



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MÉXICO



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA.

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA  
CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

ENSAYE DE MUROS DE BLOQUE DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA  
CON REFUERZO INTERIOR

TESINA

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
ESPECIALISTA EN ESTRUCTURAS

PRESENTA:  
DANIELA MÁRQUEZ AVILÉS

DIRECTOR DE TESINA: M. en I. LEONARDO FLORES CORONA

Ciudad Universitaria, Ciudad de México. Febrero de 2020.



## AGRADECIMIENTOS

Esta tesis está dedicada a:

A mis padres quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

Agradezco a mis padres María Gabriela Avilés Cruz y Enrique Gustavo Márquez López, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser su hija, son los mejores padres.

A mis hermanos Ana Karen y Ricardo Diego por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias. A toda mi familia porque con sus consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

A mi esposo Daniel Sangrador, a quien amo y agradezco estar a mi lado en todo momento y por darme su amor todo los días, motivándome a cumplir todo lo que me proponga, por ser mi apoyo fundamental e incondicional en los momentos muy difíciles de mi vida profesional y emocional.

Quisiera dar el agradecimiento más profundo a mi director de tesina, M. en I. Leonardo Flores Corona por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su conocimiento, de haberme brindado la oportunidad de poder llevar a cabo este trabajo y haber confiado en el desarrollo de este.



## CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
1.1 MARCO TEÓRICO.....	3
1.2 OBJETIVOS .....	3
<b>CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES</b> .....	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 3 DISEÑO DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>6</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ESPECÍMENES .....	6
3.1.1 Piezas .....	6
3.1.2 Probetas para ensayos de materiales .....	7
3.1.3 Especímenes para ensayos a fuerza horizontal en su plano .....	9
3.1.4 Propiedades nominales de los materiales .....	10
3.2 PREDICCIÓN DE RESISTENCIA Y RIGIDEZ .....	11
3.2.1 Resistencia a flexocompresión.....	11
3.2.2 Resistencia a cortante.....	12
3.2.3 Resistencia esperada en cada espécimen .....	14
3.2.4 Rigidez de los muros.....	14
3.3 INSTRUMENTACIÓN .....	15
3.4 APLICACIÓN DE CARGAS .....	16
3.4.1 Marco de carga para ensayos ante fuerza lateral .....	16
3.4.2 Historia de carga .....	17
<b>CAPÍTULO 4 CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES</b> .....	<b>19</b>
4.1 CONSTRUCCIÓN DE ESPECÍMENES .....	19
<b>CAPÍTULO 5 RESULTADOS GENERALES DE LOS ENSAYES</b> .....	<b>25</b>
5.1 COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS MATERIALES .....	25
5.1.1 Piezas de mampostería doble hueco del espécimen MBRI-2.....	26
5.1.2 Piezas de mampostería doble hueco del espécimen MBRI-8.....	26
5.1.3 Mitades de bloques de mampostería del espécimen MBRI-8 .....	27
5.2 ENSAYE DEL ESPÉCIMEN MBRI-2.....	28
5.3 ENSAYE DEL ESPÉCIMEN MBRI-8.....	30
5.4 COMPARACIÓN DE LOS ESPECÍMENES .....	31
<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES</b> .....	<b>35</b>
<b>APÉNDICE A RESULTADOS DE ENSAYES DE MATERIALES</b> .....	<b>37</b>
A.1 COMPRESIÓN EN PILAS DE MAMPOSTERÍA .....	37
A.2 COMPRESIÓN DIAGONAL EN MURETES.....	39
A.3 COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO.....	40
A.4 COMPRESIÓN EN CILINDROS DE CONCRETO DE RELLENO .....	42
A.5 TENSIÓN EN BARRAS DE ACERO DE REFUERZO .....	44
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>48</b>



# **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

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

Sin embargo, en los últimos años no se ha incluido el estudio de muros de bloque con refuerzo horizontal entre las hiladas. Por lo tanto en el CENAPRED se ha propuesto un estudio para revisar la influencia en el comportamiento de muros de las principales variables de refuerzo para el caso de muros de bloque de concreto, mampostería con refuerzo interior. El proyecto se estudió el comportamiento de muros de mampostería de piezas de concreto de resistencia superior a la convencional.

## **1.1 MARCO TEÓRICO**

La importancia de estas investigaciones son sus aplicaciones en el diseño estructural y los procesos constructivos de la mampostería. Esto llevó a la normalización de las construcciones en mampostería en México.

En el análisis estructural se estudian diversas causas que pueden afectar una edificación, como son el peso propio, el peso temporal y acciones accidentales, que se valúan como cargas. Los efectos a los que estará sometida una edificación son los desplazamientos y esfuerzos internos en los materiales que la conforman. Para llevar a cabo el análisis es necesario estimar las propiedades mecánicas de los materiales con los que se piensa se construirá la obra y así con todas estas disposiciones se podrá justificar la seguridad de la edificación.

## **1.2 OBJETIVOS**

- Verificar experimentalmente la resistencia ante carga horizontal cíclica reversible de muros de mampostería de bloque de concreto con distintas cuantías de refuerzo horizontal.
- Comparar los resultados de resistencia con la predicción teórica según las normas de diseño de mampostería del 2017 del reglamento de construcciones de la Ciudad de México.
- Evaluar la rigidez inicial y la degradación de rigidez con el daño en los especímenes.



## **CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES**

La mampostería es uno de los materiales de construcción con mayor diversidad de usos, es el más antiguo que se mantiene generalizado alrededor del mundo en la actualidad. Este material ha sido el más importante hasta el advenimiento del concreto reforzado y el acero estructural. En la actualidad esta se define como el conjunto de piezas de origen pétreo, naturales o artificiales, unidas entre sí por mortero aglutinante o cementante.

Los componentes utilizados a través del tiempo como sus elementos constructivos, han sido desde piedra simple, bloques de mármol, hasta piezas industrializadas de arcilla y de concreto. En el desarrollo de la mampostería existe el uso del mortero de arcilla y agua lo cual permitió asentarse con mayor facilidad y mayor altura las piedras irregulares. Durante los años se fue modificando las piezas de mampostería, el hombre optaba por piezas de mampostería creada a partir de masa de lodo secado en el sol cuando no era posible encontrar piedra natural.

La mampostería como sistema constructivo da muchas soluciones estructurales y no estructurales, debido a que sus materiales poseen características que se deben conocer antes de ser utilizados; los cuatro principales materiales usados en la mampostería estructural son:

1. Piezas de mampostería
2. Morteros
3. Concreto de relleno
4. Acero de refuerzo

La importancia que tiene estos materiales, es debido a que juntos forman un sistema homogéneo.

1. Las piezas de mampostería son bloques o ladrillos de concreto o arcilla, recocidos y extruidos, macizas o huecas; se excluyen las piezas naturales y artificiales como son piedras y canteras.
2. Morteros, son materiales empleados para unir y rellenar las piezas, las cuales crean una junta de adhesión y dan soporte al muro.
3. Concreto de relleno, mezcla de cemento Portland, arena, gravilla y agua con una fluidez adecuada que permita un relleno adecuado de las cavidades de las piezas.
4. Acero de refuerzo, este es diferente al utilizado en estructuras de concreto por el hecho de utilizarse varillas estiradas en frío de alta resistencia con diámetros pequeños como 4 mm.

Las modalidades de la mampostería;

- a) Muro estructural: Son aquellos de los que dependen otros elementos de la estructura, soportan todo tipo de solicitaciones, verticales y horizontales tanto contenidas en su plano como perpendiculares a él.
- b) Muro no estructural: Es aquellos que solo depende, del mismo muro, no soporta ningún elemento más, no soportan cargas verticales, tales como pretilas, bardas, celosías, divisorios, desligados.
- c) Muro diafragma: Se colocan en los vanos de estructuras esqueléticas, de marcos de concreto reforzado o de acero estructural, con el objetivo de resistir fuerzas horizontales e incrementar su rigidez lateral.



## CAPÍTULO 3 DISEÑO DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ESPECÍMENES

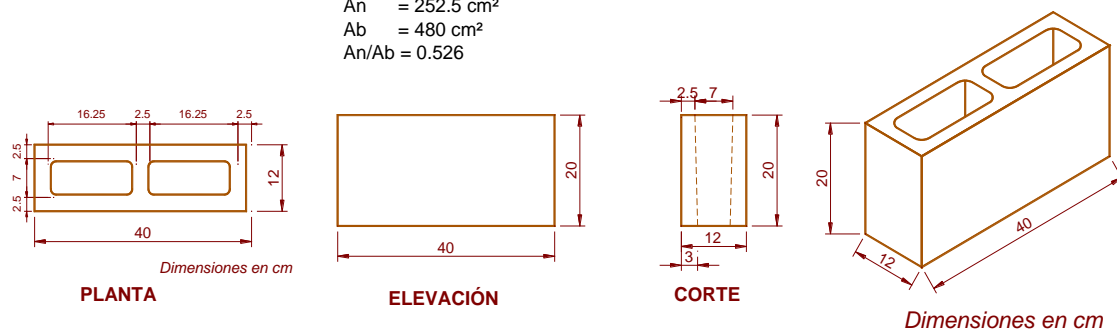
Para este estudio se usaron bloques de concreto tipo doble hueco.

#### 3.1.1 Piezas

En la Figura 3.1 de muestra la geometría de las piezas básicas.

Pieza doble hueco

$$\begin{aligned} A_{\text{hueco}} &= 113.75 \text{ cm}^2 \\ A_n &= 252.5 \text{ cm}^2 \\ A_b &= 480 \text{ cm}^2 \\ A_n/A_b &= 0.526 \end{aligned}$$



**Figura 3.1** Piezas de concreto vibrocomprimido doble hueco

El ancho de la pieza, y por lo tanto del muro, es  $t = 12$  cm.

### 3.1.2 Probetas para ensayos de materiales

#### 3.1.2.1 Resistencia a compresión de piezas

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

#### 3.1.2.2 Resistencia a compresión de la mampostería

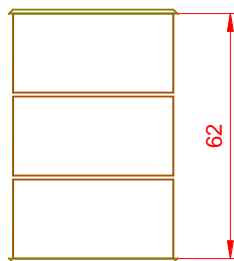
Para obtener la resistencia de diseño de los muros fue necesario realizar ensayos de probetas construidas con piezas unidas por la junta de mortero horizontal. Estas probetas se denominan pilas y están descritas en la norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE. Se construyeron pilas de tres piezas enteras sobrepuestas, con el mismo mortero con que se construyeron los muros.

La cantidad de probetas a ensayar se muestra en la Tabla 3.1 y la geometría de las probetas se muestra en la Figura 3.2.

**Tabla 3.1 Número y características de las piezas ensayadas a compresión**

No.	Descripción	Número de probetas
1	Pila	3 por muro
2	Murete	3 por muro

3x1 = 3 piezas



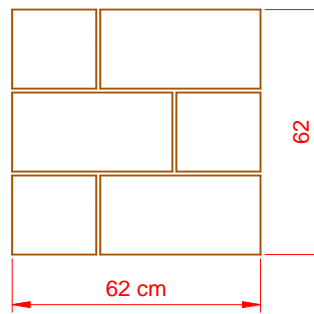
Dimensiones en cm

a) Pila

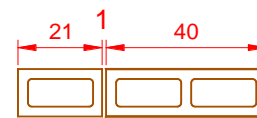


6 piezas

(corte especial de las mitades)



b) Murete



PLANTA



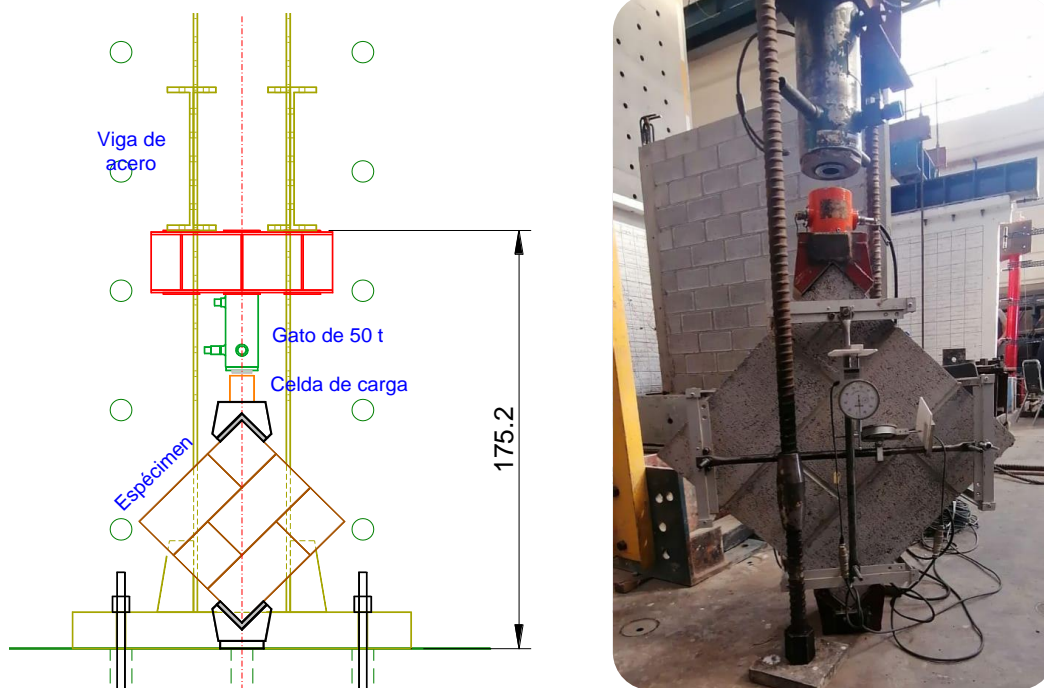
**Figura 3.2 Probetas para ensaye a compresión y compresión diagonal de mampostería**

### 3.1.2.3 Ensaye a compresión diagonal

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

Siguiendo los requerimientos de las normas de mampostería del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2017), así como la norma mexicana de ensaye de muretes y pilas NMX-C-464-ONNCCE el tamaño mínimo del murete fue de una y media piezas en la base y el número de hiladas necesario para que sea cuadrado. Conviene probar los muretes más pequeños posibles de forma de tener un tamaño manejable (60×60 cm).

