

# CONTROL DE LA TRITURACIÓN DE LOS LADRILLOS HUECOS MEDIANTE MALLA ELECTROSOLDADA EN MUROS DE ALBANILERÍA CONFINADA

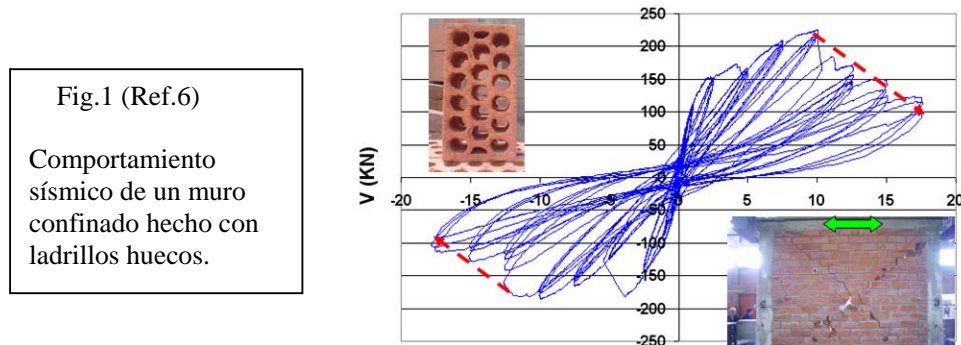
Por: Ángel San Bartolomé, Krishan Barr y César Pineda  
Pontificia Universidad Católica del Perú

## RESUMEN

Debido al mal comportamiento sísmico de los muros portantes de albañilería confinada construida con ladrillos huecos (con más de 30% de huecos en sus caras de asiento), la Norma E.070 prohíbe su uso, excepto cuando la edificación se comporta elásticamente ante los sismos severos. Sin embargo, por razones económicas, esos ladrillos son muy empleados en nuestro medio. En ese contexto, y puesto que en un proyecto anterior se controló parcialmente la trituration de los ladrillos huecos mediante la adición de refuerzo horizontal, en este proyecto se encontró una forma más eficaz de evitar el problema mencionado, con el empleo de malla electrosoldada recubierta con mortero, refuerzo que también podría aplicarse en las edificaciones existentes hechas con ladrillos huecos y que presenten baja densidad de muros.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Norma E.070 [1] obliga el uso de ladrillos sólidos (con menos del 30% del área bruta ocupada por las perforaciones) en la construcción de los muros portantes confinados, ya que los ladrillos huecos se trituran por las continuas aberturas y cierres de las grietas diagonales producidas por la carga sísmica, lo cual genera una fuerte degradación de resistencia y rigidez en los muros (Fig.1), incluso para derivas inferiores al límite máximo especificado por la Norma sísmica E.030 [2]. Sin embargo, mucha gente usa ladrillo hueco porque es más económico que el sólido, construyendo así estructuras sísmicamente vulnerables, razón por la cual sería necesario reforzar estas edificaciones, especialmente cuando presentan baja densidad de muros que conduce a que sus muros se agrieten diagonalmente ante los sismos severos.



En ese sentido, en un proyecto anterior [5], se trató de controlar el problema descrito mediante el empleo de refuerzo horizontal, sin embargo, si bien se atenuó el problema, la trituration de los ladrillos huecos continuó presentándose (Fig.2), por lo que en el presente proyecto se pretende solucionar el problema mediante el uso de malla electrosoldada recubierta con un tarrajeo de cemento, para tratar de controlar en mayor grado el grosor de las grietas diagonales.

De este modo, con fines comparativos, en este proyecto se analizaron dos muros confinados a escala natural, construidos con la misma mano de obra, los mismos materiales, las mismas dimensiones y refuerzo en los confinamientos, excepto que en uno de ellos se colocó una malla electrosoldada en cada cara del muro. Ambos muros fueron ensayados a carga lateral cíclica con desplazamiento lateral controlado, lográndose resultados satisfactorios.



Fig.2 (Ref.5). Muro sin refuerzo horizontal (izq.) y con refuerzo horizontal (der.).

