



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

CONTRIBUCIÓN DEL REFUERZO HORIZONTAL A LA RESISTENCIA A CORTE DE
MUROS CONFINADOS DE PIEZAS DE ARCILLA EXTRUIDA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
LUIS RUBIO PÉREZ

TUTOR
DR. JUAN JOSÉ PÉREZ GAVILÁN ESCALANTE
INSTITUTO DE INGENIERÍA

CDMX, JUNIO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: (Dr. López Bátiz Oscar Alberto)

Secretario: (Dr. Chávez Cano Marcos Mauricio)

Vocal: (Dr. Pérez Gavilán Escalante Juan J.)

1^{er.} Suplente: (Dr. Peña Mondragón Fernando)

2^{do.} Suplente: (M. I. Flores Corona Leonardo Emmanuel)

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM Y CENAPRED

TUTOR DE TESIS:

DR. JUAN JOSÉ PÉREZ GAVILÁN ESCALANTE

FIRMA

Resumen

Se determinó la contribución del refuerzo horizontal a la resistencia a corte de muros de mampostería confinada con castillos exteriores, construidos con piezas extruidas multiperforadas de arcilla. Para tal efecto, se ensayaron 6 muros a escala natural, con las características mencionadas, con distintas cuantías de refuerzo horizontal en las juntas, sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles. Los resultados se presentan en términos de la resistencia al agrietamiento, la resistencia máxima y última y las distorsiones correspondientes. Se presenta también la energía disipada y la degradación de la rigidez con la distorsión.

Se determinó la contribución a la resistencia del refuerzo horizontal mediante mediciones de deformación en los alambres que sirvieron de refuerzo horizontal y se consideró a la resistencia debida a la mampostería como la diferencia entre la resistencia total y la resistencia debida al refuerzo.

Los resultados muestran que la resistencia debida a la mampostería decrece con la cuantía de refuerzo. Este resultado está de acuerdo a lo reportado en otros estudios. Se confirmó también que la resistencia debida al refuerzo tiene un comportamiento elastoplástico, esto es, existe un valor de cuantía para el que ya no es posible aumentar la contribución del refuerzo a la resistencia. A esta cuantía se le conoce como cuantía resistente límite.

Se determinó que la cuantía resistente límite depende de la resistencia a compresión de la mampostería y del área neta de las piezas.

Se presenta una nueva propuesta para determinar la resistencia a corte de muros de mampostería confinada, en la que se incluye este nuevo parámetro.

Finalmente se comparan los valores experimentales de varias campañas experimentales en las que se incluyó como variable la cuantía de refuerzo, incluida la realizada en este estudio, y los valores calculados con las expresiones propuestas. Se observa una mejoría consistente en las predicciones al incluir el área neta de las piezas como parámetro, el factor de área neta.

Aunque la resistencia a compresión de la mampostería alcanzó valores elevados, la capacidad de distorsión de los muros medida como la ductilidad a la resistencia máxima fue muy baja en comparación con otros sistemas de mampostería.

Agradecimientos

El presente estudio fue financiado por NOVACERAMIC, en convenio con la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural y su Comité de Mampostería.

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Estructuras Grandes del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), un especial agradecimiento a Carlos Olmos por su cooperación durante las pruebas de laboratorio y a todos los responsables del laboratorio: Joel Aragón, Dr Oscar López Bátiz.

Agradecemos la participación de los estudiantes que colaboraron en la instrumentación y ensaye de los especímenes durante su servicio social: Ricardo Cruz Enríquez, Rodrigo Esqueda Córdova, Cristian Abimael Hernández Castañeda.

Agradecemos especialmente la participación de Leonardo Flores, miembro del comité de mampostería de la SMIE por sus recomendaciones y apoyo durante los ensayos.

A la empresa NOVACERAMIC por el financiamiento de los ensayos.

Al instituto de ingeniería, por las facilidades del préstamo de equipo del laboratorio.

Contenido

Resumen.....	3
Agradecimientos.....	4
Notación	7
Capítulo 1. Introducción	8
Capítulo 2. Antecedentes	10
2.1. Investigaciones realizadas en México	10
2.2. Sánchez, Flores Corona, & Meli, 1992.....	11
2.3. Alcocer, Zepeda, & Ojeda Ziga, 1997	12
2.4. Aguilar & Alcocer, 2001.....	14
2.5. Pineda & Alcocer, 2004	16
2.6. Cruz Olayo & Pérez Gavilán, 2015.....	17
Capítulo 3. Resistencia a cortante de acuerdo a las Normas técnicas complementarias de mampostería 2004 y 2017	21
3.1. Ecuaciones de resistencia a cortante de acuerdo a las NTCM 2004	21
3.1.1. Inconsistencias observadas.....	22
3.2. Expresiones de resistencia en las NTCM 2017	23
3.3. Cuantía resistente efectiva	24
Capítulo 4. Programa experimental	25
4.1. Descripción de especímenes.....	25
4.2. Instrumentación interior y exterior	26
4.3. Materiales	28
4.4. Marco de carga	29
4.5. Historia de carga	30
Capítulo 5. Resultados	32
5.1. Resistencia y distorsión.....	32
5.2. Curvas de histéresis.....	32
5.3. Patrones de agrietamiento	34
5.4. Envolventes.....	38
5.5. Envolvente elastoplástica equivalente.....	39
5.6. Deformaciones y ductilidades.....	39
5.7. Componentes de la fuerza cortante del muro	40
5.7.1. Resistencia debida al refuerzo	40
5.7.2. Resistencia debida a la mampostería.....	42
5.8. Determinación de la cuantía límite	42

5.9. Disipación de energía	43
5.10. Rigidez de ciclo	44
Capítulo 6. Discusión	45
6.1. Cuantía límite	46
6.2. Resistencia debida a la mampostería.....	48
6.3. Capacidad de distorsión	49
Conclusiones.....	50
Referencias	51
Apéndice A. Modelo elastoplástico equivalente	53
Ejemplo	54
Apéndice B. Historia de esfuerzos en el refuerzo horizontal	56
Apéndice C Propiedades mecánicas de los materiales.....	59
C.1 Pruebas de compresión de pilas de mampostería	59
C.2 Ensaye de piezas	60
C.3 Mortero.....	61
C.4 Prueba de compresión diagonal de muretes de mampostería.....	64
C.5 Pruebas de cilindro de concreto	65

Notación

A_s	área de acero de refuerzo horizontal en una junta
A_T	área transversal, cm^2 .
E_m	módulo de elasticidad de la mampostería, MPa
f_c	resistencia promedio a compresión del concreto, MPa
f_j	resistencia promedio a compresión del mortero, MPa
f_m	resistencia promedio a compresión de las pilas, MPa
f_p	resistencia promedio a compresión de la pieza, MPa
f_{an}	factor de área neta = área neta entre área bruta de las piezas
H	altura del muro, cm.
L	longitud del muro, cm.
n	número de niveles en una estructura
p_h	porcentaje de acero de refuerzo horizontal = $A_s/(s \times t)$
$p_h f_{yh}$	cuantía por esfuerzo de fluencia del acero horizontal, MPa
Q	factor de comportamiento sísmico, tomado como ductilidad global de la estructura
q	= $p_h f_{yh}$ cuantía de acero resistente de refuerzo horizontal, MPa
q_e	cuantía resistente efectiva
q_ℓ	cuantía resistente límite
s	separación del refuerzo horizontal, mm
t	espesor del muro, mm.
V_0	resistencia máxima de un muro sin refuerzo horizontal, kN
V_{mR}	fuerza cortante que toma la mampostería kN
V_R	resistencia del muro ante cargas laterales, kN.
V_{sR}	fuerza cortante de diseño que toma el acero de refuerzo horizontal kN
γ	distorsión = δ/H , desplazamiento lateral entre la altura del muro.
λ	constante que relaciona la resistencia a compresión y la cuantía resistente límite
μ	ductilidad = γ/γ_y
μ_1	distorsión de una estructura en el primer nivel
τ_c	esfuerzo cortante resistente calculado, MPa
τ_{exp}	esfuerzo cortante resistente, obtenido experimentalmente, MPa

Capítulo 1. Introducción

El sistema constructivo a base de muros de mampostería es muy utilizado en México para viviendas unifamiliares y multifamiliares principalmente por su bajo costo inicial (Aguilar & Alcocer, 2001). El uso de este sistema permite ahorrar tanto en material como en los tiempos de ejecución de la obra (Hernández & Meli Piralla, 1976).

Uno de los elementos estructurales de mayor importancia en viviendas multifamiliares son los muros que se encuentran ubicados en la planta baja, pues en estructuras de mampostería, son los que reciben mayor demanda en cuanto a ductilidad y resistencia cuando las estructuras son sometidas a cargas laterales. Para mejorar su capacidad de resistencia y ductilidad, se han utilizado diferentes tipos de refuerzo horizontal, como: el tipo escalerilla (Sanchez, et al., 1992), la malla electrosoldada (Aguilar & Alcocer, 2001) y la barra longitudinal de alta resistencia comúnmente conocido como varillín (Cruz Olayo, 2015).

Se han realizado estudios de la contribución de refuerzo horizontal a la resistencia a corte y se ha notado que el refuerzo horizontal mejora la resistencia de los muros sin incrementar significativamente su costo. Estudios realizados en México (Aguilar & Alcocer, 2001) muestran que considerando el costo por tonelada resistida puede concluirse que es más económico construir muros con refuerzo horizontal que muros sin dicho refuerzo.

La construcción de vivienda en la ciudad de México debe cumplir las normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de Mampostería del Gobierno de la Ciudad de México. Recientemente, en un estudio realizado por (Cruz Olayo, 2015), se describen inconsistencias en las (NTCM, 2004) en cuanto a la contribución de refuerzo horizontal a la resistencia a corte de muros con refuerzo horizontal. Se muestran dos escenarios, en el primero de ellos se estudia la resistencia a corte de un muro construido con piezas de baja resistencia a la compresión con cuantía mínima de acero; en el segundo escenario se analiza la resistencia a corte de un muro construido con piezas de una resistencia a compresión mayor que en el primer caso y reforzado con la cuantía máxima de acero horizontal. Se demuestra que, de acuerdo a las NTCM 2004, el muro del primer escenario tiene una resistencia a corte mayor que el muro en el segundo caso.

En un esfuerzo por comprender la contribucion del refuerzo horizontal a la resistencia y revertir este tipo de incosistencia (Cruz Olayo, 2015) realizaron un estudio experimental. Ensayaron 6 muros cuadrados con piezas de concreto, el primero de los muros sin refuerzo horizontal y los demas con cuantias desde $p_h f_{yh}$ de 2.31 hasta 15.77 kg/cm². Los muros se ensayaron aplicando cargas ciclicas con niveles crecientes de deformación. Se utilizaró como refuerzo horizontal varillas corrugadas de alta resistencia de acero estirado en frio con resistencia a la fluencia de diseño de 6000 kg/cm². La barras se colocaron en las juntas con un espaciamiento vertical uniforme y sin traslapes a lo largo del muro. Las varillas se anclaron con ganchos de 90 grados dentro de los castillos. En la investigacion se obervó que en los muros reforzados con refuerzo horizontal se tuvo una distribucion del daño mas uniforme y que, en la etapa del comportamiento inelastico, se incremento la capacidad de deformación, la dicipacion de energía y la estabilidad del muro.

Con lo observado en el estudio, se propusieron nuevas expresiones para estimar la resistencia a corte de muros de mampostería. En dichas expresiones la contribución del refuerzo horizontal a la resistencia se cambió sustancialmente con respecto a lo especificado en las NTCM 2004 corrigiendo las inconsistencias mencionadas anteriormente. Sin embargo, dicha propuesta depende de parámetros estimados como la cuantía resistente límite, obtenida con escasa información experimental.

Con el fin de complementar la información experimental disponible de muros con distinta cuantía de refuerzo y distinto tipo de mampostería, se planteó el presente estudio. Al igual que en el estudio de Cruz se ensayaron 6 muros con relación de aspecto igual a la unidad, variando la cuantía de refuerzo horizontal. En este estudio se utilizaron piezas extruidas multiperforadas de arcilla.

Como resultado de las investigaciones que aquí se reportan, está la inclusión del factor de área neta (área neta/área bruta) para determinar la contribución máxima del refuerzo horizontal a la resistencia.

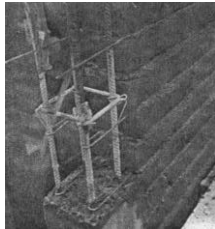
Esta investigación tuvo los siguientes objetivos:

- 1) Conocer la contribución del refuerzo horizontal a la resistencia a cortante de muros de mampostería de piezas multiperforadas de arcilla, confinados con castillos exteriores.
- 2) Determinar la capacidad de distorsión de muros hechos con piezas de arcilla extruida en función de la cantidad de refuerzo horizontal.
- 3) Verificar la nueva propuesta para estimar la resistencia a corte de muros de mampostería confinados especialmente en lo que se refiere a la cuantía resistente límite y, en su caso, hacer los ajustes necesarios

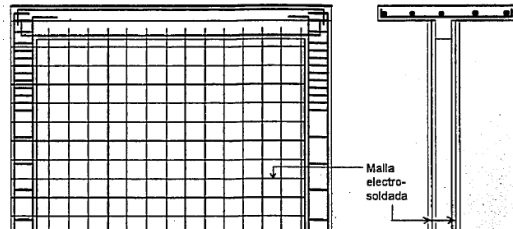
Capítulo 2. Antecedentes

2.1. Investigaciones realizadas en México

Se han estudiado muros de mampostería sometidos a carga lateral cíclicas y reversibles con distintos tipos de piezas y tipos de refuerzo horizontal: con piezas macizas de barro y refuerzo mediante escalerilla de alambres electrosoldados (Sanchez, et al., 1992), con piezas artesanales y malla electrosoldada (Pineda & Alcocer, 2004) con piezas artesanales (Aguilar & Alcocer, 2001), piezas multiperforadas de concreto (Cruz Olayo, 2015) o piezas extruidas de barro (Alcocer, et al., 1997) los tres con barras de alta resistencia (Figura 2.1).



Escalerilla (Sanchez, et al., 1992)



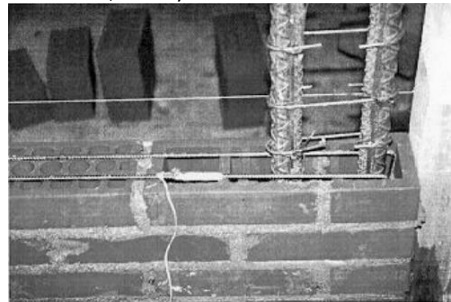
Malla electrosoldada (Pineda & Alcocer, 2004)



Refuerzo horizontal (Aguilar & Alcocer, 2001)



Refuerzo horizontal (Cruz Olayo, 2015)



Refuerzo horizontal (Alcocer, et al., 1997)

Figura 2.1 Tipos de refuerzo horizontal

A continuación se describen los objetivos, las características generales de los especímenes, algunas variables de estudio y también se presentan algunas de las conclusiones a las que han llegado cada uno de los distintos estudios realizados en México.

2.2. Sánchez, Flores Corona, & Meli, 1992

El estudio realizado por estos autores consiste de tres muros denominados: WBW, WBW-B y WBW-E. El primer modelo fue sin refuerzo horizontal (WBW), considerado como modelo de referencia, y adicionalmente dos muros con refuerzo horizontal, el primero con refuerzo de alta resistencia, WBW-B, y el segundo con refuerzo tipo escalerilla, WBW-E.

1. Objetivos:

- Verificar la seguridad sísmica de estructuras de mampostería
- Conocer en mayor detalle la respuesta sísmica de estructuras de mampostería
- Estudiar el efecto del refuerzo horizontal en la respuesta ante cargas laterales cíclicas.

2. Características generales de los especímenes:

- Tabiques de barro recocido de dimensiones de 25 cm × 12.5 cm × 6.5 cm
- La geometría de los muros fue de 500 cm de longitud, espesor de 12.5 cm y de altura de 250 cm y con una abertura en forma de puerta en el centro de 100 cm, (Figura 2.2).

3. Variables :

- El modelo de control WBW no contenía refuerzo horizontal en las juntas de mortero.
- El tipo de refuerzo para el modelo WBW-E fue con escalerilla con diámetro igual a 3.43 mm y con esfuerzo de fluencia nominal de 5000 kg/cm². La cuantía de refuerzo horizontal fue igual a:

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{2 \times 0.092 \text{ cm}^2}{14 \text{ cm} \times 12.5 \text{ cm}} = 0.00106$$
$$p_h f_{yh} = 5.3 \text{ kg/cm}^2$$

El refuerzo para el modelo WBW-B fue con barras corrugadas con un diámetro nominal de 3.96 mm y esfuerzo de fluencia de 6000 kg/cm². La cuantía de refuerzo horizontal para este modelo fue igual a:

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{2 \times 0.124 \text{ cm}^2}{21 \text{ cm} \times 12.5 \text{ cm}} = 0.00094$$
$$p_h f_{yh} = 5.66 \text{ kg/cm}^2$$

4. Conclusiones :

- Las deformaciones a corte gobernaron la respuesta en todos los modelos.
- Las conclusiones para el caso del modelo WBW-E fueron:

Exhibieron fallas frágiles en los puntos de soldadura.

No incrementan en forma importante la resistencia a corte del modelo

La cantidad de refuerzo horizontal no tuvo ningún efecto en la rigidez inicial de los modelos

- Las conclusiones para el caso del modelo WBW-B fueron:

El refuerzo horizontal con barras corrugadas logró una distribución más uniforme del agrietamiento diagonal en los tableros de mampostería.

A distorsiones moderadas, la respuesta estuvo asociada a un comportamiento dúctil.

Después de haber alcanzado la resistencia máxima, exhibe un abrupto deterioro de la estructura.

La cantidad de refuerzo horizontal no tuvo ningún efecto en la rigidez inicial.

Presento 69% de resistencia a carga lateral mayor que el modelo sin refuerzo horizontal WBW.

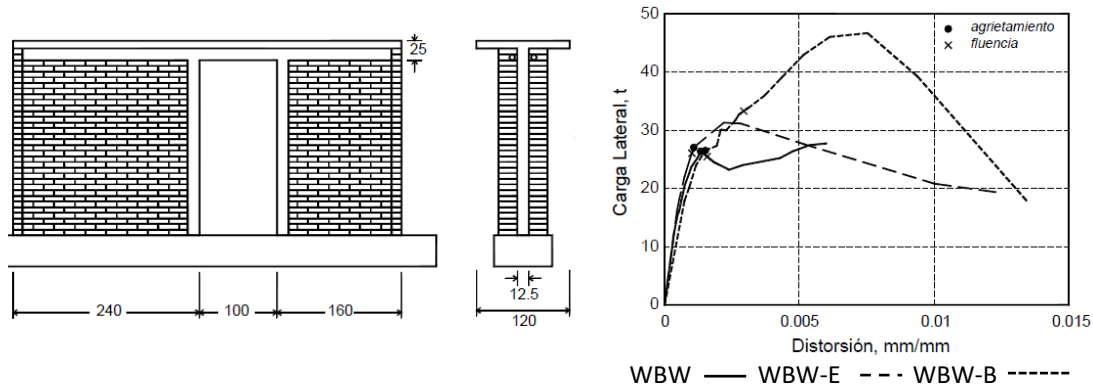


Figura 2.2 Geometría general y envoltura de respuesta (WBW, WBW-E, WBW-B)

2.3. Alcocer, Zepeda, & Ojeda Ziga, 1997

El estudio consiste en cuatro muros de mampostería de ladrillo extruido denominados: N1, N2, N3, y N4, con diferentes tipos de elementos confinantes. Las dimensiones de longitud y altura fueron de 250 cm (Figura 2.3) para todos los muros. El primer muro de mampostería fue sin refuerzo horizontal considerada como modelo de control, N1. En el segundo y tercer muro (N2 y N3) se utilizó la cuantía mínima. El último muro, N4, se construyó con cuantía de refuerzo horizontal cuatro veces la cuantía mínima, aproximadamente.

1. Objetivos :

- Determinar la contribución del acero de refuerzo horizontal a la resistencia de muros de ladrillos extruidos
- Estudiar el mecanismo resistente a carga lateral
- Evaluar el comportamiento ante cargas laterales cíclicas y reversibles de muros con distintas cuantías de refuerzo horizontal y con distintas disposiciones de acero transversal en los castillos.

2. Características generales de los especímenes:

- Ladrillos multiperforados (Multex) y doble hueco vertical (Vintex) de dimensiones largo ancho y espesor de $24 \times 12 \times 6$ cm.
- La geometría general de los muros fueron cuadrados con una longitud de 250 cm y espesor de 12 cm.
- El esfuerzo vertical aplicado fue de 4 kg/cm^2

3. Variables :

- El modelo de control, N1, no contenía refuerzo horizontal.

- El tipo de refuerzo horizontal para el modelo N2 y N3 fue de barras corrugadas con un diámetro nominal de 3.96 mm y esfuerzo de fluencia de 6000 kg/cm². La cuantía de refuerzo horizontal fue igual a

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{0.124 \text{ cm}^2}{21 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}} = 0.0005$$

$$p_h f_{yh} = 3 \text{ kg/cm}^2$$

La diferencia entre los modelos N2 y N3 fue en el tipo de castillo. Para el muro N2, se utilizaron castillos interiores usando las piezas doble hueco tipo Vintex para alojar el refuerzo longitudinal (Figura 2.1). Para el modelo N3, se utilizaron castillos exteriores en sus extremos.

- El refuerzo horizontal para el modelo N4 fue con dos barras corrugadas de 6.35 mm de diámetro, colocadas a cada cuatro hiladas. El esfuerzo de fluencia del acero de las barras fue de 6000 kg/cm². La cuantía de refuerzo horizontal fue igual a

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{2 \times 0.316 \text{ cm}^2}{28 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}} = 0.00188$$

$$p_h f_{yh} = 11.34 \text{ kg/cm}^2$$

En el modelo N4 se utilizaron castillos interiores usando las piezas doble-hueco tipo Vintex para alojar el refuerzo longitudinal, eliminando la pared central de la pieza para duplicar la dimensión del castillo.

5. Conclusiones :

- Las deformaciones a corte gobernaron la respuesta en todos los modelos.
- La participación del refuerzo horizontal a la resistencia lateral dependió del nivel de desplazamiento del muro.
- Conforme aumenta el producto $p_h f_y$, disminuyó el factor de eficiencia del refuerzo horizontal, η .
- El incremento en resistencia a carga lateral debido al refuerzo horizontal no es directamente proporcional a la cuantía.
- Se propone que la resistencia de muros con refuerzo horizontal grado 60 colocado entre hiladas se calcule con la expresión.

$$V_u = F_R [(0.5v^* A_T + 0.3P) + \eta p_h f_y A_T]$$

$$\eta = \frac{2}{3} \text{ si } p_h f_{yh} \leq 6 \text{ kg/cm}^2 \text{ y } \eta = \frac{2}{5} \text{ si } p_h f_{yh} \geq 10 \text{ kg/cm}^2. \text{ Para valores de cuantía entre } 6 \text{ kg/cm}^2 \text{ y } 10 \text{ kg/cm}^2 \text{ se interpolaría linealmente.}$$
- En los modelos N2 y N3 el modo de falla fue controlado por la rotura de los alambres horizontales. El mayor beneficio, en cuanto al aumento de resistencia, se obtuvo para cuantías cercanas a la mínima, $p_h = 0.0005$.
- El modelo N4 falló por el efecto combinado de compresión y cortante en la parte superior del muro. La eficiencia del refuerzo fue menor para el muro N4 que para los muros N2 y N3.
- En general, los muros reforzados horizontalmente en comparación con el muro de control exhibieron: mayor capacidad a deformación, mayor resistencia a cargas laterales, una degradación de resistencia ante carga lateral menos pronunciada, una distribución de daño más uniforme en el muro y menores anchuras de grietas.