Normalmente, para tabiques u otras piezas de tamaño reducido (por ejemplo de 40×40 cm) se realiza el ensaye en máquinas de pruebas o máquinas universales; sin embargo, el murete de 60 cm de lado no cabe en la máquina del CENAPRED por lo que fue necesario montar un marco de carga especial. En la Figura 3.3 se muestra el arreglo de carga para ensayar a compresión diagonal un murete en un marco de carga.



**Figura 3.3 Dimensiones de los muretes a compresión diagonal**

Se hicieron tres probetas de 60 cm por muro. Por lo tanto el número de especímenes se muestra en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Número y características de especímenes ensayados a compresión diagonal**

No.	Especímen	Número de probetas
1	MBRI-2	3
2	MBRI-8	3
Total		6

### 3.1.3 Especímenes para ensayos a fuerza horizontal en su plano

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

#### 3.1.3.1 Variables de estudio

Las variables a estudiar se identifican como las siguientes:

- Resistencia de las piezas: en esta etapa se usaron piezas doble hueco de alta resistencia a compresión.
- Mortero de pega: se estudió mortero tipo I hecho en obra.
- Concreto de relleno: se hizo un concreto de  $150 \text{ kg/cm}^2$  con grava de TMA=10 mm.
- Relación de aspecto: se estudiaron solo muros cuadrados ( $H/L = 1$ ).
- Tipo de ensaye: muros de carga ante fuerza horizontal cíclica reversible cuasi-estática.
- Refuerzo vertical.
  - Se usó un arreglo de barras verticales constante para este espécimen. Las barras verticales se colocaron cada 60 cm lo que implica reforzar y rellenar uno de cada dos huecos.
- Refuerzo horizontal.
  - Se usaron varias cuantías de refuerzo horizontal usando la mínima, una intermedia, una máxima y una mayor a la máxima.

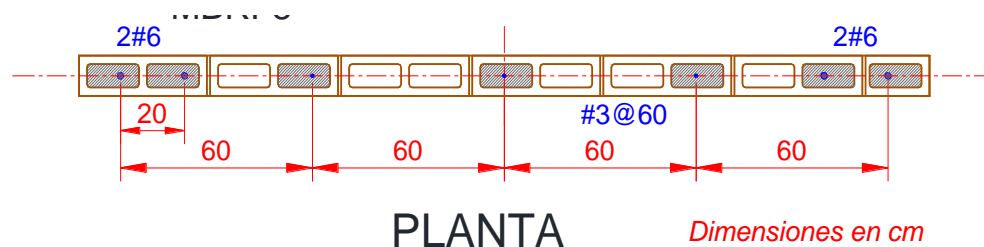
#### 3.1.3.2 Geometría y refuerzo

Considerando las anteriores variables se construyeron seis muros de bloque hueco con refuerzo interior. En este trabajo se presenta solo el espécimen MBRI-8 y su comparación con otro ensaye de piezas de baja resistencia ensayado en el 2019 (MBRI-2). Los muros se muestran en la Tabla 3.3, los de refuerzo interior de  $260 \times 252 \text{ cm}$  y  $266 \times 252 \text{ cm}$ :

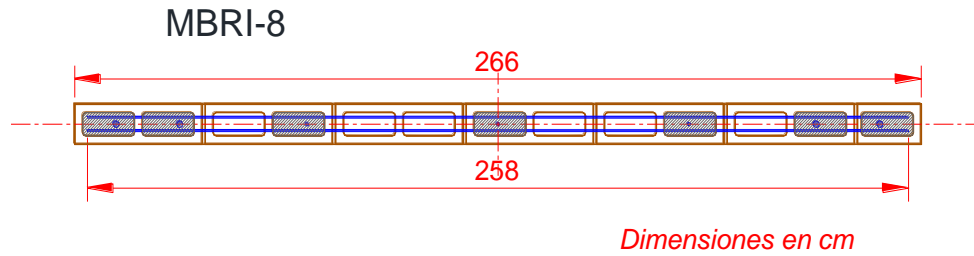
**Tabla 3.3 Número y características de especímenes ensayados a carga lateral cíclica**

No.	Nombre	Piezas	Refuerzo en extremos	Refuerzo vertical	Refuerzo horizontal	$p_h \times f_{yh}$ $\text{kg/cm}^2$	Esf vertical $\text{kg/cm}^2$	Mortero
1	MBRI-2	huecas	2#4	2#3	2(5/32) @40	3.1	3	tipo I
2	MBRI-8	huecas	2#6	3#3	2(5/32) @40	3.1	3	tipo I

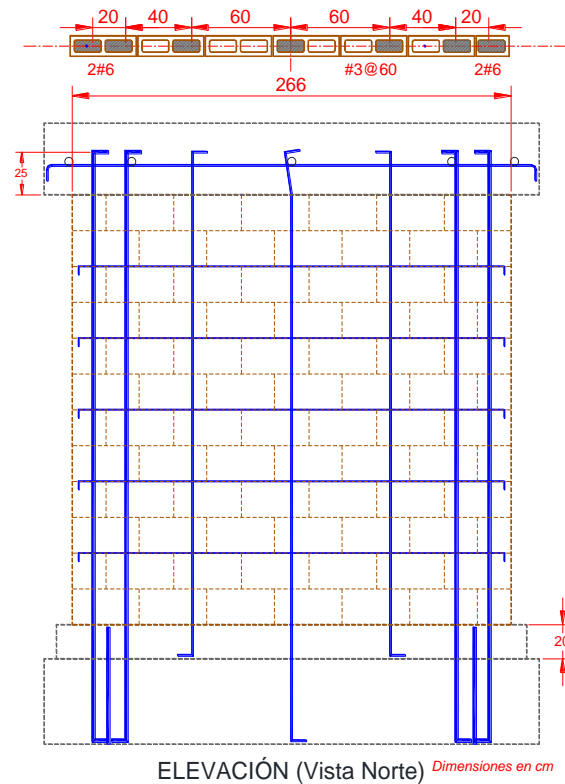
Los muros se desplantaron sobre vigas de cimentación de concreto reforzado de  $80 \times 50 \text{ cm}$  y se les conectará en su parte superior una viga o cabezal de  $45 \times 40 \text{ cm}$ . Se muestra la geometría de los muros, mientras que y el armado se muestra en la Figura 3.4.



**Figura 3.4 Sección transversal y armado vertical de los especímenes**



**Figura 3.5 Refuerzo horizontal mediante alambres de acero estirado en frío**



**Figura 3.6 Espécimen MBRI-8**

### 3.1.4 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 | $f_c' = 300 \text{ kg/cm}^2$    |
| * Piezas concreto doble hueco         | $f_p' = 90 \text{ kg/cm}^2$     |
|                                       | $f_m' = 70 \text{ kg/cm}^2$     |
|                                       | $v_m' = 4 \text{ kg/cm}^2$      |
| * Concreto de relleno                 | $f_c' = 180 \text{ kg/cm}^2$    |
| * Acero vertical                      | $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$    |
| * Acero horizontal                    | $f_{yh} = 6000 \text{ kg/cm}^2$ |

### 3.2 PREDICCIÓN DE RESISTENCIA Y RIGIDEZ

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.

#### 3.2.1 Resistencia a flexocompresión

##### 3.2.1.1 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:

$$P_R = F_R F_E (f_m' A_T + \Sigma A_s f_y) \leq P_{R,m\acute{a}x} \quad (1)$$

en muros con refuerzo interior:  $P_{R,m\acute{a}x} = 1.25 F_R F_E f_m' A_T \quad (2)$

donde

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

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

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

$\Sigma A_s$  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.

##### 3.2.1.2 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:

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

donde

$F_R$  factor de resistencia, se tomará igual a 1.0 para la predicción en estos ensayes (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 3.4. 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 3.4 Resistencias nominales a flexo-compresión con cálculo simplificado**

No.	Especimen	Armado	$A_s$ cm <sup>2</sup>	d cm	P t	$P_R$ t	$M_0$ t-m	$M_{R, \text{simple}}$ t-m	$V_{MR, \text{simple}}$ t
1	MBRI-2	2#4	2.54	240	9.36	54.6	23.5	30.2	11.62
2	MBRI-8	2#6	5.7	246	9.58	195.5	54.1	61.2	23.5

### 3.2.2 Resistencia a cortante

#### 3.2.2.1 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:

$$V_{mR} = F_R (0.5v_m' A_T + 0.3P) \cdot f \leq 1.5F_R v_m' A_T \cdot f \quad (4)$$

Donde

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

$v_m'$  resistencia a compresión diagonal de la mampostería;

$A_T$  área transversal del muro;

$P$  carga axial sobre el muro;

$f$  factor que toma en cuenta la relación de aspecto, para muros cuadrados  $f = 1$ .

Se supuso una resistencia nominal a cortante de  $v_m' = 0.4$  MPa (4 kg/cm<sup>2</sup>), para bloques huecos de concreto tipo pesado.

Con esto las áreas transversales y cargas axiales serán:

$$A_T = L \cdot t = 12 \times 260 = 3120 \text{ cm}^2; \sigma = 3 \text{ kg/cm}^2,$$

$$P = \sigma \cdot A_T = 9.36t, \text{ para muros con refuerzo interior (MBRI-2)}$$

$$A_T = L \cdot t = 12 \times 266 = 3192 \text{ cm}^2; \sigma = 3 \text{ kg/cm}^2,$$

$$P = \sigma \cdot A_T = 9.58 t, \text{ para muros con refuerzo interior (MBRI-8),}$$

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:

$$V_{sR} = F_R \eta p_h f_{yh} A_T \quad (5)$$

$$p_h = \frac{A_{sh}}{s_h \cdot t} \quad (6)$$

Donde

$p_h$  cuantía de acero horizontal;

$s_h$  separación de alambres horizontales;

$A_{sh}$  área de acero en cada junta reforzada;

$\eta$  eficiencia del refuerzo;

$$\eta = \frac{V_{mR}}{F_R \rho_h f_{yh} A_T} (k_0 k_1 - 1) + \eta_s \quad (7)$$

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

$$k_1 = 1 - \alpha \rho_h f_{yh} \quad (8)$$

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

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

$f_{an}$  cociente del área neta y el área bruta de las piezas para muros confinados. En el caso de los muros de piezas multiperforadas  $f_{an} = 0.625$ .

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

El cálculo práctico de dicho factor es:

$$f_{nm} = A_{nT} / A_T, \quad A_{nT} = A_T - n_h A_{hueco} \quad (9)$$

$A_{nT}$  es el área neta total definida aquí como el área transversal  $A_T = t \cdot L$  menos el área de los huecos no rellenos ( $n_h$  = número de dichos huecos). Para estas piezas un solo hueco tiene un área promedio de  $A_{hueco} = 113.8$  cm<sup>2</sup>. Para el muro MBRI-8 se tienen seis huecos por lo que  $f_{nm} = (3192 - 6 \times 113.8) / 3192 = 0.786$ .

Se colocó dos alambres cada dos hiladas ( $s_h = 42$  cm). La separación máxima permitida del refuerzo horizontal es de seis hiladas o 45 cm, por lo que se cumple.

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

### 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:

$$V_R = V_{mR} + V_{sR} \quad (10)$$

En la Tabla 3.5 se muestran los resultados del cálculo de la resistencia a cortante.

**Tabla 3.5 Resistencias nominales cortante de los especímenes**

No.	Espécimen	Refuerzo horizontal	$\rho_h$	$\rho_h \times f_{yh}$ kg/cm <sup>2</sup>	diseño $\rho_h \cdot f_{yh}$ kg/cm <sup>2</sup>	$\eta$	$P$ t	$V_{mR}$ t	$V_{sR}$ t	$V_R$ t
1	MBRI-2	2(5/32)@40	0.00052	3.1	3.0	0.484	9.36	8.67	4.53	13.20
2	MBRI-8	2(5/32)@42	0.00052	3.1	3.1	0.741	9.58	9.6	7.1	16.7

### 3.2.2.2 Resistencia a cortante por fricción

Se puede calcular con los criterios de la sección 2.5.10 de las NTCC (GDF, 2017). La resistencia  $V_R$  será la menor de:

$$\begin{aligned} & F_R \mu (A_{vf} f_y + N_u) \\ & F_R [ 14A + 0.8(A_{vf} f_y + N_u) ] \\ & F_R 0.25 f_c' A \end{aligned} \quad (11)$$



Donde

$A_{vf}$  área de refuerzo por cortante por fricción. En este caso será la de las barras que cruzan la sección crítica;

$A$  área de concreto del plano crítico; para muros de mampostería se recomienda usar el área completa del muro ( $A = tL$ ) y  $f_m'$  en vez de  $f_c'$  siempre y cuando  $s_v$  cumpla con el máximo;

$N_u$  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.

El resumen en términos de fuerza cortante se presenta en la Tabla 3.6.

### 3.2.3 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 3.6 se enlistan las resistencias y se anota como  $V_{min}$  la que predominará.

**Tabla 3.6 Resistencias teóricas ante la fuerza horizontal**

No.	Espécimen	$\frac{V_{R,fricc}}{t}$	$\frac{V_R}{t}$	$\frac{V_{Mp}}{t}$	$\frac{V_{min}}{t}$	Modo de falla
1	MBRI-2	15.6	13.20	14.6	13.20	Cortante
2	MBRI-8	54.6	16.8	23.5	16.6	cortante

### 3.2.4 Rigidez de los muros

Definimos la rigidez de entrepiso como el cociente de la fuerza entre el desplazamiento que produce:

$$Rig = V / \delta_h \quad (12)$$

La deformación teórica,  $\delta_h$ , 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,  $\delta_h$ , se calcula como:

$$\delta_h = \frac{VH^3}{3E_m I} + \frac{VH}{G_m A_v} \quad (13)$$

Donde:

$V$  fuerza cortante horizontal al nivel de la losa,

$H$  altura del muro,

$E_m$  módulo de elasticidad de la mampostería,

$G_m$  módulo de rigidez a cortante,

$I$  momento de inercia de la sección transversal del muro, y

$A_v$  área de cortante de la sección transversal del muro.

