado anteriormente, al comparar el modelo confinado MBC con cualquiera de los muros reforzados, incluso el MBRI-1 que no cumplía con el refuerzo mínimo, se puede identificar la utilidad de colocar refuerzo interior, y en particular el refuerzo horizontal. Cabe recordar que dicho muro confinado alcanzó solo 8.6 t de resistencia cuando el equivalente con refuerzo interior, MBRI-2, llegó a resistencias del orden de 16 t.
- En cuanto a la diferencia del detallado del acero de refuerzo horizontal de anclar los alambres en la celda reforzada del extremo del muro mediante una desviación de su trayectoria y tener dichos alambres embebidos en mortero sobre las caras laterales de los bloques, la comparación de los especímenes MBRI-2 y MBRI-4 demostró que, para esa cuantía de refuerzo y propiedades de los materiales usados, ambos detalles constructivos dieron exactamente el mismo comportamiento. Esta verificación puede ser útil en zonas del país donde es necesario proteger con el mortero a los alambres de acero para evitar oxidación.
- La comparación de los especímenes MBRI-1, MBRI-2 y MBRI-3, con distinta cuantía de refuerzo horizontal comprueba las conclusiones de estudios previos (por ejemplo Cruz y otros, 2014), en cuanto al beneficio en resistencia y capacidad de deformación del uso del refuerzo horizontal, pero también de que existe una cuantía límite arriba de la cual ya no es útil aumentar el refuerzo horizontal debido a que se migra a otro mecanismo de falla como el debido al aplastamiento de la mampostería con baja resistencia a compresión. Una segunda parte del estudio se está empezando en el CENAPRED donde se ensayará otra serie de muros pero usando bloques de resistencia a compresión mucho mayor que los usados aquí.
- Se obtuvieron resultados del comportamiento de la serie de tres muros variando la carga vertical: MBRI-5, MBRI-2 y MBRI-6, con carga vertical baja, media y alta, respectivamente. El aumento de resistencia con la carga vertical permite corroborar las expresiones de diseño, pero adicionalmente, ahora se tiene información de la reducción de la capacidad de deformación lateral inelástica cuando se aumenta la carga vertical. Cabe señalar que el espécimen con alta carga vertical (MBRI-6) tuvo un mecanismo de falla más frágil que los otros casos.

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 tomó una muestra de cinco piezas del lote con el que se desarrolló el proyecto de las cuales se tomaron sus dimensiones externas, dando un promedio de:

$$11.8 \times 19.5 \times 39 \text{ cm}$$

con un coeficiente de variación de las medidas del orden del 1%. Por lo tanto el espesor promedio de los muros se consideró de 11.8 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.

Tabla A.1 Ensayo a compresión de piezas

Pieza No.	Dimensiones, cm			Área cm ²	Carga, kg	Esfuerzo kg/cm ²
	a	b	c			
1	11.7	39.0	19.7	456.3	19000	41.64
2	11.8	39.0	19.4	460.2	27400	59.54
3	11.9	38.9	19.7	462.9	17000	36.72
4	11.9	39.0	19.3	464.1	32600	70.24
5	11.8	38.9	19.2	459.0	20200	44.01
Promedio	11.8	39.0	19.5			50.4
Coef. variación	0.007	0.001	0.012			0.28

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 (GDF, 2017). 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, pero sin sistema de control de calidad, este valor no debe tomarse menor que 0.3.

El esfuerzo promedio fue $\overline{f_p} = 4.9 \text{ MPa}$ (50.4 kg/cm^2), y dado que el coeficiente de variación fue de $c_p = 0.28$ en la fórmula A.1 se utilizó el valor de 0.3 con lo cual se obtuvo un a resistencia de diseño de

$$f_p' = 2.8 \text{ MPa} \quad (28.8 \text{ kg/cm}^2).$$

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.