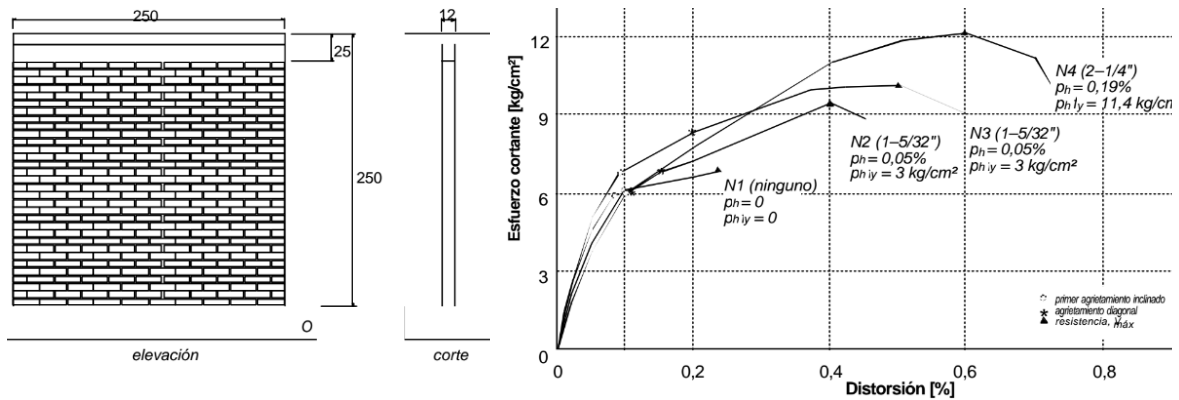


Figura 2.3 Geometría y Envoltura de respuesta (N1, N2, N3 y N4)

2.4. Aguilar & Alcocer, 2001

En el estudio se ensayaron cuatro muros denominados M1, M2, M3 y M4, con longitud y altura de 250 cm. El modelo de control, sin refuerzo horizontal, fue el muro M2. La cuantía de refuerzo horizontal para el muro M1 fue igual a 8.9 kg/cm², para el muro M3 fue de 4.3 kg/cm² y para el modelo M4 fue igual a 11.4 kg/cm².

1. Objetivos:

- La determinación de la contribución del acero de refuerzo horizontal en la resistencia de muros de mampostería confinada.
- El estudio del mecanismo resistente a carga lateral.
- Evaluación del comportamiento ante carga lateral cíclica y reversible de muros con distintas cuantías y tipos de refuerzo horizontal y con diferentes disposiciones de acero transversal en los castillos.
- La valoración de la facilidad de construcción de mampostería confinada con refuerzo horizontal.

2. Características generales de los especímenes:

- Piezas de barro recocido de fabricación tradicional de dimensiones largo, ancho y espesor de 24 × 12 × 6 cm
- La geometría general de los muros tenían una longitud y altura de 250 cm, con espesor de 12 cm, (
- Figura 2.4).
- El esfuerzo vertical aplicado fue de 5 kg/cm².

3. Variables:

- El modelo de control M2 no contenía refuerzo horizontal.
- El muro M1, se reforzó con una barra corrugada, de 9.52 mm de diámetro nominal, colocada a cada cuatro hiladas. El esfuerzo de fluencia del acero de las barras fue de 4200 kg/cm². La cuantía de refuerzo horizontal fue igual a

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{1 \times 0.712 \text{ cm}^2}{28 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}} = 0.00211$$

$$p_h f_{yh} = 8.9 \text{ kg/cm}^2$$

- El muro M3, se reforzó con dos barras corrugadas de 3.96 mm de diámetro nominal, a cada cuatro hiladas. El esfuerzo de fluencia del acero de las barras fue de 6000 kg/cm². La cuantía de refuerzo horizontal fue igual a

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{2 \times 0.124 \text{ cm}^2}{28 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}} = 0.00073$$

$$p_h f_{yh} = 4.3 \text{ kg/cm}^2$$

- El modelo M4 se reforzó con dos barras corrugadas de 6.35 mm de diámetro nominal a cada cuatro hiladas. El esfuerzo de fluencia del acero de las barras fue de 6000 kg/cm². La cuantía de refuerzo horizontal fue igual a

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{2 \times 0.317 \text{ cm}^2}{28 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}} = 0.00188$$

$$p_h f_{yh} = 11.4 \text{ kg/cm}^2$$

4. Conclusiones:

- El agrietamiento en el modelo de control, M1, mostró una inclinación de 45° aproximadamente.
- Al término del ensaye del muro M4, las deformaciones por flexión participaron en forma importante en el comportamiento general.
- Se estableció una ecuación que permite calcular la resistencia de muros de mampostería con refuerzo horizontal

$$V_u = F_R [(0.5v^* A_T + 0.3P) + \eta P_h f_y A_T]$$

$\eta = \frac{2}{3}$, si $p_h f_{yh} \leq 6 \text{ kg/cm}^2$ y $\eta = \frac{1}{4}$ si $p_h f_{yh} \geq 9 \text{ kg/cm}^2$. Para valores de cuantía entre 6 kg/cm² y 9 kg/cm² se interpolaría linealmente.

- La anchura de grietas por corte y por flexión disminuyó con la colocación del refuerzo horizontal.
- La participación del refuerzo horizontal en la resistencia ante cargas laterales se evaluó mediante el cálculo de un factor de eficiencia, η . Se encontró que el factor de eficiencia del refuerzo horizontal depende tanto de la cuantía de refuerzo como del nivel de distorsión en el muro.

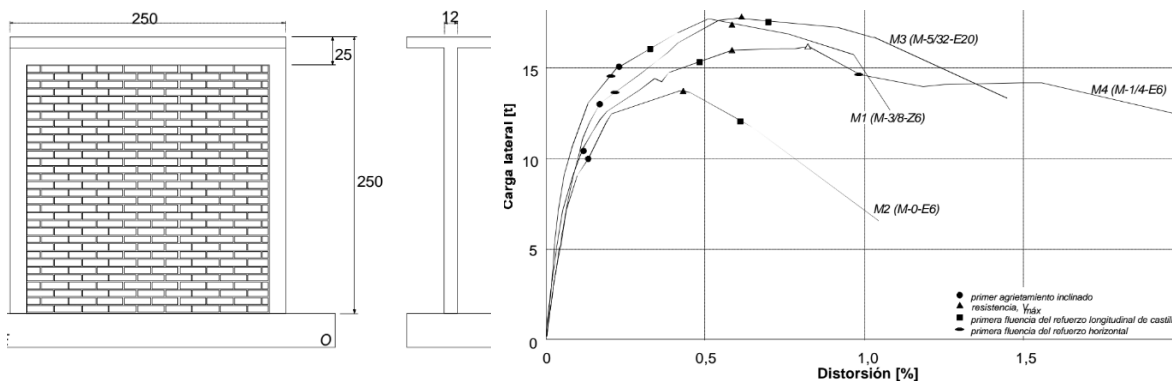


Figura 2.4 Geometría y envolvente de respuesta (M1, M2, M3 y M4).

2.5. Pineda & Alcocer, 2004

El estudio consiste en cuatro muros con geometría general de 250 cm de longitud y de 250 cm de altura, (Figura 2.5). Tres muros denominados M-072, M-147, M-211 fueron de mampostería confinada. El refuerzo horizontal de los tres modelos fue con mallas de alambre soldado. El cuarto muro fue denominado M-250 y consistió en un muro de concreto reforzado de 10 cm de espesor, para este muro, el refuerzo horizontal fue con barras longitudinales con esfuerzo de fluencia nominal de 420 MPa.

1. Objetivos:

- Estudiar la influencia del refuerzo con malla de alambre soldado en muros de mampostería sometidos a cargas laterales.
- Estudiar el mecanismo resistente a carga lateral
- Evaluar los sistemas de anclaje empleados para colocar la malla en cada cara de los muros.
- Comparar el comportamiento de los muros de mampostería reforzados con malla de alambre soldado con un muro de control de concreto reforzado con una cuantía mínima.

2. Características generales de los especímenes de mampostería.

- Se usó tabique rojo de arcilla cuyas dimensiones fueron 6×12.5×24 cm
- Tres de los modelos fueron de mampostería confinada y reforzados por ambas caras con mallas de alambre de acero, recubiertas con mortero tipo I con un espesor de 25 mm.

3. Variables:

- El modelo M-072, M-147 y M-211 fueron reforzados con mallas de alambre de acero con esfuerzo de fluencia de 500 MPa, la cuantía de refuerzo horizontal fue igual a:

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{2 \times 0.092 \text{ cm}^2}{15.2 \text{ cm} \times 12.5 \text{ cm}} = 0.00097$$
$$p_h f_{yh} = 0.47 \text{ MPa}$$

- Para el modelo M-147, la cuantía de refuerzo horizontal fue igual a:

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{2 \times 0.187 \text{ cm}^2}{15.2 \text{ cm} \times 12.5 \text{ cm}} = 0.00197$$
$$p_h f_{yh} = 0.96 \text{ MPa}$$

- Para el modelo M-211, la cuantía de refuerzo horizontal fue igual a:

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{2 \times 0.317 \text{ cm}^2}{15.2 \text{ cm} \times 12.5 \text{ cm}} = 0.00333$$
$$p_h f_{yh} = 1.63 \text{ MPa}$$

- Para el modelo M-250, el refuerzo horizontal fue dado por barras longitudinales del No. 3. La cuantía de refuerzo horizontal fue igual a:

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{0.713 \text{ cm}^2}{30 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}} = 0.0024$$
$$p_h f_{yh} = 1.02 \text{ MPa}$$

4. Conclusiones:

- En los muros de mampostería, la primera grieta inclinada se presentó a la misma distorsión, 0.1%, el cortante de agrietamiento ocurrió a 0.2% de distorsión y la carga máxima se alcanzó a una distorsión de 0.6% (excepto en el modelo M-147). En el muro de concreto reforzado, la primera grieta inclinada se presentó a una distorsión del 0.05%
- El muro M-072 falló por cortante en forma frágil luego de que todos los alambres de la malla cruzados por una diagonal del muro se rompieron en cadena.
- Se obtuvo un incremento del 25% en la resistencia del muro de mampostería M-211, en comparación con el muro de mampostería M-072.

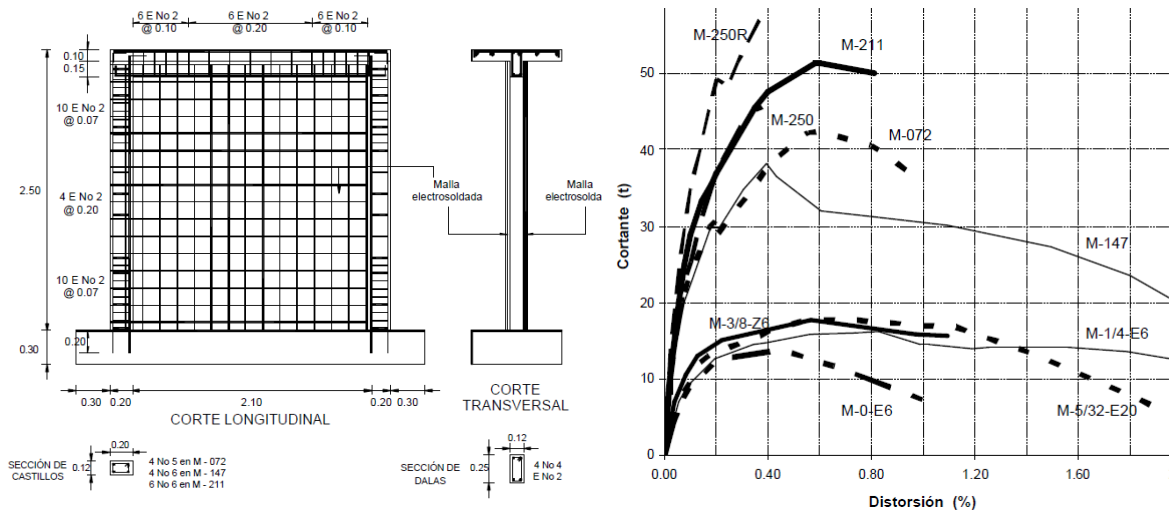


Figura 2.5 Geometría y envolvente de respuesta (M-072, M-211, M-147, M-250 y M-250-R).

2.6. Cruz Olayo & Pérez Gavilán, 2015

En este estudio se ensayaron seis muros de mampostería de bloque liso multiperforado de concreto. Los especímenes se denominaron: MB-0, MB-1, MB-2, MB-3, MB-4 y MB-5, con cuantía variable de refuerzo horizontal. Las dimensiones de longitud y altura fueron de 256 cm (Figura 2.6) para todos los muros. El primer muro de mampostería, MB-0, considerado como modelo de control, no tuvo refuerzo horizontal. En los muros restantes, se utilizó refuerzo horizontal con esfuerzo de fluencia nominal de 600 MPa.

1. Objetivos:

- Conocer la eficiencia η del acero de refuerzo horizontal de los especímenes con su cuantía respectiva y comparar las diferencias entre los resultados experimentales con los calculados con la expresión de diseño de la (NTCM, 2004).
- Con base en los resultados obtenidos, revisar los límites de cuantía de refuerzo mínimo y máximo permitidos para el caso de mampostería hecha a base de piezas de bloque de concreto.

- Al comparar con los resultados de estudio previos en los que se utilizaron otros materiales, determinar la posible relación entre la resistencia a compresión de la mampostería, la eficiencia y con los límites mínimo y máximo de cuantía de acero horizontal.
- De acuerdo con lo observado en la etapa experimental, proponer una alternativa de procedimiento simple de cálculo, que determine la resistencia a carga lateral de muros de mampostería confinada con refuerzo horizontal.

2. Características generales de los especímenes

- Se usó bloque liso multiperforado de concreto con dimensiones nominales de 11.9 × 11.9 × 24 cm
- La geometría general de los muros tenía una longitud y altura de 256 cm, con espesor de 12 cm.
- El esfuerzo vertical aplicado fue de 0.47 MPa.

3. Variables:

La única variable del estudio fue la cuantía de refuerzo.

El modelo MB-0 no tuvo refuerzo horizontal.

- El modelo MB-1 fue reforzado con una barra con diámetro de 4 mm a cada 2 hiladas. La cuantía de refuerzo horizontal fue igual a:

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{0.12 \text{ cm}^2}{26 \text{ cm} \times 11.9 \text{ cm}} = 0.00039$$

$$p_h f_{yh} = 0.23 \text{ MPa}$$

- El modelo MB-2 fue reforzado con una barra de diámetro 0.64 cm a cada 2 hiladas. La cuantía de refuerzo horizontal fue igual a:

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{0.32 \text{ cm}^2}{26 \text{ cm} \times 11.9 \text{ cm}} = 0.00102$$

$$p_h f_{yh} = 0.66 \text{ MPa}$$

- El modelo MB-3 fue reforzado con tres barras, dos de diámetro 0.48 cm y una de diámetro de 0.40 cm a cada 2 hiladas. La cuantía de refuerzo horizontal fue igual a:

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{0.48 \text{ cm}^2}{26 \text{ cm} \times 11.9 \text{ cm}} = 0.00153$$

$$p_h f_{yh} = 0.90 \text{ MPa}$$

- El modelo MB-4 fue reforzado con dos barras de diámetro de 0.64 cm a cada 2 hiladas. La cuantía de refuerzo horizontal fue igual a:

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{0.64 \text{ cm}^2}{26 \text{ cm} \times 11.9 \text{ cm}} = 0.00205$$

$$p_h f_{yh} = 1.21 \text{ MPa}$$

- El modelo MB-5 fue reforzado con tres barras, dos de diámetro 0.64 cm y una de diámetro de 0.48 cm a cada 2 hiladas. La cuantía de refuerzo horizontal fue igual a:

$$p_h = \frac{A_s}{s \times t} = \frac{0.82 \text{ cm}^2}{26 \text{ cm} \times 11.9 \text{ cm}} = 0.00262$$

$$p_h f_{yh} = 1.54 \text{ MPa}$$

4. Conclusiones:

- El acero de refuerzo horizontal incrementa la resistencia a cortante de los muros confinados hasta cierta cuantía llamada cuantía límite y posteriormente deja de aumentar.

- La distribución de daño de los muros aumenta con la cuantía de refuerzo horizontal, lo cual provoca un aumento en el ancho del puntal de compresión.
- Se observa que la variación en la eficiencia respecto a la cuantía no es conveniente para resistencias a compresión altas de mampostería, por lo que es más conveniente mantenerla fija respecto a la cuantía y variable respecto a la resistencia a compresión.
- Se hace una propuesta de cálculo de resistencia a cortante de muros cuya premisa es la estimación de la participación de la mampostería y el acero que ocurren simultáneamente en el que se presenta el máximo de resistencia a cortante.

$V_R = k_0 k_1 V_{agr} + V_{SR}$	Resistencia a cortante del muro
$V_{SR} = A_t q_v \eta$	Resistencia a cortante del acero
$V_{mR} = k_0 k_1 V_{agr}$	Resistencia a cortante de la mampostería
V_{agr}	Resistencia de la mampostería al agrietamiento.
k_0	Factor para obtener la resistencia máxima (posterior al agrietamiento) de la mampostería sin refuerzo horizontal.

$$k_0 = \begin{cases} 1 & \frac{H}{L} > 1 \\ 1.3 & \frac{H}{L} \leq 1 \\ \text{se interpola} & 1.5 < \frac{H}{L} < 1 \end{cases} \quad k_1 = 1 - \alpha q_v = 1 - 0.045 q_v \quad (q_v \text{ en kg/cm}^2)$$

$$q_v = \begin{cases} p_h f_{yh} & p_h f_{yh} \leq q_l \\ \lambda f_m & p_h f_{yh} > q_l \end{cases} \quad q_l = \lambda f_m \quad \lambda = 0.1$$

Los valores propuestos de eficiencia en porcentaje, η , son:

Resistencia a compresión de la mampostería f_m (kg/cm ²)	Eficiencia del acero de refuerzo η (%)
Menor que 30	0
30-60	55
60-90	65
90 en adelante	75
Refuerzo con malla electrosoldada	50

De un estudio hecho por (Pérez Gavilán & Manzano, 2013).

$$V_{agr} = (0.5 v_m A_T + 0.3 P) \cdot f - \frac{M_a}{H_k} \leq 1.5 v_{m A_T} \cdot f$$

$$f = \begin{cases} 1.55 & \frac{H_e}{L} < 0.2 \\ 1.69 - 0.69 \frac{H_e}{L} & 0.2 \leq \frac{H_e}{L} < 1 \\ 1 & \frac{H_e}{L} > 1 \end{cases}$$

$$H_k = \frac{2k_f + k_v}{3k_v} H$$

donde

$$k_f = 3E_m I / H^3$$

$$k_v = G_m A_T / H$$

$$G_m$$

$$M_a$$

$$H_k$$

$$\frac{M_a}{H_k}$$

Rigidez a flexión del muro

Rigidez a cortante del muro

Módulo de cortante que puede tomarse en forma aproximada $G_m = 0.2E_m$

Momento en el extremo superior del muro

Altura característica del muro

Toma en cuenta la reducción de resistencia al agrietamiento debido a la interacción momento-cortante

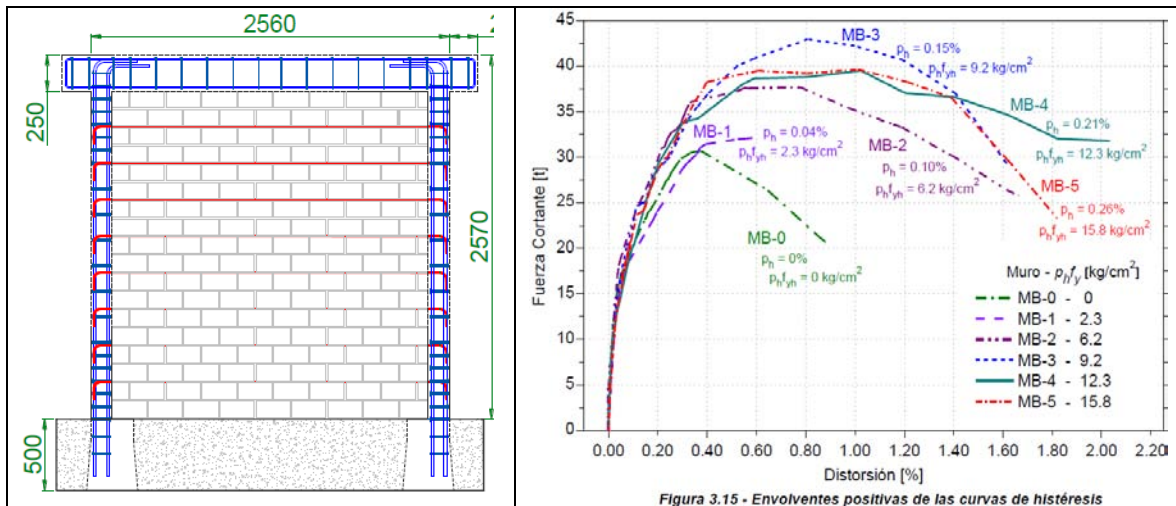


Figura 2.6 Geometría y envolvente de respuesta (MB-0, MB-1, MB-2, MB-3, MB-4 y MB-5)

Capítulo 3. Resistencia a cortante de acuerdo a las Normas técnicas complementarias de mampostería 2004 y 2017

3.1. Ecuaciones de resistencia a cortante de acuerdo a las NTCM 2004

Las NTCM 2004 estiman la resistencia a corte de los muros de mampostería confinada con

$$V_R = V_{mR} + V_{sR} \quad (1)$$

donde la resistencia debida a la mampostería V_{mR} esta dada por

$$V_{mR} = F_R(0.5v^*A_T + 0.3P) \leq 1.5F_Rv^*A_T \quad (2)$$

y la resistencia debida al refuerzo V_{sR} esta dada por

$$V_{sR} = F_Rp_hf_{yh}\eta A_T \quad (3)$$

donde

- v^* es la resistencia a compresión diagonal
- A_T es el área transversal del muro incluyendo los castillos sin transformar
- P es la carga vertical que actúa sobre el muro
- p_h $A_s/(s \times t)$, A_s es el área de acero, s es el espaciamiento del refuerzo y t es el espesor del muro
- f_{yh} es el esfuerzo de fluencia del refuerzo horizontal
- η es la eficiencia del refuerzo que vale 0.6 si $p_hf_{yh} < 6 \text{ kg/cm}^2$ y 0.2 si $p_hf_{yh} > 9 \text{ kg/cm}^2$ e interpolando para casos intermedios, ver Figura 3.1.
- F_R es el factor de reducción de la resistencia, que para muros confinados vale 0.7.

Se debe entender que la resistencia V_{mR} es la resistencia al agrietamiento de los muros sin refuerzo horizontal, V_R es la resistencia máxima. Si efectivamente no hay refuerzo horizontal, la resistencia máxima se hace igual a la del agrietamiento del muro, aunque dicha resistencia es, en general, menor a la resistencia máxima. Esta decisión se ha conservado como muy apropiada, ya que la resistencia máxima de los muros sin refuerzo es difícil de establecer con precisión y al llegar a la resistencia máxima dichos muros experimentan una degradación rápida de la resistencia, lo que haría, por ambas razones, riesgoso el utilizar la resistencia máxima de los muros sin refuerzo.

