

# Propiedades mecánicas de la mampostería de tabique rojo recocido utilizada en Chilpancingo, Gro (México)

## *Mechanical properties of solid clay brick masonry used in Chilpancingo, Gro (Mexico)*

V. Flores<sup>(\*)</sup>, S. Sánchez-Tizapa<sup>(\*\*)</sup>, R. Arroyo<sup>(\*\*)</sup>, R. Barragán<sup>(\*\*)</sup>

### RESUMEN

Este documento presenta los resultados de ensayos en especímenes de mampostería de tabique rojo recocido comúnmente utilizado para la construcción de muros de mampostería confinada en Chilpancingo (Estado de Guerrero, México). Un total de 68 ensayos, entre pilas y muretes, fueron realizados. Los valores medidos fueron la resistencia de diseño a compresión y cortante, los módulos de elasticidad y corte y la cohesión de la junta. También se obtuvieron expresiones para definir la curva esfuerzo-deformación en las pruebas de pilas y muretes. La comparación de los valores respecto a la norma de la ciudad de México, utilizada como referencia en el diseño y análisis, concluye que hay diferencias significativas para algunos de ellos.

### SUMMARY

*Experimental results of developed tests in solid clay brick masonry specimens are reported. This masonry type is largely used to build the confined masonry walls in Chilpancingo City (Guerrero State, Mexico). Sixty eight tests of masonry specimens, prisms and walls, were developed. Mean values of compressive and shear strength design, elasticity and shear modulus and joint mortar adherence were measured. Additionally, stress-strain relationship of compressive prisms and walls were recorded. Comparison among experimental results and standardized values of Mexico City Code, normally used to the design process, shows a large difference for some of them.*

631-20

**Palabras clave:** Propiedades mecánicas; tabique rojo recocido; resistencia a cortante; resistencia a compresión; módulo de elasticidad.

**Keywords:** Mechanical properties; solid clay brick; shear strength; compressive strength; elasticity modulus.

<sup>(\*)</sup> Subsecretaría de Protección Civil - Gobierno del estado de Guerrero, (México).

<sup>(\*\*)</sup> UAI - Universidad Autónoma de Guerrero. Chilpancingo, (México).

Persona de contacto/Corresponding author: sstizapa@hotmail.com (S. Sánchez-Tizapa)

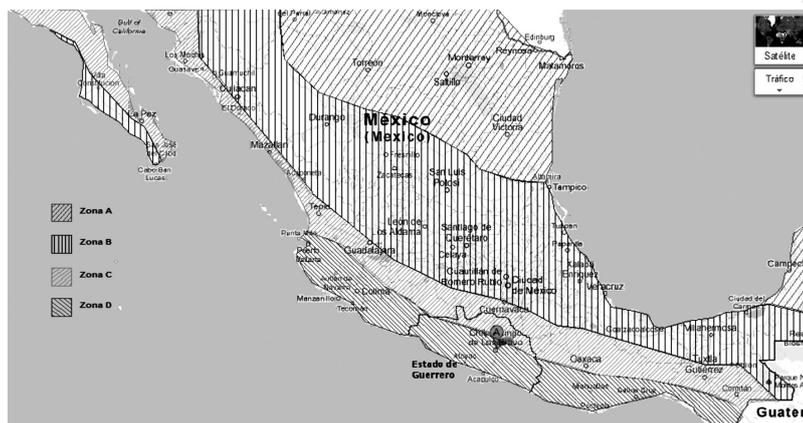
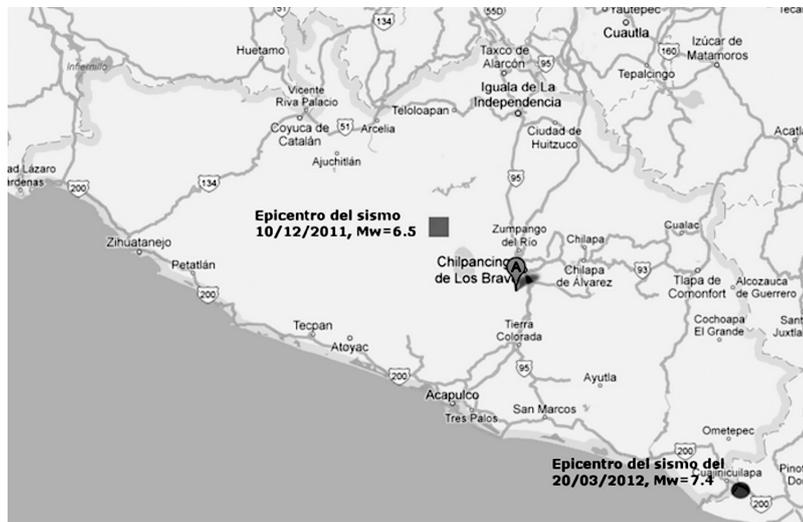
1. Epicentros de sismos fuertes en el estado de Guerrero, México (1) (2) (3) (4).

2. Ubicación del estado de Guerrero y zonificación sísmica de la República Mexicana (3) (4).

## 1. INTRODUCCIÓN

En el último año, el estado de Guerrero (México) fue afectado por dos sismos importantes, el primero ocurrió el 10 de diciembre de 2011, Mw 6,5, con epicentro en la Cuenca del Río Balsas ubicado a 65 km de la ciudad capital Chilpancingo, Figura 1. El evento generó pérdidas económicas aproximadas por 70 millones de pesos (4,14 millones de euros) con daños en 685 viviendas, 41 escuelas, 18 edificios del sector salud y 36 monumentos históricos. En este último caso destacan los daños de los templos de la Asunción, San Mateo, San Antonio y el Museo Regional en Chilpancingo, así como el templo de Santiago Apóstol en la cercanía del epicentro (1).

El segundo sismo ocurrió el 20 de marzo de 2012, con epicentro cercano a Ometepec, Mw 7,4. Este evento y sus réplicas afectaron a un total de 37 municipios, las pérdidas económicas ascendieron a 516 millones de pesos (30,55 millones de euros), los daños se distribuyeron como sigue: 18.323 viviendas, 173 planteles educativos, 3 hospitales, 5 centros de salud, 2 puentes y 11 tramos carreteros, Figura 1 (2).



Lo anterior se explica porque el Estado está en la zona de mayor peligro sísmico de la República Mexicana. La superficie estatal se reparte en las zonas C y D con valores de aceleración espectral máxima igual a 0,68 g y 0,86 g, respectivamente, Figura 2 (3).