## 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

En la construcción de los muros M1 (sin malla) y M2 (con malla electrosoldada), se usaron los mismos materiales, cuyas características principales fueron:

- Ladrillos Industriales de Arcilla. Tipo King Kong de 9x12.5x23cm (Fig.3), con: 46% de huecos,  $f'b = 230 \text{ kg/cm}^2$ , variación dimensional menor que 1%, 0.7mm de alabeo, 11% de absorción y 47 gr/(200cm<sup>2</sup>-min) de succión, razón por la cual fueron regados durante ½ hora, unas 10 horas antes de asentarlos [1]. De acuerdo a la Ref.1, la unidad clasificó como “hueca” clase V.
- Mortero. Dosificado en proporción volumétrica cemento-arena gruesa 1:4, tipo P2 [1]. La cantidad de agua la reguló el albañil de tal modo de lograr una mezcla trabajable. El grosor de las juntas horizontales y verticales en la albañilería fue 1.5cm.
- Cemento. Portland tipo I, embolsado.
- Concreto. En los confinamientos se usó concreto de  $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$ , con piedra de ½”.
- Acero de Refuerzo. ASTM A615, grado 60 ( $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ ).
- Malla Electrosoldada. Utilizada en el muro M2, estuvo compuesta por varillas de acero corrugado de 4.5mm de diámetro, espaciadas a 15cm. La resistencia máxima a tracción es de 6114 kg/cm<sup>2</sup>. Para interconectar la malla al muro M2 se usó alambre #8, cada 45cm.
- Pilas de Albañilería Simple. El ensayo de compresión axial de 3 pilas de 12.5x23x60cm, sujetas a una velocidad de carga de 5 ton/min, proporcionó una resistencia característica  $f'm = 78 \text{ kg/cm}^2$ . La falla fue frágil, triturándose algunos ladrillos huecos (Fig.3).
- Muretes de Albañilería Simple. El ensayo de compresión diagonal de 3 muretes de 12.5x60x60cm, sujetos a una velocidad de carga de 1 ton/min, proporcionó una resistencia característica a corte puro  $v'm = 7.2 \text{ kg/cm}^2$ . La falla fue frágil, escalonada a través de las juntas y cortando o triturando algunos ladrillos huecos (Fig.3).



Fig.3. Ladrillo hueco (izq.), y formas de falla de la pila (centro) y del murete (der.)

### 3. CARACTERÍSTICAS DE LOS MUROS

Los muros M1 (sin malla, Fig.4) y M2 (con malla, Fig.5), tuvieron las mismas características geométricas, materiales, refuerzo en los confinamientos, mano de obra y procedimiento constructivo. La única diferencia que hubo fue que en M2 se añadieron en ambas caras de la albañilería, una malla electrosoldada. Esta malla no fue conectada a los confinamientos ni a la cimentación, ya que lo que se pretendía era cerrar las grietas diagonales en la albañilería, generadas por la carga lateral, para de este modo controlar la trituration de los ladrillos huecos.

Fig.4  
Características de M1.  
Medidas en metros.

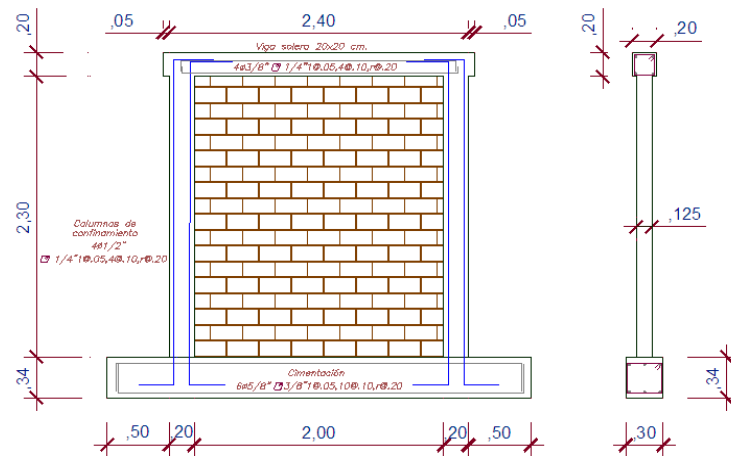
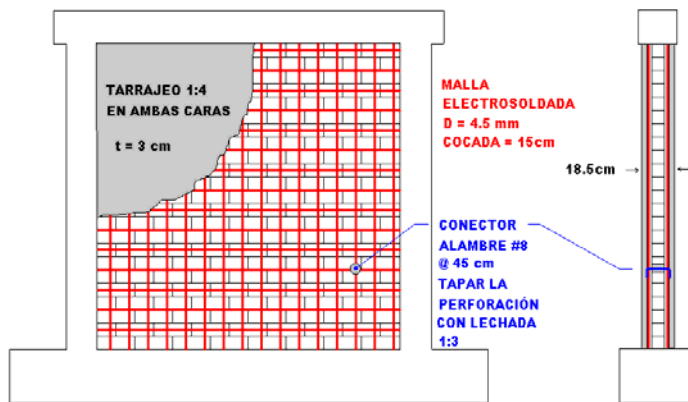


Fig.5  
Reforzamiento de M2.  
El resto de características es similar a M1 (Fig.4).