El parámetro η es obtenido de diversos ensayos experimentales como la serie M (Aguilar & Alcocer, 2001), la serie N (Alcocer, et al., 1997), las conclusiones a las que llegaron estos autores permitieron observar que a mayor cuantía, menor es la eficiencia, η , el cual es observada de manera representativa en la Figura 3.1.

En evidencia experimental reciente, analizando la ecuación asociada a la resistencia aportada por el acero, V_{sR} , se observó que, η , depende de la resistencia a compresión de la mampostería.

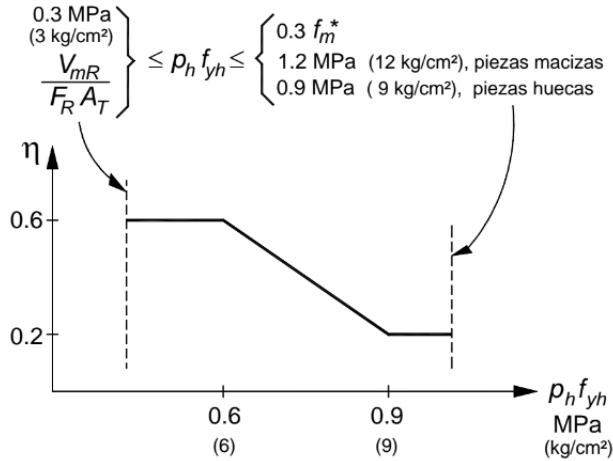


Figura 3.1 Factor de eficiencia η (NTCM-2004)

3.1.1. Inconsistencias observadas

Es observable que la eficiencia se reduce cuando la cuantía de refuerzo es mayor que 0.6 MPa, (Figura 3.1), este límite, en la norma vigente, no depende del tipo de pieza ni de la resistencia de la mampostería a compresión, parámetros que al parecer afectan el desempeño del muro al aumentar la cuantía de refuerzo horizontal. En un estudio reciente (Cruz Olayo, 2015) se observó que, con piezas industrializadas de concreto, los muros pueden tener un mejor desempeño, las piezas utilizadas tenían resistencias a compresión en promedio de 11.2 MPa.

La actual especificación produce diseños que en ocasiones podrían ser cuestionados. En la investigación de (Cruz Olayo, 2015) observaron varias inconsistencias en la aplicación del reglamento para realizar el cálculo de la contribución de refuerzo horizontal. En la Figura 3.2, se observa que las NTCM 2004 predicen una resistencia a corte mayor con la cuantía mínima (línea gris punteada) que con la cuantía máxima (línea verde continua y línea azul con guion) para un amplio rango de mamposterías, sobre todo de alta resistencia. El esfuerzo cortante de la mampostería sin refuerzo (línea naranja con guion y punto) aumenta conforme aumenta la resistencia a compresión de la mampostería f_m^* , ya que se consideró que $v_m^* = 0.6\sqrt{f_m^*}$

En la Figura 3.2, generada por (Cruz Olayo, 2015) se distinguen tres casos de mampostería, A, B, y C. Es observable que la mampostería de piezas sólidas de baja calidad con un $f_m^* = 2$ MPa (caso A) da lugar a una resistencia a corte mayor que si se usara una mampostería con un $f_m^* = 6$ MPa, ambas con cuantía máxima de refuerzo horizontal.

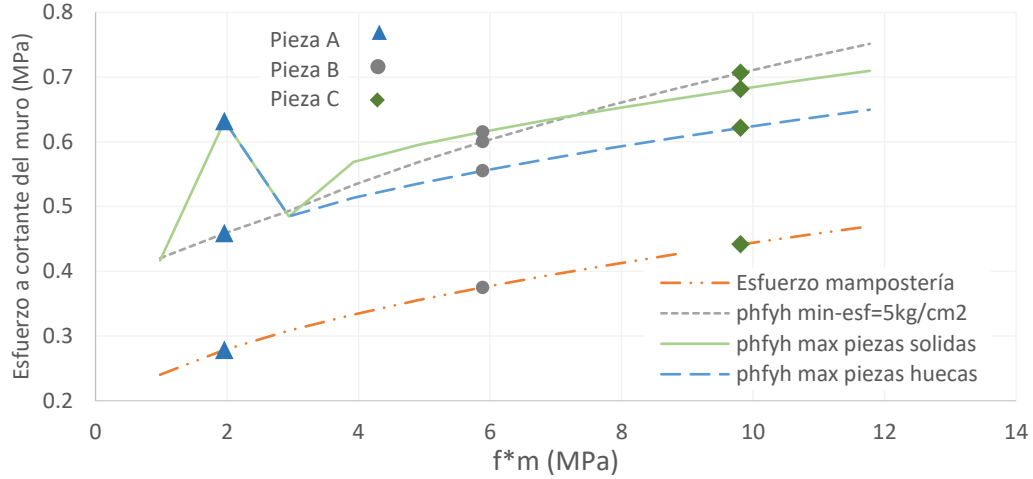


Figura 3.2 Inconsistencia en la resistencia a corte con la norma NTCM 2004 (Cruz Olayo, 2015)

3.2. Expresiones de resistencia en las NTCM 2017

Se presenta el nuevo esquema propuesto para las NTCM. Las expresiones se presentan en formato que no coincide con el de las normas pero que es equivalente.

La resistencia a corte de los muros está dada por

$$V_R = F_R(k_0 k_1 V_a + V_{SR}) \quad (4)$$

donde la resistencia al agrietamiento (sin refuerzo horizontal) V_a esta dada por

$$V_a = (0.5v^* A_T + 0.3P) \cdot f \quad (5)$$

Donde f esta dado por

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

y la contribución del refuerzo V_{SR} esta dada por

$$V_{SR} = \eta_s q_e A_T \quad (6)$$

donde

k_0 es un factor que multiplica a la resistencia al agrietamiento sin refuerzo para estimar la resistencia máxima de un muro sin refuerzo horizontal. $k_0 = 1.3$ si $H/L < 1$ y $k_0 = 1.0$ si $H/L > 1.5$, interpolando para casos intermedios

k_1 reduce la resistencia de la mampostería por la inclusión del refuerzo horizontal. Este es un comportamiento que, como veremos, se confirma con los resultados de los ensayos en este

estudio. $k_1 = 1 - \alpha q_e$ donde α es un valor con unidades del inverso de esfuerzo, igual a $0.4 \text{ mm}^2/\text{N}$ ($0.04 \text{ cm}^2/\text{kg}$), obtenido experimentalmente.

f es un valor que toma en cuenta la relación de aspecto del muro para determinar la resistencia a corte de un muro sin refuerzo horizontal.

η_s es la eficiencia del refuerzo, pero ahora es independiente de la cuantía de refuerzo, en cambio se propone que dependa de la resistencia a compresión de la mampostería, como un indicador de la calidad de la misma: $\eta_s = 0.7$ para mamposterías con $f_m > 9 \text{ MPa}$ y 0.55 para $f_m < 6 \text{ MPa}$, interpolando para casos intermedios

q_e es la cuantía resistente efectiva que se detalla en el siguiente inciso.

A_T es el área transversal del muro

3.3. Cuantía resistente efectiva

La cuantía resistente límite, q_ℓ , es un valor de cuantía resistente ($p_h f_{yh}$) a partir del cuál ya no aumenta la resistencia a corte del muro. Este valor se obtuvo de observaciones experimentales, y, como veremos, se confirma en esta investigación.

$$q = p_h f_{yh} \quad (7)$$

la cuantía resistente efectiva es

$$q_e = \begin{cases} q & q \leq q_\ell \\ q_\ell & q > q_\ell \end{cases} \quad (8)$$

La cuantía resistente límite se obtuvo con resultados experimentales en forma aproximada y en función de la resistencia a la compresión de la mampostería, (Cruz Olayo, 2015). Conceptualmente se asume que la fuerza que se desarrolla en el refuerzo debe transmitirse por la mampostería hasta los apoyos para que dicha fuerza pueda contribuir a la resistencia. Se asume que dicha transmisión de fuerzas es por compresión en la mampostería y de ahí que la fuerza máxima que puede desarrollar el refuerzo debe estar asociada a la resistencia a la compresión de la mampostería. Dado que se cuenta con muy poca información experimental para determinar este valor la relación entre la resistencia a la compresión de la mampostería y la cuantía resistente límite se ha propuesto con la expresión más simple

$$q_\ell = \lambda f_m \quad (9)$$

donde λ debe ser determinado experimentalmente.

La determinación de λ para muros de mampostería confinada construidos con piezas de barro extruido es uno de los principales objetivos de la presente investigación.

Capítulo 4. Programa experimental

Se presenta el programa experimental que se desarrolló en el laboratorio de estructuras grandes del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), a continuación, se describen las características y la descripción de los muros MC-0, MC-1, MC-2, MC-3, MC-4 y MC-5.

4.1. Descripción de especímenes

En CENAPRED, se ensayaron seis muros cuadrados de dimensiones nominales de longitud y altura de 250 cm y con espesor nominal de 11.5 cm denominados como MC-0, MC-1, MC-2, MC-3, MC-4 y MC-5. La cuantía resistente ($p_h f_{yh}$) en los muros varió entre 0 y 1.66 MPa, la cuantía en cada muro se muestra en la Tabla 4-2.

Todos los muros fueron construidos con piezas de arcilla extruida con un área neta del 56% (sección, 2.1 de las NTCM 2004), confinados por castillos en los extremos del muro y con una dala en la parte superior. Los castillos están anclados en una viga de cimentación de dimensiones de longitud de 300 cm, de espesor de 80 cm y de altura de 50 cm. Las dimensiones medidas de los seis muros se muestran en la Tabla 4-1

Tabla 4-1 Propiedades geométricas de los muros

	L (cm)	H (cm)	t (cm)
MC-0	252.7	249.5	11.5
MC-1	252.6	250.0	11.5
MC-2	252.8	249.0	11.5
MC-3	251.2	249.5	11.5
MC-4	251.7	249.5	11.5
MC-5	252.0	250.0	11.5

El refuerzo horizontal fue distribuido a cada dos hiladas en cada uno de los muros (Figura 4.1). Las barras de refuerzo utilizadas en cada caso se indican en la Tabla 4-2. En cuanto el refuerzo de los castillos, se utilizaron cuatro barras longitudinales del No. 6 con estribos de alambra del No. 2. La separación de los estribos se redujo en los extremos de castillos y dalas como se indica en la Figura 4.2. Para el refuerzo de la losa se utilizaron cuatro barras longitudinales (contando las del lecho superior de la dala) y 27 estribos.

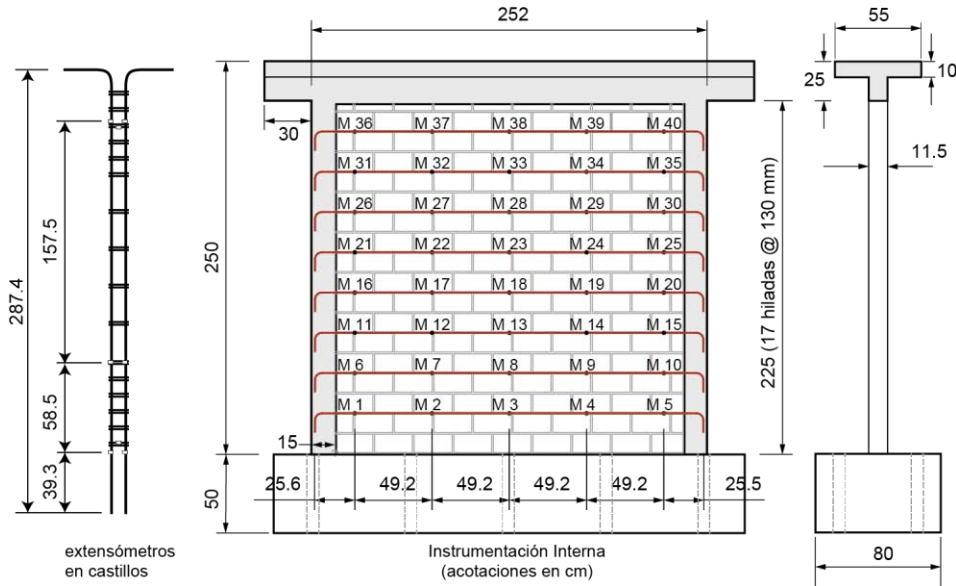


Figura 4.1 Geometría del muro

Tabla 4-2 Variación de cuantía por esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo horizontal de los especímenes de ensaye

Esquema de refuerzo	Espécimen	Barras de refuerzo horizontal mm (Pulg)	$\rho_h f_{yh}$ (MPa)
	MC-0	Sin refuerzo	0.000
	MC-1	4.8 (3/16")	0.364
	MC-2	6.4 (1/4")	0.648
	MC-3	2*4.8+4.0 (2*3/16" + 5/32")	0.982
	MC-4	2*6.4 (2*1/4")	1.296
	MC-5	2*6.4 + 4.8 (2*1/4" + 3/16")	1.660

4.2. Instrumentación interior y exterior

Para medir la resistencia a corte que aporta el acero, el refuerzo horizontal de los muros fue instrumentado con deformímetros ("strain gauges"), los cuales fueron distribuidos como se indica en la Figura 4.1. En los muros MC-3, MC-4 y MC-5 al haber más de una barra de refuerzo se instrumentó la barra con diámetro mayor, para esos casos se asumió que las barras contenidas en la hilada tiene la misma deformación a pesar de ser diámetros desiguales, en cada uno de los castillos fueron instrumentados con 8 deformímetros, ver Figura 4.1.

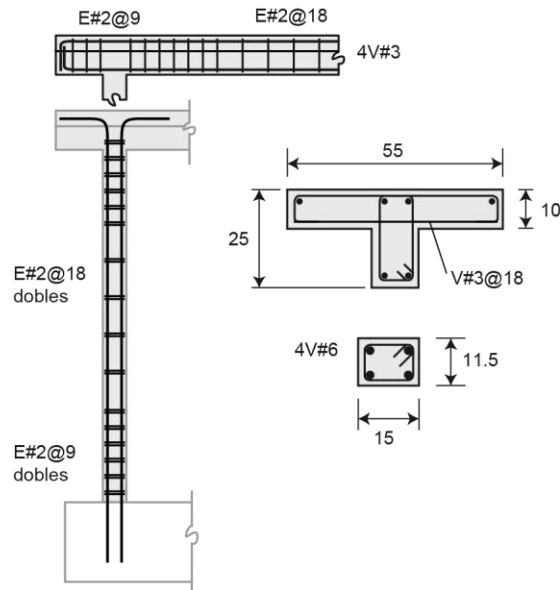


Figura 4.2 Refuerzo longitudinal y transversal

La instrumentación externa se muestra en la Figura 4.3. Para medir los desplazamientos, se instalaron, en total, 28 transductores de desplazamiento con capacidad de carrera del vástago de 10, 25, 50, 100 y 200 mm, la descripción del uso de los transductores se muestra en la Tabla 4-3. De manera general, los transductores se utilizaron para medir desplazamientos y deformaciones del muro. La deformación se calculó dividiendo el desplazamiento lateral registrado por el transductor ubicado aproximadamente a nivel de la dala entre la altura del muro medido desde la interfaz viga de cimentación-muro hasta el transductor ubicado a nivel de la dala, ver Figura 4.3. Se colocaron celdas de carga para monitorear las cargas verticales y horizontales durante la prueba.

El sistema de adquisición utilizado fue un Tokio Sokki Kenkyujo TDS 530.

Tabla 4-3 transductores de capacidad de 10, 25, 50, 100, y 200 mm.

Capacidad del vástago	Descripción
10 mm (V3b, V4b, V5b, V6b, V7b, H13b)	Fueron colocados para observar deformaciones axiales, unión viga de cimentación-muro, V3b, V4b y V5b y para observar las deformaciones axiales, unión viga de cimentación-losa de transmisión de carga se midieron con transductores V6b y V7b, el desplazamiento de cuerpo rígido se registró con el transductor H13b.
25 mm (VR1, VR3, V1, V2, H10, H10b)	Con VR1, V1, V2 y VR3 se puede conocer la rotación y con H10 y H10b se puede conocer la expansión del muro en la parte inferior.
50 mm (H8, H9, D1, D2, HR3, R1 y R2)	Con H8 y H9 se puede conocer la expansión del muro en la parte inferior, con D1 y con D2 se puede medir la deformación angular, con HR3 se puede medir la expansión, y con R1 y R2 se pueden registrar las deformaciones en sentido perpendicular al de la aplicación de la carga.

100 mm (H1, H1-100, H3, H4, H5, H6, H7)	Se registra la expansión con los transductores H1, H1-100, H3, H4, H5, H6, H7.
200mm (H2, H2-200)	Con los transductores H2 y H2-200 se utilizaron para medir la expansión en la parte superior del muro.

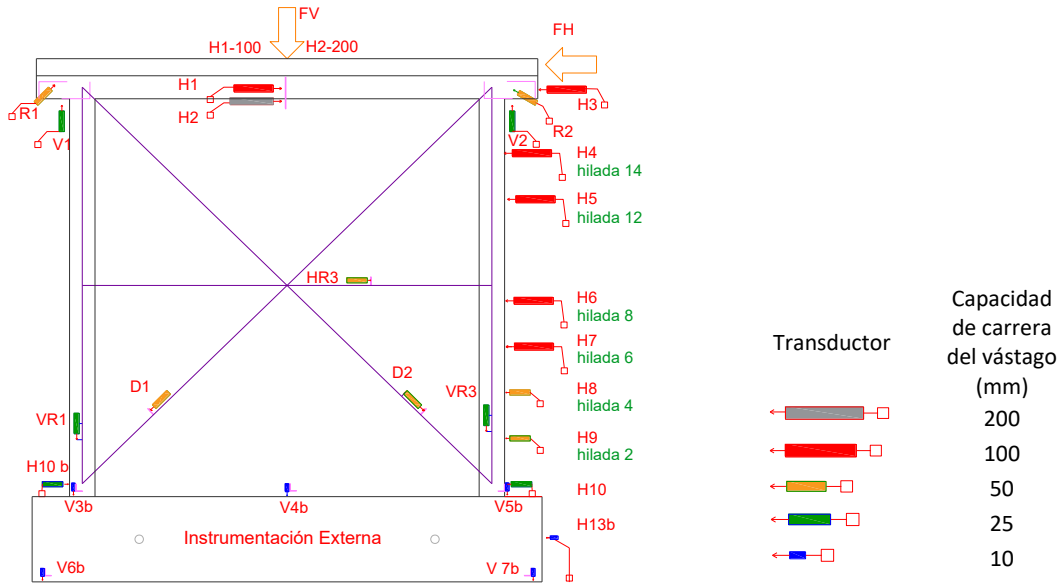


Figura 4.3 Instrumentación externa

4.3. Materiales

Las piezas utilizadas en la construcción de los muros fueron tabiques extrudidos multiperforados de arcilla denominado por el fabricante como Tabimax 11.5, con dimensiones nominales de espesor, alto y largo de 115, 120 y 240 mm respectivamente. Las dimensiones promedio del espesor, alto y largo fueron 11.67, 24.09, 11.9 respectivamente. Las dimensiones de las paredes fueron: espesor exterior en el lado largo 11.8 cm y 11.6 en el lado corto y espesor interior de 7.78 mm, ver Figura 4.4

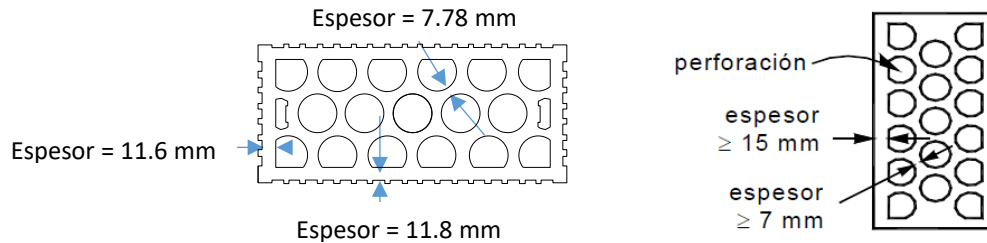


Figura 4.4 Pieza multiperforada de ensayos MC Vs Pieza multiperforada (NTCM, 2004)

Para la colocación de las piezas se utilizó mortero Tipo I, de acuerdo a las NTCM 2004, con una relación cemento, cal y arena de 1:1/4:3. Se utilizó cemento de marca Cruz Azul CPC-30. El muestreo del mortero consistió en la obtención de 3 cubos de 50 mm de arista por cada cuatro hiladas de cada muro.

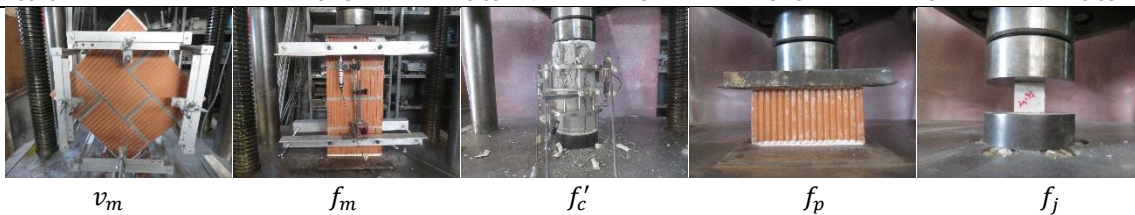
Para la obtención de las propiedades mecánicas de la mampostería se ensayaron 4 pilas y 4 muretes por cada muro construido. Las pilas estuvieron constituidas de cuatro piezas sobrepuestas con espesor en la junta de mortero igual a 10 mm, las pilas tenían una longitud aproximada de 520 mm. Respecto a la construcción de los muretes se utilizaron, tres piezas completas y tres mitades, con espesor en la junta de mortero igual a 10 mm, quedando con una geometría cuadrada con dimensiones de 370 mm de cada lado.

El muestreo del concreto consistió en el ensaye de cuatro cilindros para el muro MC-0, MC3, MC-4 y MC-5, se ensayaron 6 cilindros para el muro MC-1 y MC-2, todos con dimensiones nominales de 150 mm de diámetro y con una altura de 300 mm. La mezcla de concreto se diseñó para obtener una resistencia promedio de 25 MPa, al final se obtuvieron resistencias superiores a lo contemplado en el diseño, esta sobre- resistencia se le atribuye al uso del fluidificante. Esta sustancia le permite al concreto ser más trabajable, logrando un revenimiento entre 20 y 25 cm. El fluidificante fue necesario debido a que el acero de refuerzo horizontal formaba trampas que impedían el paso libre del concreto.