Respecto a la infraestructura de vivienda en México, el porcentaje de edificaciones habitacionales menores de 5 niveles y/o viviendas unifamiliares construidas con mampostería confinada puede alcanzar hasta el 60% del total existente (5). Además, en el Estado, la pieza más utilizada en la construcción de muros de mampostería confinada es el tabique rojo recocido que en algunos lugares puede representar hasta el 80% del total de piezas utilizadas (6). Sin embargo, su producción artesanal, sin adecuado control de calidad en los insumos, elaboración y cocción, genera altos porcentajes de variación en sus propiedades mecánicas.

Adicionalmente, hasta hoy no existe ninguna referencia local sobre las propiedades mecánicas más importantes utilizadas en el diseño y análisis del comportamiento, al contrario de lo que ocurre en otros lugares con mampuestos de piedra o adobe (7) (8). Por lo anterior, en el medio ingenieril se utilizan valores definidos en Normas externas (9) aún cuando existe la posibilidad que éstos sean diferentes a los registrados experimentalmente en la zona.

Por la situación antes expuesta es imperativo evaluar las propiedades mecánicas del tabique rojo recocido utilizado extensamente en la ciudad para así conocer el nivel de seguridad estructural en edificaciones construidas con este material.

## 2. LOCALIZACIÓN DE LA CIUDAD DE CHILPANCINGO, GRO

Chilpancingo es la capital del estado de Guerrero y cuenta con 187.251 habitantes que representa el 5,5% de la población estatal (10). La ciudad se ubica en las coordenadas geográficas 17° 33' 06" N y 99° 30' 04" O a una altitud media de 1.253 metros sobre el nivel medio del mar (11). El asentamiento está orientado de norte a sur siguiendo el trazo de la carretera nacional N.º 95 México-Acapulco, que es paralela a una falla central representada por el Río Huacapa, en los alrededores de esta zona el suelo está formado por estratos profundos de arcillas expansivas (mayores a 10 metros) y algunas lentes de boleosa-arena en las márgenes del río por lo que el suelo es clasificado como Tipo II (12), ver Figura 3. En la última década ha existido un alto crecimiento de la mancha urbana en la zona sur y en los lados este-oeste del valle,

donde el suelo es más rígido y se considera suelo tipo I. La mayor parte de la ciudad está en la zona de mayor peligro sísmico (tipo D) según la regionalización sísmica de la Comisión Federal de Electricidad (3), Figura 2.

### 3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA PIEZA Y MORTERO UTILIZADOS

Las piezas aquí estudiadas provienen de la comunidad de Atliaca, ubicada aproximadamente a 30 km de la ciudad (Figura 3), porque de acuerdo a estudios realizados, el 75% de edificaciones de mampostería confinada en la ciudad son construidas con este material (13).

Los tabiques fueron adquiridos en tiendas comerciales, repitiendo un proceso similar al realizado por las personas al construir sus viviendas, sin tener cuidado en la calidad de las piezas. El único requisito es la pertenencia al banco antes mencionado.

De las piezas utilizadas en la construcción de muretes y pilas se tomó un lote para evaluar la resistencia a compresión ( $f_p$ ). En una muestra de 15 piezas se obtuvo un valor medio  $f_p = 8,7$  MPa con un coeficiente de variación  $c_v = 0,23$  y resistencia a compresión de diseño  $f^*p = 5,5$  MPa. Las dimensiones promedio de las piezas fueron: largo = 26,3 cm, ancho = 12,8 cm y alto = 5,0 cm.

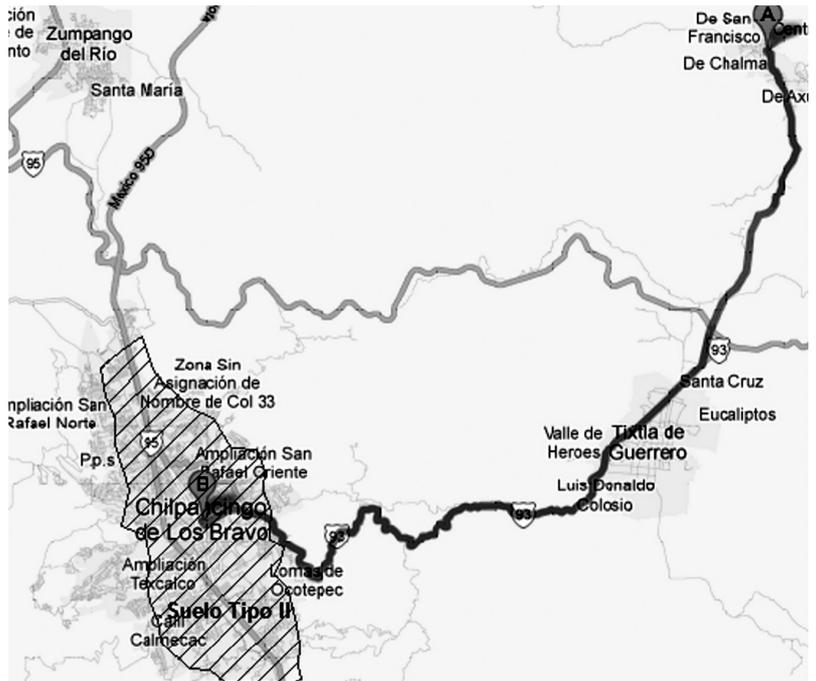
Para aparejar las piezas se utilizó mortero Tipo I (9) con dosificación en volumen cemento-arena 1:3. En 43 especímenes ensayados (5x5x5cm), la resistencia a compresión registró un valor medio  $f_j = 27,5$  MPa, coeficiente de variación  $c_v = 0,11$  y resistencia de diseño  $f^*j = 21,5$  MPa.

Los protocolos de prueba utilizados en los ensayos de piezas y morteros, así como las ecuaciones para evaluar los parámetros de diseño se ajustaron a lo especificado en la normatividad mexicana (9) (14) (15) (16).