Para un cálculo preliminar se tomará el módulo de elasticidad como  $E = 800f_m'$ , el módulo de cortante se permite calcular como  $G_m = 0.2E_m$ .

En estos muros se calculó el momento de inercia de la sección rectangular bruta. Las propiedades nominales tomadas son:

$E_m = 800 f_m'$  y  $G_m = 0.2$ . Para piezas de concreto,

por tanto:

$E_m = 800 \times 20 = 16,000 \text{ kg/cm}^2$ ,  $G_m = 3,200 \text{ kg/cm}^2$  para el espécimen MBRI-2

$E_m = 800 \times 70 = 56,000 \text{ kg/cm}^2$ ,  $G_m = 11,200 \text{ kg/cm}^2$  para el espécimen MBRI-8

Y el cálculo es:

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

El área de cortante se tomó como 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 3.7.

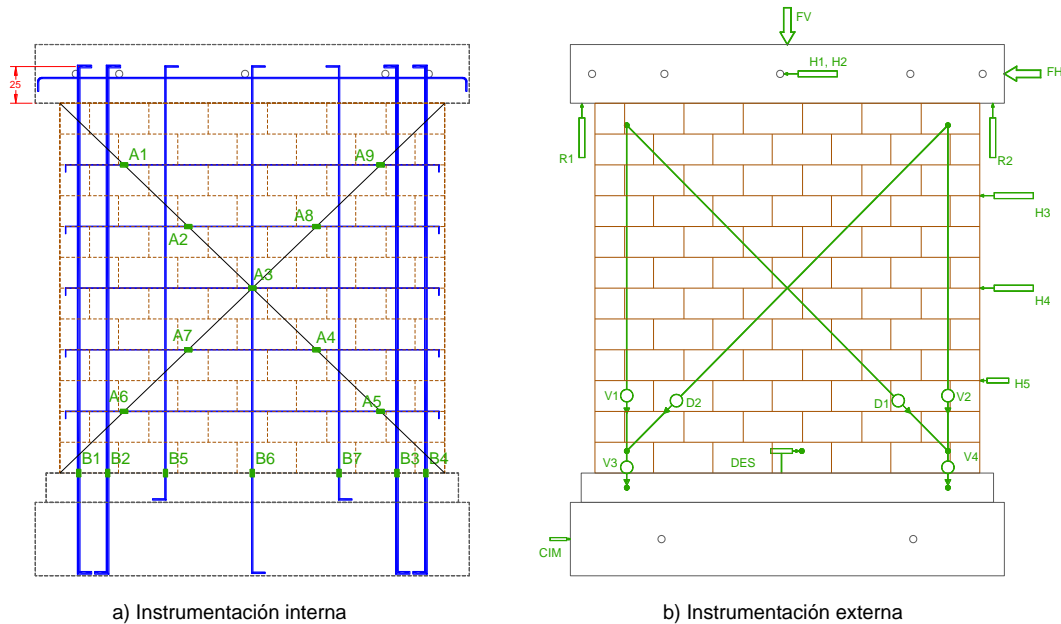
**Tabla 3.7 Rigideces teóricas con propiedades nominales**

No.	Especimen	Sección cm	$f_m'$ kg/cm <sup>2</sup>	$E_m$ kg/cm <sup>2</sup>	$G_m$ kg/cm <sup>2</sup>	$t$ cm	$L$ cm	$A_v$ cm <sup>2</sup>	$I$ cm <sup>4</sup>	Rig t/cm
1	MBRI-2	Rectangular	20	16,000	3,200	12	260	2600	17,576,000	22.1
2	MBRI-8	Rectangular	70	56,000	11,200	12	266	2660	18,821,096	74.0

### 3.3 INSTRUMENTACIÓN

Para los especímenes ensayados ante carga lateral se colocarán medidores horizontales en la parte superior, medidores verticales en los extremos del muro y equipo para la medición de las diagonales. Se dejará un instrumento para detectar el posible deslizamiento en la base del muro.

En la Figura 3.7 se muestra el arreglo de la instrumentación externa para el caso de muros con refuerzo interior.



**Figura 3.7 Instrumentación de los especímenes**

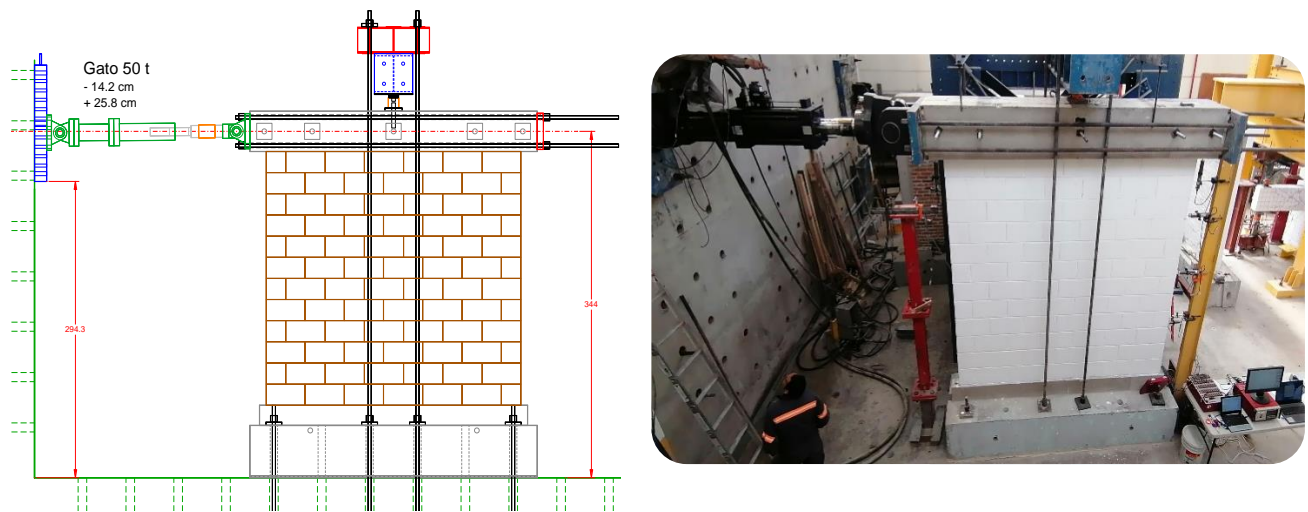


**Figura 3.8 Instrumentación de los especímenes, espécimen MBRI-8**

### 3.4 APLICACIÓN DE CARGAS

#### 3.4.1 Marco de carga para ensayos ante fuerza lateral

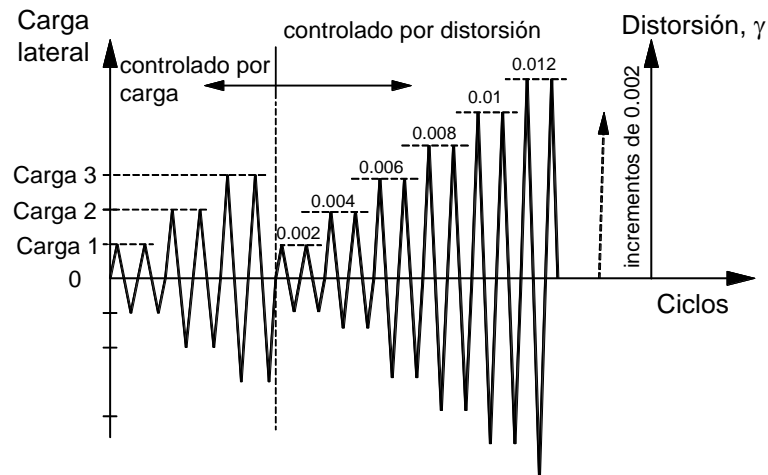
Las cargas se aplicarán mediante una carga lateral cíclica reversible producida por un gato hidráulico y una viga de concreto o cabezal construido a lo largo de la parte superior de los especímenes. En la Figura 3.9 se presenta el marco de carga.



**Figura 3.9 Marco de aplicación de cargas para ensaye ante fuerza horizontal**

### 3.4.2 Historia de carga

Siguiendo las recomendaciones del apéndice A de las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería, se realizó la prueba en forma cíclica reversible con una repetición de cada ciclo para cada nivel de carga o deformación. En los ciclos 1 y 2 se aplicó la cuarta parte de la carga resistente estimada, el 3 y 4 la mitad de dicha carga, y en el 5 se buscó agrietamiento o daño visible. A partir de aquí se controló por deformación con incrementos de distorsión de 0.002 y sus respectivas repeticiones. Se usó la historia de carga mostrada en la Figura 3.10.



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 3.10 Historia de carga**

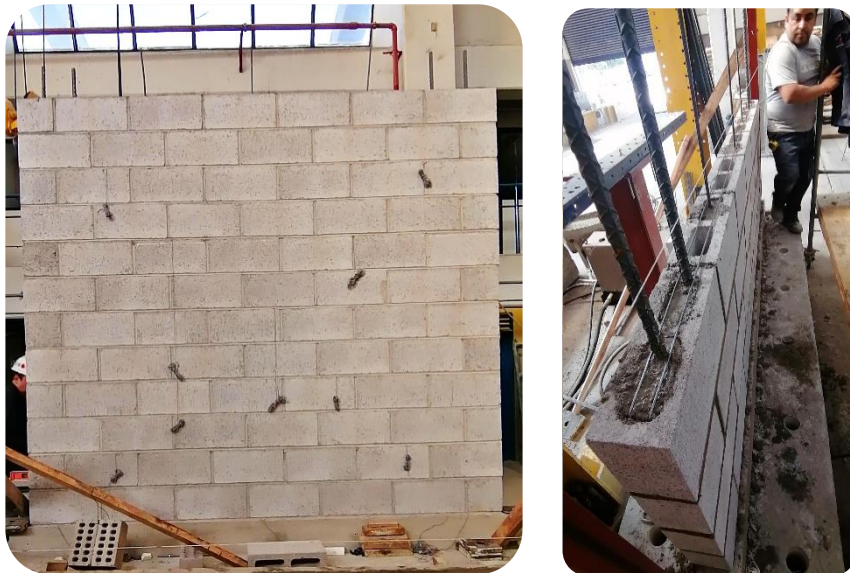


## CAPÍTULO 4

### CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES

#### 4.1 CONSTRUCCIÓN DE ESPECÍMENES

En el espécimen MBRI-8 se utilizó una viga de cimentación de concreto reforzado de 80×50 cm, anclada con barras de acero verticales al piso del laboratorio y con una cadena de concreto de desplante para dar anclaje a las barras verticales intermedias. Se colocaron las piezas con un mortero convencional hecho en obra tipo I de proporción 1:¼:3, es decir, una parte de cemento hidráulico por un cuarto de cal hidratada y tres partes de arena suelta. Se hizo un muestreo con cubos de mortero de 5 cm. Y en el colado de cabezal, anclaje a la cimentación, cadena de desplante se tomaron muestreo de cilindros con dimensiones de 20×10 cm. A continuación se ilustrarán las etapas de la construcción del espécimen (MBRI-8).



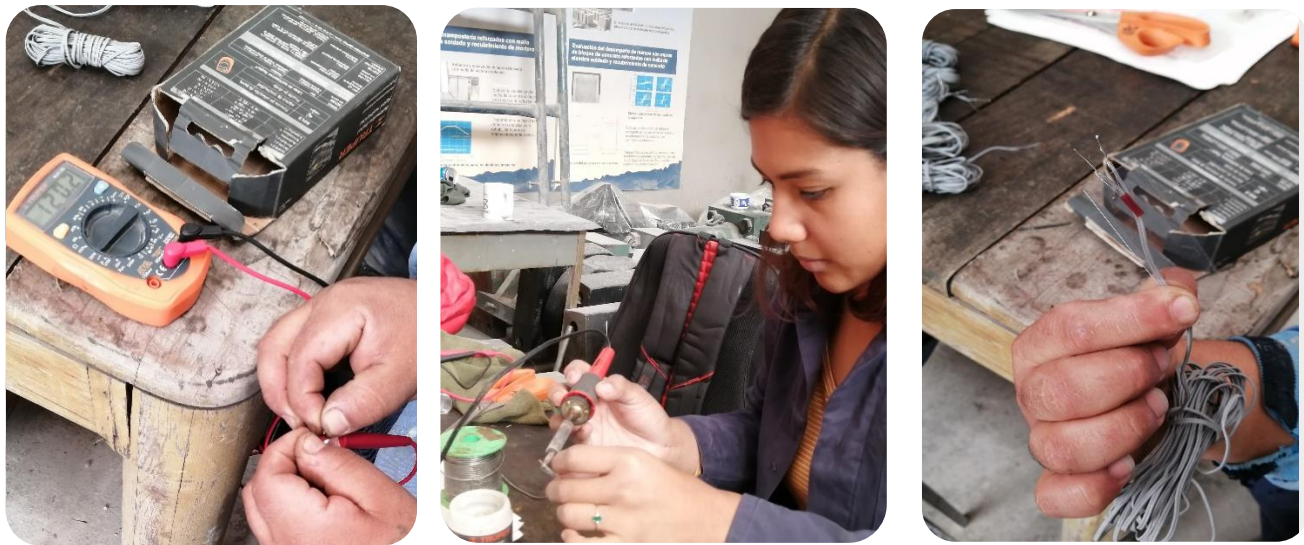
**Figura 4.1 Construcción de espécimen MBRI-8, muro con refuerzo interior**

Preparación de armado vertical para muro con refuerzo interior. Conformado con dos barras del No. 6 (19 mm de diámetro) en cada extremo y tres barras del No. 3 (9.5 mm), a cada 60 cm de distancia; estas barras se instrumentaron con deformímetros eléctricos Strain Gauge (5 mm) para su monitoreo durante la prueba como se puede observar en la Figura 4.3 .