Se ensayaron seis piezas de arcilla extruida por cada muro para obtener la resistencia promedio a compresión de las piezas. Las propiedades mecánicas promedio por muro se muestran en la Tabla 4-4

Tabla 4-4 Propiedades de los materiales (MPa)

	E (MPa)	ν_m (MPa)	f_m (MPa)	f'_c (MPa)	f_p (MPa)	f_j (MPa)
MC-0	4501.22	0.86	16.61	33.86	19.29	24.50
MC-1	4592.93	1.59	13.45	41.67	16.96	22.04
MC-2	5291.51	1.09	18.10	42.05	26.32	22.94
MC-3	5327.07	1.13	17.93	33.65	23.93	23.95
MC-4	5449.49	1.24	15.92	40.83	21.05	25.88
MC-5	4979.16	1.06	16.40	32.57	17.98	24.95
Prom	5010.37	1.16	16.47	38.13	20.92	24.04
Desv. Std.	727.44	0.32	2.57	5.54	4.95	2.79
CV	0.145	0.274	0.156	0.145	0.237	0.116
Diseño	7104.0 ^(*)	0.69	11.84	28.25 ^(*)	13.14	16.03



4.4. Marco de carga

A los muros MC-0, MC-1, MC-2, MC-3, MC-4 y MC-5 se les aplicó carga lateral cíclica y reversible mediante un gato hidráulico con capacidad de 490.5 kN. También se les aplicó un esfuerzo vertical constante de 0.49 MPa, mediante un peso muerto al centro del muro que se distribuyó a lo largo del muro mediante una viga de acero. En Figura 4.5 se muestra esquemáticamente el sistema de carga mencionado.

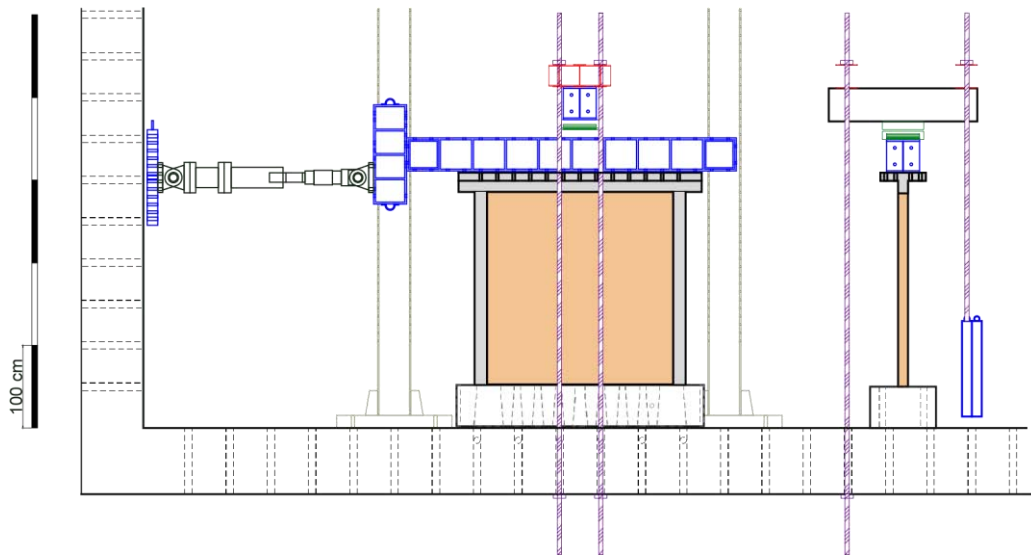


Figura 4.5 Dispositivo de aplicación de la carga

4.5. Historia de carga

La historia de carga utilizada en los ensayos fue la especificada en el apéndice normativo A de las normas técnicas complementarias de mampostería, (NTCM, 2004). La secuencia de carga se dividió en dos etapas: en la primera etapa, controlada por carga, se aplicaron dos pares de ciclos cuya carga máxima fue la cuarta parte y la mitad de la carga calculada al agrietamiento. Las cargas calculadas al agrietamiento, V_{mR} , con factor de reducción unitario, F_R , se muestran en la Tabla 4-5, fueron calculadas con la ecuación (2). La segunda etapa, controlada por desplazamiento, inició con un par de ciclos a una distorsión (desplazamiento lateral entre la altura del muro) igual 0.001 y posteriormente dos nuevos ciclos a una deformación de 0.002. Posteriormente se aplicaron pares de ciclos incrementando, cada vez, la deformación en 0.002, ver Figura 4.6, hasta suspender el ensayo al estar cerca del colapso, ver Figura 5.3

En el cálculo de V_{mR} , para cada uno de los muros, se utilizaron los resultados promedio de la resistencia a compresión diagonal, v_m , obtenidos de los ensayos, ver Tabla 4-4, también se usó un esfuerzo vertical constante de 0.49 MPa, esta carga fue colocada mediante dos placas cuadradas de acero. El esfuerzo de 0.49 MPa representa la carga típica de una vivienda multifamiliar, ver Figura 4.5.

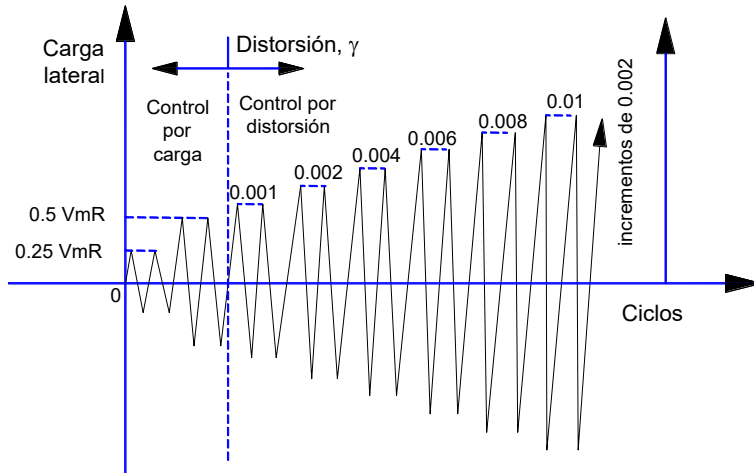


Tabla 4-5 Valores estimados de resistencia al agrietamiento V_{mR}

Muro	V_{mR} (kN)
MC-0	167.71
MC-1	274.14
MC-2	200.92
MC-3	205.03
MC-4	178.78
MC-5	196.16

Figura 4.6 Historia de carga, carga calculada al agrietamiento

Capítulo 5. Resultados

5.1. Resistencia y distorsión

En la Tabla 5-1, se muestran los valores de carga y distorsión correspondientes al, primer agrietamiento, V_{agr} , resistencia máxima, V_{max} , y 80% de la resistencia máxima, V_u , también considerada como resistencia a la falla. Estos datos, también se muestran en la Figura 5.4 mediante marcadores (triángulo, rombo, círculo, etc.). En los modelos, los valores de distorsión y resistencia al primer agrietamiento corresponden al punto de la envolvente positiva donde se observó un cambio significativo de la pendiente. Las envolventes positivas de los muros MC, fueron obtenidos de las curvas de histéresis mostradas en la Figura 5.1.

Tabla 5-1 Resistencia y distorsión de los muros

Muro	Resistencia al Agrmto		Resistencia Máxima		80% Resistencia Máxima (resistencia a la falla)	
	Carga (kN)	distorsión (mm/mm)	Carga (kN)	distorsión (mm/mm)	Carga (kN)	distorsión (mm/mm)
MC-0	137.83	0.00066	285.27	0.00505	228.22	0.00701
MC-1	186.88	0.00118	325.99	0.00603	260.79	0.00605
MC-2	160.39	0.00086	330.89	0.00539	264.71	0.00898
MC-3	153.53	0.00078	361.99	0.00535	289.59	0.00852
MC-4	162.85	0.00073	339.72	0.00385	271.78	0.00695
MC-5	157.74	0.00100	316.37	0.00599	253.10	0.00831

5.2. Curvas de histéresis

Para cada curva de histéresis, mostrada en la Figura 5.1, en el eje horizontal se tiene la distorsión en unidades de mm/mm y en el eje vertical la fuerza lateral en kN.

En la curva de histéresis correspondiente al muro MC-0, se observa que la resistencia al primer agrietamiento es igual a 137.83 kN a una distorsión de 0.00066, en esta etapa difícilmente se pudo apreciar una grieta diagonal en el muro. La resistencia máxima del muro se dio en (285.27 kN) a una distorsión de (0.00505). Posterior a la resistencia máxima, se puede apreciar que la resistencia a la falla se dio cuando el modelo estaba al 80% de la resistencia máxima, (228.22 KN) a una distorsión de (0.00701).

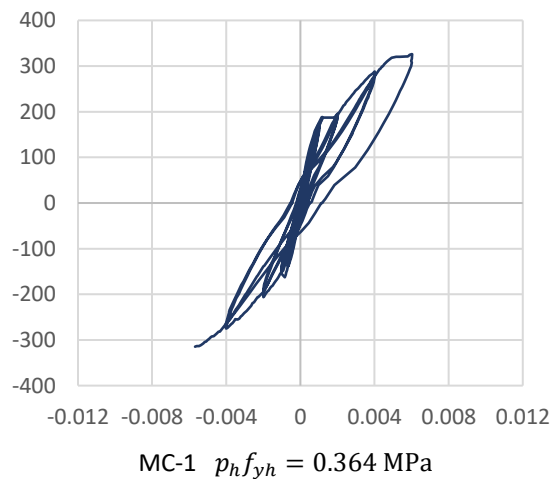
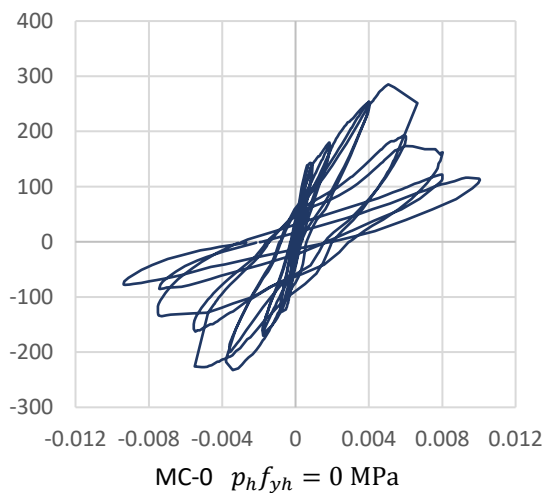
Para el caso del muro MC-1, se observó que resistencia al primer agrietamiento fue igual a 186.88 kN y la distorsión fue igual a 0.00118. La resistencia máxima fue igual a (325.99 kN) y a una distorsión igual a 0.00603, en este modelo se percibió un ligero incremento de resistencia máxima en comparación con el modelo MC-0, sin embargo, posterior a la resistencia máxima la degradación de resistencia fue inexistente, ver Figura 5.1, esta degradación de resistencia no pudo observarse debido a que el muro sufrió una falla repentina que no permitió continuar la prueba y que por seguridad de los instrumentos de medición colocados en el muro se suspendió la prueba.

En el modelo MC-2, la resistencia a cortante al primer agrietamiento fue igual a 160.39 kN y con una distorsión de 0.00086. La resistencia máxima para este modelo fue igual a 330.89 kN y con una distorsión igual a 0.00539, se aprecia que se obtuvo un incremento en la resistencia máxima en comparación con el modelo con refuerzo horizontal MC-1, de 325.99 kN a 330.89 kN. Posterior a la resistencia máxima, se puede apreciar que la resistencia a la falla es igual a 264.71 kN a una distorsión de 0.00898. La degradación de resistencia posterior a la resistencia a la falla para este modelo fue gradual.

En el modelo MC-3, la resistencia a cortante al primer agrietamiento fue igual a 153.53 kN y con una distorsión de 0.00078. La resistencia máxima fue igual a 361.99 kN y a una distorsión igual a 0.00535, se aprecia que se obtuvo un incremento en la resistencia máxima en comparación con los modelos con refuerzo horizontal MC1 y MC2. La resistencia a la falla fue igual 289.59 a una distorsión de 0.00852, posterior a la resistencia a la falla, la degradación de resistencia fue gradual.

En el modelo MC-4, la fuerza cortante al primer agrietamiento fue igual a 162.85 kN y con una distorsión de 0.00073. La resistencia máxima obtenida para este modelo fue igual a 339.72 kN y con una distorsión igual a 0.00385, en este muro se aprecia que con la cuantía de refuerzo horizontal (1.296 MPa) ya no es posible aumentar la contribución a la resistencia máxima aportada por el acero, pues hubo un decremento de resistencia máxima de 361.99 kN a 339.72 kN. La resistencia a la falla fue igual 271.78 kN a una distorsión de 0.00695, posterior a la resistencia a la falla, la degradación de resistencia fue gradual.

En el modelo MC-5, la fuerza cortante al primer agrietamiento fue igual a 157.74 kN y con una distorsión de 0.00100. Posteriormente, se aprecia que la resistencia máxima fue igual a 316.37 kN y con una distorsión igual a 0.00599. Al igual que en el modelo MC-4, se observa que con cuantía de refuerzo horizontal igual a 1.660 MPa ya no es posible aumentar la contribución del refuerzo a la resistencia, pues hubo un decremento en comparación con el modelo MC-4 de 339.72 kN a 316.37 kN. La resistencia a la falla fue igual 253.10 a una distorsión de 0.008831, posterior a la resistencia a la falla, la degradación de resistencia fue gradual.



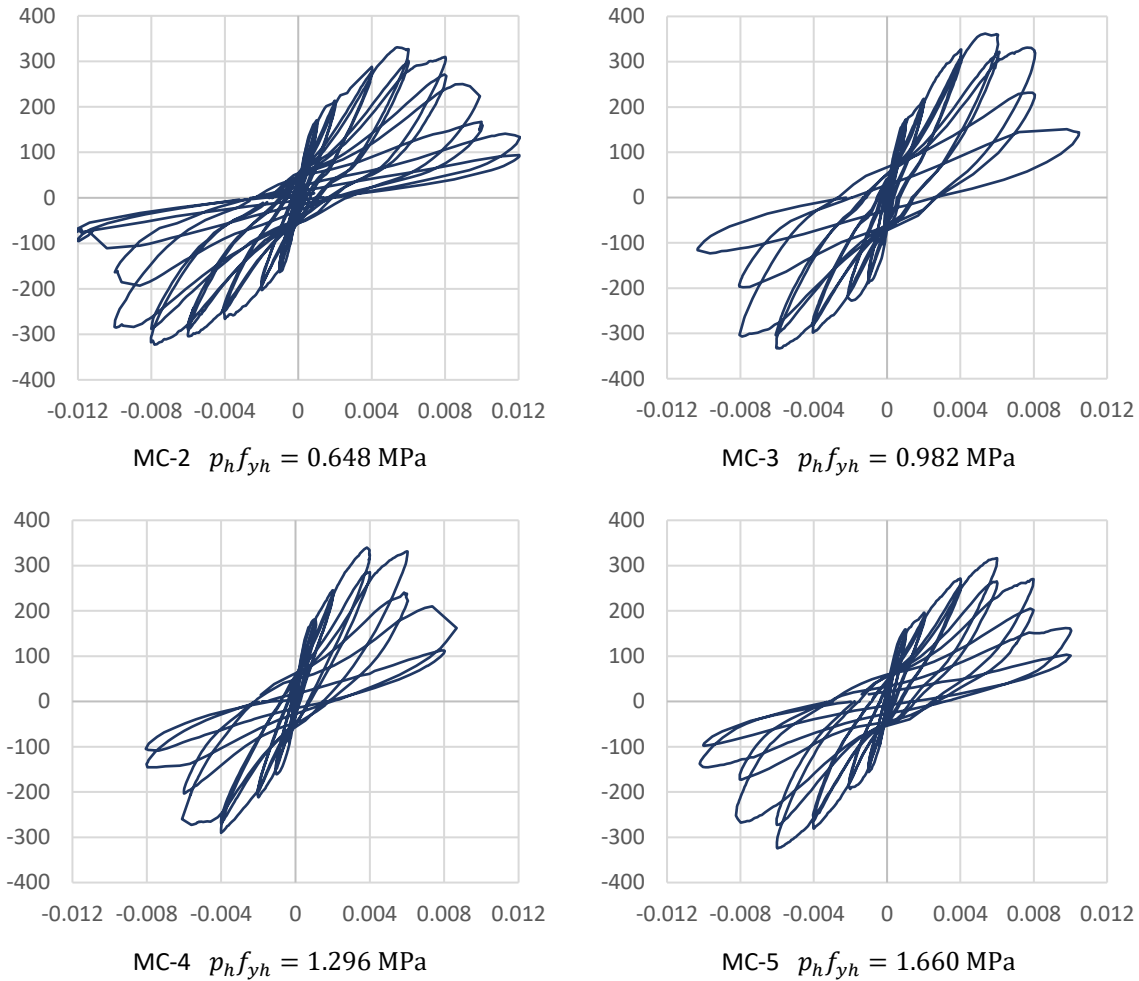


Figura 5.1 Curvas de histéresis, cortante resistente en kN vs deformación en mm/mm

5.3. Patrones de agrietamiento

En la Figura 5.2 se muestran los patrones de agrietamiento observados a la resistencia máxima y a la falla de cada muro. Debajo de cada fotografía se indica el valor de la resistencia y la distorsión correspondiente.

El nivel de daño mostrado en la Figura 5.3 muestra el incremento de número de grietas cuando se llega a la carga máxima, V_{max} , y cuando se redujo al 80% de la carga máxima, V_u . En estos modelos se puede apreciar que las grietas están relacionadas con la cantidad de cuantía de refuerzo horizontal, es decir, a mayor cuantía de refuerzo horizontal, $p_h f_{yh}$, mayores son el número de grietas, en consecuencia, los anchos de grieta tienden a ser menores.

En el modelo MC-0 se apreció que, a medida que se incrementó la distorsión, los anchos de grieta en el muro aumentaron, este tipo de daño se le atribuye a que no hay refuerzo horizontal que restrinja el incremento de los anchos de grieta.

En el modelo MC-1 se apreció que cuando la distorsión incrementaba, los anchos de grieta tienden a disminuir, pues el refuerzo horizontal restringe el incremento del espesor de la grieta, este

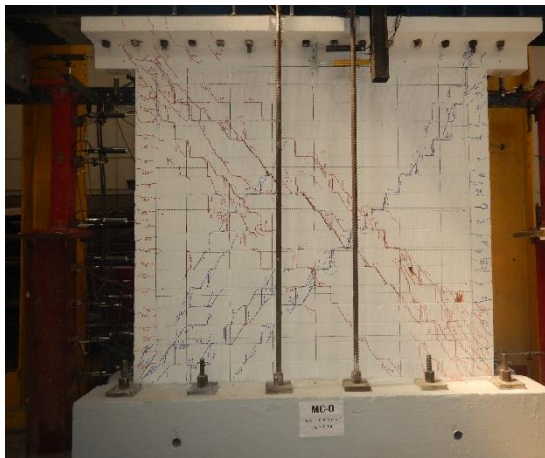
fenómeno se atribuye a que el refuerzo es capaz de resistir esfuerzos a tensión y que las piezas resisten esfuerzos a compresión, por lo que hay una repartición de esfuerzos entre estos dos elementos, lo cual lleva a minimizar el grosor de las grietas.

Evidentemente, en la medida que se incrementa la cuantía de refuerzo horizontal $p_h f_{yh}$, menores serán los anchos de grieta, también se logra uniformidad en todo el muro en la distribución de anchos de grieta, logrando que el refuerzo horizontal trabaje hasta su máxima capacidad. En esta investigación no se fracturo el refuerzo horizontal en ninguno de los modelos.

Resistencia Máxima

Resistencia última

MC0 ($p_h f_{yh} = 0 \text{ MPa}$)



$V_{max} = 285.27 \text{ kN}$
 $\gamma_{max} = 0.00505$



$V_u = 228.22 \text{ kN}$
 $\gamma_u = 0.00701$

MC1 ($p_h f_{yh} = 0.364 \text{ MPa}$)

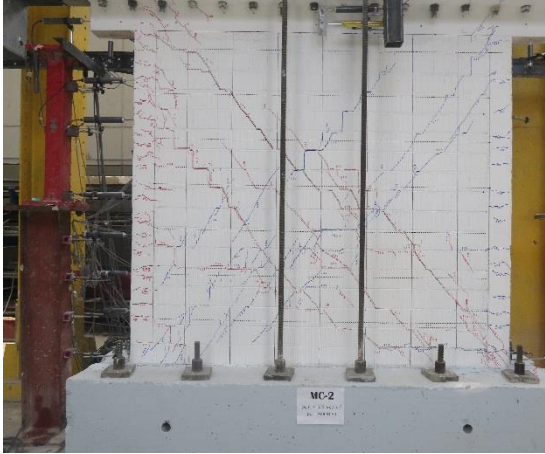


$V_{max} = 325.99 \text{ kN}$
 $\gamma_{max} = 0.00603$

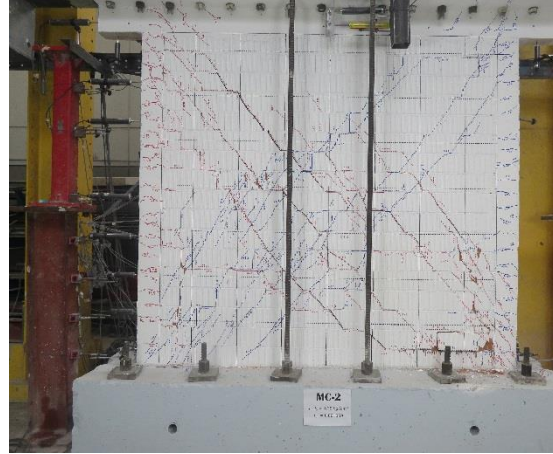


$V_u = 260.79 \text{ kN}$
 $\gamma_u = 0.00605$

MC2 ($p_h f_{yh} = 0.648$ MPa)

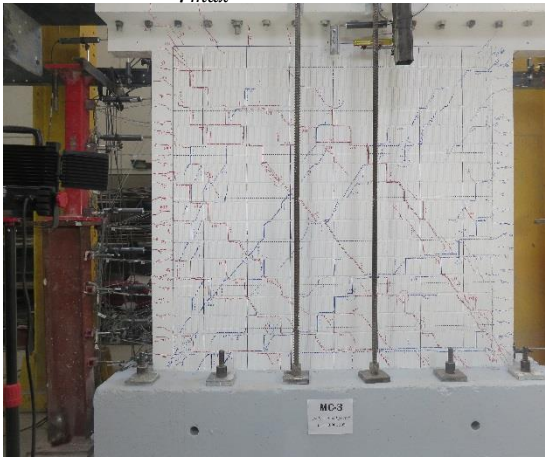


$V_{max} = 330.89$ kN
 $\gamma_{max} = 0.00539$

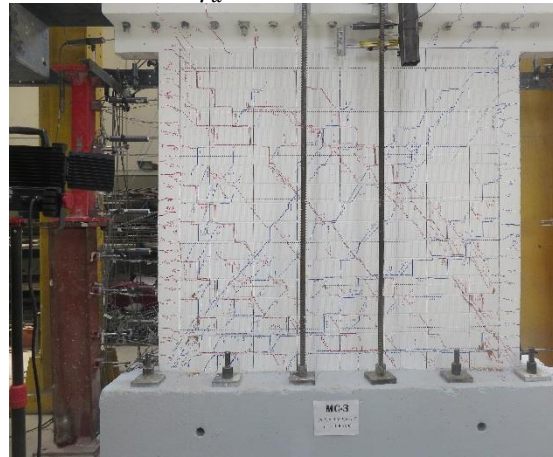


$V_u = 264.71$ kN
 $\gamma_u = 0.00898$

MC3 ($p_h f_{yh} = 0.982$ MPa)