### 4. RESISTENCIA EN COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD

#### 4.1. Protocolo y desarrollo de prueba

Un total de 22 pilas, colocando una pieza sobre otra y pegadas con una capa de mortero de espesor aproximado igual a 1 cm, fueron construidas; todos los especímenes tenían 8 piezas para obtener una relación altura/espesor cercana a cuatro y evitar la corrección del esfuerzo, Figura 4a. Para su ensaye, fueron cabeceadas con azufre en los extremos garantizando un asiento perfectamente plano sobre la máquina de pruebas y evitando concentraciones de

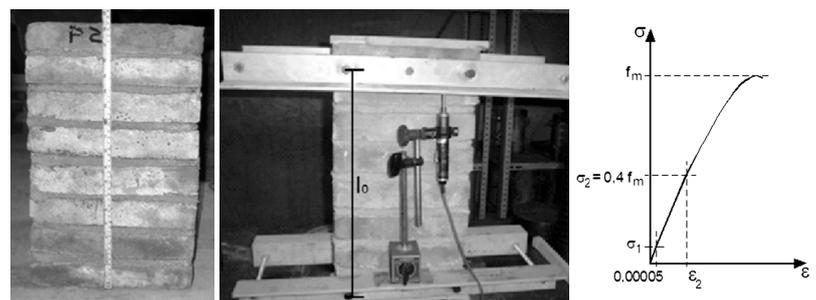


3

esfuerzos por irregularidades de las superficies de las piezas, adicionalmente se colocó un par de placas de acero de espesor igual a 25,4 mm entre los bloques de carga y la probeta. La carga fue aplicada a una velocidad media de 30 KPa/s en una prensa automatizada con 1,500 KN de capacidad.

Un total de 15 pilas fueron instrumentadas mediante dos medidores verticales (aproximación 0,001 mm) para medir el acortamiento en una longitud de control,  $l_0$ , Figura 4b, y determinar el módulo elástico de la curva esfuerzo-deformación. Antes y con objeto de evitar el daño en la instrumentación se realizaron 7 pruebas preliminares para conocer la carga máxima. Siguiendo el protocolo definido, a cada espécimen se aplicaron tres ciclos de precarga (carga y descarga) hasta el 15% de la carga máxima para acomodar los dispositivos de carga y de la probeta, así como revisar el funcionamiento de la instrumentación. El módulo elástico es la pendiente entre dos puntos de la curva, Figura 4c, y se evalúa con la ecuación [1] definida por la norma (17).

$$[1] \quad E_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\epsilon_2 - 0,00005}$$



4

3. Zonificación sísmica de Chilpancingo y ubicación de la zona de elaboración de tabique rojo recocido (4) (12).

4. a) Pila elaborada con 8 piezas, b) Enlucido e instrumentación para ensayo a compresión, c) Definición de módulo elástico (17).

5. Curvas esfuerzo normal-deformación unitaria normal.

Las variables son:  $E_m$  módulo secante elástico;  $\sigma_1$ , esfuerzo correspondiente a una deformación normal unitaria igual a 0,00005;  $\sigma_2$  y  $\varepsilon_2$  corresponden al punto de la curva donde el esfuerzo es igual al 40% del esfuerzo máximo.

4.2. Resultados

La Tabla 1 muestra los resultados experimentales, la segunda columna contiene la resistencia a compresión ( $f_m$ ) que es la ordenada máxima de la curva (Figura 4c), el valor medio fue 5,1 MPa con un coeficiente de variación (cv) igual a 0,19. La tercera columna muestra la deformación unitaria ( $\varepsilon_m$ ) asociada a la resistencia a compresión ( $f_m$ ), mientras que  $\varepsilon_u$  es la deformación correspondiente a la resistencia última ( $f_u$ ); los va-

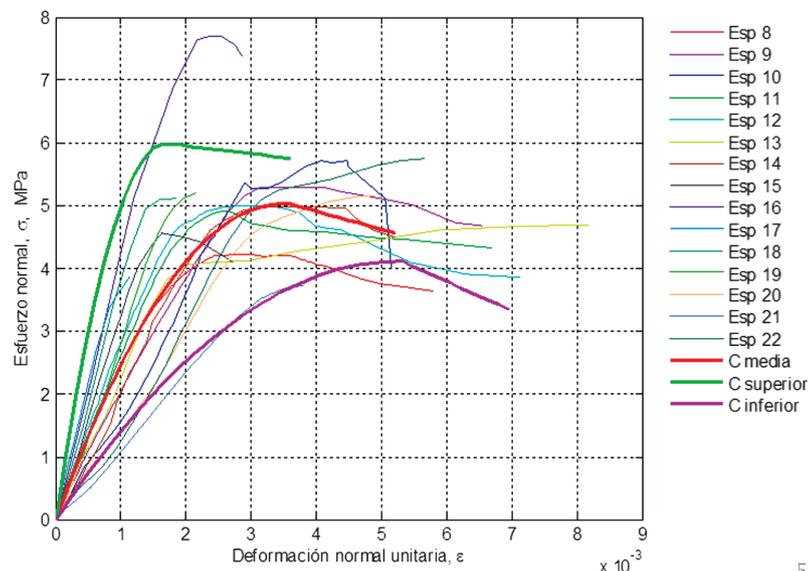
lores medios son 0,0035 y 0,0053, respectivamente. El módulo elástico ( $E_m$ ), última columna, registró un valor medio de 2,54 GPa. Respecto al coeficiente de variación, la deformación asociada al esfuerzo máximo ( $\varepsilon_m$ ) y el módulo elástico ( $E_m$ ) registran los valores más altos, 0,51 y 0,40, respectivamente. La Figura 5 muestra las curvas esfuerzo-deformación de las pilas instrumentadas.

La resistencia de diseño a compresión ( $f_m^*$ ), evaluada con la ecuación [2] contenida en la norma (9) (17), resultó igual a 3,5 MPa. Por otro lado, la relación módulo elástico-resistencia de diseño ( $E_m/f_m^*$ ) es 725.

$$[2] \quad f_m^* = \frac{f_m}{1 + 2,5 c_v}$$

Tabla 1. Propiedades mecánicas en compresión

Prisma	$f_m$ (MPa)	$\varepsilon_m$	$f_u$ (MPa)	$\varepsilon_u$	$E_m$ (GPa)
1	7,6				
2	4,7				
3	3,9				
4	4,4				
5	5,9				
6	3,3				
7	5,3				
8	4,2	0,0028	3,6	0,0058	2,50
9	5,3	0,0040	4,7	0,0065	2,04
10	5,7	0,0045	4,0	0,0052	1,63
11	4,9	0,0026	4,3	0,0067	2,66
12	5,0	0,0032	3,9	0,0071	2,87
13	4,7	0,0082			2,19
14	5,0	0,0039	4,5	0,0052	2,02
15	4,6	0,0016	4,1	0,0027	3,26
16	7,7	0,0026	7,4	0,0029	4,17
17	3,9	0,0011			4,44
18	5,1	0,0019			3,69
19	5,2	0,0021			2,65
20	5,2	0,0049			1,41
21	3,7	0,0038			1,12
22	5,7	0,0057			1,44
Valor medio	5,1	0,0035	4,6	0,0053	2,54
D estándar (S)	0,9	0,0018	1,2	0,0017	1,01
cv	0,19	0,51	0,26	0,32	0,40