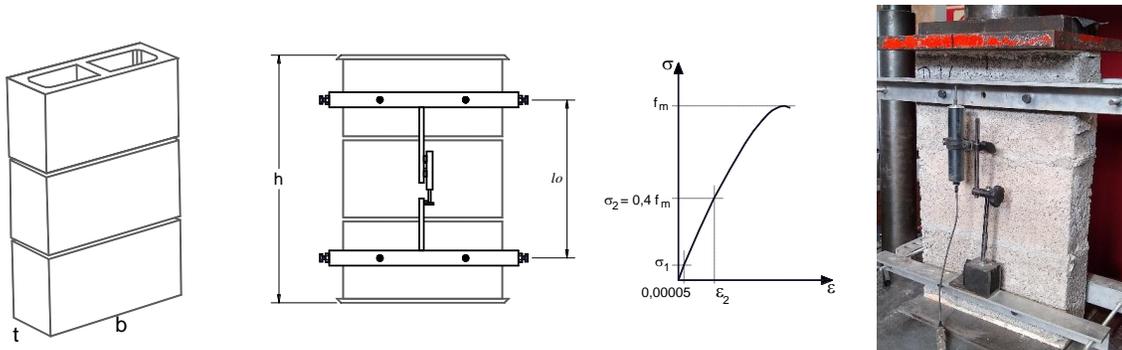


Figura A.1 Esquema y foto del ensaye de pilas a compresión

La elaboración de los muretes y pilas del primer espécimen (MBC) se hizo después de la construcción del mismo, mientras que los grupos de pilas y muretes siguientes se hicieron representando por pareja los especímenes MBRI-2 y MBRI-4 y otro conjunto para MBRI-5 y MBRI-6. No se hicieron probetas específicas para los especímenes MBRI-1 ni MBRI-3. 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 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.2 se presenta el módulo de cada pila y una correlación respecto a la resistencia de dicha pila. La variable ϵ_{fm} es la deformación unitaria registrada en la carga máxima.

Tabla A.2 Resultados de ensayos de pilas a compresión

Pila	Descripción	Dimensiones, cm			Carga kg	f_m kg/cm ²	Promedio	E_m kg/cm ²	E_m/f_m	ϵ_m
		t	b	h						
Pila-1	MBC	12.0	39.0	60.5	12450	26.60	30.45	32627	1226	0.0016
Pila-2		11.9	39.1	60.4	21025	45.19		43254	957	0.0007
Pila-3		11.9	39.0	60.5	9075	19.55		29180	1492	
Pila-4	MBRI-2 y 4	11.8	39.0	60.3	13600	29.55	32.25	25075	848	0.0011
Pila-5		11.9	38.9	60.5	13450	29.06		31193	1074	0.0018
Pila-6		11.8	39.0	60.4	17550	38.14		28520	748	0.0019
Pila-7	MBRI-5 y 6	11.9	39.0	60.4	19450	41.91	35.73	43935	1048	0.0011
Pila-8		12.0	39.1	60.1	11400	24.30		36406	1498	0.0002
Pila-9		12.0	39.1	60.2	19050	40.60		35487	874	0.0015
Pila-10		11.9	39.1	60.0	16800	36.11		36608	1014	0.0014
Pila-14	MBV-1, 2 y 3	11.7	38.9	60.4	16550	36.36	37.54	37521	1032	0.0012
Pila-15		11.9	38.9	60.1	23520	50.81		47367	932	0.0016
Pila-16		11.8	38.8	60.2	11650	25.45		30570	1201	0.0009
Promedios		11.9	39.0	60.2		34.1		34228.5	1078.1	0.0012
Coef. de variación						0.27		0.18		0.40

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.