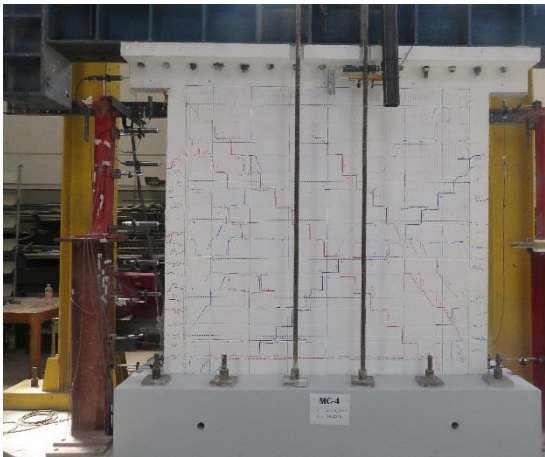


$V_{max} = 361.99$ kN
 $\gamma_{max} = 0.00535$

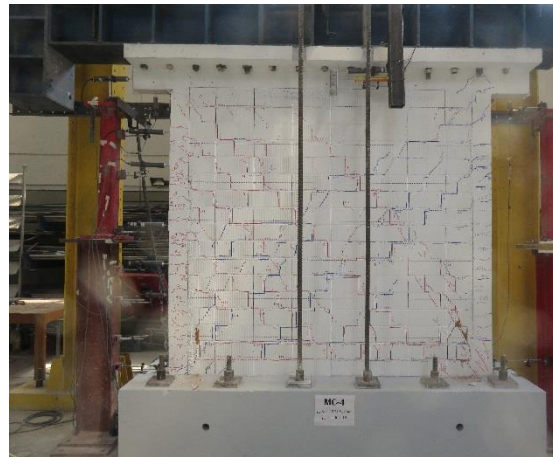


$V_u = 289.59$ kN
 $\gamma_u = 0.00852$

MC4 ($p_h f_{yh} = 1.296$ MPa)

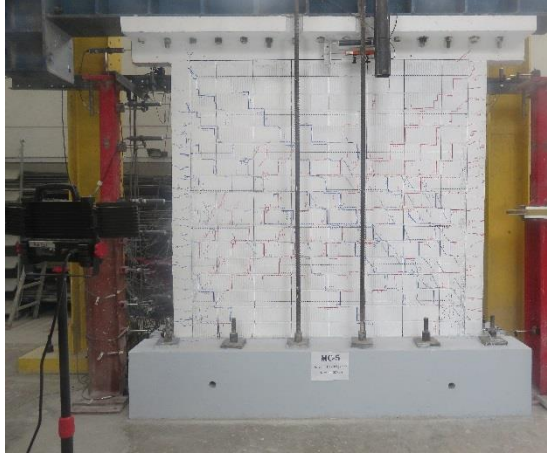


$V_{max} = 339.72$ kN
 $\gamma_{max} = 0.00385$

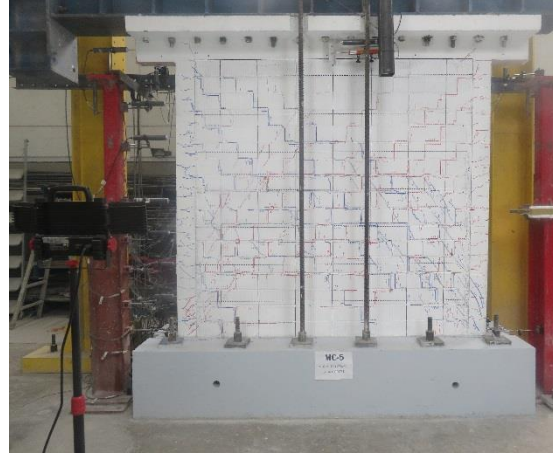


$V_u = 271.78$ kN
 $\gamma_u = 0.00695$

MC5 ($p_h, f_{yh} = 1.660 \text{ MPa}$)



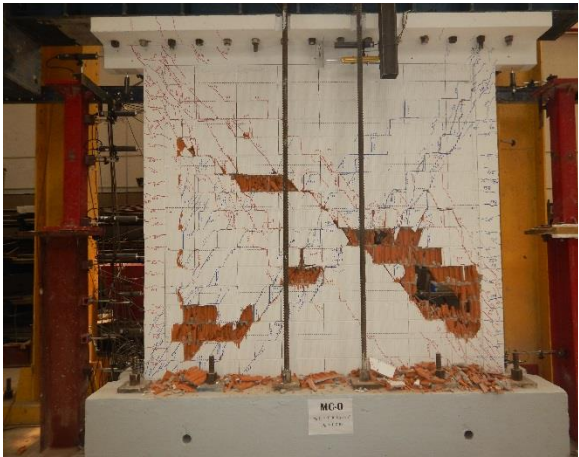
$V_{max} = 316.37 \text{ kN}$
 $\gamma_{max} = 0.005991$



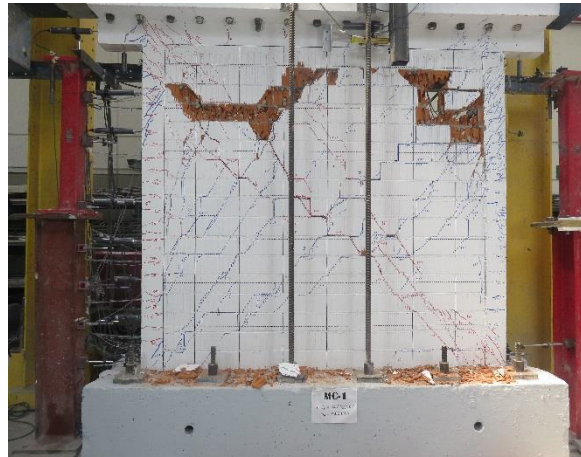
$V_u = 253.10 \text{ kN}$
 $\gamma_u = 0.008305$

Figura 5.2 Patrones de agrietamiento a la resistencia máxima y resistencia última

En la Figura 5.3 se muestran los patrones de agrietamiento al suspenderse el ensaye, que se consideró como un estado cercano al colapso y que, por cuestiones de seguridad de los instrumentos de medición, se suspendió el ensaye.



MC-0
 $\gamma = 0.00993$



MC-1
 $\gamma = 0.00904$

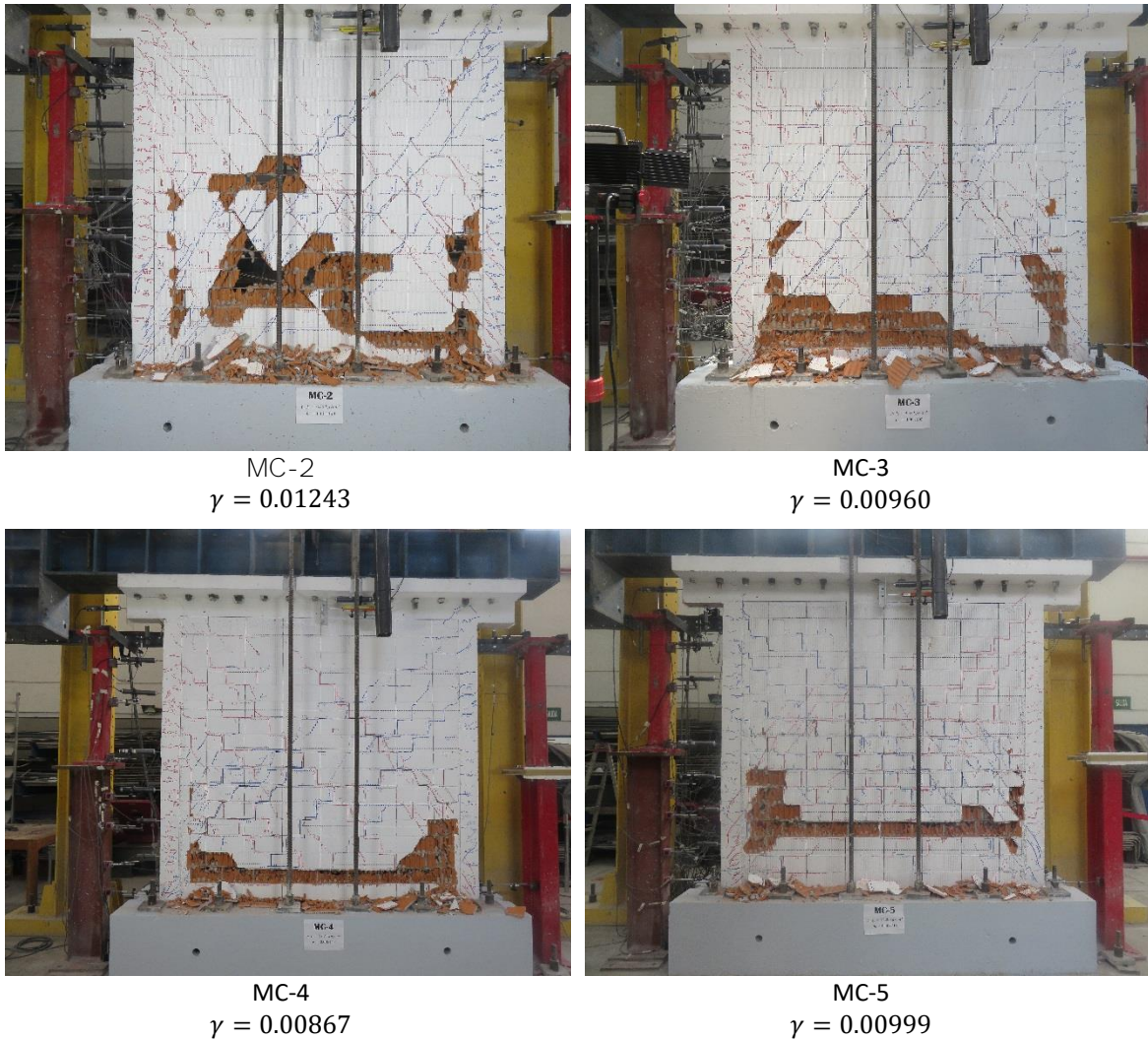


Figura 5.3 Patrones de agrietamiento al suspenderse el ensaye, estado cercano al colapso.

5.4. Envolventes

En la Figura 5.4, se presentan las envolventes positivas de las curvas de histéresis de los muros MC mostradas en la Figura 5.1. Las curvas se suspendieron cuando la resistencia se redujo al 80% de la resistencia máxima, que es el punto cuando se considera que el muro ha fallado.

Para el muro sin refuerzo horizontal MC-0 vemos que la resistencia máxima a carga lateral fue menor que todos los muros con refuerzo. Note que en los muros MC-0 a MC-5, la distorsión es aproximadamente igual a 0.001, estos puntos definen la resistencia al primer agrietamiento, esto nos lleva a concluir que el refuerzo horizontal en la etapa elástica, aún no está demandada a esfuerzos de corte. Posterior a la resistencia al agrietamiento podemos notar que la curva de cada muro tiene una tendencia distinta. Se puede apreciar que la curva correspondiente al modelo MC-3 es el que envuelve a todos los demás modelos, excepto en modelo MC-4.

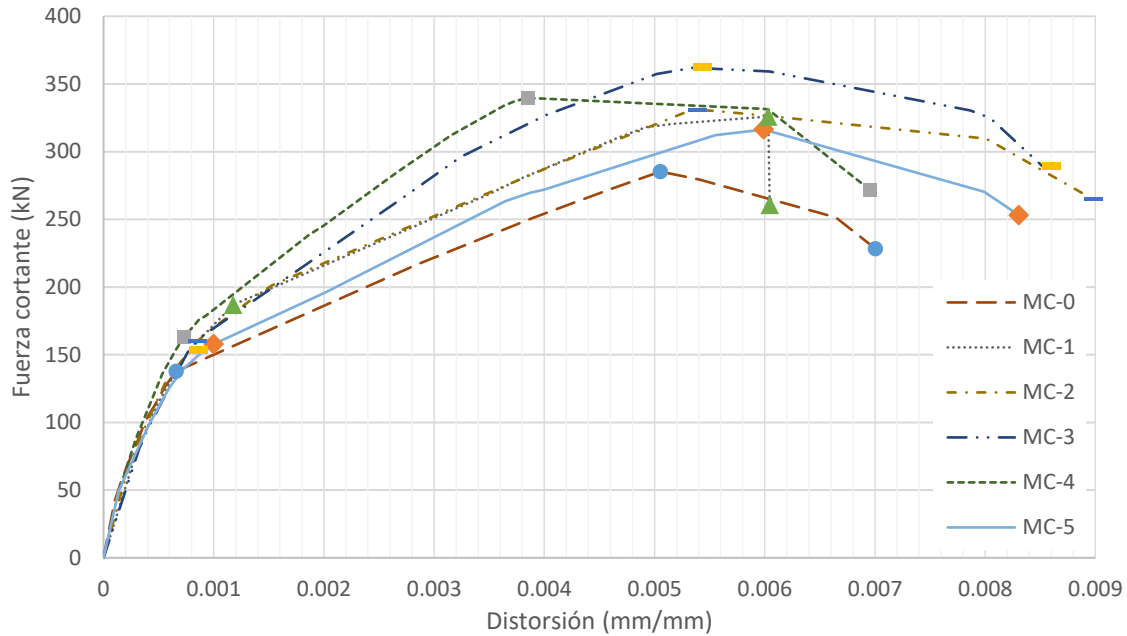


Figura 5.4 Envoltorios de las curvas de histéresis positivas de los muros con distinta cuantía de refuerzo horizontal

5.5. Envoltente elastoplástica equivalente

La envoltente elastoplástica equivalente del modelo se determina de modo que el área bajo la curva elastoplástica es igual al área de la envoltente positiva obtenida experimentalmente. Adicionalmente debe haber una intersección, entre la rama ascendente de la envoltente elastoplástica y la envoltente experimental en el punto en el que la fuerza lateral es aproximadamente 60% de la resistencia máxima del modelo elastoplástico, $0.6 R_y$. En el Apéndice A, se muestra un ejemplo del cálculo de los parámetros, γ_y , R_y y $0.6R_y$. Estos cálculos fueron necesarios para conocer la ductilidad del muro, pues se espera que en una estructura con sus elementos que la componen, tengan la habilidad de mantener su resistencia después de que le han impuesto deformaciones inelásticas. Las envoltentes obtenidas se presentan en la Figura 5.5

5.6. Deformaciones y ductilidades

En la Tabla 5-2 se reportan los valores de distorsión y las ductilidades correspondientes de cada muro, a la resistencia máxima y a la falla. Para determinar las ductilidades se obtuvo la distorsión a la fluencia de un modelo elastoplástico equivalente, siguiendo un procedimiento propuesto por el ASCE/SEI 41-13, 2014. El procedimiento se describe con detalle en el apéndice A.

Tabla 5-2 Deformaciones y ductilidades

Muro	γ_y	γ_a	γ_{max}	γ_u	$\mu_{max} = \gamma_{max}/\gamma_y$	$\mu_u = \gamma_u/\gamma_y$
MC-0	0.00133	0.00066	0.00505	0.00701	3.79069	5.25708
MC-1	0.00150	0.00118	0.00603	0.00605	4.01316	4.02258
MC-2	0.00180	0.00086	0.00539	0.00898	2.98743	4.98003

MC-3	0.00257	0.00078	0.00535	0.00852	2.08458	3.31898
MC-4	0.00177	0.00073	0.00385	0.00695	2.18074	3.93582
MC-5	0.00199	0.00100	0.00599	0.00831	3.00443	4.16478

5.7. Componentes de la fuerza cortante del muro

La fuerza total se midió directamente por medio de la celda de carga instalada en el actuador.

La resistencia a cortante del muro se descompone en dos componentes principales, la resistencia debida a la mampostería y la resistencia debida al refuerzo, ver Figura 5.5. La resistencia debida a la mampostería es representada mediante la curva discontinúa (color verde), para el caso del muro sin refuerzo horizontal, la curva que define la resistencia debida a la mampostería es la curva discontinua naranja. La resistencia debida al refuerzo es representada por la curva continua (color azul). Evidentemente, en la figura 5.5, se observa la aportación a la resistencia a cortante, tanto de la mampostería como la del refuerzo a distintas distorsiones de los muros.

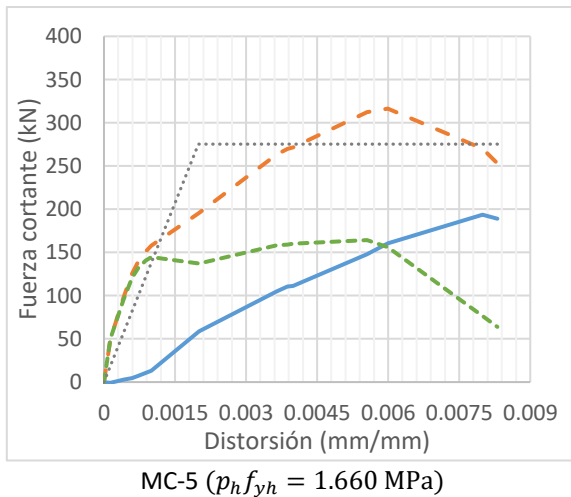
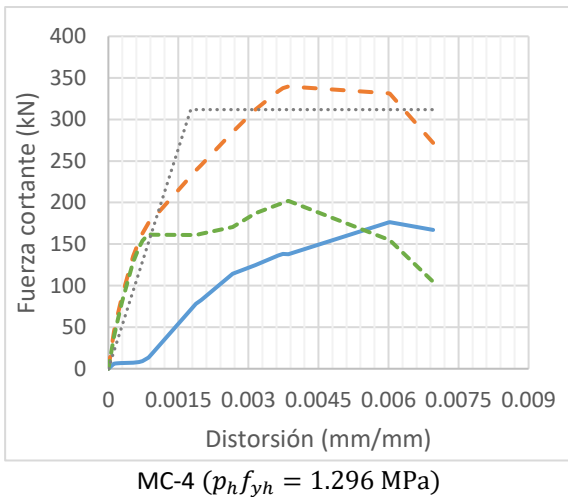
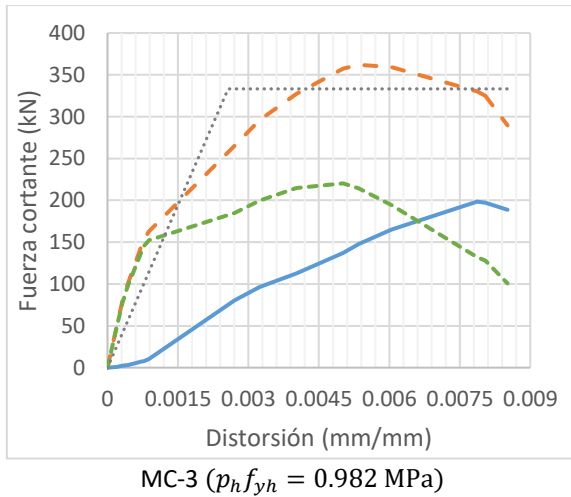
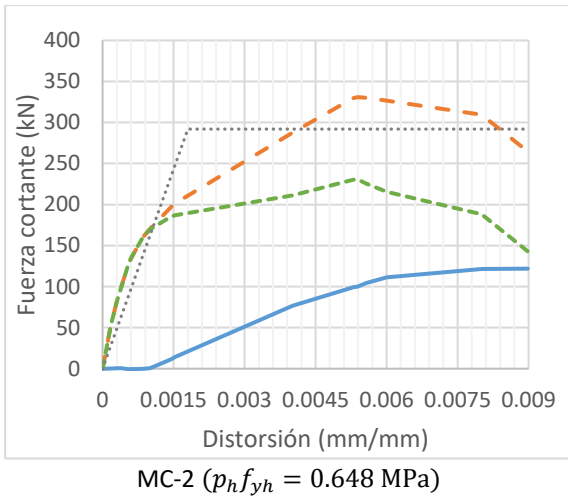
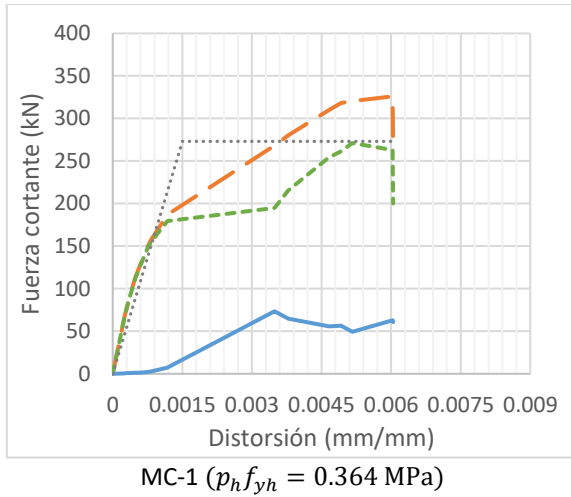
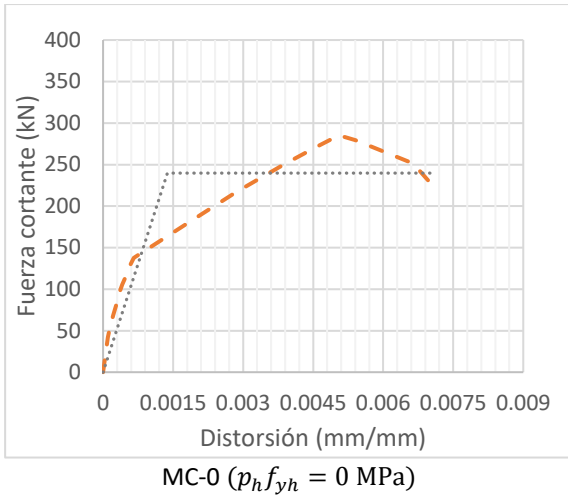
5.7.1. Resistencia debida al refuerzo

La fuerza resistida por el refuerzo se determinó analizando las deformaciones de los deformímetros o strain gages, en las siguientes curvas, son representadas por las curvas continuas azules. Para poder asociar las deformaciones a esfuerzos en el acero de refuerzo, se realizaron ensayos de segmentos de las varillas utilizadas en los muros para determinar la curva esfuerzo deformación de cada varilla. Se obtuvo una curva esfuerzo deformación promedio para todas estas fuerzas para todas las hiladas con refuerzo horizontal para así determinar la fuerza contribuida por el acero de refuerzo a la resistencia.

En la figura 5.5, se puede apreciar que a medida que la curva correspondiente a la resistencia debida al refuerzo incrementa, la resistencia debida a la mampostería va disminuyendo su aportación, esto es debido al incremento de daño en las piezas de mampostería. La contribución del refuerzo, en cambio, aumenta debido a que resiste lo que pierde la mampostería.

La reducción de la resistencia de la mampostería en relación con el aumento de cuantía de acero horizontal, se debe al aumento de la distribución del daño en los muros y a la reducción del área de contacto de las piezas debido a la presencia de barras de refuerzo horizontal.

Analizando el modelo MC-3, podemos notar que en la carga de 220.3 kN a una distorsión de 0.00501, la resistencia aportada por las piezas de mampostería comienza a decrecer, sin embargo, la resistencia aportada por el acero seguía en incremento hasta llegar a la carga de 198.4 kN a una distorsión de 0.00786, es importante mencionar que el modelo MC-3 fue el que obtuvo mayor contribución de refuerzo horizontal.



Muro: — Refuerzo: — Mampostería: — Curva elastoplástica equivalente: ·····

Figura 5.5 Resistencia a corte: total, atribuible al acero de refuerzo y atribuible a la mampostería. Curva elastoplástica equivalente

5.7.2. Resistencia debida a la mampostería

La resistencia debida a la mampostería se obtuvo por diferencia de la fuerza resistente total y la fuerza contribuida por el acero. En la Figura 5.5 se muestran las contribuciones: debida al refuerzo (líneas azules), debida a la mampostería (líneas verdes), así como también la fuerza cortante resistente total del muro (líneas naranjas)

En la Figura 5.6 se muestra la resistencia debida a la mampostería. La resistencia se presenta normalizada con respecto a la resistencia máxima del muro sin refuerzo.