Para el análisis numérico de la mampostería se requiere conocer la relación esfuerzo/deformación, por tal razón, se propone la ecuación [3] con dos pares de valores medios asociados al esfuerzo máximo ( $f_m, \varepsilon_m$ ) y al esfuerzo último ( $f_u, \varepsilon_u$ ). Esta expresión es semejante al modelo de Hognestad (18) para el hormigón simple con una forma parabólica hasta el esfuerzo máximo y lineal en la rama descendente. Como se observa en la Figura 5, hay una variación importante en las curvas experimentales. Con el objeto de acotar el comportamiento se proponen dos curvas envolventes adicionales, una superior y otra inferior; en la ecuación [3] se suma o resta la desviación estándar de cada parámetro según la ecuación [4]; la Tabla 2 muestra las variables calculadas.

$$[3] \quad \sigma = \begin{cases} f_m \left[ \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_m} - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \right)^2 \right] & \text{si } \varepsilon \leq \varepsilon_m \\ f_m - \left[ \frac{f_u - f_m}{\varepsilon_u - \varepsilon_m} \right] \varepsilon & \text{si } \varepsilon > \varepsilon_m \end{cases}$$

$$[4] \quad \begin{aligned} f_{s,i} &= f \pm S_{esinormal} \\ \varepsilon_{s,i} &= \varepsilon \pm S_{definormal} \end{aligned}$$

Tabla 2. Parámetros de curvas inferior y superior.

Ecuación	$f_m$ (MPa)	$\varepsilon_m$	$f_u$ (MPa)	$\varepsilon_u$
C superior	6,0	0,0017	5,8	0,0036
C inferior	4,2	0,0053	3,4	0,0070

Una referencia del módulo elástico de la pieza puede obtenerse a partir de la ecuación [5] (19). Las variables son:  $E_m$ , módulo elástico de la mampostería;  $E_p$ , módulo elástico de la pieza;  $E_j$ , módulo elástico del mortero;  $\gamma_t$ , relación de espesores junta-pieza;  $\gamma_M$ , relación modular de la junta respecto a la pieza. La evidencia experimental local proporciona un valor de  $E_j = 25,97$  GPa (20), considerando  $\gamma_t = 0,20$  y  $E_m = 2,54$  GPa,

con estos valores se obtiene  $E_p = 2,15$  GPa. Por otro lado, la relación resistencia a compresión mampostería –pieza– mortero son definidas con la ecuación [6]:

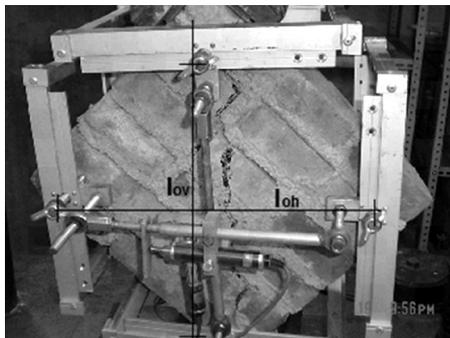
$$[5] \quad \frac{E_m}{E_p} = \frac{1+\gamma_t}{1+\frac{\gamma_t}{\gamma_M}}$$

$$[6] \quad \begin{aligned} f_m &= 0,65 f_p \\ f_m &= 0,19 f_j \end{aligned}$$

## 5. RESISTENCIA A CORTANTE Y MÓDULO DE CORTE

### 5.1. Protocolo y desarrollo de prueba

Los muretes se construyen con un mínimo de pieza y media de largo en la base y el número de hiladas necesario para tener una forma cuadrada. El traslape es a media asta, donde cada pieza está centrada respecto a la junta vertical de la hilada inferior, Figura 6. Los muretes se ensayan colocándolos en un cabezal de acero a 45° respecto a la horizontal, de tal forma que la carga se aplica paralela a la diagonal principal. La instrumentación mostrada, Figura 6, registra simultáneamente la extensión y acortamiento del murete sobre longitudes de control ( $l_{oh}$ ,  $l_{ov}$ ) ubicadas en las diagonales (17).



6

El esfuerzo medio ( $v_m$ ), relación de carga máxima entre el área de la diagonal del murete, se utiliza para calcular el cortante de diseño ( $v_m^*$ ) mediante la ecuación [7] definida por la norma (9) (17), para este caso el coeficiente de variación  $c_v$  no será menor que 0,2. En forma similar a las pilas de compresión, el módulo de corte es la pendiente de la línea que une dos puntos de la gráfica esfuerzo-distorsión de acuerdo a la ecuación [8].

$$[7] \quad v_m^* = \frac{v_m}{1+2,5 c_v}$$

$$[8] \quad G_m = \frac{\tau_1 - \tau_2}{\gamma_2 - 0,00005}$$

Donde:  $G_m$ , Módulo de corte;  $\tau_1$ , esfuerzo cortante correspondiente a  $\gamma_1 = 0,00005$ ;  $\tau_2$ , esfuerzo cortante igual al 40% del esfuerzo máximo;  $\gamma_2$ , distorsión angular para el esfuerzo  $\tau_2$ .

### 5.2. Resultados

Una serie de 27 muretes fueron ensayados (largo = 55 cm, alto = 55 cm). El módulo de corte fue evaluado en 15 probetas, con los resultados presentados en la Tabla 3. La segunda columna muestra el valor del esfuerzo cortante, la tercera y cuarta columna definen el punto de la curva donde hay un cambio importante de la pendiente ( $\tau_y$ ,  $\gamma_y$ ), la quinta y sexta columna contienen las coordenadas del último punto registrado ( $\tau_u$ ,  $\gamma_u$ ). La Figura 7 muestra las curvas esfuerzo-deformación registradas. Los datos de 27 muros proporcionan un esfuerzo cortante medio  $v_m = 0,83$  MPa con un coeficiente de variación  $c_v = 0,34$ , por lo que el esfuerzo cortante de diseño resulta  $v_m^* = 0,55$  MPa. El módulo de corte es  $G_m = 1,13$  GPa con un coeficiente de variación  $c_v = 0,42$ .