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

Por lo tanto, la resistencia a compresión de todos los especímenes fue en promedio de 3.3 MPa (34.1 kg/cm²), que, al multiplicar por el factor correctivo por esbeltez $h/t=5.06$ que vale 1.051, y al aplicar la ecuación A.2 resulta una resistencia de diseño de todas las probetas de:

$$f_m' = 2.1 \text{ MPa (21.4 kg/cm}^2\text{)}$$

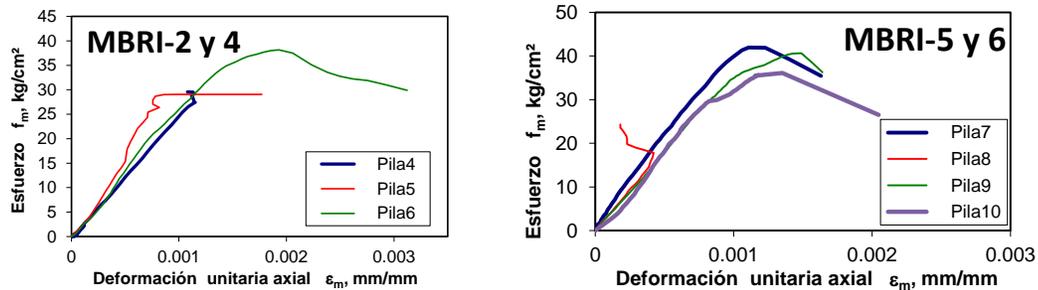


Figura A.2 Gráficas representativas del ensayo de pilas a compresión

Aprovechando las probetas se pesaron las pilas y se obtuvieron valores de peso volumétrico bruto resultando de 109.1 kg/m² de muro aunque hay que considerar que no hay junta de mortero vertical en estos especímenes.

A.3 COMPRESIÓN DIAGONAL EN MURETES

Se construyeron seis muretes de mampostería con las mismas piezas usadas para la construcción de los muros 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 aproximadamente cuadrada con una y media pieza de largo en la base por cinco 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.2.

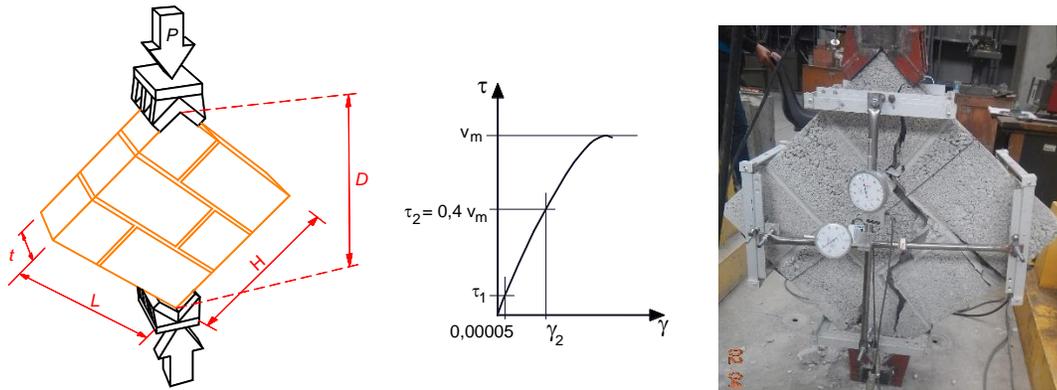


Figura A.3 Esquema y foto de la prueba de murete a compresión diagonal

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 ($v = P/A$, 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, 2017), 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
		l_1	l_2	l_3	l_4	D	t				
Mur-1	MBC	57.5	56.7	58.8	59.3	85.4	12.4	1059.0	4980	4.70	4.71
Mur-2		58.5	60.0	58.7	57.9	85.1	11.9	1012.7	4900	4.84	
Mur-3		58.0	58.0	58.5	57.5	85.7	12.0	1028.4	4720	4.59	
Mur-4	MBRI-2 y 4	57.5	56.0	61.3	59.5	84.2	11.9	1002.0	5330	5.32	4.80
Mur-6		58.3	58.3	59.6	60.0	84.3	11.8	994.7	4250	4.27	
Mur-7	MBRI-5 y 6	60	60	60	60	83.5	11.8	985.3	5030	5.11	5.92
Mur-8		59.0	58.0	61.8	61.0	83.5	11.8	985.3	6530	6.63	
Mur-9		66.5	65.3	62.0	61.0	83.5	12.0	1002.0	4820	4.81	
Mur-10		59.8	59.8	59.3	58.3	83.5	11.8	985.3	7050	7.16	
Promedio										5.27	
Coeficiente de variación										0.19	

El promedio de los ensayos fue de 0.52 MPa (5.27 kg/cnm²) con un coeficiente de variación de 0.19; 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 $v_m' = 0.34$ MPa (3.51 kg/cm²).