Para observar la razón a la que decrece la resistencia debida a la mampostería, se normalizó con la resistencia máxima de la mampostería sin refuerzo MC-0. La forma en la que se obtuvo fue: dividiendo la resistencia ante carga lateral del muro MC-0 entre la resistencia de cada uno de los muros (MC-0, MC-1, MC-2, MC-3, MC-4, MC-5).

Note que a medida que se incrementa la cuantía de refuerzo horizontal, la participación de la mampostería es menor, es por ello que aunque se coloque mucho refuerzo no se incrementara la resistencia, pues la mampostería ya habrá sufrido degradación de rigidez y resistencia. También notamos que es muy consistente la reducción de resistencia, las piezas de mampostería a pesar de ser muy frágiles poseen esta propiedad de que se podría predecir la reducción de su resistencia en la medida que se incremente su cuantía

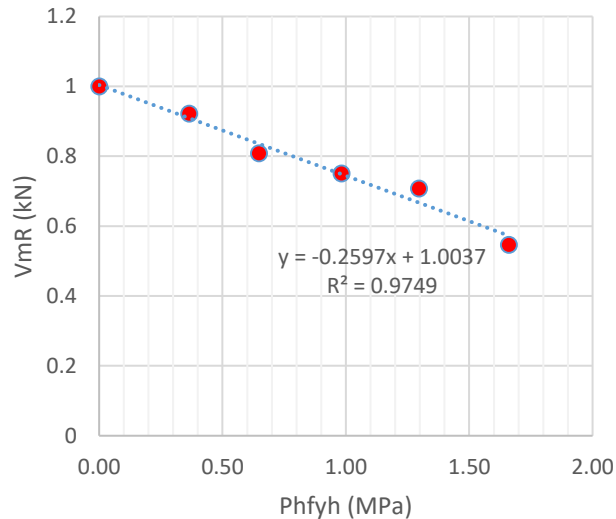


Figura 5.6 Resistencia debida a la mampostería normalizada con respecto a la resistencia máxima del muro sin refuerzo

5.8. Determinación de la cuantía límite

En la Figura 5.7 se muestran las resistencias debidas al refuerzo a la resistencia máxima de cada muro. Se muestra además el modelo de dos ramas propuesta para las nuevas normas, la rama ascendente obtenida con las líneas de tendencia de los puntos MC-0, a MC-2 y la rama horizontal con la línea de tendencia (resistencia media) de las resistencias de los muros MC-3 a MC-5. La intersección de ambas ramas define el punto cuya abscisa es la cuantía resistente límite.

Para la serie de muros de mampostería de arcilla extruida con refuerzo horizontal y con relación de aspecto igual a uno, la cuantía limite es igual a 0.93 MPa. La cuantía limite se expresa como una fracción de la resistencia promedio de los seis muros MC a compresión de la mampostería, en este caso

$$\lambda = \frac{(p_h f_{yh})_{lim}}{f_m} = 0.05696$$

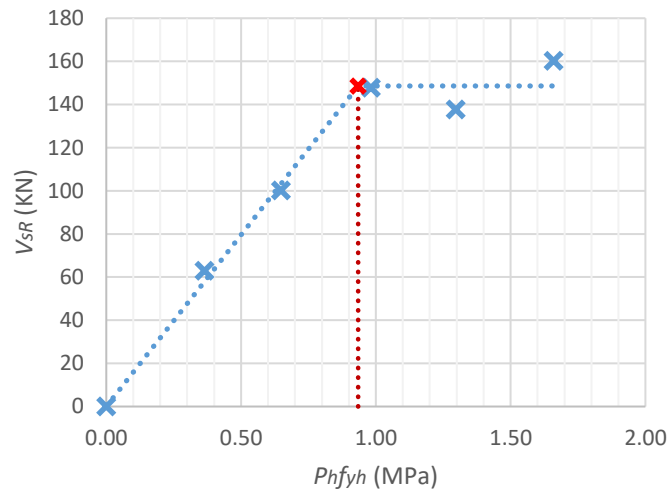


Figura 5.7 Resistencia debida al refuerzo con la cuantía y cuantía limite $q_{\ell} = 0.93 \text{ MPa}$

5.9. Disipación de energía

El concepto de energía de deformación nos permite tener idea de cuanta energía es presentada debido a las deformaciones por corte que se presentaron en los muros, el trabajo realizado por una fuerza al desplazar un cuerpo sobre el que actúa dicha fuerza es a lo que se llama energía de deformación.

La Figura 5.9, muestra la disipación de energía de los muros MC. Note que al aumentar la cuantía de refuerzo horizontal se mantiene la disipación de energía, esto es porque la mampostería utilizada es frágil y llega a un punto en que ya no puede repartir los esfuerzos a las barras de refuerzo horizontal pues ya están muy dañadas y esto fue observable en la medida que aumentan los anchos de grieta conforme se incrementaba la distorsión en las pruebas cíclicas de los diferentes muros.

La energía de deformación fue calculada con la ecuación:

$$E = \frac{(V_1+V_2)-(V_3+V_4)}{2} (\Delta_2 - \Delta_1)$$

De (Aguilar & Alcocer, 2001), se muestra la siguiente imagen:

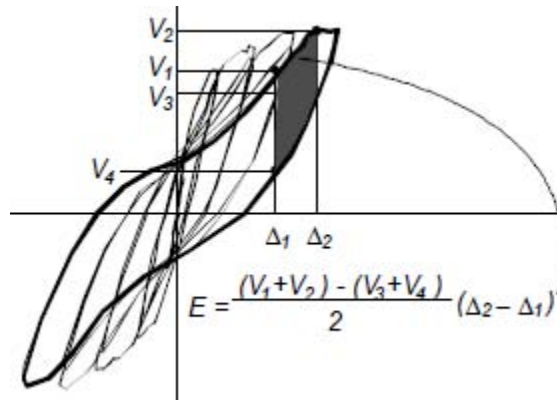


Figura 5.8 energía disipada

Donde el eje horizontal representa la distorsión y el eje vertical representa la fuerza de cortante

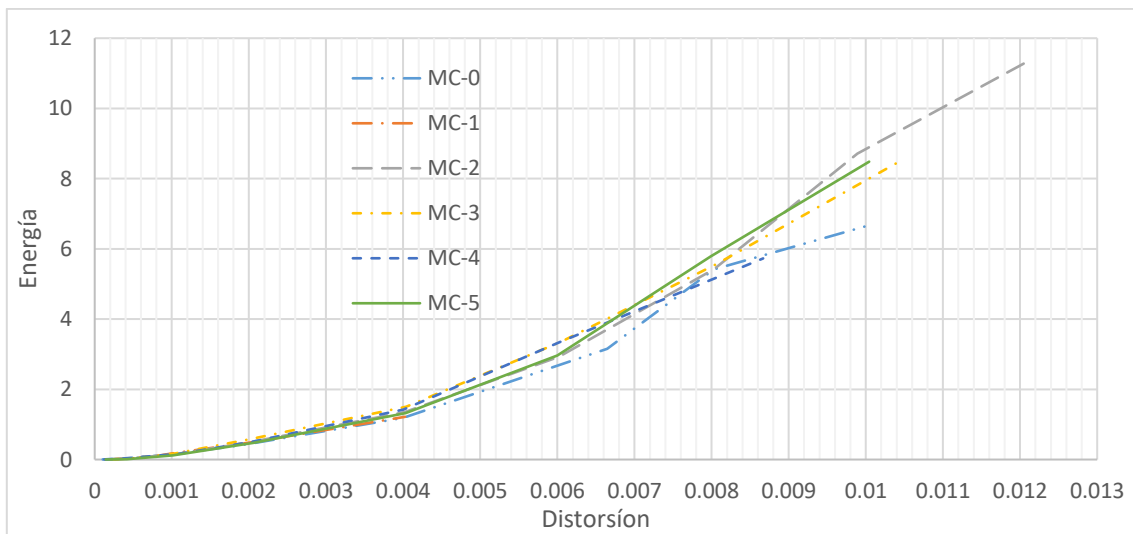


Figura 5.9 Disipación de energía

5.10. Rigidez de ciclo

En la tabla 5.3 de la referencia (Aguilar & Alcocer, 2001) muestran una tabla de rigidez elástica en donde concluyen que la rigidez inicial no depende del tipo de cuantía de refuerzo horizontal, ni del refuerzo de los castillos y que solo dependen de la geometría y de las propiedades mecánicas de los materiales con que fue construido el sistema estructural. En la actual investigación esto es evidente pues si observamos la Figura 5.5 en la distorsión después del primer agrietamiento de cada uno de los muros, es cuando es mayormente demandado el refuerzo horizontal y que antes de la resistencia al primer agrietamiento es mayormente demandado las piezas de mampostería, note que la degradación de rigidez está asociado con el incremento de distorsión y nivel de daño del muro.

En estos ensayos la rigidez de ciclo se calculó con la ecuación (10), se calculó así, porque la degradación de rigidez va incrementando a medida que aumenta la distorsión y no a medida que aumenta la carga (Aguilar & Alcocer, 2001)

$$k_c = \frac{V_{\gamma_{max}^+} + |V_{\gamma_{min}^-}|}{\gamma_{max}^+ + |\gamma_{min}^-|} \quad (10)$$

k_c es la rigidez de ciclo.

$V_{\gamma_{max}^+}$ es el cortante asociado a la distorsión máxima del semiciclo positivo.

$V_{\gamma_{min}^-}$ es el cortante asociado a la distorsión mínima del semiciclo negativo.

γ_{max} Es la distorsión máxima del semiciclo positivo

γ_{min} Es la distorsión mínima del semiciclo negativo

Observando la Figura 5.10 notaremos que la degradación de rigidez se parecen en su mayoría y que únicamente el muro MC0 y el muro MC-5 son los que difieren, se asocia a que las piezas de mampostería son demasiado rígidas y a la vez frágiles, por lo que a pesar de que en sus propiedades mecánicas presenten resistencias a compresión muy grandes, también presentan mucha fragilidad. Note que la distorsión después de 0.001 la degradación de rigidez fue muy rápida en comparación con su rigidez inicial.

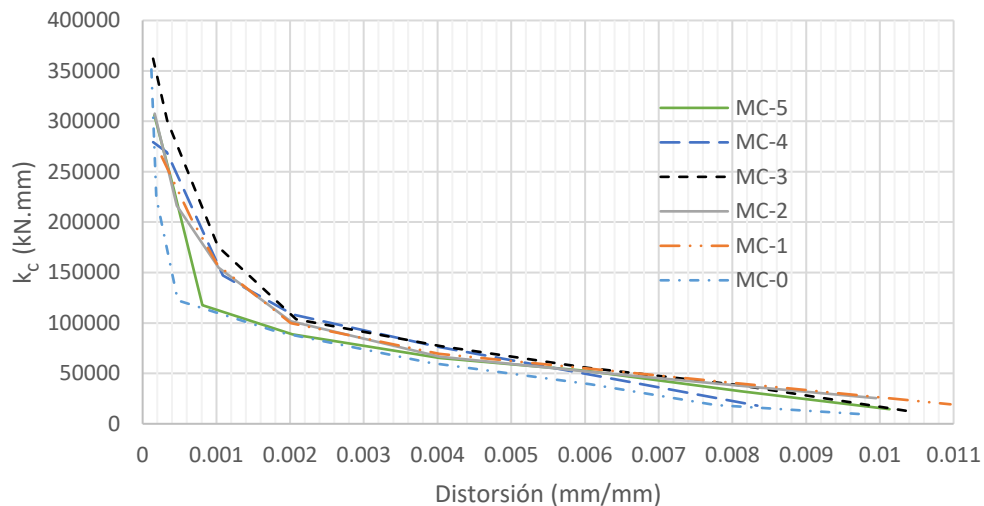


Figura 5.10 Degradación de rigidez

Capítulo 6. Discusión

Se discuten a continuación los resultados obtenidos. Tres aspectos son analizados con detalle: 1) La cuantía límite y el efecto del área neta de las piezas, 2) La resistencia debida a la mampostería y 3) el factor de comportamiento sísmico recomendable de una estructura construida con el sistema estudiado.

6.1. Cuantía límite

Se pudo verificar con los resultados obtenidos, que el modelo bilineal del comportamiento de la contribución del refuerzo es apropiado, como puede verse en la Figura 5.7.

Por otra parte, el valor de $\lambda = 0.05696$ resultó mucho mas pequeño de lo que originalmente se había propuesto de la referencia de Cruz Olayo & Pérez Gavilán, 2015, ($\lambda = 0.1$). Esto dio como resultado que las predicciones que se tenían de la resistencia a corte de los muros, utilizando los valores de la resistencia a compresión y cortante de la mampostería obtenidos experimentalmente, sobreestimaron significativamente la contribución del refuerzo horizontal en la resistencia de los muros. Esta discrepancia se debió principalmente a que la resistencia a la compresión de la mampostería obtenida de los ensayos de pilas fue muy elevada: en promedio $f_m = 17$ MPa (Tabla 4-4)

Tabla 4-4). La cuantía límite $q_\ell = 0.1f_m = 1.7$ MPa, indicaría que la contribución del refuerzo podría crecer constantemente hasta una cuantía muy elevada (la máxima cuantía resistente utilizada fue de 1.66 MPa (Tabla 4-2) , en cambio la cuantía límite obtenida fue de apenas $q_\ell = 0.05696 \times 17 = 0.968$ MPa. Se concluyó que f_m no podría ser el único parámetro para determinar la cuantía límite y se propuso que el área neta de las piezas debía de tener una influencia en los resultados. La idea se centra en que la resistencia a compresión de la mampostería es distinta, en distintas direcciones de la aplicación de la carga. Las resistencias tan elevadas observadas en la mampostería de piezas extruidas obedecen a que la carga axial se aplica paralela a la dirección de la extrusión, pero que de aplicarse, como sucede en el interior del muro, a una inclinación cercana a los 45° respecto a dicha dirección, las resistencia sería menor. La cuantía límite propuesta fue entonces.

$$q_\ell = 0.1f_{an}f_m$$

donde $f_{an} = A_n/A_b$ es el cociente del área neta y el área bruta de la pieza, esto es $\lambda = 0.1f_{an}$. Esta nueva definición de la cuantía límite da predicciones adecuadas para los ensayos realizados en este estudio. Para corroborar la validez de esta hipótesis se hicieron predicciones de varias series experimentales disponibles, los resultados se muestran en la Figura 6.1.

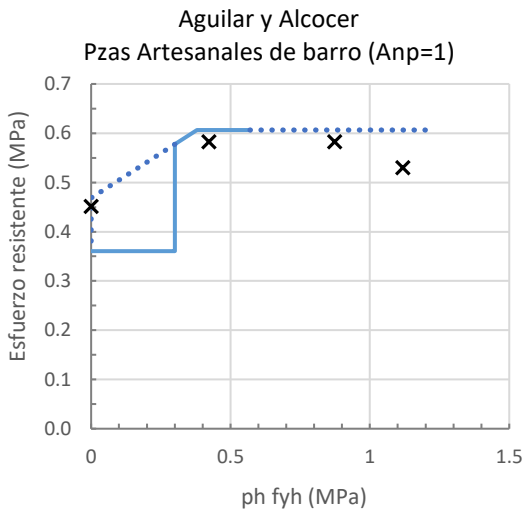
Las curvas en color azul representan las resistencias predichas con la nueva propuesta, utilizando los valores experimentales promedio de la resistencia a compresión de la mampostería, f_m , la resistencia a compresión diagonal, v_m , y utilizando un factor de reducción de la resistencia, F_R , igual a la unidad. Las curvas mencionadas que se presentan con línea continua, se suspenden para la cuantía máxima y se continúan posteriormente con líneas punteadas manteniendo la resistencia a corte constante. Las curvas continuas muestran una discontinuidad cuando la cuantía resistente alcanza el valor mínimo, $q_{min} = 0.3$ MPa. La discontinuidad se debe a que, para cuantías menores a la mínima se asume que el muro no tiene refuerzo horizontal. La línea punteada indica la resistencia para valores de cuantía resistente menores a la mínima, si se considerara el refuerzo aun para ese caso, siguiendo las mismas expresiones. Es importante notar que dichas líneas punteadas, cuando ya no se tiene refuerzo, llegan a un valor de la resistencia que corresponde a la resistencia máxima del muro sin refuerzo. Dicho valor corresponde a k_0V_a . Para efecto de comparar la resistencia experimental para el caso sin refuerzo con la resistencia calculada, debe utilizarse este valor, k_0V_a , como el valor calculado de la resistencia sin refuerzo.

Las curvas con líneas discontinuas en color gris, representan las resistencias predichas utilizando $\lambda = 0.1$ fijo, y se suspenden para la cuantía máxima, $0.15 f_m$, que es la cuantía máxima.

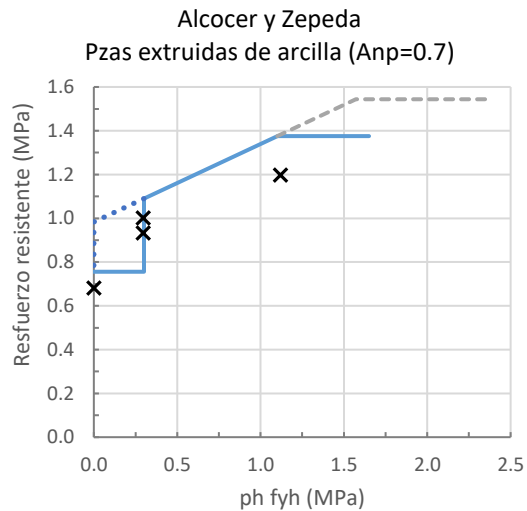
Se observa que al introducir el nuevo valor de λ se mejoran las predicciones en todos los casos, excepto en los ensayos con piezas artesanales ya que en ese caso no hubo cambio en el valor de λ pues $f_{an} = 1$ por tratarse de piezas macizas.

En las tablas debajo de cada gráfica se muestran los valores de la cuantía resistente q , el esfuerzo cortante resistente experimental τ_{exp} , el valor del esfuerzo calculado utilizando la nueva propuesta, τ_c , el error relativo del valor calculado

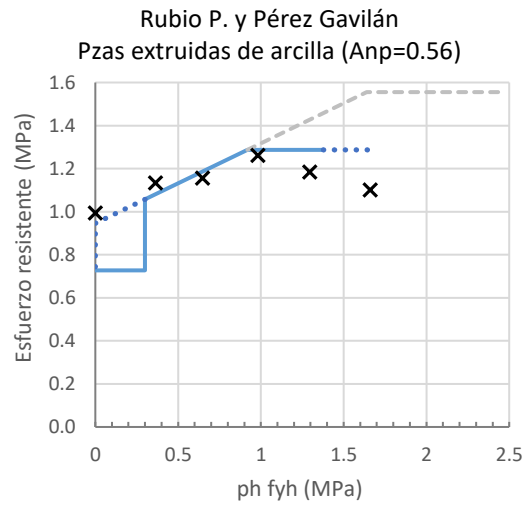
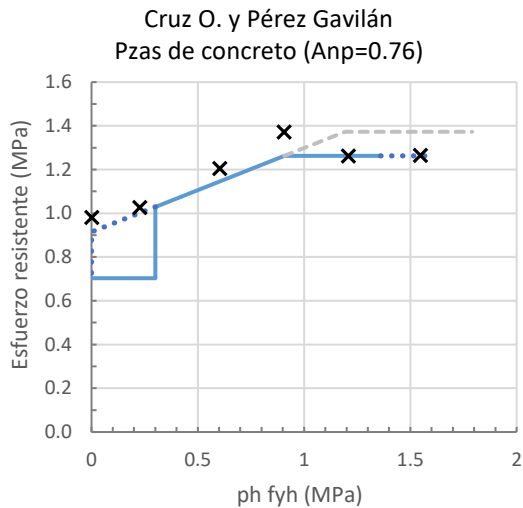
$$e_c = \frac{\tau_c - \tau_{exp}}{\tau_{exp}}$$



Muro	q	τ_{exp}	τ_c	err
M2	0.000	0.451	0.469	0.039
M1	0.873	0.582	0.606	0.042
M3	0.422	0.582	0.606	0.042
M4	1.118	0.530	0.606	0.145



Muro	q	τ_{exp}	τ_c	Err
N1	0.000	0.680	0.756	0.111
N2	0.294	0.932	1.090	0.169
N3	0.294	1.001	1.090	0.089
N4	1.118	1.197	1.375	0.149



Muro	q	τ_{exp}	τ_c	Err
MB1	0.000	0.980	0.914	0.068
MB2	0.227	1.027	1.001	0.025
MB3	0.603	1.204	1.146	0.048
MB4	0.905	1.372	1.262	0.080
MB5	1.208	1.261	1.262	0.001
MB6	1.547	1.265	1.262	0.002

Muro	q	τ_{exp}	τ_c	Err
MC1	0.000	0.994	1.057	0.063
MC2	0.364	1.134	1.081	0.047
MC3	0.648	1.156	1.186	0.027
MC4	0.982	1.262	1.287	0.020
MC5	1.296	1.184	1.287	0.087
MC6	1.660	1.100	1.287	0.017

Figura 6.1 Comparación de la resistencia a corte experimental de varios ensayos (x) con la predicción de resistencia utilizada $\lambda = 0.1$ (-----), la nueva propuesta $\lambda = 0.1f_{an}$ (———), ambas calculadas con los valores de las propiedades mecánicas promedio de los materiales.

Vale la pena observar que la predicción, para el caso de los ensayos de Alcocer y Zepeda, se sobreestima la resistencia. Sin embargo, estos ensayos fueron realizados con muros confinados con castillos internos, con excepción del espécimen N3. En realidad, eran castillos con dos barras que no tenían un núcleo confinado. Las resistencias observadas usando castillos internos son menores a la observada con castillos externos. Se observa que para el caso del espécimen N3, con castillos externos, el error de la predicción es el más pequeño. Esto sugiere que pudiera reducirse la resistencia a corte de los muros cuando se usan castillos internos. Sin embargo, dado que la nueva especificación en la norma es mucho más exigente en cuanto al uso de los castillos internos, y todavía no hay evidencia experimental con muros que tengan castillos que cumplan la nueva especificación, no se está proponiendo aquí, dicha reducción de resistencia.

6.2. Resistencia debida a la mampostería

En la Figura 6.2 se muestra la resistencia normalizada debida a la mampostería cuando se alcanza la resistencia máxima, en función de la cuantía de refuerzo horizontal. Se incluyen los nuevos

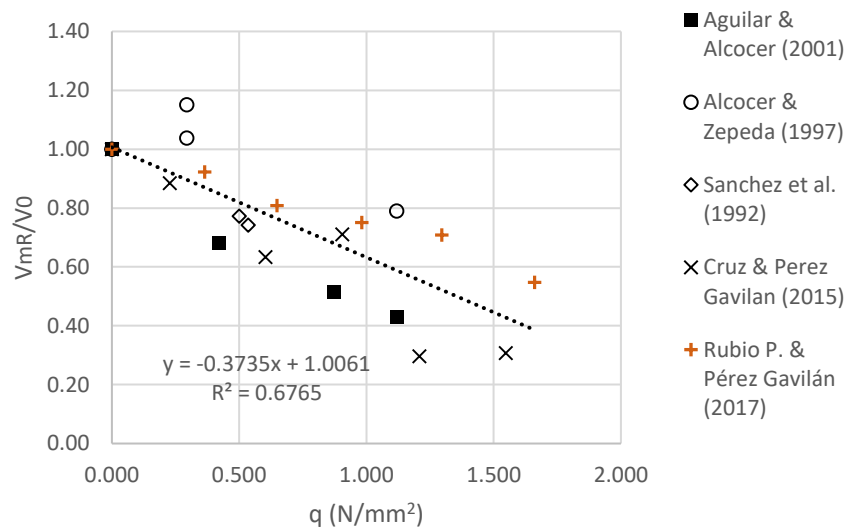


Figura 6.2 Reducción de la resistencia de la mampostería debida a la cuantía de refuerzo horizontal

resultados de los ensayos de este estudio, que se muestran en color naranja. El valor de α corresponde a la pendiente de la línea de tendencia. La pendiente con los nuevos valores se reduce un poco, en promedio, paso de 0.4 (anteriormente propuesto) a $\alpha = 0.37$. No se creyó

necesario cambiar el valor que ya se había aprobado de 0.4 MPa^{-1} que es un valor un poco conservador.