### 3.1 Diseño de los Confinamientos

Para el diseño de los confinamientos correspondientes al muro convencional M1, se usaron las expresiones de la Norma E.070 [1], donde se indica que ante sismos severos la albañilería confinada fallará por corte y los confinamientos deberán soportar la carga que produce el agrietamiento diagonal ( $V_m$ ), evaluado mediante la fórmula:  $V_m = 0.5 \alpha v' m t L + 0.23 P$ , donde:

- $\alpha = V L / M = V L / (V h) = 1$  para muros cuadrados
- $t = 12.5\text{cm}$  = espesor del muro
- $L = 240\text{cm}$  = longitud total del muro
- $v' m = 7.2 \text{ kg/cm}^2$  (acápite 2)
- $P = 0$  = carga axial en el muro (el ensayo se hizo sin carga vertical)

De esta forma se obtuvo  $V_m = 10.8 \text{ ton}$ , lo que proporcionó: columnas de  $12.5 \times 20\text{cm}$  reforzadas con  $4 \phi 1/2$ " y estribos de  $1/4$ " 1 a 5, 4 @ 10, resto a 20cm, y una viga solera de  $20 \times 20\text{cm}$  reforzada con  $4 \phi 3/8$ " y estribos de  $1/4$ " 1 a 5, 4 @ 10, resto a 20cm (ver la Fig.4).

### 3.2 Diseño de la Malla Electrosoldada en M2

Para simular el reforzamiento de un muro construido con ladrillos huecos, M2 tuvo las mismas características que M1, con la diferencia que se adicionó en cada cara malla electrosoldada (Fig.5), capaz de soportar la carga de agrietamiento diagonal asociada a un muro con el espesor incrementando en 6cm por el tarrajeo, que ahora forma parte de la estructura al aplicarse sobre una malla debidamente conectada al muro. De acuerdo a la Ref.1, cuando el tarrajeo se aplica directamente sobre la albañilería, no debe contemplarse en el cálculo del espesor efectivo "t", porque se desprende durante el sismo. De esta forma:

- $V_m (M2) = 0.5 \alpha v' m t L + 0.23 P = 0.5 \times 1 \times 7.2 \times 18.5 \times 240 + 0.23 \times 0 = 16 \text{ ton}$
- $A_s$  (malla de cocada  $s = 15\text{cm}$ ) =  $V_m s / (f_y L) = 16 \times 15 / (4.2 \times 240) = 0.24\text{cm}^2$
- Se usó doble malla de 4.5mm:  $A_s = 2 \pi (0.45)^2 / 4 = 0.32\text{cm}^2 > 0.24\text{cm}^2$

Cabe señalar que en el cálculo de "V<sub>m</sub>" en M2, se utilizó la resistencia a corte puro de la albañilería simple ( $v' m = 7.2 \text{ kg/cm}^2$ ); sin embargo, debería emplearse el "v' m" de muretes con una sección compuesta por albañilería-malla-tarrajeo, lo que se dejará como línea futura de investigación (acápite 9).

## 4. PROPIEDADES DEL MURO M1 Y PREDICCIÓN DEL TIPO DE FALLA

Con la finalidad de predecir resultados, se evaluaron las propiedades del muro convencional M1, empleando las disposiciones y fórmulas de la Norma E.070 [1]. Para ello se utilizó un módulo de elasticidad de la albañilería  $E_m = 500 f' m = 500 \times 78 = 39000 \text{ kg/cm}^2$ , un módulo de corte  $G_m = 0.4 E_m$ , un módulo de elasticidad del concreto  $E_c = 15210 \sqrt{f' c} = 201000 \text{ kg/cm}^2$ . Con lo cual, la relación de módulos de elasticidad resulta:  $n = E_c / E_m = 5.15$ .