Aprovechando las probetas de muretes estas se pesaron y se obtuvieron valores de peso volumétrico bruto resultando de 106.3 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).

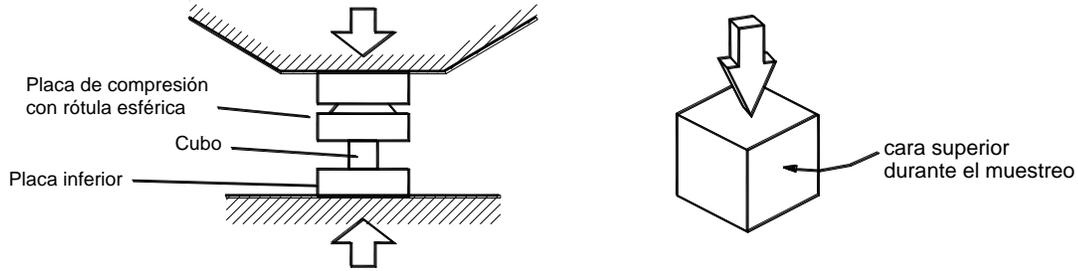


Figura A.4 Ensayo de cubos de mortero

El mortero usado fue elaborado para cumplir con el requisito del mortero tipo I según las NTC Mampostería (CDMX, 2017) 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 Nº	Espécimen	fj kg/cm ²	Promedio kg/cm ²
1	MBC	183.0	192.3
2		204.2	
3		189.5	
4	MBRI-1	137.5	158.2
5		178.9	
6	MBRI-2	95.1	99.9
7		121.7	
9		82.9	
10	MBRI-4	94.8	95.3
11		76.9	
12		114.2	
15	MBRI-3	114.4	135.4
16		156.5	
27	MBRI-5	84.1	129.7
28		143.7	
29		121.7	
30		169.5	
31	MBRI-6	151.5	102.9
32		114.9	
33		93.1	
34		52.2	
Promedio		127.63	130.53
Coeficiente de variación		0.33	

El esfuerzo de compresión promedio fue de 12.5 MPa (127.6 kg/cm²), con un coeficiente de variación de $c_v = 0.33$, por lo que el esfuerzo de diseño resulta de 6.9 MPa (70.2 kg/cm²). 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/cm² sino incluso menor a 75 kg/cm² (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.5 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 mexicana NMX-C-128 (ONNCCE, 2013), aunque los ensayes 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 26 t/min.

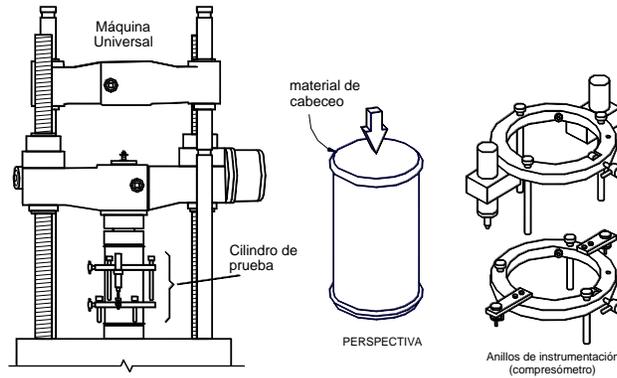


Figura A.5 Ensayo de cilindros de concreto

En la Tabla A.5 se muestra el resumen de los resultados de los ensayes de cilindros de concreto.