6.3. Capacidad de distorsión

La capacidad de distorsión de los muros es una característica de mucha importancia en el diseño de las estructuras de mampostería, como en cualquier otro tipo de estructura, y está relacionada con la determinación de la reducción de las fuerzas sísmicas para diseño por medio de un factor, conocido en las normas mexicanas como el factor de comportamiento sísmico Q , que tiene que ver con la ductilidad global de la estructura. En estructuras de mampostería, el factor de comportamiento sísmico Q , que es una medida global de la estructura, no es una medida apropiada para determinar la capacidad de distorsión demandada en los muros, particularmente en los muros del primer nivel de las estructuras. Esto se debe a que en este tipo de estructuras el daño se concentra en los muros de planta baja. Para determinar la demanda de ductilidad en los muros de primer nivel en función de la ductilidad global de la estructura puede utilizarse la expresión

$$\mu_1 = 1 + \frac{2n + 1}{3}(Q - 1)$$

donde μ_1 es la demanda de ductilidad en un muro de planta baja en función de la ductilidad global de la estructura Q y el número de niveles n . Utilizando la ductilidad o capacidad de distorsión de los muros en esta investigación, fue posible determinar cuál sería el máximo número de niveles que una estructura de mampostería hecha con muros de las mismas características de los muros ensayados, podría diseñarse, considerando una ductilidad global de $Q=1.5$ y $Q=2.0$. Los resultados se presentan en la Tabla 6-1. Las ductilidades se calcularon a la resistencia máxima, que es la utilizada en las normas técnicas, como la ductilidad apropiada para un desempeño de las estructuras de protección al colapso. La ductilidad de fluencia μ_y se determinó utilizando un modelo elastoplástico equivalente. Dicho modelo esta en función de dos parámetros, la resistencia a la fluencia R_y y la deformación a la fluencia γ_y . Estos parámetros se determinaron utilizando un procedimiento reconocido, descrito en la literatura ASCE/SEI 41-13, 2014. En el Apéndice A se detalla el cálculo.

Tabla 6-1 Número de niveles aceptable para una ductilidad global dada

Muro	γ_y	γ_{max}	$\mu_1 = \frac{\gamma_{max}}{\gamma_y}$	Numero de niveles aceptable	
				Q=1.5	Q=2
MC-0	0.00133	0.00505	3.8	8	3
MC-1	0.0015	0.00603	4.0	8	4
MC-2	0.0018	0.00539	3.0	5	2
MC-3	0.00257	0.00535	2.1	3	1
MC-4	0.00177	0.00385	2.2	3	1
MC-5	0.00199	0.00599	3.0	5	2
			2.9	4.8	2.2

Se observa que utilizando un factor de comportamiento sísmico $Q = 2.0$ el promedio de número de niveles aceptable para no exceder la capacidad de distorsión de los muros fue de 2.2 niveles. Mientras que utilizando un valor de $Q = 1.5$ el número de niveles aceptable crece a 4.8

Conclusiones

- La contribución del refuerzo horizontal a la resistencia a corte tiene un comportamiento bilineal, y consta de una rama ascendente y una rama constante, en esta serie de ensayos, en la rama ascendente la cuantía resistente límite fue de 0.93 MPa y a partir de ese valor la resistencia se mantiene constante a pesar de que se incremente la cuantía, $p_h f_{yh}$.
- Las piezas de barro extruida tienen una limitada capacidad para transmitir las fuerzas generadas en el refuerzo, y esto es reflejado en su poca capacidad de disipación de energía a pesar de un aumento de cuantía y también a pesar de tener una buena rigidez inicial, pues posteriormente, la degradación de rigidez es muy rápida, aunque tenga mucha cantidad de refuerzo horizontal. Este tipo de piezas permiten que haya un aumento moderado en la resistencia a corte debido a su poca capacidad para transmitir fuerzas en el refuerzo horizontal.
- La cuantía resistente límite relativa a la resistencia a compresión de la mampostería, fue sustancialmente menor que el valor propuesto anteriormente por (Cruz Olayo, 2015) ($\lambda = 0.056$ en vez de $\lambda = 0.1$). El nuevo valor propuesto $\lambda = 0.1 f_{an}$ conduce a mejoras sustanciales en las predicciones de resistencia para muros construidos con distintos tipos de mampostería.
- El resultado anterior confirma que la fuerza debida al refuerzo se transmite por compresión en el muro, y que los que están mayormente demandado a los esfuerzos a corte son las piezas de mampostería que conforman el muro, por lo que la resistencia está relacionada con la resistencia a compresión de la mampostería, pero también con el área efectiva de las piezas. La reducción de la cuantía resistente límite se atribuye a esta reducción del área efectiva de las piezas, que en el caso estudiado alcanza un valor apenas mayor al 50%.
- La reducción de la resistencia de la mampostería tiene un comportamiento lineal y se reduce con la cuantía de refuerzo, y esto es debido a la proporción de área bruta y área neta, por el momento se puede decir que, a mayor área neta, mayor capacidad para transmitir esfuerzos de corte.

Referencias

- Aguilar Ramos, G., 1997. *Efecto del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería confinada ante cargas laterales*, México : Tesis de licenciatura, UNAM.
- Aguilar, G. & Alcocer, S. M., 2001. *Efecto del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería confinada ante cargas laterales*, México: Sistema Nacional de Protección Civil, CENAPRED..
- Alcocer, S. M., Zepeda, J. A. & Ojeda Ziga, M., 1997. *Estudio de la factibilidad técnica del uso de tabique Vintex y Multex para vivienda económica.*, México: Sistema Nacional de Protección Civil, CENAPRED.
- ASCE/SEI 41-13, 2014. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. *American Society of Civil Engineers, EEUU.* .
- Cruz Olayo, A. I., 2015. *Contribución del refuerzo horizontal a la resistencia de muros de mampostería confinada*, México: s.n.
- Fernández Orozco, L., 2000. *Laboatorio de materiales de construcción y control de calidad*. México: Materiales-Tomo 1, tercera edición..
- Flores Corona, L. & Alcocer Martines de Castro, S. M., 2001. *Estudio Analítico de estructuras de mampostería confinada*.. México: Área de ingeniería estructural y Geotecnia. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 1ra Edición.
- Hernández, O. & Meli Piralla, R., 1976. *Modalidades de refuerzo para mejorar el comportamiento sísmico de muros de mampostería* , CDMX: Universidad Nacional Autónoma de México.
- NMX-B-072-CONACERO, 2008. *Industria Siderúrgica-Varilla corrugada de acero grado 60, laminada en frío para refuerzo de concreto*, México: Especificaciones y métodos de prueba.
- NMX-B-310, 1981. *Metodos de prueba a tension para productos de acero*, México: Norma Mexicana, Secretaría de comercio y Fomento Industrial.
- NMX-C-061-ONNCCE, 2001. *Determinación de la resistencia a compresión de cementantes hidráulicos.*, México, CDMX: Norma Mexicana, Industria de la Construcción-Cemento.
- NMX-C-404-ONNCCE, 2012. *Tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural*, México, CDMX: Norma Mexicana, Industria de la construcción-Mampostería-Especificaciones y metodos de ensaye.
- NMX-C-464-ONNCCE, 2010. *Determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o de concreto*, s.l.: Norma Mexicana, Insustría de la construcción-Mampostería.
- NTCM, 2004. *Normas Tecnicas Complementarias del Reglamento de Costrucciones para el Distrito Federal.*, México: Diseño y construcción de estructuras de Mampostería..
- Pérez Gavilán, J. J. & Manzano, A., 2013. Efecto del momento flexionante en la fuerza cortante que produce el agrietamiento por tensión diagonal en muros de mampostería confinada. *Revista de ingeniería Sísmica* .
- Pineda, J. A. & Alcocer, S. M., 2004. *Comportamiento ante cargas laterales de muros de mampostería confinada reforzados con mallas de alambre soldado*, México: Sistema Nacional de Proteccion Civil, CENAPRED.

Sanchez, T. A., Flores Corona, L. & Meli, R., 1992. *Respuesta Sísmica de Mampostería Confinada con Diferentes Tipos de Refuerzo Horizontal*, México: Informe para el instituto Nacional Para la Vivienda de los Trabajadores.

Apéndice A. Modelo elastoplástico equivalente

La envolvente elastoplástica equivalente del modelo, Figura A. 1, se determina de modo que el área bajo la curva elastoplástica es igual al área de la envolvente positiva obtenida experimentalmente. Adicionalmente, la rama ascendente de la envolvente elastoplástica, debe intersectar a la envolvente experimental en el punto en el que la fuerza lateral es 60% de la resistencia máxima del modelo elastoplástico. ($0.6 R_y$).

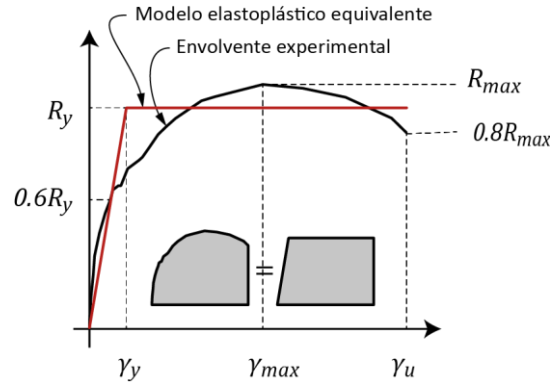


Figura A. 1 Envolvente del muro (negro) y envolvente elastoplástica (rojo)

El procedimiento de cálculo es iterativo, se describe a continuación

1. Se calcula el área bajo la cura de la envolvente experimental del muro con la siguiente ecuación y se propone el valor de R_y , R_p :

$$A_{ex} = \sum_{i=0}^n \frac{V_i + V_{i+1}}{2} \times (\gamma_{i+1} - \gamma_i) \quad (11)$$

se propone que $R_p = R_{max}$,

2. $R_i = 0.6R_p$
3. Se calcula por interpolación el valor de la distorsión correspondiente a la carga en que se supone intersectan el modelo equivalente y el experimental, γ_i . La rigidez de la rama ascendente de la envolvente elastoplástica es entonces $K = R_i/\gamma_i$
4. Se calcula el valor calculado de R_y , R_c . El área bajo la curva de la envolvente elastoplástica, A_{ee} , se iguala el área bajo la curva de la envolvente experimental, A_{ex} :

$$A_{ee} = \frac{R_c^2}{2K} + R_c \left(\gamma_u - \frac{R_c}{K} \right) = A_{ex} \quad (12)$$

reordenando términos:

$$-\frac{1}{2K}R_c^2 + \gamma_u R_c - A_{ex} = 0 \quad (13)$$

de donde se obtiene R_c .

- Se verifica si el valor propuesto de la fuerza, R_p , es igual a la fuerza calculada R_c . Si $|R_c - R_p| < \epsilon$, entonces, $R_y = R_c$ y $\gamma_y = R_y/K$, fin del cálculo. De lo contrario $R_p = R_c$, ir al paso 2.

Ejemplo

A continuación, se muestran los pasos a seguir para la obtención de la curva elastoplástica correspondiente al muro MC-3. Teniendo los siguientes valores de distorsión y fuerza cortante que definen a la envolvente del muro. La gráfica de la envolvente experimental y la del modelo elastoplástico del muro MC3 se muestra en la Figura A. 2.

Envolvente		Primera iteración
Distorsión mm/mm	Muro kN	
0.00000	0.0	1.- Utilizando la ecuación (11), se obtiene $A_{ex} = 2.41$, $R_{max} = 362.0$ kN. Se propone $R_p = R_{max}$
0.00021	51.5	2.- $R_i = 0.6R_p = 217.2$ kN
0.00032	80.4	
0.00034	84.9	3.- Como podemos notar, el valor 217.2 kN está entre los valores de distorsión 0.00088 y 0.00271. Por interpolación se obtiene el valor, γ_i .
0.00037	89.6	
0.00040	94.2	
0.00044	102.0	
0.00073	146.7	$\gamma_i = 0.00185$
0.00078	153.5	$K = F_i/\gamma_i = 117541$
0.00088	163.1	
0.00271	265.4	Se utiliza la ecuación (13) Y se obtiene el valor $R_c = 341.12$ kN
0.00324	296.1	
0.00402	327.2	4.- $ R_c - R_p < \epsilon?$ $ 341.1 - 362.0 < 0.01?$, los valores son distintos por lo que $R_p = R_c = 341.12$, se va nuevamente al paso 2
0.00502	357.4	
0.00535	362.0	
0.00604	359.3	
0.00787	330.4	
0.00804	325.0	
0.00852	289.6	

Segunda iteración

2.- $R_i = 0.6R_p = 204.7$

3.- Interpolando entre los valores de distorsión 0.00088 y 0.00271 obtenemos $\gamma_i = 0.00162$ y $K = R_i/\gamma = 126007$,

4.- con la ecuación (13) se obtiene un nuevo valor $R_c = 335.4$ kN

5.- $|R_c - R_p| < \epsilon$? $|335.42 - 341.12| < 0.01$?, no se cumple por lo que $R_p = R_c = 335.4$ ir al paso 2.

...etc, después de 7 iteraciones se obtiene $R_y = R_c = 333.2$ kN, $R_i = 0.6 R_y = 199.9$, $\gamma_i = 0.00154$

de donde $K = \frac{R_i}{\gamma_i} = 129848$. Finalmente se obtiene que la distorsión a la fluencia $\gamma_y = R_y/K = 0.00257$

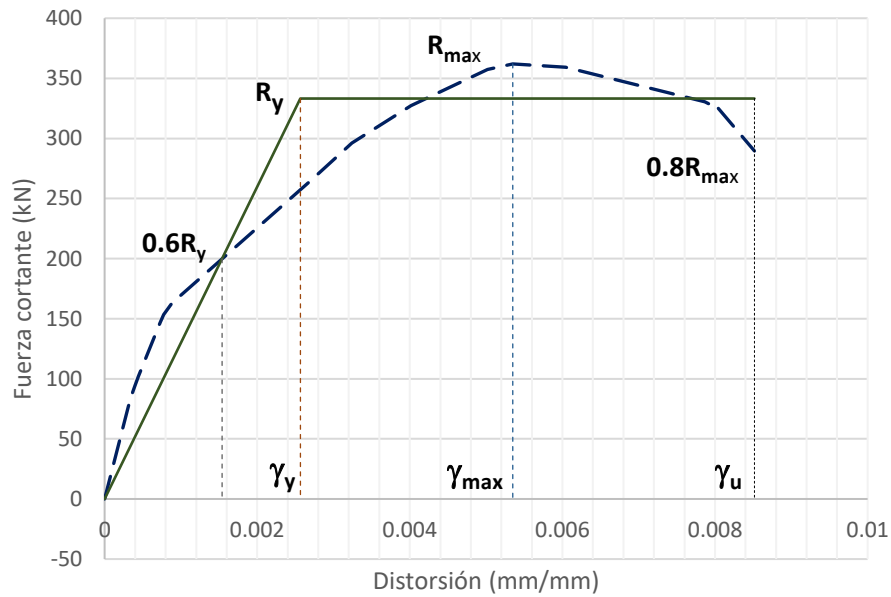


Figura A. 2 Envolvente del muro MC3 (línea discontinua) y envolvente elasto-plástica (línea continua)

Apéndice B. Historia de esfuerzos en el refuerzo horizontal

Para la determinación de los esfuerzos en el acero de refuerzo horizontal, se utilizó la Teoría clásica de plasticidad (Simo y Hughes 1997). El problema consiste en que dado un estado conocido de esfuerzo y un incremento de la deformación se obtenga el estado actualizado de esfuerzo. El procedimiento mostrado en la referencia mencionada se generalizó para el caso de una curva de endurecimiento generalizada para poder utilizar las curvas del refuerzo obtenidas experimentalmente.

La historia de deformaciones de cada extensómetro se convierte en una historia de esfuerzos utilizando E como el módulo de elasticidad de la curva esfuerzo deformación, σ_Y es el valor del esfuerzo de fluencia o límite a partir del cual se inicia el endurecimiento. La regla o curva esfuerzo deformación de endurecimiento está dada por $C(\alpha)$ Figura B. 1

Los pasos son los siguientes

- 1) El estado conocido es $\{\varepsilon_n^p, \alpha_n\}$, la deformación plástica y la variable de deformación de endurecimiento (para el estado inicial, ambas son cero).
- 2) Dado un incremento de deformación $\varepsilon_{n+1} = \varepsilon_n + \Delta\varepsilon_n$
- 3) Calcular el estado elástico de prueba y probar si se produce flujo plástico

$$\begin{aligned} \sigma_{n+1}^{tr} &:= E(\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n^p) \\ f_{n+1}^{tr} &:= |\sigma_{n+1}^{tr}| - \left(\sigma_Y + \frac{\partial C(\alpha_n)}{\partial \alpha} \alpha_n \right) \\ \text{IF } f_{n+1}^{tr} \leq 0 \text{ THEN} \\ &\quad \sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr} \\ &\quad \varepsilon_{n+1}^p = \varepsilon_n^p \\ &\quad \alpha_{n+1} = \alpha_n \\ \text{ELSE} \\ \Delta\gamma &:= \frac{f_{n+1}^{tr}}{\left(E + \frac{\partial C(\alpha_n)}{\partial \alpha} \right)} > 0 \\ \sigma_{n+1} &:= \left[1 - \frac{\Delta\gamma E}{|\sigma_{n+1}^{tr}|} \right] \sigma_{n+1}^{tr} \\ \varepsilon_{n+1}^p &:= \varepsilon_n^p + \Delta\gamma \text{ sign}(\sigma_{n+1}^{tr}) \\ \alpha_{n+1} &:= \alpha_n + \Delta\gamma \\ \text{ENDIF} \end{aligned}$$

donde f es la superficie de fluencia

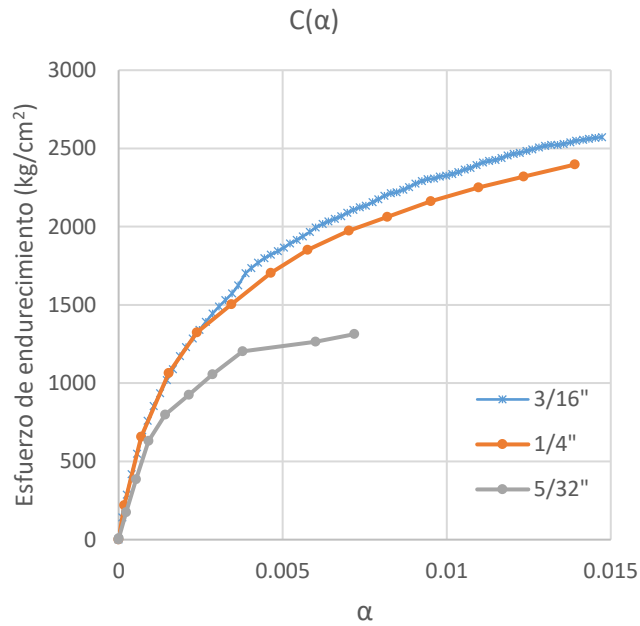


Figura B. 1 Curvas Promedio de endurecimiento para las barras con distinto diámetro

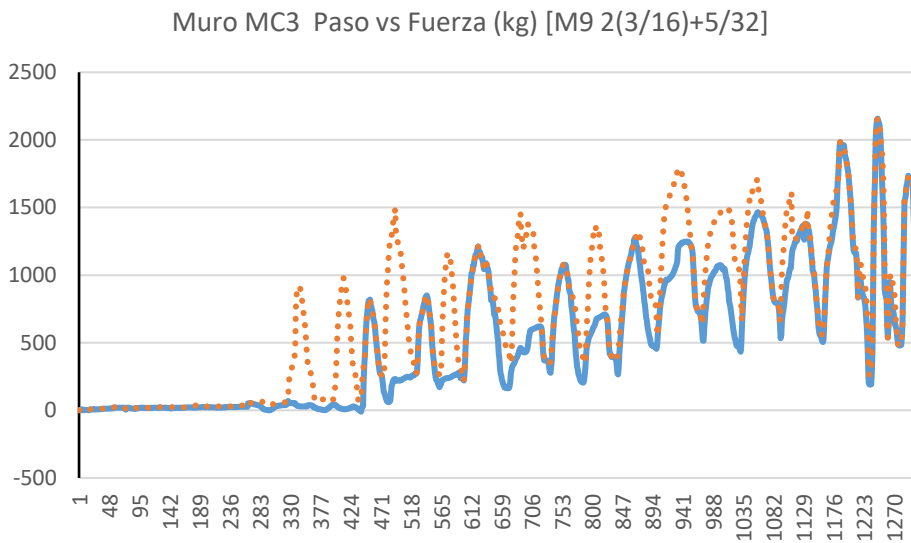


Figura B. 2 Fuerza máxima en la segunda hilada con refuerzo, contando de abajo hacia arriba (línea punteada) y fuerza obtenida con el extensómetro M9 (línea continua), el lecho tiene 2 barras de 3/16" y una barra de 5/32"

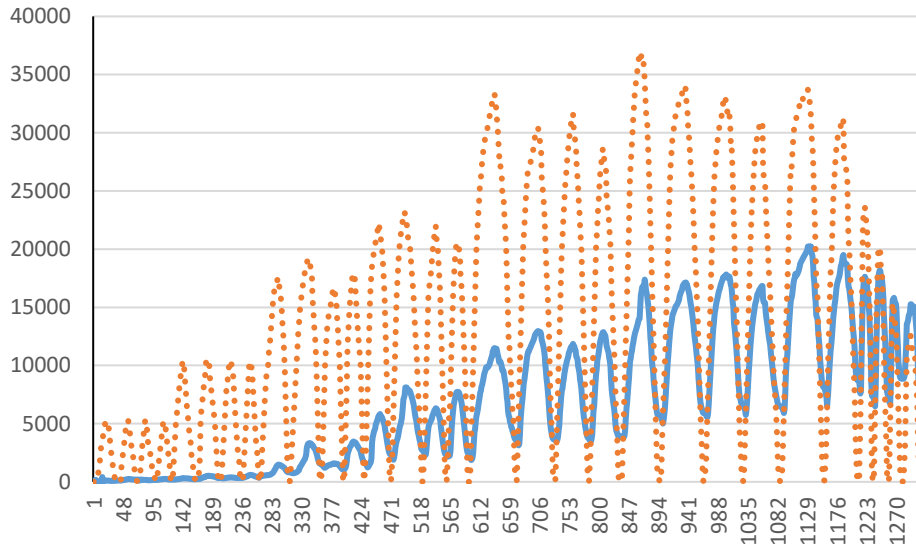
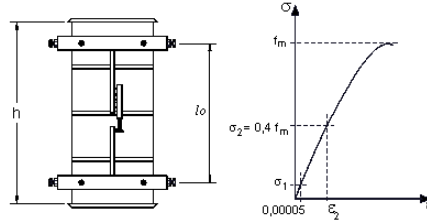