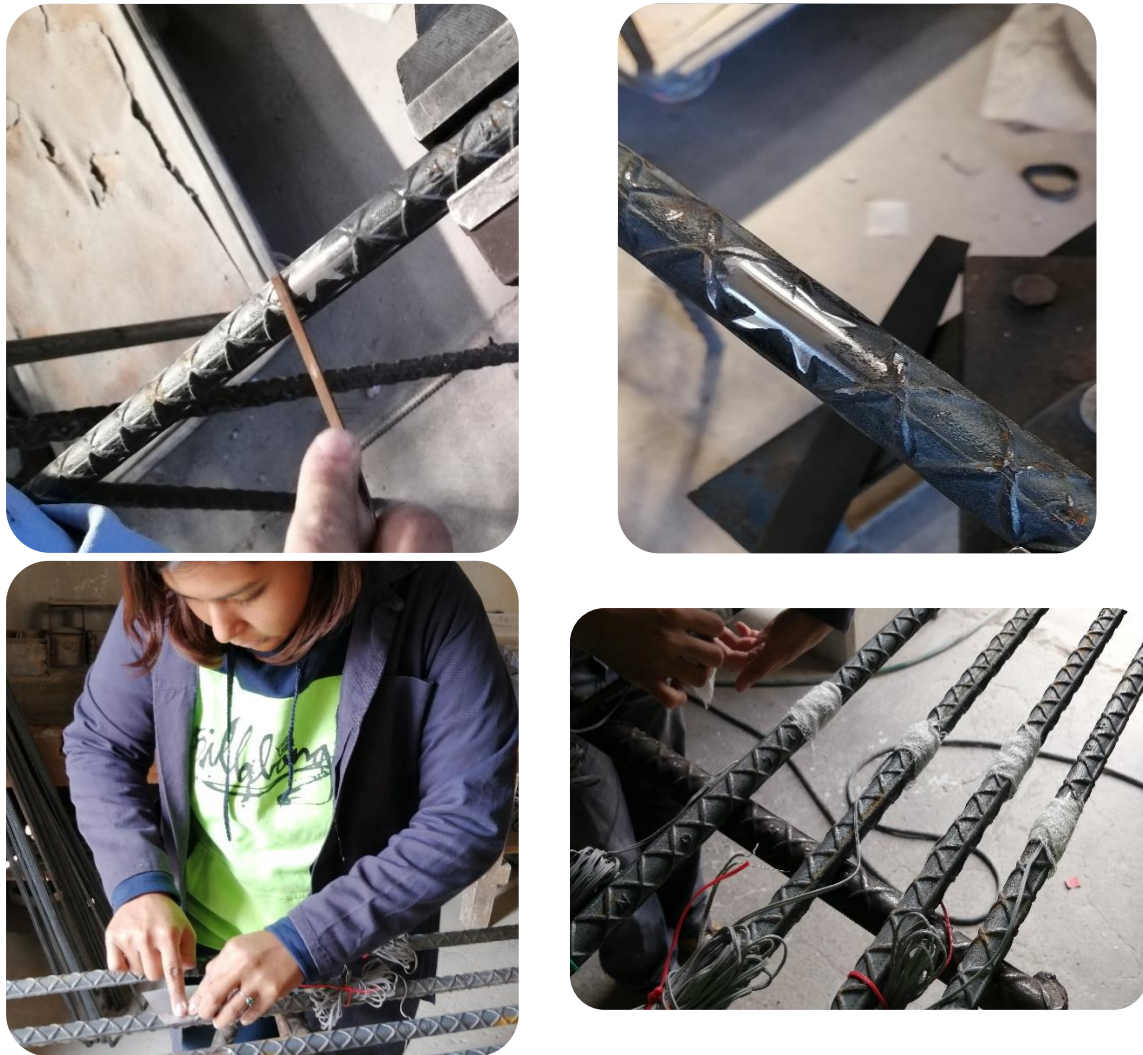
La preparación de los deformímetros se realizó con mucha cautela debido a que son muy sensibles. Antes de ser colocados y soldados, se revisó que dieran las lecturas correspondientes. Una vez que se comprobó que dichos deformímetros funcionaban de manera adecuada se prosiguió a su soldadura con cables los cuales requirieron para su monitoreo durante la prueba. Para evitar que en algún momento fallaran los Strain Gauge se monitoreaban para que siguieran dando lectura antes de ser colocados en las barras y posteriormente en el muro para llevarse a cabo la prueba, como se puede observar en la Figura 4.2

En las barras que se colocaron los deformímetros, se limaron las barras para mejor colocación, realizando un acabado tipo espejo y además de una limpieza con acetona, los deformímetros se les hizo una limpieza y se pegaron en la barra, quedando fijo el deformímetro en la barra se procede a protegerlo para evitar que se dañe una vez que se coloquen las barras en el muro y en el relleno las celdas de los bloques. Figura 4.3





**Figura 4.2** Preparación de deformímetros (Strain Gauge)



**Figura 4.3** Preparación de barras y colocación de deformímetros (Strain Gauge)





**Figura 4.4 Armado de muro con refuerzo interior**



**Figura 4.5 Anclaje a la base, cadena de desplante 16x20 cm**



La colocación de los bloques de concreto, debido a que las barras verticales son continuas en toda la altura del muro, se requirió de la ayuda de una barra con una especie de garrucha para subir pieza por pieza. Esto quiere decir que no fue necesario el flexionar o traslapar las barras.



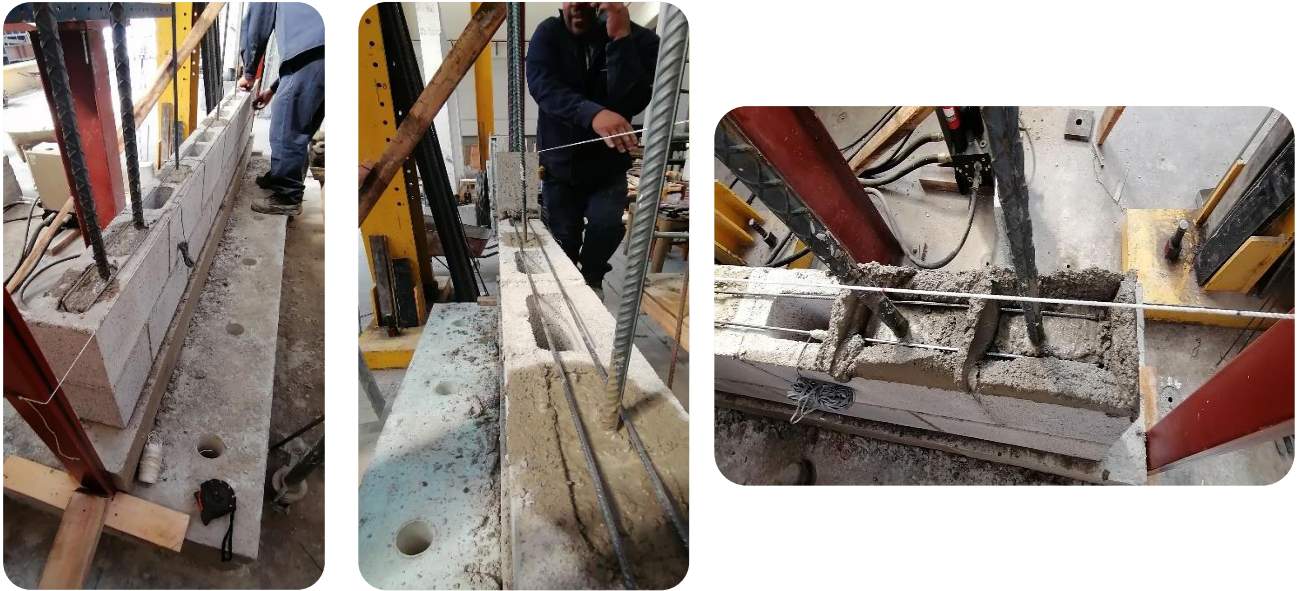
**Figura 4.6** Colocación de bloques con ayuda de una barra

El relleno de las celdas con refuerzo se realizó con mortero fluido elaborado con porciones 1:1¼:1/2 el cual consiste de uno de arena, uno y un cuarto de gravilla y medio de cemento hidráulico este se realizaba a cada dos hiladas antes de ser colocado el acero de refuerzo horizontal, como se muestra en la Figura 4.7, una vez que se hace el relleno se colocaron dos barras 5/32 pulg (3.9 mm) de las cuales solo una se instrumentó con deformímetro eléctricos Strain Gauge de 2 mm.



**Figura 4.7** Relleno de celdas con refuerzo

La colocación de las barras horizontales, su posición fue recta siendo ancladas a las celdas extremas del muro. Dichas barras pasan por todas las celdas, únicamente son cubiertas de mortero de relleno en las celdas en las cuales pasan las barras verticales. Como se puede observar en la Figura 4.8.



**Figura 4.8 Refuerzo horizontal, barras de No. 5/32 (3.9 mm)**

Una vez que se alzó el muro se procedió a subir el cabezal y colar la dala de cierre del muro. Podemos observar en la Figura 4.9 y Figura 4.10



**Figura 4.9 Espécimen MBRI-8, muro con refuerzo interior.**





**Figura 4.10** *Espécimen MBRI-8, con cabezal.*

Ya montado el cabezal y dala de cierre, se procedió a montar el actuador en el muro de reacción y en el cabezal para la prueba, se apoyó con la grúa para la colocación del gato el cual tiene capacidad de cincuenta toneladas de reacción, con ayuda de tornillos y llaves Allen se ancla al muro para mayor estabilidad.



**Figura 4.11** *Montaje del actuador.*

## CAPÍTULO 5 RESULTADOS GENERALES DE LOS ENSAYES

### 5.1 COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS MATERIALES

Se midieron las dimensiones de las piezas para considerar si se clasifica como pieza hueca al tener un área neta por lo menos cincuenta por ciento del área bruta y su espesor de paredes exteriores que no sea menor a 15 mm con dos o cuatro celdas, y con espesor mínimo de las paredes interiores de 13 mm. Las dimensiones tomadas permiten obtener su resistencia a la compresión de la pieza que se calcula sobre área bruta. La resistencia a compresión se determinará de acuerdo con ensaye indicado en la norma NMX-C-036-ONNCCE.

$$f'_p = \frac{\bar{f}_p}{1 + 2.5c_p}$$

donde:

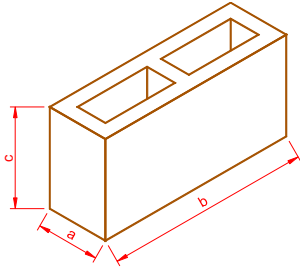
$\bar{f}_p$  Resistencia media a compresión de las piezas, referida al área bruta.

$c_p$  Coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las piezas, que en ningún caso será menor que 0.1. (0.2 piezas provenientes de planta, control de calidad; 0.3 para piezas que no cuentan con control; y 0.35 para piezas de producción artesanal)



Figura 5.1 Piezas de mampostería y medición de pesos

**5.1.1 Piezas de mampostería doble hueco del espécimen MBRI-2**



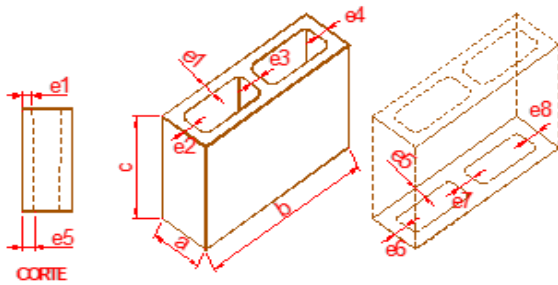
Proyecto: Muros de bloque con refuerzo int.  
 Fecha de ensaye : 29 de octubre de 2018  
 Tipo de material : Bloque doble hueco de concreto

Esfuerzo  $f_p = 50.4$  kg/cm<sup>2</sup>  
 $f_p' = f_p / (1 + 2.5c_p) = 28.82$  kg/cm<sup>2</sup> control de calidad  $c_p \geq 0.2$

**Tabla 5.1 Resultados de ensayos bloques huecos**

Pieza No.	Dimensiones, cm			Carga, kg	Área bruta cm <sup>2</sup>	Esfuerzo kg/cm <sup>2</sup>
	a	b	c			
4	11.7	39.0	19.7	19000	456.3	41.64
5	11.8	39.0	19.4	27400	460.2	59.54
1	11.9	38.9	19.7	17000	462.9	36.72
3	11.9	39.0	19.3	32600	464.1	70.24
2	11.8	38.9	19.2	20200	459.0	44.01
Prom.	11.8	39.0	19.5			50.4
C Var.	0.01	0.00	0.01			0.28

**5.1.2 Piezas de mampostería doble hueco del espécimen MBRI-8**



Proyecto: Muros de bloque con refuerzo int.  
 Fecha de ensaye :  
 Tipo de material : Bloque doble hueco de concreto IBM

Esfuerzo  $f_p = 107.1$  kg/cm<sup>2</sup>  
 $f_p' = f_p / (1 + 2.5c_p) = 71.42$  kg/cm<sup>2</sup> con control de calidad  $c_p \geq 0.2$

**Tabla 5.2 Resultados de ensayos bloques huecos del MBRI-8**

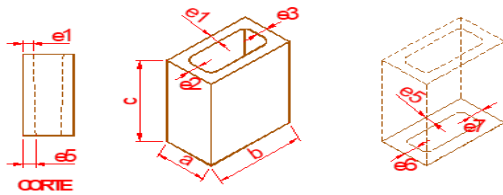
Pieza No.	Dimensiones, cm											Peso, kg	Carga, kg	Área bruta cm <sup>2</sup>	Peso Vol. kg/m <sup>3</sup>	Esfuerzo kg/cm <sup>2</sup>
	a	b	c	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8					
1	12.0	40.0	20.0	2.5	3.0	2.8	2.6	2.7	3.0	3.5	3.3	11.623	61400	480.0	1211	127.92
2	12.0	40.0	20.0	3.0	3.4	3.2	3.3	3.0	2.9	2.8	2.9	11.418	53800	480.0	1189	112.08
3	12.0	40.0	20.0	3.0	3.5	3.3	3.5	2.5	2.6	2.8	2.8	11.475	47400	480.0	1195	98.75
4	12.0	40.0	20.0	3.3	3.5	3.2	3.4	2.5	2.6	2.8	2.9	11.376	43500	480.0	1185	90.63
5	12.0	40.0	20.0	2.8	2.8	3.2	2.8	3.2	3.4	3.4	3.3	11.647	51000	480.0	1213	106.25
Prom.	11.9	40.0	20.0	2.8	3.1	3.1	3.0	2.8	3.0	3.2	3.1					107.1
C Var.	0.01	0.00	0.00	0.09	0.10	0.06	0.11	0.11	0.11	0.11	0.07					0.13





Figura 5.2 Ensayo de piezas a compresión

5.1.3 Mitades de bloques de mampostería del espécimen MBRI-8



Proyecto: Muros de bloque con refuerzo int.