Tabla A.5 Resultados de ensayes de cilindros de concreto de castillos del espécimen MBC

Nombre	Descripción	Área cm ²	Peso Vol t/m ³	Carga kg	Esfuerzo f' _c kg/cm ²	E _c kg/cm ²	E _c / √f' _c
Cil-2	Castillos MBC	173.2	1.86	30600	176.7	98521	7412
Cil-3		175.8	1.85	33000	187.7	101749	7426
Cil-4		175.0	1.84	30200	172.6	93698	7132
Promedio			1.85		179.0	97989	7323
Coeficiente de variación			0.007		0.044	0.041	

Las gráficas esfuerzo–deformación unitaria axial de los ensayes se presentan en la Figura A.6.

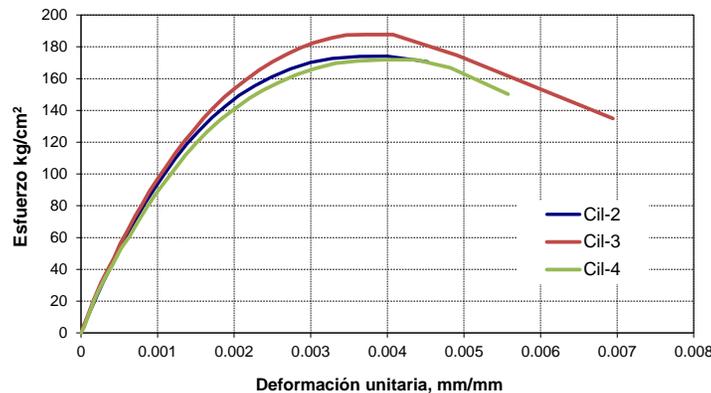


Figura A.6 Gráficas esfuerzo – deformación unitaria de ensayes de cilindros

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 97,989 kg/cm² (ver Tabla A.5).

APÉNDICE B

CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES

B.1 CONSTRUCCIÓN DE LA MAMPOSTERÍA DE LOS MUROS

Las piezas de mampostería se pegaron siempre 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. 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 en el caso del espécimen MBC, se tomaron muestras cilíndricas.

B.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS ENSAYADOS ANTE CARGA VERTICAL

El procedimiento de construcción de los muros cortos, de 140 cm de ancho y 2.6 m de alto, siguió la misma secuencia que la de los muros cuadrados, con el pegado de piezas con mortero tipo I con dosificación 1:¼:3, y el acabado de la junta de mortero mediante llaguero o junteador (Figura B.1). Para la construcción de los especímenes se construyeron sendas bases de concreto de 40×20 cm directamente contra el piso del laboratorio en la zona en que cada muro se ensayaría. Para el espécimen MBV-1, de mampostería simple, la base no tenía barras verticales, mientras que las del espécimen MBV-2 se dejaron ancladas dos barras del no. 3 y para el y MBV-3 tres barras del no. 5.



Figura B.1 Cimentación y construcción del especímenes MBV-1 (sin refuerzo vertical)



Figura B.2 Cimentación y construcción del especímenes MBV-2 (con dos barras del no. 3)



Figura B.3 Especímenes MBV-3 (con tres barras verticales del no. 6)

B.3 CONSTRUCCIÓN DEL ESPÉCIMEN CONFINADO (MBC)

En todos los casos se usaron vigas de cimentación de concreto reforzado de 80×50 cm reutilizables, anclando las barras verticales y la cadena de desplante en huecos de las vigas que se rellenan de concreto.

En las figuras siguientes se ilustran las etapas de construcción de los siete especímenes.