Figura B. 3 Muro MC3, Fuerza total que toma el refuerzo (línea continua), valor absoluto de la carga lateral en el muro (línea punteada)

[1] Computational inelasticity, J.C. Simo & T.J.R. Hughes, Springer, 1997

Apéndice C Propiedades mecánicas de los materiales

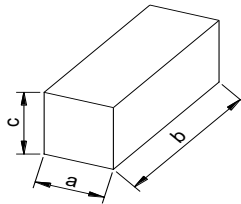
C.1 Pruebas de compresión de pilas de mampostería



Pila MC-0	Dimensiones, cm				Área bruta, A	Carga,	Esfuerzo bruto, f_m	Em
	a	b	h	l_0	cm ²	tn	kg/cm ²	
PMC01	11.8	24.3	50.2	38.1	286.7	44.6	155.54	41837.407
PMC02	11.7	24.2	50.2	38.2	283.1	45.1	159.29	48064.529
PMC03	11.8	24.1	50.1	38.3	284.4	54.1	190.24	53183.400
PMC04	11.8	24.2	50.2	38.4	285.6	45.2	158.29	40450.607
Promedios							169.3	45883.986
Pila MC-1	Dimensiones, cm				Área bruta, A	Carga,	Esfuerzo bruto, f_m	Em
	a	b	h	l_0	cm ²	tn	kg/cm ²	
PMC11	11.6	24.2	50.4	39.6	280.7	53	188.80	60814.062
PMC12	11.8	24.3	50.2	39.8	286.7	44.1	153.80	51512.473
PMC13	11.8	24.2	50.2	38.5	285.6	43.1	150.93	41889.682
PMC14	11.7	24.2	50.0	38.9	283.1	30.2	106.66	33059.10
Promedios							137.1	46818.830
Pila MC-2	Dimensiones, cm				Área bruta, A	Carga,	Esfuerzo bruto, f_m	Em
	a	b	h	l_0	cm ²	tn	kg/cm ²	
PMC21	11.8	25.1	50.3	38.9	296.2	52.7	177.93	49718.390
PMC22	11.7	24.1	51.0	39.7	282.0	52.3	185.48	59774.970
PMC23	11.5	23.9	51.2	39.1	274.9	43.9	159.72	48825.97
PMC24	11.3	23.9	50.8	37.2	270.1	56.3	208.46	57440.613
Promedios							184.6	53939.98
Pila MC-3	Dimensiones, cm				Área bruta, A	Carga,	Esfuerzo bruto, f_m	Em
	a	b	h	l_0	cm ²	tn	kg/cm ²	
PM32	11.5	24.1	50.1	38.3	277.2	56.3	203.14	56426.945
PM33	11.7	24.2	50.0	38.1	283.1	52.7	186.13	47983.662
PM34	11.4	24.1	50.3	39.2	274.7	43.7	159.06	58496.855
Promedios							182.8	54302.48
Pila MC-4	Dimensiones, cm				Área bruta, A	Carga,	Esfuerzo bruto, f_m	Em
	a	b	h	l_0	cm ²	tn	kg/cm ²	
PMC41	11.7	24.1	50.1	38.1	282.0	44.8	158.88	62106.458
PMC42	11.7	24.0	50.0	38.4	280.8	31	110.40	60945.275
PMC43	11.7	24.1	50.3	38.1	282.0	47	166.68	49131.137
PMC44	11.7	24.2	50.4	38.2	283.1	60.3	212.97	50018.446
Promedios							162.2	55550.329

Pila MC-5	Dimensiones, cm				Área bruta, A	Carga,	Esfuerzo bruto, f_m	Em
	a	b	h	l_0	cm ²	tn	kg/cm ²	
PMC51	11.7	24.2	50.5	38.3	283.1	44.8	158.23	47837.102
PMC52	11.5	24.2	50.6	38.3	278.3	43.1	154.87	55485.592
PMC53	11.7	24.2	50.5	38.3	283.1	50	176.59	46635.269
PMC54	11.6	24.2	50.5	38.3	280.7	50.3	179.18	53065.892
Promedios							167.216912	50755.964
		Valores promedio:						
		h	50.4			Promedio	167.9	51074.:
		a	11.7			Desvesta	26.2	7415.:
Relación altura espesor de la pila:			4.3			Cm	0.156	0.14:
Por lo tanto, el factor correctivo es =			1.0			f*m	120.7	37472.:
Cm Coeficiente de variación que en ningún caso se tomará inferior a 0.15								

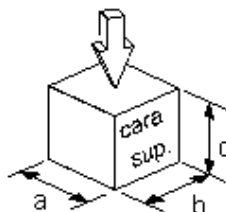
C.2 Ensaye de piezas



MC-0	Dimensiones, cm			Peso	Peso,	Carga	Área	Esfuerzo
Pieza	a	b	c	g	t/m ³	cm ²	kg/cm ²	
M0	11.60	24.20	12.00	3345	0.993	25800.00	280.72	91.906526:
M0	11.60	24.10	12.00	3461	1.032	50000.00	279.56	178.85248:
M0	11.80	24.40	12.00	3436	0.994	49700.00	287.92	172.61739:
M0	11.80	24.20	12.00	3353	0.978	68300.00	285.56	239.17915:
M0	11.70	24.20	12.00	3459	1.018	65500.00	283.14	231.33432:
M0	11.80	24.20	12.00	3456	1.009	76000.00	285.56	266.14371:
Promedio								196.67226:
MC-1	Dimensiones, cm			Peso	Peso,	Carga	Área	Esfuerzo
Pieza	a	b	c	g	t/m ³	cm ²	kg/cm ²	
M1	11.80	23.80	11.90	3935	1.177	66600.00	280.84	237.14570:
M1	11.60	23.90	11.80	3981	1.217	72500.00	277.24	261.50627:
M1	11.70	23.90	11.50	3937	1.224	53700.00	279.63	192.03948:
M1	11.40	24.10	11.70	3658	1.138	28000.00	274.74	101.91453:
M1	11.60	24.10	11.80	3655	1.108	34800.00	279.56	124.48132:
M1	11.30	24.20	11.70	3585	1.120	32900.00	273.46	120.310:
Promedio								172.89957:

MC-2	Dimensiones, cm			Peso	Peso,	Carga	Área	Esfuerzo
Pieza	a	b	c	g	t/m ³	kg	cm ²	kg/cm ²
M2	11.50	24.00	11.80	3822	1.174	74500.00	276.00	269.927531
M2	11.50	24.00	11.80	3896	1.196	73400.00	276.00	265.942021
M2	11.40	23.90	11.60	3884	1.229	77800.00	272.46	285.546501
M2	11.70	24.10	11.80	3834	1.152	62500.00	281.97	221.654781
M2	11.60	23.90	11.80	3785	1.157	74100.00	277.24	267.277441
M2	11.50	24.00	11.70	3989	1.235	82600.00	276.00	299.275361
Promedio								268.270611
MC-3	Dimensiones, cm			Peso	Peso,	Carga	Área	Esfuerzo
Pieza	a	b	c	g	t/m ³	kg	cm ²	kg/cm ²
M3	11.60	23.80	11.80	4004	1.229	66700.00	276.08	241.596631
M3	11.70	24.20	11.90	3844	1.141	63200.00	283.14	223.211131
M3	11.70	23.90	12.00	3964	1.181	67200.00	279.63	240.317561
M3	11.50	24.00	11.80	3937	1.209	71100.00	276.00	257.608691
M3	11.50	24.00	11.90	4022	1.225	68400.00	276.00	247.826081
M3	11.70	23.90	12.10	3904	1.154	70800.00	279.63	253.191711
Promedio								243.958631
MC-4	Dimensiones, cm			Peso	Peso,	Carga	Área	Esfuerzo
Pieza	a	b	c	g	t/m ³	cm ²	kg/cm ²	
M4	11.80	24.20	12.00	3402	0.993	56400.00	285.56	197.506651
M4	11.80	24.10	12.00	3341	0.979	63800.00	284.38	224.347701
M4	11.80	24.20	12.00	3357	0.980	61800.00	285.56	216.416861
M4	11.70	24.30	12.00	3346	0.981	59800.00	284.31	210.333791
M4	11.80	24.20	12.00	3328	0.971	58900.00	285.56	206.261381
M4	11.80	24.20	12.00	3517	1.026	66400.00	285.56	232.525561
Promedio								214.565321
MC-5	Dimensiones, cm			Peso	Peso,	Carga	Área	Esfuerzo
Pieza	a	b	c	g	t/m ³	cm ²	kg/cm ²	
M5	11.80	24.10	12.00	3355	0.983	52000.00	284.38	182.853921
M5	11.80	24.20	12.00	3555	1.037	60900.00	285.56	213.265161
M5	11.70	24.10	12.00	3424	1.012	53800.00	281.97	190.800041
M5	11.90	24.20	12.00	3477	1.006	47900.00	287.98	166.330991
M5	11.80	24.20	12.00	3465	1.011	50900.00	285.56	178.246251
M5	11.80	24.20	12.00	3473	1.014	48100.00	285.56	168.440951
Promedio								183.322951
Para piezas de fabricación mecanizada, Cp no se tomara menor que 0.2 para piezas que evidencien un sistema de control de calidad, ni que 0.3 para los que no cuenten con un sistema de control de calidad.							Promedio	213.281561
							Desvesta	50.5088941
							Cp	0.23681791
							f*p	133.967061

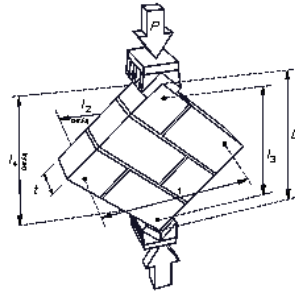
C.3 Mortero



MC-0	Dimensiones, cm			Peso, g	Peso Vol. t/m ³	Carga kg	Área cm ²	Esfuerzo kg/cm ²
	Nº	a	b					
CM01	5.10	5.00	4.80	244	1.993	6730.00	25.50	263.92
	5.10	5.00	5.00	248	1.945	6560.00	25.50	257.25
	5.10	4.90	5.00	244	1.953	7540.00	24.99	301.72
CM02	5.10	5.00	4.80	247	2.018	6000	25.50	235.29
	5.00	4.90	4.90	247	2.057	5830	24.50	237.96
	5.10	5.00	5.00	247	1.937	5510	25.50	216.08
CM03	5.10	4.90	5.00	252	2.017	4740	24.99	189.68
	5.00	4.90	4.90	252	2.099	7130	24.50	291.02
	4.90	4.80	4.90	246	2.135	5570	23.52	236.82
CM04	5.10	4.90	4.90	245	2.001	6510	24.99	260.50
	5.10	4.90	4.80	243	2.026	6360	24.99	254.50
	5.10	4.80	4.90	251	2.093	6180	24.48	252.45
Promedio								249.8
MC-1	Dimensiones, cm			Peso, g	Peso Vol. t/m ³	Carga kg	Área cm ²	Esfuerzo kg/cm ²
	Nº	a	b					
CM11	5.00	5.00	4.80	242	2.017	5150	25.00	206.00
	5.00	4.90	5.10	249	1.993	4970	24.50	202.86
	5.00	5.00	5.00	254	2.032	4950	25.00	198.00
CM12	5.00	4.80	5.00	243	2.025	5580	24.00	232.50
	5.10	5.00	5.00	245	1.922	5680	25.50	222.75
	5.10	5.00	5.00	254	1.992	5630	25.50	220.78
CM13	4.80	4.90	4.80	251	2.223	5690	23.52	241.92
	5.00	5.00	5.00	248	1.984	6240	25.00	249.60
	5.10	5.00	5.00	243	1.906	6020	25.50	236.08
CM14	5.00	5.00	5.00	244	1.952	5280	25.00	211.20
	4.80	4.80	4.90	253	2.241	5860	23.04	254.34
	4.90	5.00	5.00	251	2.049	5380	24.50	219.59
Promedio								224.6
MC-2	Dimensiones, cm			Peso, g	Peso Vol. t/m ³	Carga kg	Área cm ²	Esfuerzo kg/cm ²
	Nº	a	b					
CM21	4.80	5.00	5.00	255	2.125	6340	24.00	264.17
	5.00	5.00	5.10	258	2.024	6880	25.00	275.20
	5.00	5.00	5.00	258	2.064	6100	25.00	244.00
CM22	5.10	5.10	5.00	250	1.922	6750	26.01	259.52
	5.00	5.00	5.00	246	1.968	5860	25.00	234.40
	5.00	5.10	5.00	243	1.906	6680	25.50	261.96
CM23	4.80	4.80	5.00	235	2.040	4550	23.04	197.48
	5.00	5.00	5.00	241	1.928	5600	25.00	224.00
	5.00	5.10	5.10	248	1.907	4230	25.50	165.88
CM24	5.10	5.00	5.00	234	1.835	6110	25.50	239.61
	5.00	5.00	5.00	247	1.976	5570	25.00	222.80
	5.00	5.00	5.10	248	1.945	5420	25.00	216.80
Promedio								233.8

MC-3	Dimensiones, cm			Peso,	Peso Vol.	Carga	Área	Esfuerzo
Nº	a	b	c	g	t/m³	kg	cm²	kg/cm²
CM31	5.10	5.00	5.00	258	2.024	5830	25.50	228.63
	5.00	5.00	5.00	257	2.056	6350	25.00	254.00
	5.10	5.10	5.10	261	1.968	5150	26.01	198.00
CM32	5.00	5.00	5.00	258	2.064	6080	25.00	243.20
	5.00	5.00	5.00	250	2.000	5770	25.00	230.80
	5.10	5.00	5.00	252	1.976	6625	25.50	259.80
CM33	4.80	5.00	5.00	246	2.050	5120	24.00	213.33
	5.00	5.00	5.00	248	1.984	7240	25.00	289.60
	5.00	5.00	5.00	247	1.976	6560	25.00	262.40
CM34	5.00	5.00	5.00	248	1.984	6070	25.00	242.80
	5.00	5.00	5.00	246	1.968	6110	25.00	244.40
	5.00	5.00	4.80	249	2.075	6580	25.00	263.20
Promedio								244.2
MC-4	Dimensiones, cm			Peso,	Peso Vol.	Carga	Área	Esfuerzo
Nº	a	b	c	g	t/m³	kg	cm²	kg/cm²
CM41	5.00	5.00	5.10	243	1.906	6740.00	25.00	269.60
	5.00	5.00	5.00	236	1.888	5900.00	25.00	236.00
	5.00	5.10	5.10	249	1.915	6325.00	25.50	248.04
CM42	5.00	5.00	5.00	240	1.920	7740	25.00	309.60
	5.20	5.00	5.00	242	1.862	6800	26.00	261.54
	5.10	5.00	4.90	241	1.929	7570	25.50	296.86
CM43	5.10	5.10	5.00	241	1.853	6000	26.01	230.68
	5.10	5.00	4.90	240	1.921	6160	25.50	241.57
	5.00	5.10	4.90	236	1.889	5750	25.50	225.49
CM44	5.00	5.00	5.00	251	2.008	6800	25.00	272.00
	5.10	5.00	4.90	244	1.953	6480	25.50	254.12
	5.00	4.90	4.90	242	2.016	7850	24.50	320.41
Promedio								263.8
MC-5	Dimensiones, cm			Peso,	Peso Vol.	Carga	Área	Esfuerzo
Nº	a	b	c	g	t/m³	kg	cm²	kg/cm²
CM51	5.00	5.00	5.00	245	1.960	6500.00	25.00	260.00
	5.00	5.00	5.00	243	1.944	6080.00	25.00	243.20
	5.00	5.00	5.00	248	1.984	6240.00	25.00	249.60
CM52	5.00	5.10	5.10	249	1.915	6410	25.50	251.37
	5.00	5.00	5.00	243	1.944	5990	25.00	239.60
	5.00	5.00	5.00	246	1.968	5490	25.00	219.60
CM53	4.90	5.10	5.00	244	1.953	6700	24.99	268.11
	5.10	5.00	5.10	246	1.892	7110	25.50	278.82
	5.00	5.00	5.00	247	1.976	7130	25.00	285.20
CM54	5.00	5.00	5.00	248	1.984	6100	25.00	244.00
	5.00	5.00	5.00	243	1.944	6320	25.00	252.80
	5.00	5.00	4.90	240	1.959	6500	25.00	260.00
Promedio								254.36
							Promedio	245.10
							Desvesta	28.4132241
							Cj	0.11592627
							f*j	163.39825

C.4 Prueba de compresión diagonal de muretes de mampostería.



Murete MC-0	Dimensiones, cm						Peso g	Carga P, t	Esfuerzo, v, kg/cm ²
	l_1	l_2	l_3	l_4	D	t			
MrtMC01	39.9	40.1	38.1	38.1	53.0	11.7	20318	6.265	10.10
MrtMC02	38.6	38.7	38.1	37.9	53.0	11.7	20354	4.7	7.58
MrtMC03	37.5	38.5	38.9	39.1	53.0	11.7	21406	5.35	8.63
MrtMC04	38.9	38.1	38.0	37.8	53.0	11.5	20391	5.375	8.82
Promedio,	\bar{V}_m								8.78
Murete MC-1	Dimensiones, cm						Peso g	Carga P, t	Esfuerzo, v, kg/cm ²
	l_1	l_2	l_3	l_4	D	t			
MrtMC11	38.8	37.7	37.6	37.3	53.3	11.4	22533	10.8	17.77
MrtMC12	40.3	40.6	40.2	40.1	53.2	11.5	22011	12.45	20.35
MrtMC13	39.2	39.5	36.8	37.6	53.1	11.4	22387	6.85	11.32
MrtMC14	37.9	37.6	38.1	37.9	52.8	11.3	21872	9.25	15.50
Promedio,	\bar{V}_m								16.24
Murete MC-2	Dimensiones, cm						Peso g	Carga P, t	Esfuerzo, v, kg/cm ²
	l_1	l_2	l_3	l_4	D	t			
MrtMC21	38.5	37.6	34.6	34.3	53.5	11.8	21013	8.65	13.70
MrtMC22	38.4	38.3	36.5	37.8	53.3	11.8	21351	5.05	8.03
MrtMC23	38.0	38.3	37.2	37.8	54.0	11.6	20590	7.9	12.61
MrtMC24	39.0	39.1	39.1	38.9	53.4	11.7	21720	6.25	10.00
Promedio,	\bar{V}_m								11.09
Murete MC-3	Dimensiones, cm						Peso g	Carga P, t	Esfuerzo, v, kg/cm ²
	l_1	l_2	l_3	l_4	D	t			
MrtMC31	41.0	39.6	38.5	38.5	53.0	11.5	21828	7	11.48
MrtMC32	36.3	36.3	39.4	37.3	54.5	11.7	21905	9	14.11
MrtMC33	38.0	36.8	36.5	36.5	53.0	11.5	21369	5.1	8.37
MrtMC34	39.0	38.0	37.7	38.3	54.2	11.6	21892	7.5	11.93
Promedio,	\bar{V}_m								11.47
Murete MC-4	Dimensiones, cm						Peso g	Carga P, t	Esfuerzo, v, kg/cm ²
	l_1	l_2	l_3	l_4	D	t			
MrtMC41	39.4	37.3	39.5	37.3	53.0	11.5	20749	10	16.41
MrtMC42	36.3	36.3	39.4	40.2	53.0	11.5	20479	5.885	9.66
MrtMC43	37.8	37.6	39.1	39.6	53.0	11.5	20991	7.68	12.60
MrtMC44	36.7	36.5	39.2	38.8	53.0	11.5	21083	7.14	11.71
Promedio,	\bar{V}_m								12.59

Murete MC-5	Dimensiones, cm						Peso g	Carga P, t	Esfuerzo, v_c kg/cm ²
	l_1	l_2	l_3	l_4	D	t			
MC51	38.3	38.0	38.8	35.7	53.0	11.5	20809 21188 20957	7.08	11.62
MC52	41.6	41.1	39.5	40.0	53.0	11.5		7.79	12.78
MC53	40.6	41.0	38.8	39.1	53.0	11.5		5.18	8.50
MC54	39.4	37.3	39.5	37.3	53.0	11.5		6.28	10.30
Promedio,	\bar{V}_m								10.80
								Promedio	11.83
En ningun caso el Cv se tomara menor que 0.2								Desvesta	3.24335
								Cv	0.27419
								V*m	7.01808

C.5 Pruebas de cilindro de concreto

Nombre	Diámetro		Altura cm	Fecha colado	Carga kg	Esfuerzo f_c' kg/cm ²	Promedio kg/cm ²
	0° cm	90° cm					
M0-1	15.00	15.00	30.00	09/11/2016	53800	304.445722	345.19
M0-2	15.00	15.00	30.00	10/11/2016	56400	319.158713	
M0-3	15.00	15.00	30.00	28/10/2016	68500	387.630706	
M0-4	15.00	15.00	30.00	28/10/2016	65300	369.52241	
M1-1	15.00	15.00	30.00	22/12/2016	63400	358.770609	424.79
M1-2	15.00	15.00	30.00	22/12/2016	79100	447.614436	
M1-3	15.00	15.00	30.00	22/12/2016	71600	405.173117	
M1-4	15.00	15.00	30.00	22/12/2016	71400	404.041349	
M1-5	15.00	15.00	30.00	20/12/2016	83400	471.947458	
M1-6	15.00	15.00	30.00	20/12/2016	81500	461.195657	
M2-1	15.00	15.00	30.00	28/11/2016	79600	450.443857	431.20
M2-2	15.00	15.00	30.00	28/11/2016	72800	411.963728	
M2-3	15.00	15.00	30.00	08/12/2016	74200	419.886108	
M2-4	15.00	15.00	30.00	08/12/2016	76900	435.164982	
M2-5	15.00	15.00	30.00	08/12/2016	76300	431.769677	
M2-6	15.00	15.00	30.00	08/12/2016	77400	437.994403	
M3-1	15.00	15.00	30.00	28/11/2016	59300	335.569356	343.07
M3-2	15.00	15.00	30.00	21/10/2016	70500	398.948391	
M3-3	15.00	15.00	30.00	21/10/2016	56200	318.026944	
M3-4	15.00	15.00	30.00	21/10/2016	56500	319.724597	
M4-1	15.00	15.00	30.00	09/11/2016	71400	404.041349	416.21
M4-2	15.00	15.00	30.00	09/11/2016	76800	434.599098	
M4-3	15.00	15.00	30.00	21/10/2016	66500	376.313021	
M4-4	15.00	15.00	30.00	21/10/2016	79500	449.877972	
M5-1	15.00	15.00	30.00	09/11/2016	73100	413.661381	332.03
M5-2	15.00	15.00	30.00	09/11/2016	61000	345.189388	
M5-3	15.00	15.00	30.00	21/10/2016	44700	252.950256	
M5-4	15.00	15.00	30.00	21/10/2016	55900	316.329291	

					prom	388.641213	kg/cm ²
					DesvStd	56.513837	
					cv	0.14541391	
					min+35	287.950256	kg/cm ²
					min	252.950256	kg/cm ²
					(ver secc 14.3.4.1 NTCC)		