### 4.1 Propiedades de la Sección Transformada

Para predecir la rigidez lateral y la resistencia a tracción por flexión, se calcularon las propiedades de la sección transversal de M1, transformada en una sección equivalente de albañilería. Para ello, el espesor real de la columna (12.5cm), se multiplicó por  $n = E_c / E_m$ , manteniendo constante su peralte (20cm). Se obtuvieron las siguientes propiedades en la sección transformada:

- $A = 0.506\text{m}^2$  = área axial
- $A_c = t L = 0.125 \times 2.4 = 0.3\text{m}^2$  = área de corte
- $f = A / A_c = 1.69$  = factor de forma
- $I = 0.394\text{m}^4$  = momento de inercia

## 4.2 Rigidez Lateral Inicial (Ko)

Para el cálculo de la rigidez lateral elástica (Ko) de M1, se utilizó la siguiente fórmula, válida para muros que trabajan en voladizo:

$$K_o = \frac{E_m}{\frac{h^3}{3I} + \frac{f h E_m}{G_m A}}$$

Donde h = 2.4m = altura del muro hasta el eje de la solera. Se obtuvo: Ko = 12.3 ton/mm.

## 4.3 Fisuración en Tracción por Flexión (F)

La resistencia (F) asociada a la formación de la fisura en tracción por flexión en la base del muro M1, se obtuvo igualando el esfuerzo máximo de tracción existente en la sección transformada a la resistencia a tracción por flexión del concreto ( $2\sqrt{f'c}$ ), transformada en albañilería ( $2\sqrt{f'c} / n$ ). Despreciando el peso propio del muro, se utilizó la expresión:  $\sigma = M / I = 2\sqrt{f'c} / n$ , donde:

- M = F h = momento flector en la base del muro producida por la carga lateral "F".
- y = 1.2m = distancia desde el centroide de la sección hasta la fibra extrema en tracción.

De esta manera se obtuvo: F = 7 ton.

## 4.4 Resistencia al Agrietamiento Diagonal (Vm)

La resistencia al agrietamiento diagonal de la albañilería ( $V_m = 0.5 \alpha \sqrt{m} t L + 0.23 P$ ), fue calculada en el acápite 3.1, obteniéndose: Vm = 10.8 ton.

## 4.5 Resistencia a Flexión (Vf)

Despreciándose el peso propio del muro M1, la resistencia (Vf) asociada a la fluencia del refuerzo vertical existente en la base de la columna en tracción, fue calculada con la expresión: momento flector en la base del muro M1 = Vf h = As fy D, obteniéndose Vf = 19.9 ton. En esta expresión:

- As = 4x1.29 = 5.16cm<sup>2</sup> (4  $\phi$  1/2")
- fy = 4200 kg/cm<sup>2</sup> = esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo
- D = 2.2m = distancia entre los ejes de columnas

## 4.6 Tipo de Falla Esperada

Puesto que la resistencia a flexión Vf = 19.9 ton supera a la resistencia a corte Vm = 10.8 ton, es de esperarse una falla por fuerza cortante en el muro M1, debiendo ocurrir previamente la fisura en tracción por flexión de las columnas (F = 7 ton). Este tipo de falla ocurre con frecuencia en las construcciones reales de albañilería confinada sujeta a sismos severos.

En cuanto al muro M2, reforzado con doble malla electrosoldada recubierta con mortero, la resistencia a flexión no varía (Vf = 19.9 ton), ya que el refuerzo vertical de la malla no se conectó a la cimentación; sin embargo, esta resistencia podría incrementarse por la incursión del refuerzo vertical en la zona de endurecimiento. En este caso, la resistencia a corte (Vm) se incrementa en relación a la obtenida en M1, ya que M2 presenta mayor espesor. Asimismo, el mortero empleado para recubrir las mallas, debe proporcionar mayor resistencia a corte puro ( $\sqrt{m}$ ) que la albañilería simple ( $\sqrt{m} = 7.2 \text{ kg/cm}^2$ ). De esta forma, se desconoce qué tipo de falla tendría el muro M2.

## 5. CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS Y REFORZAMIENTO DE M2

Los dos muros (M1 y M2) fueron construidos en forma tradicional, pero en M2 se agregó malla electrosoldada recubierta con mortero 1:4 en cada cara.