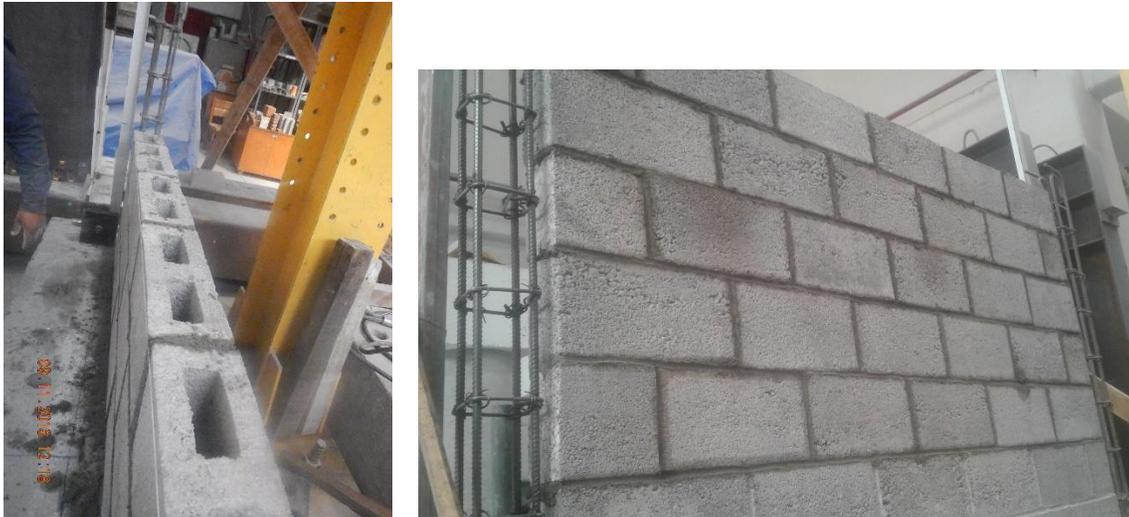


Figura B.4 Construcción del espécimen MBC, confinado con castillos y sin refuerzo horizontal

B.4 CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES CON REFUERZO INTERIOR

Para la construcción de todos los muros cuadrados 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; para esto el albañil usó una varilla como “garrucha” para subirla cada pieza a dicha altura (Figura B.6). Por lo tanto no se flexionaron las barras ni se unieron con traslape quedando las barras completas y rectas.



Figura B.5 Anclaje a la base y construcción de especímenes con refuerzo horizontal

El relleno de las celdas con refuerzo se hizo con concreto fluido elaborado con grava de tamaño máximo de 10 mm. En los primeros especímenes se rellenaron las celdas al llegar los muros a una altura de 120 cm, pero en los siguientes se cambió el procedimiento y se rellenaron cada 40 cm, procediendo al relleno antes de colocar los alambres de refuerzo cada dos hiladas.