Tipo de material : Mitades de Bloque hueco de concreto IBM

Esfuerzo  $f_p = 110.4$  kg/cm<sup>2</sup>  
 $f_p' =$   
 $f_p/(1+2.5c_p) = 73.62$  kg/cm<sup>2</sup> control de calidad  $c_p \geq 0.2$

Tabla 5.3 Resultados de ensayos mitades de bloques huecos

Pieza No.	Dimensiones, cm									Peso, kg	Carga, kg	Área bruta cm <sup>2</sup>	Peso Vol. kg/m <sup>3</sup>	Esfuerzo kg/cm <sup>2</sup>
	a	b	c	e1	e2	e3	e5	e6	e7					
1	12.0	19.8	19.9	2.7	2.2	2.1	3.0	2.5	3.5	5.973	23950	237.6	1263	100.80
2	11.8	20.0	20.0	3.0	2.5	3.0	3.0	2.5	4.0	6.108	28650	236.0	1294	121.40
3	11.8	20.0	20.0	2.5	3.0	2.5	3.0	3.5	3.0	5.986	25600	236.0	1268	108.47
4	12.0	20.0	20.0	3.0	2.5	3.5	3.0	3.0	4.0	6.155	28850	240.0	1282	120.21
5	11.8	20.0	20.0	2.5	3.0	2.5	3.0	3.5	3.0	5.968	23900	236.0	1264	101.27
Prom.	11.9	20.0	20.0	2.7	2.8	2.9	3.0	3.2	3.4					110.4
C Var.	0.01	0.00	0.00	0.09	0.11	0.18	0.00	0.15	0.17					0.09

Figura 5.3 Ensayo de mitades piezas a compresión

Con fines de comparación se presentan los resultados del ensayo de un espécimen estudiado anteriormente usando piezas de baja resistencia a compresión. El espécimen MBRI-2 se reforzó con dos



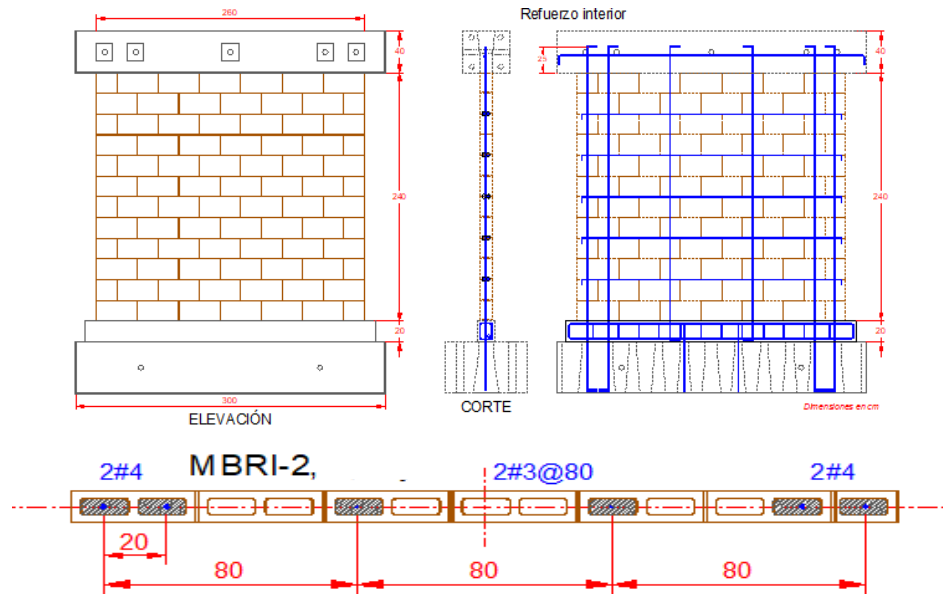
barras del No. 4 a los extremos y refuerzo vertical de dos barras del No. 3. Como refuerzo horizontal se colocaron dos alambres de No. 5/32 a cada 40 cm. El ancho del muro fue de 260 cm y un espesor de 12 cm.

## 5.2 ENSAYE DEL ESPÉCIMEN MBRI-2

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 espécimen se construyó cadena de desplante arriba de la viga de cimentación para darle anclaje a las barras verticales centrales.

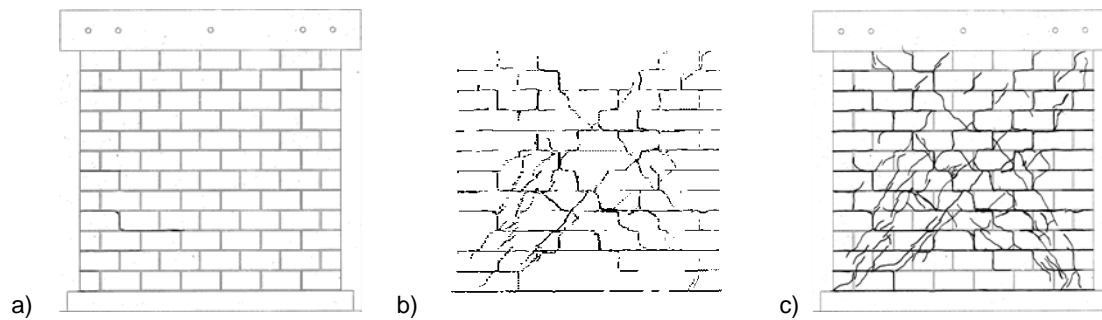
El espécimen se reforzó horizontalmente con dos alambres de 5/32 pulg cada dos hiladas resultando  $p_h f_{yh} = 0.3 \text{ MPa}$  (3.1 kg/cm<sup>2</sup>) lo que representa la cuantía mínima que piden las NTCM (2017). En la Figura 5.4 se muestra la geometría y el armado del espécimen.

La resistencia promedio de pilas a compresión del espécimen MBRI-2 resultó de  $f_m' = 24.3 \text{ kg/cm}^2$ .



**Figura 5.4 Geometría y armados del espécimen MBRI-2**

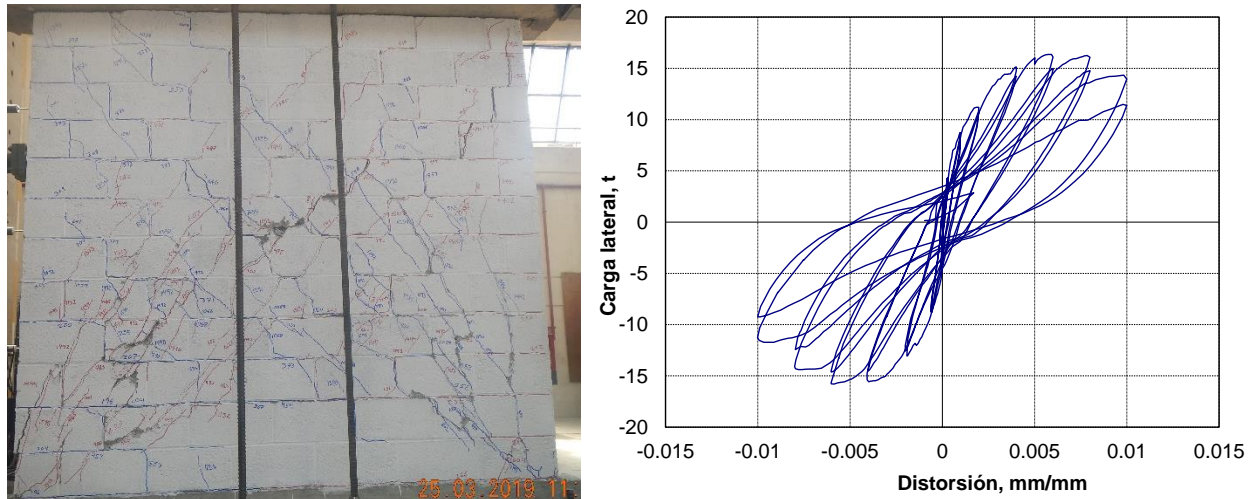
La resistencia se alcanzó para una carga de  $V_{máx}^{(+)} = 16.35$  t para una distorsión de 0.00592 mm/mm, y para los ciclos negativos de  $V_{máx}^{(-)} = -15.8$  t y  $-0.00587$  mm/mm. En la Figura 5.5 se muestra la secuencia de agrietamiento del espécimen.



**Figura 5.5 Secuencia de daño del espécimen MBRI-2**

En la Figura 5.6 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  $45^\circ$  que atraviesan las diagonales del muro.

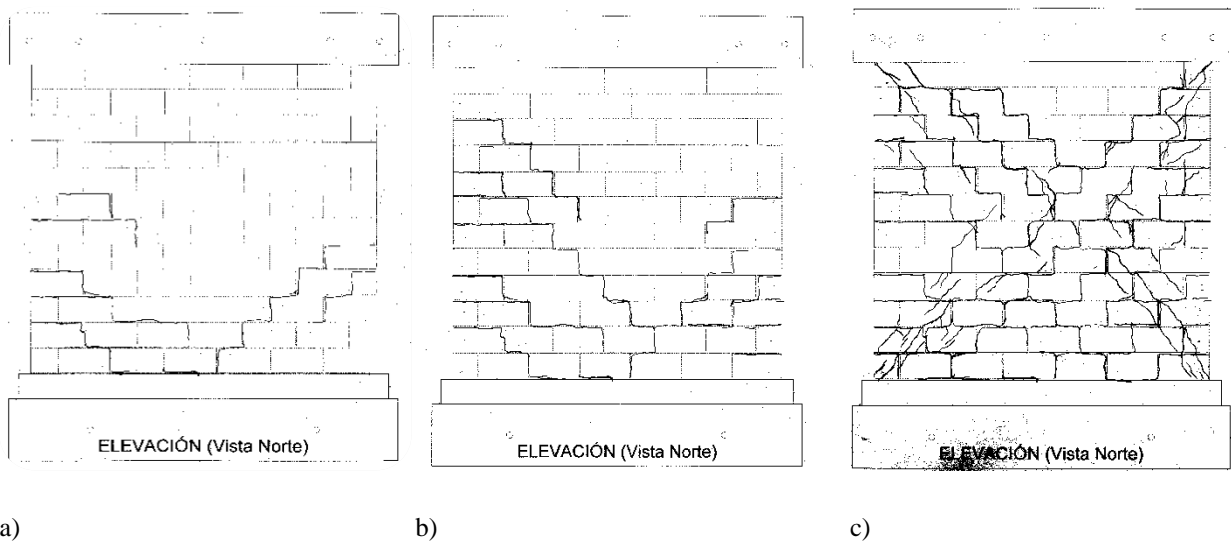




**Figura 5.6** Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MBRI-2

### 5.3 ENSAYE DEL ESPÉCIMEN MBRI-8

El espécimen MBRI-8. Contaba con barras verticales del no. 6 (1.91 cm de diámetro) en cada una de dos celdas en los extremos, y tres barras del no. 3 en la parte central. En este espécimen se construyó una cadena 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 cada dos hiladas resultando  $p_{hf_{yh}} = 0.3$  MPa (3.1 kg/cm<sup>2</sup>) lo que representa la cuantía mínima que piden las NTCM (2017). En la se muestra la Figura 5.8 Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MBRI-8. La resistencia se alcanzó para una carga de  $V_{máx}^{(+)} = 17.04$  t para una distorsión de 0.00644 mm/mm, y para los ciclos negativos de  $V_{máx}^{(-)} = -19.48$  t y -0.00519 mm/mm.