## 5.1 Construcción de los Muros M1 y M2

Aparte de emplearse los mismos materiales, la misma mano de obra y el mismo refuerzo en los confinamientos de M1 y M2, en la construcción de ambos muros se consideró lo siguiente:

- El aparejo de las unidades de albañilería fue de sogá.
- La conexión columna-albañilería fue dentada (5cm de diente), sin mechas (Fig.6).
- Lo ladrillos fueron regados durante 30 minutos unas 10 horas antes de asentarlos.
- El recubrimiento del refuerzo en los confinamientos fue 3cm.
- El concreto se preparó con una mezcladora, tuvo un revenimiento de 4 pulgadas y fue compactado con una vibradora.
- Primero se construyó la albañilería en 2 jornadas, después se vació el concreto de las columnas y finalmente, se vació el concreto de la solera (Fig.6). No se apreciaron cangrejas.

Fig.6  
Construcción de los  
muros M1 y M2.



## 5.2 Reforzamiento del Muro M2

Si se tratase de una edificación nueva de albañilería confinada, los conectores (alambre #8) de las mallas electrosoldadas (Fig.7), podrían colocarse en las juntas de mortero durante el asentado de los ladrillos. Sin embargo, se trató de simular el caso de una albañilería existente hecha con ladrillos huecos, que se iba a reforzar con las mallas, por lo cual, una vez terminado de construir el muro tradicional, se le adicionó mallas en las 2 caras, interconectándolas con alambre #8, que pasó a través de perforaciones hechas en los ladrillos con un cincel de 1/4" cada 45cm (tres veces la distancia entre los nudos de la malla con cocada de 15 cm).



Fig.7. Malla electrosoldada (izquierda), conector (centro) y tarrajeo (derecha).

Después de perforar horizontalmente los ladrillos, se instalaron las mallas para enseguida introducir los conectores (alambre # 8) a través de las perforaciones, doblarlos 90° y amarrarlos con alambre #16 contra los nudos de la malla (Fig.7). Posteriormente se procedió a taponear las perforaciones con una lechada de mortero cemento-arena fina 1:3. Finalmente, se tarrajeó el muro por ambas caras con un mortero cemento-arena 1:4. Cabe remarcar que las mallas cubrieron sólo a la albañilería, no a las columnas ni a la solera, ya que su función era cerrar las grietas diagonales en la albañilería.



## 6. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA

### 6.1 Fases del Ensayo e Instrumentación

Ambos muros se sometieron a un ensayo de carga lateral cíclica con desplazamiento horizontal controlado (Tabla 1), sin carga vertical. Se utilizaron un actuador dinámico de 500 kN de capacidad y 6 sensores de desplazamiento (LVDT), cuya distribución se muestra en la Fig.8. Cabe indicar que D1 controla los desplazamientos laterales, D2 mide las grietas diagonales acumuladas en la parte central del muro, D5-D6 miden posibles separaciones entre las columnas y la albañilería y D3-D4 miden las fisuras que se formen en la parte inferior de las columnas.

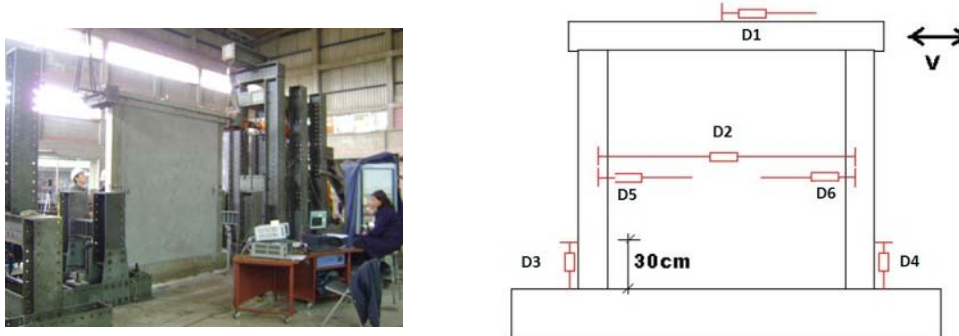


Fig.8. Dispositivos mecánicos e instrumentación.