Tabla 3. Propiedades mecánicas a compresión diagonal

Murete	$v_m$ (MPa)	$\tau_y$ (MPa)	$\gamma_y$	$\tau_u$ (MPa)	$\gamma_u$	$G_m$ (GPa)
M1	0,34					
M2	1,47					
M3	1,37					
M4	0,28					
M5	1,17					
M6	0,91					
M7	0,96					
M8	0,66					
M9	1,04					
M10	0,65					
M11	0,62					
M12	1,01					
M13	0,72	0,56	0,0006	0,72	0,0021	0,95
M14	0,66	0,44	0,0005	0,62	0,0025	0,88
M15	0,82	0,80	0,0012	0,82	0,0016	0,62
M16	0,74	0,67	0,0008	0,73	0,0011	0,97
M17	0,94	0,61	0,0004	0,94	0,0010	1,54
M18	0,87	0,60	0,0006	0,87	0,0014	1,32
M19	0,88	0,68	0,0004	0,88	0,0014	1,33
M20	0,76	0,58	0,0005	0,76	0,0012	1,40
M21	1,06	0,77	0,0006	1,06	0,0011	1,55
M22	0,79	0,76	0,0005	0,79	0,0010	1,38
M23	0,70	0,49	0,0005	0,70	0,0021	1,30
M24	0,83	0,62	0,0006	0,83	0,0010	1,11
M25	1,20	1,10	0,0008	1,14	0,0012	1,83
M26	0,45	0,31	0,0017	0,45	0,0040	0,22
M27	0,48	0,39	0,0014	0,48	0,0040	0,29
Valor medio	0,83	0,63	0,0008	0,79	0,0018	1,13
D estándar(S)	0,28	0,19	0,0004	0,19	0,0010	0,48
cv	0,34	0,31	0,50	0,24	0,58	0,42

Tres relaciones adicionales pueden obtenerse:

$$G_m / v_m^* = 2,058$$

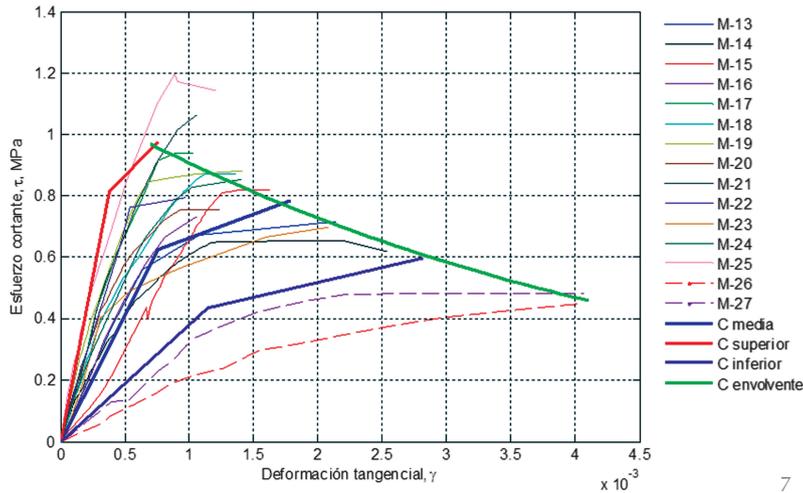
$$E_m / v_m^* = 4,614$$

$$G_m / f_m^* = 323$$

$$v_m^* / \sqrt{f_m^*} = 0,93$$

El análisis numérico de la mampostería confinada sujeta a cargas laterales requiere definir la relación esfuerzo-deformación (6). La ecuación [9] propuesta (curva media de la Figura 7) define una relación elastoplástica con valores medios obtenidos de la Tabla 3:

6. Muretes para ensayo a compresión diagonal, instrumentación y presencia de fallas por tensión diagonal.



7. Curvas esfuerzo cortante-deformación tangencial.

8. Geometría de la pila y prueba de cohesión de la junta.

9. Secuencia de fallo de la probeta M2-A1, esfuerzo de adherencia  $\tau_a = 1,67$  MPa.

10. Tipos de fallo: a) En la junta de pila M2, b) En la pieza de la pila M9, esfuerzo de adherencia  $\tau_a = 1,13$  MPa.

11. Envolvente de falla modificado (25).

12. Fallas en muros, de izquierda a derecha: a) Zona 1, por flexión en muros esbeltos (28), b) Zona 2, por corte (29), c) Zona 3, por tensión diagonal (6), d) Zona 4, por compresión (30).

$G_y = \tau_y/\gamma_y = 0,83$  GPa,  $\tau_y = 0,63$  MPa,  $\tau_u = 0,79$  MPa,  $\gamma_y = 0,00076$ ,  $\gamma_u = 0,0018$ ; todas las variables fueron definidas anteriormente.

$$[9] \quad \tau = \begin{cases} G_y \gamma & \text{si } \gamma \leq \gamma_y \\ \tau_y + \left[ \frac{\tau_u - \tau_y}{\gamma_u - \gamma_y} \right] (\gamma - \gamma_y) & \text{si } \gamma > \gamma_y \end{cases}$$

Sin embargo, la gran variación de los resultados exige un análisis numérico no-determinista por lo que se proponen dos curvas envolventes (Tabla 4) obtenidas al modificar los parámetros de la ecuación [9] según la ecuación [10].

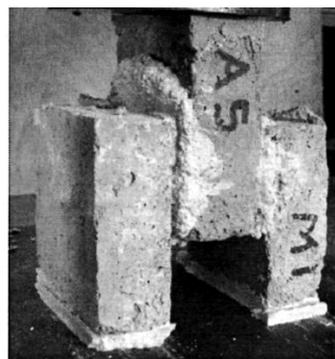
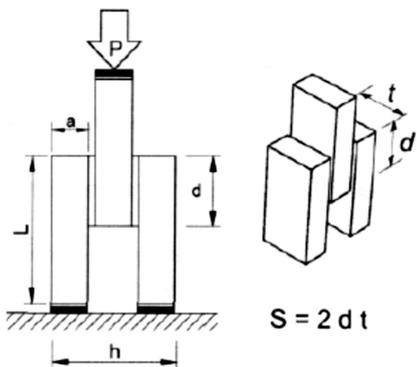
$$[10] \quad \begin{aligned} \tau_{s,i} &= \tau \pm S_{escortante} \\ \gamma_{s,i} &= \gamma \pm S_{deftangencial} \end{aligned}$$

Tabla 4. Valores medios de curvas superior e inferior

	$\tau_y$ (MPa)	$\gamma_y$	$\tau_u$ (MPa)	$\gamma_u$
C superior	0,82	0,0004	0,97	0,0008
C inferior	0,43	0,0011	0,60	0,0028

Para definir la relación inversa proporcional entre el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y la deformación tangencial ( $\gamma$ ) se utilizaron los datos ( $\tau_u$ ,  $\gamma_u$ ) de la Tabla 3. La ecuación [11] tiene un factor de correlación igual a 0,88 (21), los parámetros son:  $A = 1,1229$  MPa,  $b=219,5$ , la curva envolvente (Figura 7) es la representación gráfica de esta ecuación.

$$[11] \quad \tau = Ae^{-by}$$



## 6. ADHERENCIA DE LA JUNTA

### 6.1. Protocolo y desarrollo de prueba

Aunque esta propiedad mecánica no es utilizada para el diseño de la mampostería según las normas mexicanas, la adherencia es un parámetro importante para evaluar la calidad de la mampostería. Otros reglamentos (22) suponen la falla del material por deslizamiento de las juntas horizontales, esto implica que la carga lateral resistente es función de la adherencia en la zona de contacto.