**Figura 5.7** Secuencia de daño del espécimen MBRI-8

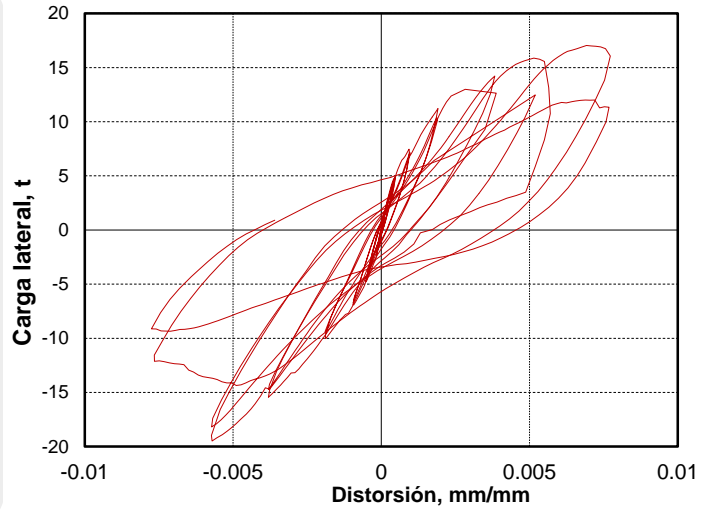


Figura 5.8 Patrón final de daño y curva de histéresis del espécimen MBRI-8

#### 5.4 COMPARACIÓN DE LOS ESPECÍMENES

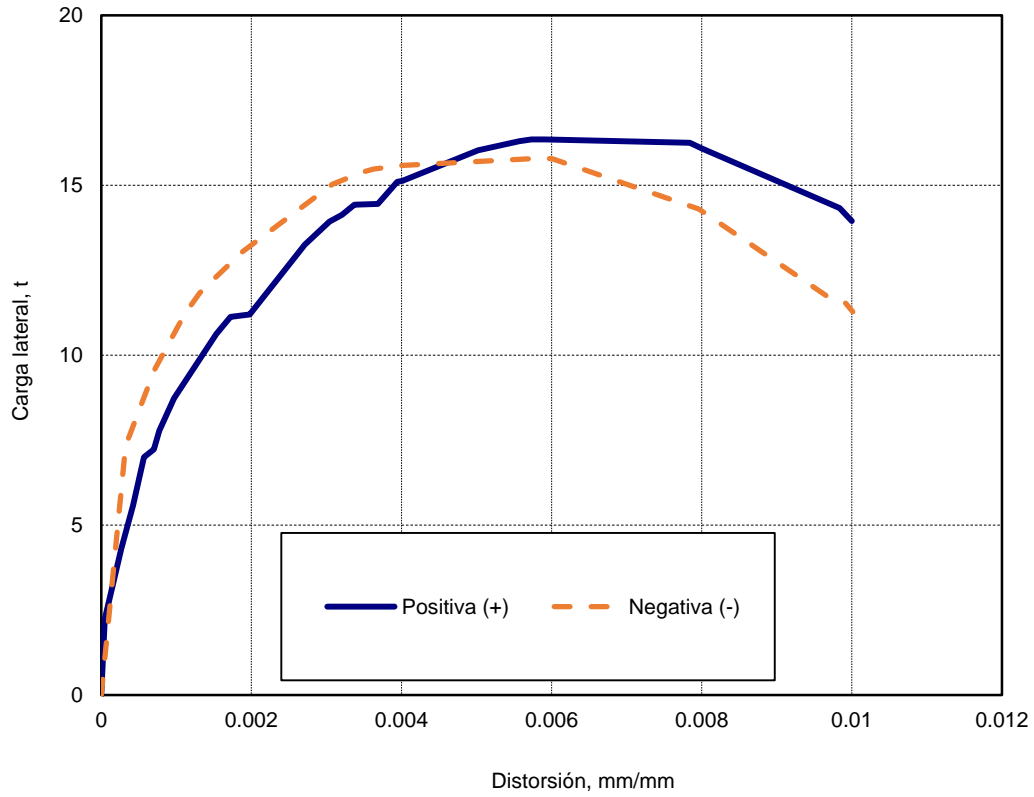
En la Tabla 5.4 se enlistan los datos de los principales resultados de los ensayos realizados

Tabla 5.4 Comparativa de los resultados para los especímenes

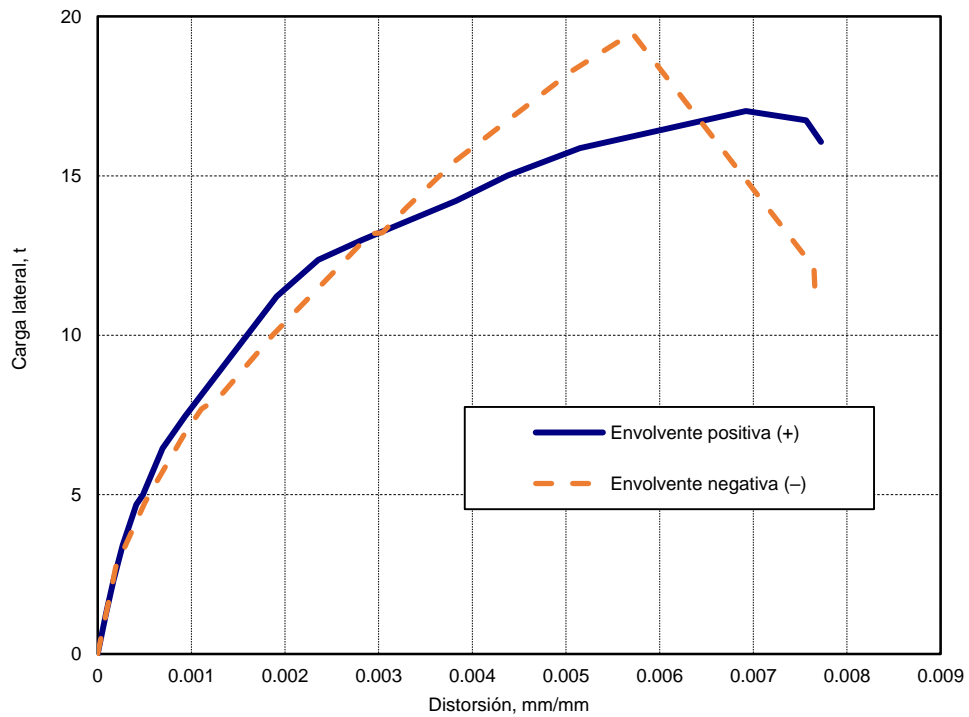
Especímen	$V_{agr} = V_{mR}$ t	$\frac{V_R}{V_{mR} + V_{sR}}$ t	$V_{max}^{(+)}$ t	$V_{max}^{(-)}$ t	$V_{agr}^{(+)}$ t	$V_{agr}^{(-)}$ t	$V_{max}^{(+)}/V_R$	$V_{max}^{(-)}/V_R$
MBRI-2	8.67	13.20	16.35	-15.80	11.20	-13.05	1.24	1.20
MBRI-8	9.6	16.8	17.06	-19.65	11.21	-10.03	1.02	1.16

Se observa que la predicción del agrietamiento,  $V_{agr}$ , para el cálculo teórico usando el valor nominal de  $v_m'_{nominal} = 4.0 \text{ kg/cm}^2$ , fue una aproximación a la carga de agrietamiento. Cabe señalar que los resultados de los muretes del MBRI-8 arrojaron una resistencia promedio de  $v_{m\_prom} = 4.92 \text{ kg/cm}^2$  y una resistencia de diseño de  $v_m' = 3.11 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que los del MBRI-2 dieron promedio de  $4.8 \text{ kg/cm}^2$  y  $3.2 \text{ kg/cm}^2$  de diseño, es decir muy parecidas.

En la Figura 5.11 se presentan las envolventes de los ciclos positivos de los especímenes a fin de poder visualizar la comparación. Se observa que los especímenes tienen comportamiento muy similar.



**Figura 5.9** *Envolturas de espécimen MBRI-2*



**Figura 5.10** *Envolturas de espécimen MBRI-8*

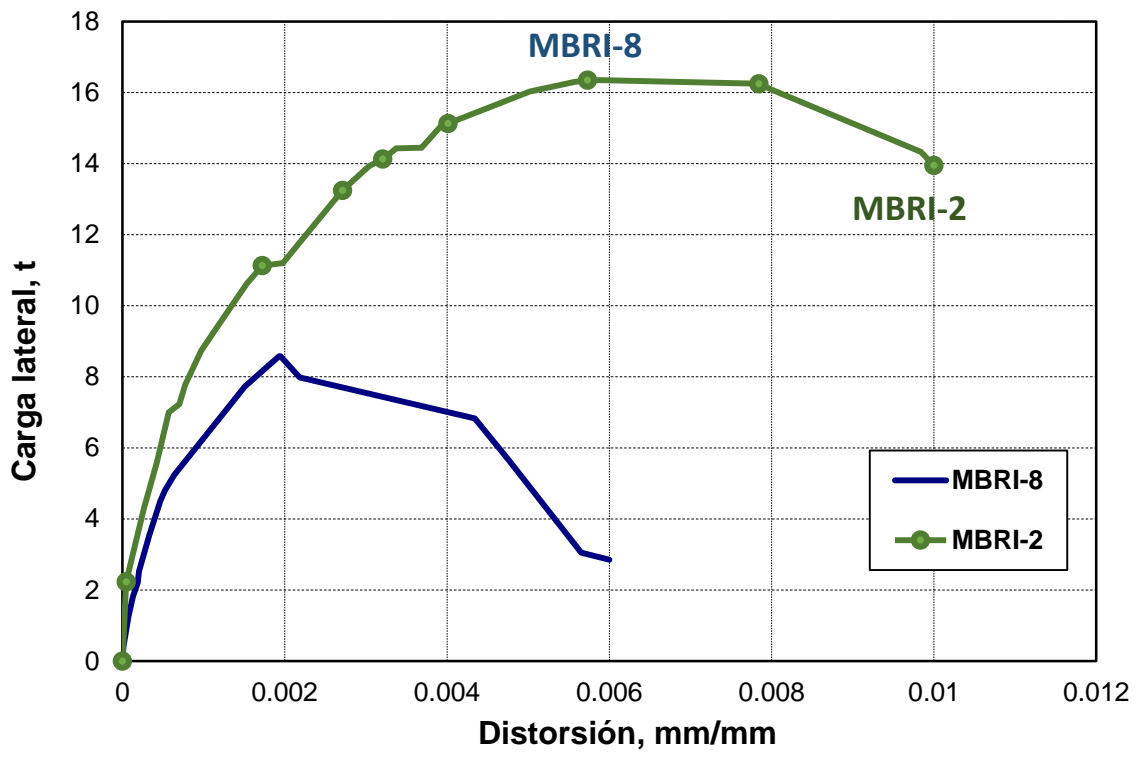


Figura 5.11 Envoltentes de especímenes



## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

Se ensayó ante carga lateral cíclica reversible un muro de mampostería a tamaño natural de bloque hueco de concreto hecho con piezas de alta resistencia a la compresión con  $f_p'=74$  kg/cm<sup>2</sup>, denominado MBRI-8, y siendo reforzado interiormente según las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería de la Ciudad de México (NTCM, 2017). Este muro se comparó con un muro idéntico elaborado en un estudio previo (MBRI-2) pero que se construyó con bloques de baja resistencia a compresión con  $f_p'=29$  kg/cm<sup>2</sup>. Ambos muros fueron reforzados interiormente con barras verticales del No. 4 y No. 6 para los especímenes MBRI-2 y MBRI-8, respectivamente. Los dos modelos tuvieron el mismo refuerzo horizontal con dos alambres de 5/32 pulg a cada dos hiladas.

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.

- Durante la etapa constructiva se tuvo un buen resultado al rellenar las celdas reforzadas verticales cada dos hiladas, es decir, a la altura de la junta donde se pondría los alambres de refuerzo horizontal. Esto evitó congestionar los huecos y lograr un relleno completo de las celdas. Otra actividad durante la construcción fue el acabado de las juntas compactándolas con llaguero o junteador, no para un fin estético sino para mejorar la compactación y adherencia del mortero. Finalmente, conviene mencionar que en la construcción de estos especímenes las barras verticales no se doblaron como se acostumbra en la práctica (lo que no es permitido) sino que las piezas se metían desde arriba de las barras rectas.
- El diseño del ensaye fue exitoso en cuanto al diseño del marco de carga, el uso del actuador o gato hidráulico de 50 t, la disposición de la instrumentación mediante micrómetros, transductores y deformímetros adheridos. No obstante, fue necesario adecuar la restricción ante desplazamientos fuera del plano del muro para evitar que tuviera una pequeña torsión, dado que en la primera etapa de la prueba se tuvo un problema dañando una de las restricciones; una vez corregido con un sistema más robusto se pudo completar el ensaye

En cuanto a los resultados de los ensayes:

- Se observó que ambos muros, con piezas de baja y alta resistencia a compresión, tuvieron un comportamiento casi idéntico a cortante, dado que las resistencias reales obtenidas en los ensayes fueron muy similares, resultando un valor máximo de 16.35 t en el MBRI-2 y de 19.65 t en el MBRI-8, así como una rigidez inicial y una capacidad de deformación inelástica equivalentes, lo cual se observa en las envolventes de las curvas de histéresis (Figura 5.11).
- Al comparar la resistencia experimental con la teórica calculada con ecuaciones de las NTCM, con valores nominales de resistencia de materiales ( $v_m'$  nominal=3.5 y 4 kg/cm<sup>2</sup> para el MBRI-2 y MBRI-8, respectivamente) las experimentales llegaron a ser un poco más altas que las predichas. No obstante las resistencias experimentales medidas en muretes a compresión diagonal resultaron ser de  $v_m' = 3.2$  y 3.11 kg/cm<sup>2</sup> por lo cual el cálculo teórico concuerda en forma muy precisa.
- Lo anterior implicaría que no habría ventaja en usar piezas de alta resistencia (a compresión) para el caso de requerir resistencia ante sismo; sin embargo, en el proyecto global del cual se tomó la información de un solo modelo (MBRI-8), la diferencia en resistencia ante fuerzas horizontales se espera observar en los siguientes especímenes que contarán con cuantías altas de refuerzo horizontal.



## 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 ensaye a compresión de cilindros muestreados durante la construcción de los castillos, losa y concreto de la base. Finalmente se ensayaron barras y alambres de acero a tensión.

#### A.1 COMPRESIÓN EN PILAS DE MAMPOSTERÍA

Para determinar la resistencia a la compresión de la mampostería se prepararon cinco 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).

La elaboración de los muretes y pilas de los especímenes se hizo después de la construcción de los mismos. Los ensayos se hicieron cerca de la fecha de ensaye de los especímenes, con 53 días de edad en las probetas del modelo MBRI-2 y 34 días del MBRI-8.

Para la construcción de las pilas se unieron tres piezas con lo cual la relación altura a espesor fue en promedio de 5.26, por lo que el factor correctivo usado fue de 1.063. Las pilas se cabecearon con un yeso especial en las piezas extremas para garantizar una superficie uniforme contra la máquina de ensaye.

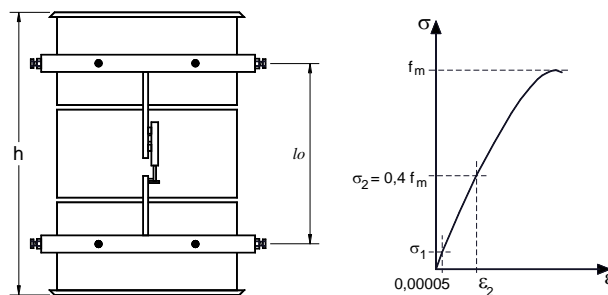


Figura A.1 Ensayo de pilas a compresión



Figura A.2 Construcción de pilas a compresión





**Figura A.3 Ensayo de pilas a compresión**

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 baja. 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.

$$f_m' = \frac{\overline{f_m}}{1 + 2.5 c_m} \quad (A.1)$$

En la Tabla A.1, 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.1 se presenta el módulo de cada pila y una correlación respecto a la resistencia de dicha pila. La variable  $\epsilon_{fm}$  es la deformación unitaria registrada en la carga máxima.