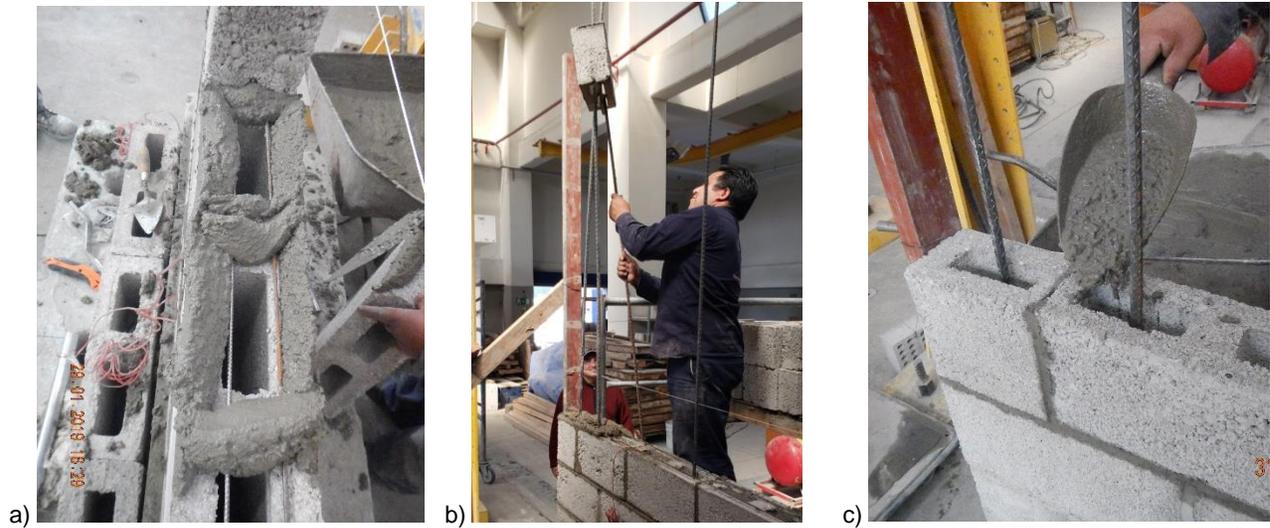


Figura B.6 Construcción de muros: a) mortero de pega, b) ensartado de bloque en barra c) relleno de celdas

Una de las variables estudiadas fue la posición del acero de refuerzo horizontal dentro del muro ya que los estudios que se han realizado del comportamiento de muros con refuerzo horizontal han incluido los alambres en trayectoria recta para poder ser anclados con ganchos verticales a 90° dentro de castillos o celdas reforzadas rellenas de concreto. Las NTCM (2017) 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.

Por estudiar esta diferencia de colocación del refuerzo horizontal se construyó el espécimen MBRI-4 con los alambres sobre las caras de los bloques, embebidos en el mortero de pega (ver Figura 2.7 y Figura B.7b), mientras que los demás especímenes contaron con este acero pasando recto hasta ser anclado en las celdas de los extremos del muro. El modelo de comparación fue el MBRI-2 (Figura B.7a).

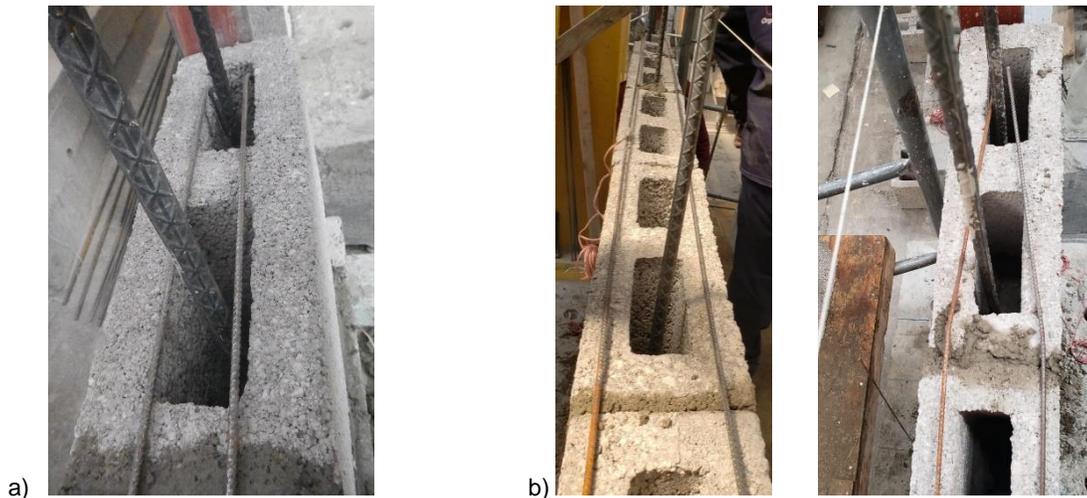


Figura B.7 Detalle de anclaje del refuerzo horizontal: a) Especimen MBRI-2, rectos, b) MBRI-4, desviados

REFERENCIAS

Flores L.E., León I., Reyes C. (2003), “Estudio experimental de muros de mampostería de barro sometidos a compresión pura”, Informe Técnico, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, 137 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.

León I., Flores L.E., Reyes C. (2004), “Estudio experimental de muros de mampostería de barro sometidos a compresión pura”, Memorias XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco Gro., México, 12 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.