El ensayo se realizó en una probeta de tres piezas según la norma mexicana (23) para evaluar la resistencia ante esfuerzo cortante directo cuando se genera la falla en las juntas. La adherencia es afectada por el esfuerzo normal a la junta horizontal, es decir por la carga vertical, generando un mecanismo resistente tipo *Coulomb*, con una resistencia por adherencia (cuando el esfuerzo normal es nulo) más una resistencia por fricción. En este trabajo, los ensayos se realizaron con esfuerzo vertical nulo.

La Figura 8 muestra un esquema de las probetas ensayadas. Para este caso y considerando que existía la posibilidad de la falla de las piezas por su mala calidad, se decidió elaborar una probeta con tres medias piezas; la carga se aplica en la pieza central.

Para realizar un ensayo confiable es necesario alinear las superficies de apoyo y de carga que garanticen una base perpendicular a las cargas aplicadas. Esto se logra aplicando en algunos casos un enlucido de azufre, y en otros completando y nivelando las superficies con mortero o arena. La norma mexicana (23) propone las ecuaciones [12] y [13] que evalúan el área de aplicación de la carga y el esfuerzo de adherencia, respectivamente.

$$[12] \quad S = 2dt$$

$$[13] \quad \tau_a = P / S$$

En las ecuaciones anteriores se tiene:  $d$ , dimensión del área de contacto entre piezas;  $t$ , ancho de las piezas;  $S$ , área de aplicación de carga;  $P$ , carga actuante máxima;  $\tau_a$ , esfuerzo de adherencia.

### 6.2. Resultados

La Tabla 5 muestra los resultados de los ensayos, los mayores valores se registraron cuando falló la pieza; sin embargo, éstos se descartan para obtener la adherencia promedio. Considerando solamente 12 datos,

el promedio es  $\tau_a = 0,49$  MPa con un coeficiente de variación  $c_v = 0,39$ . Las Figuras 9 y 10 presentan diferentes fases de la prueba y el mecanismo de colapso.

7. ANÁLISIS Y COMENTARIOS

Los tres tipos de pruebas realizadas definen una parte del comportamiento de la mampostería. De acuerdo con Mann y Müller (24), la envolvente ante carga lateral se representa como una combinación de cuatro modos de fallo. La Figura 11 muestra el segmento positivo de dicha curva, en la Zona 1 se tiene la menor resistencia ya que las juntas están sometidas a esfuerzos de tensión, este fenómeno existe en muros esbeltos, Figura 12a; la resistencia de la junta se obtiene al ensayar un espécimen formado por dos piezas sometida a tensión normal.

En la Zona 2, la falla ocurre cuando el esfuerzo cortante excede la adherencia de las juntas, esto sucede en la mayoría de los muros de piezas huecas más resistentes que el mortero; la adherencia se evalúa con la prueba presentada en el capítulo 6, ver Figura 12b. La Zona 3 indica falla por tensión diagonal y el parámetro de resistencia se obtiene en ensayo de muretes; el mecanismo de colapso generalmente ocurre en muros de mampostería confinada elaborados con piezas macizas, las cuales son más débiles que el mortero, Figura 12c. Finalmente, en la Zona 4 existe la falla en compresión, las propiedades se obtienen del ensayo en pilas o muretes donde el ángulo de aplicación de la carga puede variar respecto a las juntas horizontales; este fallo se presenta en muros de mampostería colocados al interior de marcos de concreto reforzado o acero, donde las columnas y vigas tienen una rigidez y/o resistencia muy alta comparada con la del muro, por lo que se forma un puntal en compresión o aplastar las piezas ubicadas en las esquinas, Figura 12d.

Los mecanismos de colapso son una combinación de algunas variables como: relación mortero-pieza, tipo de mampostería, geometría, ubicación y tamaño de huecos existentes, relación rigidez de elementos confinantes respecto a la mampostería, entre otras (26).

Por otro lado, la relación entre los valores medios del módulo de corte y de elasticidad, Tablas 2 y 3, se define con la ecuación [14].

Tabla 5. Esfuerzo de adherencia

Probeta	$\tau_a$ , MPa	Tipo de fallo	Probeta	$\tau_a$ , MPa	Tipo de fallo
M2-A1	1,67	Pieza	M1	1,06	Pieza
M2-A2	0,34	Junta	M2	0,33	Junta
M2-A3	0,42	Junta	M3	0,88	Junta
M2-A4	0,25	Junta	M4	1,04	Pieza
M1-A1	0,82	Junta	M5	0,43	Junta
M1-A2	0,50	Junta	M6	0,34	Junta
M1-A3	1,18	Pieza	M7	0,86	Mixta
M1-A4	0,48	Junta	M8	0,55	Junta
M1-A5	1,13	Mixta	M9	1,13	Pieza
			M10	0,54	Junta