**Tabla A.1 Resultados de ensayos de pilas a compresión**

Pila	Dimensiones, cm					Área bruta $cm^2$	Carga, kg	Esfuerzo bruto, $f_m$ $kg/cm^2$	$f_m$ $kg/cm^2$	Módulo elast $E_m$ $kg/cm^2$	$E_m/f_m$	$\epsilon_{fm}$ mm/mm
	t	B	h	$l_{0,1}$	$l_{0,2}$							
<b>Espécimen MBRI-2</b>												
Pila-1	11.8	39.0	60.3	37.7	37.7	460.2	13600	29.55	31.06	25075	807	0.00108
Pila-2	11.9	38.9	60.5	38.6	38.6	462.9	13450	29.06	30.53	31193	1022	0.00177
Pila-3	11.8	39.0	60.4	38.8	38.8	460.2	17550	38.14	40.09	28520	711	0.00193
<b>Promedios</b>									<b>33.9</b>	<b>28262.5</b>	<b>847</b>	<b>0.0016</b>
<b>Coeficiente de variación</b>									<b>0.16</b>	<b>0.11</b>	<b>0.19</b>	<b>0.28</b>
<b>Espécimen MBRI-8</b>												
Pila-4	11.85	39.9	62.2	45.2	45.3	472.82	41150	87.03	91.60	58232	636	0.00343
Pila-5	11.8	40	62.05	43.2	43.3	472.00	44000	93.22	98.12	54718	558	0.00241
Pila-6	11.8	39.9	62.1	43.0	43.4	470.82	41150	87.40	92.00	74568	811	0.00231
<b>Promedios</b>									<b>93.9</b>	<b>62505.7</b>	<b>668</b>	<b>0.0027</b>
<b>Coeficiente de variación</b>									<b>0.04</b>	<b>0.17</b>	<b>0.19</b>	<b>0.23</b>

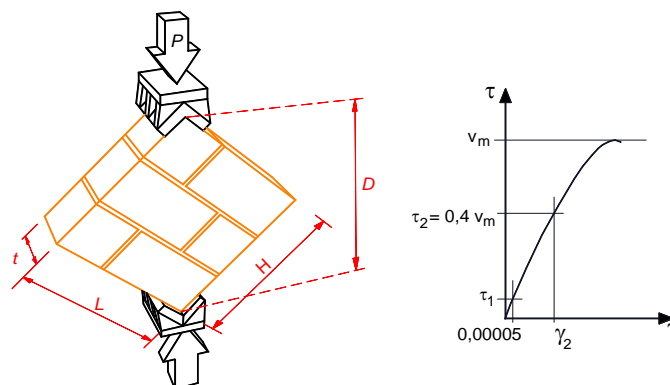
Para el espécimen MBRI-8 y usando el coeficiente de corrección por esbeltez  $h/t = 5.06$ , que resulta de 1.063, para el promedio de la resistencia a compresión y aplicando la ecuación A.2 con el coeficiente de

variación de  $c_m = 0.15$  (mayor que 0.04), el esfuerzo de diseño fue  $f_m' = 6.69$  MPa (68.30 kg/cm<sup>2</sup>). Por su parte los resultados de pilas para el espécimen MBRI-2 dieron  $f_m' = 24.3$  kg/cm<sup>2</sup>.

Cabe señalar la diferencia en la resistencia a la compresión de las pilas fabricadas con las piezas de alta resistencia de este estudio (68.3 kg/cm<sup>2</sup>) en comparación con las piezas del estudio previo con muy pobre resistencia a compresión (24.3 kg/cm<sup>2</sup>).

## A.2 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 ensaye 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.4** 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.4).

Se presentó el modo de falla en una trayectoria aproximadamente por la diagonal donde la grieta atravesó algunas piezas. El esfuerzo cortante resistente de diseño  $v_m'$ , se calculó utilizando la ecuación A.3 (CDMX, 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.

$$v_m' = \frac{\overline{v_m}}{1 + 2.5 c_v} \quad (A.2)$$

En la Tabla A.2 se presentan los resultados de los muretes ensayados. Las longitudes  $L$  y  $H$  son el largo y la altura del murete, respectivamente;  $D$  es la dimensión de la diagonal cargada y  $t$  el espesor del murete, (ver Figura A.4). En la tabla se incluye el cálculo del esfuerzo de diseño para cada probeta.

**Tabla A.2 Resultados de ensayos de muretes a compresión diagonal**

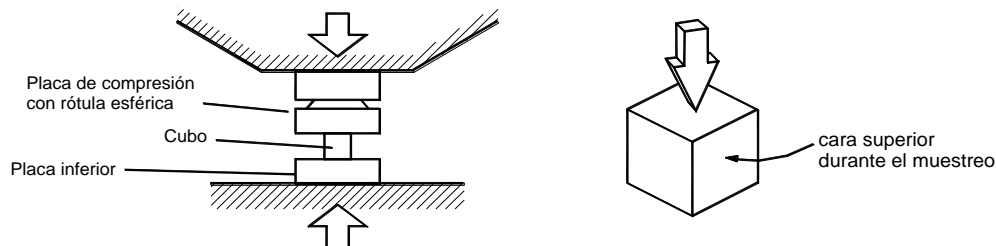
Murete	Dimensiones, cm				Área diag. $A = t \cdot D$ , cm <sup>2</sup>	Carga $P$ , kg	Esfuerzo, $v$ , kg/cm <sup>2</sup>	Espécimen
	$L$	$H$	$t$	$D$				
Mur-1	-	-	11.9	84.2	1002.0	5330	5.32	MBRI-2
Mur-2	-	-	11.8	84.3	994.7	4250	4.27	
Promedio							4.80	
Coef de variación							0.15	
Mur-4	61	61.7	11.7	86.0	1006.2	6200	6.16	MBRI-8
Mur-5	61.1	61.8	11.8	86.2	1017.16	4750	4.66	
Mur-6	61.2	61.7	11.8	85.9	1013.62	3970	3.91	
Promedio							4.92	
Coef de variación							0.23	

El promedio de los ensayos del espécimen MBRI-8 fue de 4.92 kg/cm<sup>2</sup> con un coeficiente de variación de 0.23 que es mayor que el coeficiente de variación mínimo ( $c_v \geq 0.2$ ), con lo cual el esfuerzo de diseño por compresión diagonal resultó de  $v_m' = 3.11$  kg/cm<sup>2</sup>. En el caso del espécimen de comparación MBRI-2, el promedio fue 4.8 kg/cm<sup>2</sup> y el valor de diseño  $v_m' = 3.2$  kg/cm<sup>2</sup>. Se observó que prácticamente son los mismos valores resistentes a cortante a pesar de la diferencia de resistencia a compresión de piezas y pilas.

Aprovechando las probetas de muretes estas se pesaron y se obtuvieron valores de peso volumétrico bruto resultando de 1.79 t/m<sup>3</sup> para las piezas de alta resistencia a compresión del MBRI-8, siendo piezas tipo pesado, mientras que las piezas del MBRI-2 dieron 886 kg/m<sup>3</sup>.

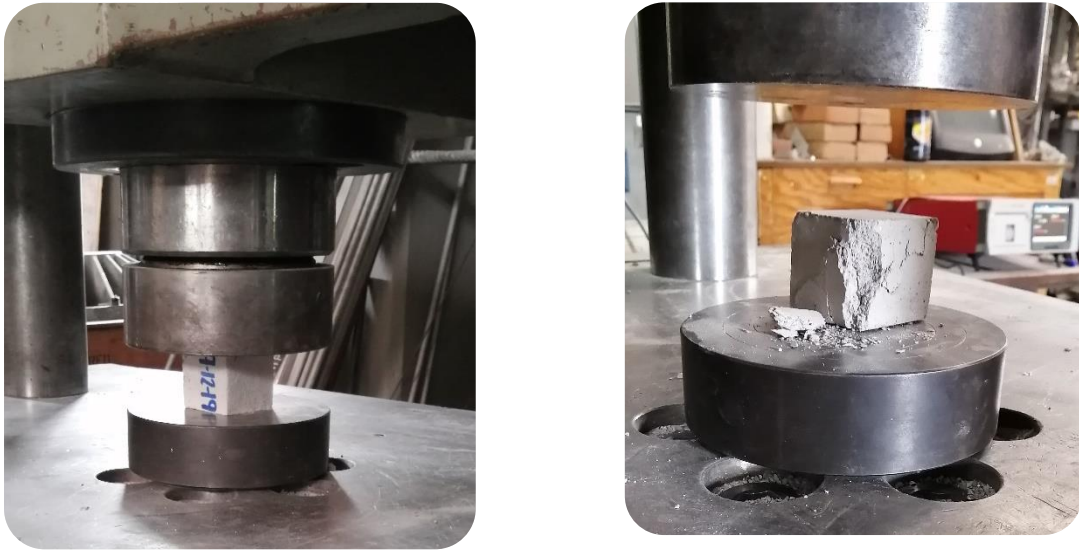
### A.3 COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO

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



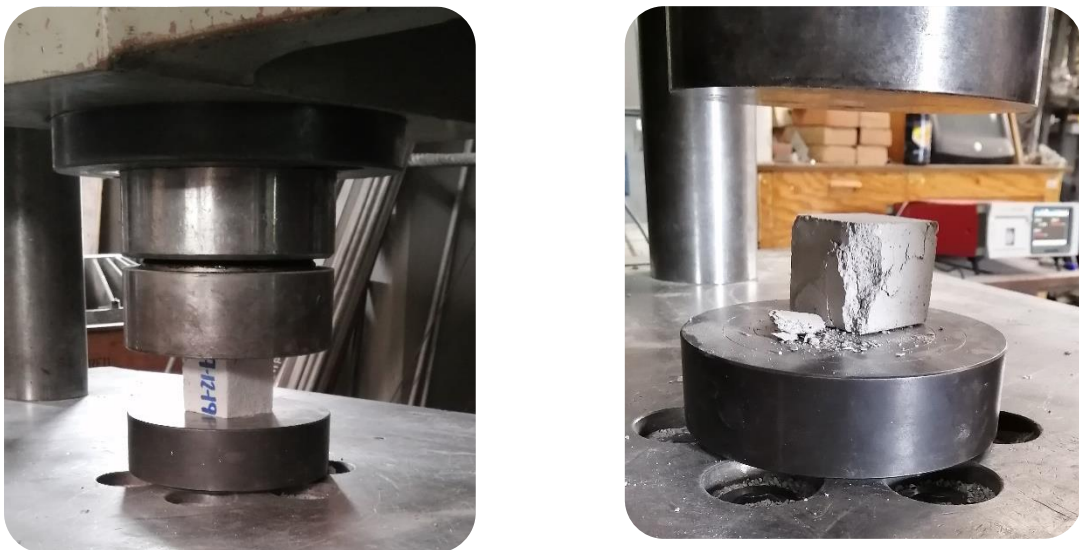
**Figura A.5 Esquema ensaye de cubos de mortero**

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



**Figura A.6** Ensayo de cubos de mortero

Tabla A.3 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.



**Figura A.6** Ensayo de cubos de mortero

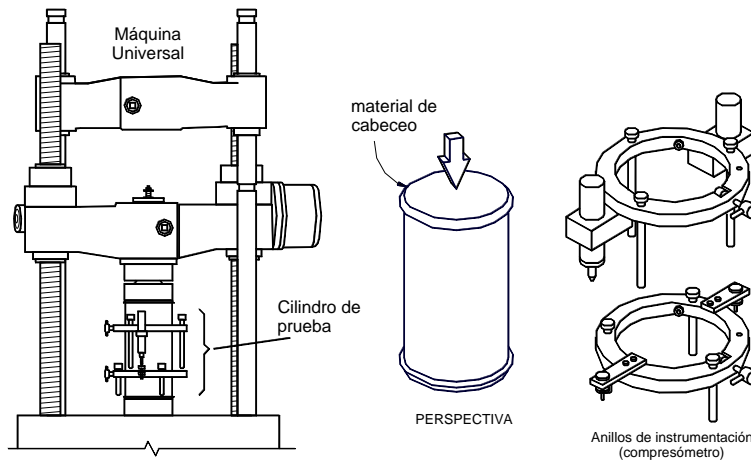
**Tabla A.3 Resultados de ensayos a compresión de cubos de mortero del MBRI-8**

Muestra		Dimensiones, cm			Peso, g	Peso Vol. t/m <sup>3</sup>	Carga kg	Área cm <sup>2</sup>	Esfuerzo kg/cm <sup>2</sup>
Nº	Probeta	a	b	c					
1	1	5.10	5.08	5.12	238	1.95	2585	25.91	99.78
	2	5.10	5.06	5.11	233	2.17	2855	25.81	110.63
	3	5.14	5.06	4.99	228	2.13	2765	26.01	106.31
2	1	5.08	5.08	5.07	235	2.23	2920	25.78	113.26
	2	5.16	5.09	5.14	237	2.16	2915	26.26	110.99
	3	5.10	5.08	5.07	235	1.96	2575	25.91	99.39
Promedio					234.33	2.10	2769.17	25.95	106.73
Coef de variación									0.06

El esfuerzo de compresión promedio fue de 106.73 kg/cm<sup>2</sup>, con un coeficiente de variación de  $c_j = 0.06$ , por lo que el esfuerzo de diseño resulta de 71.2 kg/cm<sup>2</sup>. Cabe señalar que esta resistencia corresponde a mortero tipo II.

**A.4 COMPRESIÓN EN CILINDROS DE CONCRETO DE RELLENO**

En la Figura A.7 se muestra un esquema del cilindro de 10×20 cm, de la instrumentación utilizada, así como de la máquina de prueba. El ensaye se ajustó a la norma mexicana NMX-C-083 (ONNCCE, 2014) y la medición de las deformaciones y cálculo de módulo de elasticidad siguió lo establecido en la norma mexicana NMX-C-128 (ONNCCE, 2013), aunque los ensayos se realizaron a una edad cercana a la fecha del ensaye (más de 28 días). Los cilindros se cabecearon con un yeso con cemento especial para este uso, para garantizar la distribución uniforme de esfuerzos. La prueba fue monótonamente creciente hasta la falla y se controló por carga, con una velocidad constante para una prueba en aproximadamente 3 minutos.