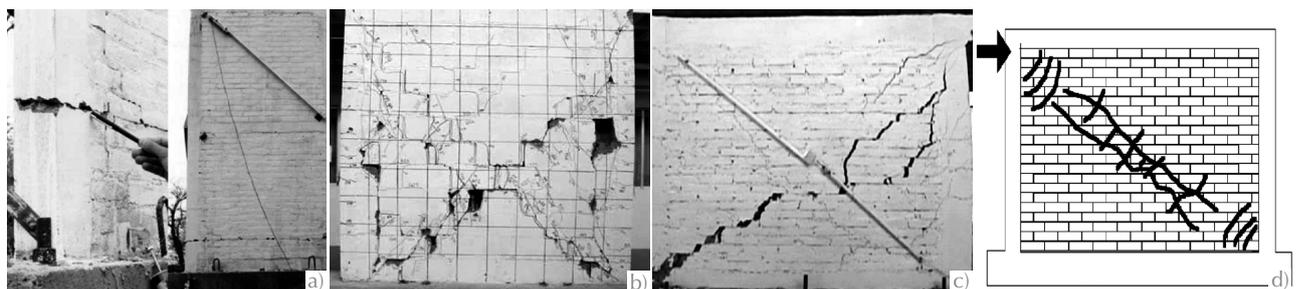
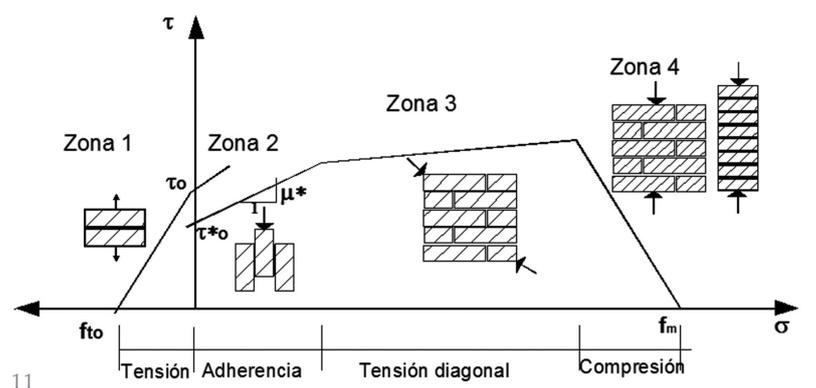
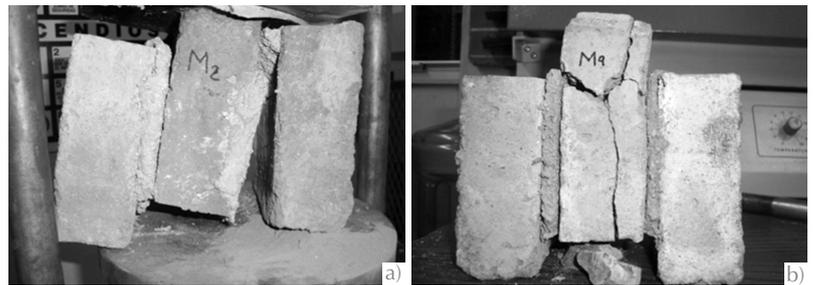
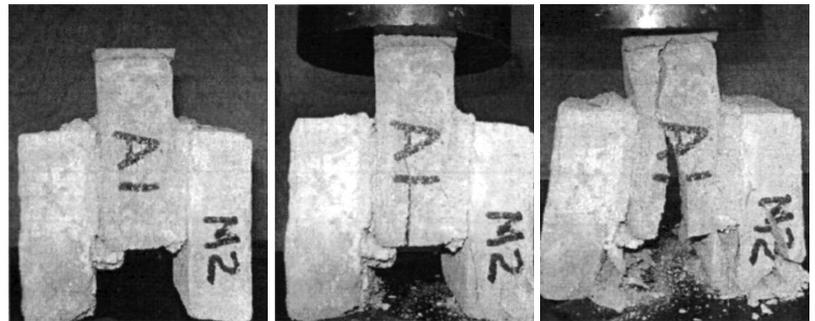


Tabla 6. Comparación de valores experimentales y normativos

Propiedad mecánica	Experimental	Norma
Resistencia de diseño a compresión de la pieza, $f^*_p$	5,5 MPa	6,0 MPa
Resistencia de diseño a compresión del mortero, $f^*_j$	21,5 MPa	12,5 MPa
Resistencia de diseño a compresión de la mampostería, $f^*_m$	3,5 MPa	2,0 MPa con $f^*_j=12,5$ MPa y $f^*_p = 6,0$ MPa.
Resistencia de diseño a cortante, $v^*_m$	0,55 MPa	0,35 MPa con $f^*_j = 12,5$ MPa y $f^*_p = 6,0$ MPa $0,8 \sqrt{f^*_m} = 0,47$ MPa
Módulo elástico en función de la resistencia de diseño a compresión para la pieza	$E_m = 725 f^*_m$	$E_m = 350 f^*_m$
Módulo de corte en función del módulo elástico	$G_m = 0,42 E_m$	$G_m = 0,40 E_m$
Esfuerzo de adherencia de la junta, $\tau_a$	0,49 MPa	No existe valor normativo. Meli y Reyes (26) reportan 0,25 MPa

Sin embargo, según Tomazevic (27), el módulo de corte puede estar entre el 6 y 25 % del módulo elástico sin alcanzar la razón normativa de 40% (9) (22).

$$[14] \quad G_m = 0,42 E_m$$

Finalmente, la Tabla 6 compara los valores experimentales con los definidos en norma de la ciudad de México, los cuales son utilizados para el diseño en Chilpancingo, Gro.

### 8. CONCLUSIONES

El valor experimental más importante para el diseño de edificaciones sometidas a fuerzas sísmicas es la resistencia a cortante de diseño ( $v^*_m$ ) para el cual se obtuvo un incremento del 57% respecto al valor normativo, considerando que la resistencia a compresión de diseño de la pieza ( $f^*_m$ ) apenas cumple con la Norma. Lo anterior se explica por la influencia positiva de la resistencia de diseño a compresión del mortero ( $f^*_j$ ) que registra un aumento de 72%. Esta situación es benéfica para la seguridad de las construcciones; sin embargo, los altos valores del módulo elástico y de corte, dos veces mayores a los referenciados, pueden generar un comportamiento más frágil al registrado en edificaciones ubicadas en otros lugares.

Otro punto desfavorable es la alta variación de las propiedades, los mayores valores corresponden a la deformación normal unitaria,  $\epsilon_{m\prime}$  (51%) y al módulo elástico,  $E_{m\prime}$  (40%). En los muretes, la mayor variación se registró en la deformaciones de fluencia y última ( $\gamma_y, \gamma_u$ ) con 50% y 58%, respectivamente. Lo anterior tiene su origen, muy probablemente, en la falta de control de calidad de los insumos y en los procesos de elaboración de las piezas.

Respecto a la resistencia a compresión ( $f^*_m$ ), la norma subestima la aportación del mortero ya que hay un incremento del 75%. Para el esfuerzo de adherencia de la junta no existen valores normativos, pero también hay un incremento de dos veces respecto a los referenciados en la bibliografía.

Por otro lado, las ecuaciones obtenidas del comportamiento en pilas y muretes pueden servir para realizar simulaciones numéricas de muros y/o estructuras de mampostería. Los valores aquí reportados son los primeros en su tipo para esta zona y deben complementarse con estudios futuros.

En México, el ensaye de muretes a tensión diagonal es la prueba más común para evaluar la mampostería; sin embargo, la información es insuficiente porque la envolvente de resistencia es una combinación de modos de falla. Lo anterior sugiere dos cosas: a) incorporar la prueba de adherencia a la normatividad mexicana, b) modificar el espécimen de la prueba a compresión para inducir un estado de esfuerzos semejante al existente en muros sujetos a carga sísmica.

Los valores registrados y las ecuaciones propuestas servirán como referencia para evaluar el comportamiento sísmico de edificaciones de mampostería confinada construidas en Chilpancingo, Gro. Esto podría impactar positivamente en la disminución del riesgo sísmico existente en la ciudad.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico del Fondo Mixto Conacyt-Estado de Guerrero (Proyecto GUE-2010-02-150486) y del Programa de Mejoramiento del Profesorado. Las pruebas fueron desarrolladas en el Laboratorio de Materiales del Centro Nacional de Prevención de Desastres y de la UAI-UAGro.

## REFERENCIAS

- (1) Subsecretaría de Protección Civil, Gobierno del Estado de Guerrero. (2012). Reporte de Daños del sismo del 10 de diciembre de 2011.
- (2) Subsecretaría de Protección Civil, Gobierno del estado de Guerrero. (2012). Reporte de daños por sismo del 20 de marzo de 2012.
- (3) Servicio Sismológico Nacional (Online). [Citado 10 julio 2012]. [www2.ssn.unam.mx/website/jsp/principal.jsp](http://www2.ssn.unam.mx/website/jsp/principal.jsp)
- (4) Google maps. Mapa de Chilpancingo, Gro (Online). [Citado 09 julio 2012]. [maps.google.com.mx](http://maps.google.com.mx)
- (5) Rodríguez, M. Confined Masonry Construcción. (Online). [Citado 6 April 2012]. [www.world-housing.net](http://www.world-housing.net)
- (6) Sánchez, S. (2009). Étude expérimental et numérique des murs en maçonnerie confinée chargés dans leur plane. Cas: État de Guerrero (Mexique). Universidad Paris-Este.
- (7) García, D., San-José, J. T., Garmendía, L., San Mateos, R. (2012). Experimental study of traditional Stone masonry under compressive load and comparison of results with design codes. *Materials and Structures*, 45(7): 995-1006.
- (8) Varum, H., Figueiredo, A., Silveira, D., Martins, T. y Costa, A. (2011). Investigaciones realizadas en la Universidad de Aveiro sobre caracterización mecánica de las construcciones existentes en adobe en Portugal y propuestas de rehabilitación y refuerzo. Resultados alcanzados. *Informes de la Construcción*, 63(523): 127-142. doi:10.3989/ic.10.016.
- (9) Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería. *Gaceta oficial del Distrito Federal*, 2004, pp. 4-53.
- (10) Instituto Nacional de Geografía e Informática: Censos y conteos de población y vivienda 2010. (Online) (2012). [Citado 09 agosto 2012]. [www3.inegi.org/sistemas/iter/consultar\\_info.aspx](http://www3.inegi.org/sistemas/iter/consultar_info.aspx) Inegi
- (11) Guerrero Cultural Siglo XXI. (2009). *Enciclopedia Guerrerense*. Gobierno del estado de Guerrero.
- (12) Reglamento de construcciones para el municipio de Chilpancingo de los Bravo Guerrero. *Gaceta de Chilpancingo*, 1999.
- (13) Salgado, J. (2000). Propuesta de reforzamiento de muros de mampostería en zonas sísmicas (Tesis de Licenciatura). UAI-UAG.
- (14) Organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación. Industria de la construcción –Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural– Especificaciones y métodos de prueba. NMX C-404-ONNCCE-2005.
- (15) Organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación. Industria de la construcción –Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural– Resistencia a la compresión– Método de prueba. NMX C-036-ONNCCE-2004.
- (16) Organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación. (2011). Industria de la construcción –Cemento– Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos. NMX C-061-ONNCCE-2001.
- (17) Organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación. Industria de la construcción -Industria de la construcción - Mampostería - Determinación de la resistencia a compresión y modulo de cortante de muretes, así como determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o de concreto - Métodos de ensayo. NMX-C-464-ONNCCE-2010.
- (18) Hognestad, E. (1951). A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. *University of Illinois Bulletin*, 399(49).
- (19) Sahlin, A. (1974). *Structural Masonry*. p. 302, Prentice Hill.
- (20) Barragán, R. (2012). *Influencias de la mano de obra en las propiedades mecánicas del mortero de liga para muros de mampostería y en la respuesta dinámica de la vivienda*. UAI-UAGro.
- (21) Canavos, G. (1988). *Probabilidad y estadística*, p. 651. McGrawHill, México.
- (22) Eurocode. Eurocode 6 Mampostería (Online). [Cited 20 August 2012], [www.eurocode6.org/index.htm](http://www.eurocode6.org/index.htm).
- (23) Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Determinación del esfuerzo de adherencia de los ladrillos cerámicos y el mortero de las juntas. NMX-C-082-1974.
- (24) Mann, W., Muller, H. (1982). Failure of shear stressed masonry an enlarged theory, tests and application to shear walls. *Proc. British Ceramic Society*, 30: 223-235.
- (25) Cabezas, F. (2011). Estimación analítica de la resistencia al corte de muros de albañilería confinada mediante el modelo Crissafulli (Tesis de licenciatura). Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- (26) Meli, R., Reyes, A. (1971). *Propiedades mecánicas de la mampostería*, p. 24. II-UNAM, México.
- (27) Tomazevic, M. (2000). *Earthquake-resistant design of masonry buildings*, p. 268. Imperial College Press, London.
- (28) Bustos, J. Estudio del comportamiento sismo-resistente de muros de mampostería encadenada mediante un ensayo en mesa vibratoria (Online). [Citado 15 julio 2012], [www.ceia.uns.edu.ar/cursos/Sismico/SESSION-05-SEMINARIO-modelo-escala.pdf](http://www.ceia.uns.edu.ar/cursos/Sismico/SESSION-05-SEMINARIO-modelo-escala.pdf)
- (29) Treviño, E., Alcocer, S., Flores, L., Larrua, R., Zarate, J., Gallegos, L. (2004). Investigación experimental del comportamiento de muros de mampostería confinada de bloques de concreto sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles reforzados con acero de grados 60 y 42. En XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Aca-pulco: Editorial SME.
- (30) Crisafulli F. Analysis of infilled frame structures Seminar on masonry and earthen structures Minho University (Online). [Citado 20 agosto 2012], [www.scribd.com/doc/37040298/01-Francisco-Crisafull-Seminar](http://www.scribd.com/doc/37040298/01-Francisco-Crisafull-Seminar).

\* \* \*