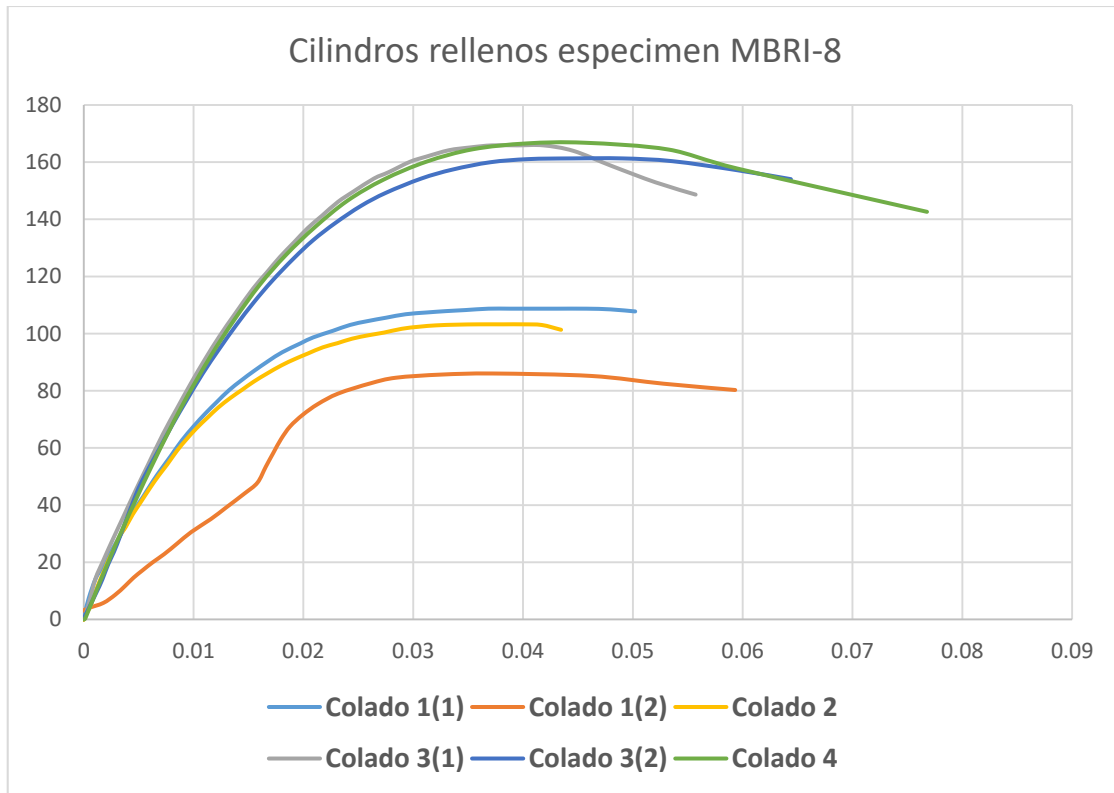


**Figura A.7 Ensayo de cilindros de concreto**

En la Tabla A.4 se muestra el resumen de los resultados de los ensayos de cilindros de concreto.

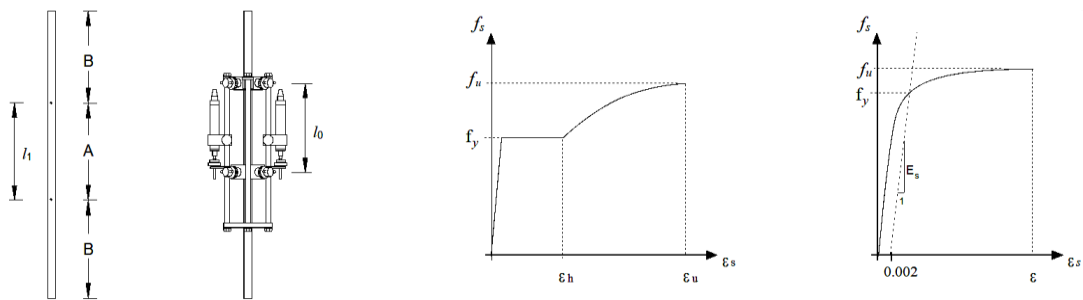
**Tabla A.4 Resultados de ensayos de cilindros de concreto de castillos y dalas**

Nombre	Descripción	Área cm <sup>2</sup>	Carga kg	Esfuerzo $f_c'$ kg/cm <sup>2</sup>
Colado 1 (1)	Relleno de celdas MBRI-8 (30/12/2019)	82.596	8800	106.54
Colado 1 (2)	Relleno de celdas MBRI-8 (30/12/2019)	81.473	6800	83.46
Colado 2	Relleno de celdas MBRI-8 (30/12/2019)	83.485	8500	101.81
Colado 3 (1)	Relleno de celdas MBRI-8 (02/01/2020)	81.873	13200	161.23
Colado 3 (2)	Relleno de celdas MBRI-8 (02/01/2020)	82.516	13000	157.55
Colado 4	Relleno de celdas MBRI-8 (02/01/2020)	83.161	13600	163.54



**Figura A.8** Las gráficas esfuerzo–deformación unitaria axial de los ensayos.

**A.5 TENSIÓN EN BARRAS DE ACERO DE REFUERZO**



**Figura A.9** Ensaye de barras de acero de refuerzo

Para el ensayo de se utilizaron tres barras de No. 6 y tres de 5/32 pulg. Pará ello se requirió de la máquina universal, para el montaje de ambas barras fue necesario utilizar dos tipos de prensa, una para la barra del No. 6 como se puede observar en la Figura A.10 Y otra para la barra de menor diámetro. La barra se debe dividir en tres zonas y con ayuda del vernier se miden estas. Una vez que se marcaron las barras se procede a instrumentar, con un marco el cual esta instrumentado con deformímetros.



**Figura A.10 Preparación de barras de acero de refuerzo**

**Tabla A.5 Resultados de ensayos de barras de acero**

Nombre de probeta	Diám. Nominal cm	Área, cm <sup>2</sup>	Long. calibrada l <sub>0</sub> , cm	Long. inicial l <sub>1</sub> , cm	Long. final l <sub>f</sub> , cm	Alargamiento %	Lectura Máq. Universal			f <sub>y</sub> (TDS), kg/cm <sup>2</sup>	f <sub>u</sub> , kg/cm <sup>2</sup>	Zona de fractura
							P <sub>y</sub> , kg	P <sub>u</sub> , kg	f <sub>y</sub> , kg/cm <sup>2</sup>			
Bar 6-1	1.9	2.85	15.2	20.14	22.21	13.6%	12800	22050	4,491.23	4,473	7,736.84	B
Bar 6-2	1.9	2.85	15.2	20.08	23.56	22.9%	13100	21900	4,596.49	4,714	7,684.21	A
Bar 6-3	1.9	2.85	15.2	19.8	22.23	16.0%	13100	21700	4,596.49	4,591	7,614.04	B
Promedio						17.5			4561.4	4,592.8	7678.4	
Desviación estándar						4.8			60.8	120.3	61.6	
A-5/32-1	0.39	0.123	11.7	10.02	10.22	1.7%	880	985	7,154.47	6,946	8,008.13	B
A-5/32-2	0.39	0.123	11.7	10.19	10.37	1.5%	870	955	7,073.17	6,858	7,764.23	B
A-5/32-3	0.39	0.123	11.7	10.1	10.37	2.3%	880	950	7,154.47	6,583	7,723.58	A
Promedio						1.9			7127.4	6,795.5	7832.0	
Desviación estándar						0.4			46.9	189.1	153.9	

Ya que se instrumentó la barra es colocada en la maquina universal y se fija, al empezar la prueba con ayuda del TDS y la predicción de la cual se tiene una idea cual será la falla, se desatornilla uno de los anillos que contiene el marco en el que se encontraba la barra debido a que la falla es súbita, permitirle que la falla y evitar que alguno de los deformímetros se dañen.





Figura A.11 Ensayo de barras de acero de refuerzo

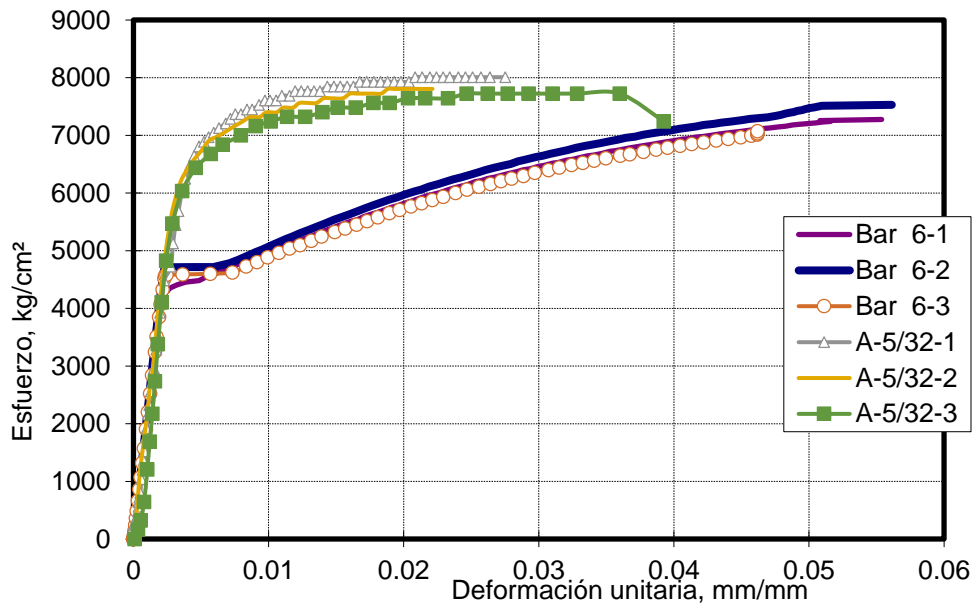
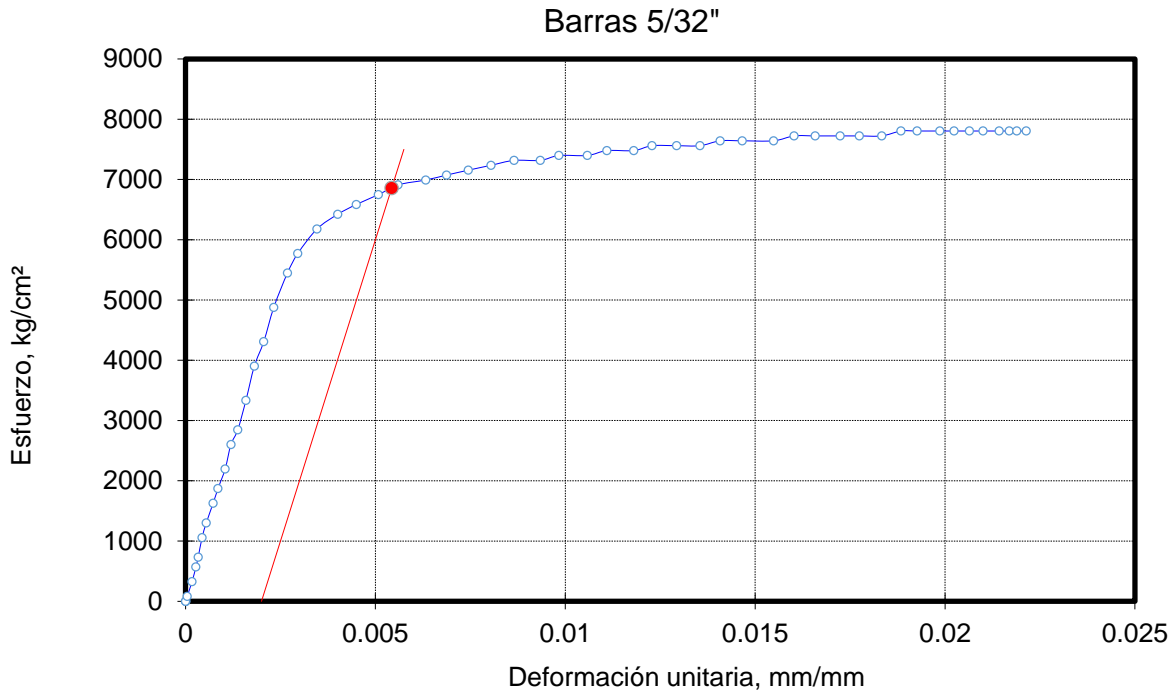


Figura A.12de Gráficas esfuerzo – deformación unitaria de ensayos de barras del no. 6 y 5/23 pulg.



**Figura A.13 Gráficas esfuerzo – deformación unitaria de ensayos de barra 5/23 pulg**

Para obtener el esfuerzo de fluencia de una barra rolada en frío, debido a que no presenta una plataforma de fluencia definida se usa el criterio de la línea desplazada (“offset”) mediante el uso de la gráfica esfuerzo-deformación donde se traza una recta paralela a la parte elástica con su origen iniciando en 0.002 y el cruce con la gráfica define el esfuerzo de fluencia nominal ( $f_y$ ); para mayor precisión de los resultados se obtiene el valor de  $f_y$  interpolando en el tramo de recta definido por los dos puntos contiguos a la zona de cruce con los datos obtenidos en el equipo de adquisición de datos electrónico (TDS).

## REFERENCIAS

Flores L. (2006), “Catálogo de Características de Gatos, Vigas, Placas y otros elementos del LEG, CENAPRED”, documento interno, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, febrero, 18 pp.

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

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

NMX-C-036-ONNCCE (2013), “Industria de la construcción – Mampostería – Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines – Método de ensayo”, Norma Mexicana, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 9 pp.

Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C., (2019), “Edificaciones de mampostería”, Limusa, 1ª edición, ISBN 978-607-05-0861-5, 419 pp.