El número de ciclos aplicados en cada fase fue variable, hasta estabilizar el lazo histerético V-D1. La velocidad del ensayo fue de aproximadamente 1 ciclo en 4 minutos, suficiente como para registrar y grabar en la computadora por lo menos 100 puntos (V y Di) en cada ciclo. Luego de concluir las 10 fases, ambos muros se sometieron a un movimiento armónico con una frecuencia de 2 Hz y desplazamiento lateral de 15mm. Lo que se pretendió en esta fase armónica, fue observar en forma rápida el tipo de falla predominante en los muros y su deterioro, algo que se torna difícil de ver cuando el ensayo es lento

Tabla 1. Fases del Ensayo de Carga Lateral Cíclica.										
FASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D1 (mm)	0.5	1.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
Ciclos en M1	1	2	3	3	3	3	3	4	3	4
Ciclos en M2	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3

### 6.2 Comportamiento de los Muros

Tal como se predijo en el acápite 4.6, el muro M1 tuvo una falla por corte, formándose primeramente fisuras de tracción por flexión en la base de las columnas y terminar con los ladrillos huecos triturados (Fig.9). Este comportamiento es común para este tipo de muros confinados [3] y por ello, la Norma E.070 [1] prohíbe el uso de ladrillos huecos.

El muro M2 tuvo una falla por flexión, con la formación de pequeñas fisuras por corte en la albañilería, controladas por la malla electrosoldada. Finalmente, la falla derivó en una grieta vertical en la columna izquierda, perdiéndose la adherencia barra-concreto, mientras que el talón de la columna derecha terminó triturándose (Fig.9).

Cuando se realizó el ensayo armónico, los ladrillos de M1 se trituraron en mayor proporción, pese a que se aplicó un desplazamiento lateral menor (15mm) al existente en la fase 10 (20mm). En el muro M2 el talón derecho se trituró completamente. En la Fig.9 se muestra el estado final de

ambos muros después de la prueba armónica, mientras que en la Tabla 2 se compara fase a fase el comportamiento de ambos muros. En la Tabla 2 “V” es la carga lateral y “G” es el grosor máximo de la grieta correspondiente a la forma de falla que tuvo cada muro.

<b>Tabla 2. Comportamiento de los Muros en cada Fase del Ensayo.</b>		
<b>FASE</b>	<b>Muro M1</b>	<b>Muro M2</b>
FASE 1 D1 = 0.5mm	Surgió una fisura horizontal, en la parte inferior izquierda. V = 6.5 ton	Comportamiento elástico, sin fisuras.
FASE 2 D1 = 1.0mm	Apareció otra fisura horizontal en la parte inferior izquierda.	Comportamiento elástico, sin fisuras.
FASE 3 D1 = 2.5mm	Surgieron fisuras horizontales en la parte intermedia izq. y der. V = 9.1 ton y - 10.2 ton. G = 0.15 mm	Aparecieron las primeras fisuras en la unión columna-cimentación en ambos lados del muro. V = 11.6 ton.
FASE 4 D1 = 5.0mm	Aparecieron grietas diagonales escalonadas en ambos sentidos. V = 14.1 ton y -12.6 ton. G = 3mm.	Aparecieron fisuras horizontales en la parte intermedia inferior del muro. V = 13 ton y - 15 ton. G = 0.1mm.
FASE 5 D1 = 7.5mm	Surgió una grieta diagonal paralela a la de la fase 4. G = 5 mm.	Las fisuras en la mitad inferior tendieron a ser diagonales. V = 16.2 ton y - 17.6 ton. G = 0.22mm.
FASE 6 D1 = 10mm	Comenzó la trituration de un ladrillo. G = 7 mm.	Se inició la falla por flexión. V = 21 ton. G = 0.35mm. Se colocó una marca en la base para verificar posible deslizamiento del muro.
FASE 7 D1 = 12.5 mm	Surgió otra grieta diagonal. V = 12 ton. G = 9mm.	Se extendió la fisura por flexión en la base y se formó una fisura vertical en la unión albañilería - columna izquierda. Se despegó el LVDT D4. V = 21 ton. G = 3mm.
FASE 8 D1 = 15mm	Surgieron otras 2 grietas diagonales. G = 12mm.	Desprendimiento pequeño del tarrajeo en las esquinas inferiores. V = 19 ton. G = 4mm.
FASE 9 D1 = 17.5mm	Surgieron más grietas y la trituration de los ladrillos se hizo más evidente. V = 11.3 ton. G = 15mm.	Apareció una grieta vertical en la columna izquierda, por donde corre el refuerzo vertical. El LVDT D3 se desprendió. V = 15 ton. G = 5mm.
FASE 10 D1 = 20mm	Los ladrillos se trituraron en mayor grado. G = 16mm.	La grieta vertical en la columna izquierda se extendió hasta la mitad de la altura, perdiéndose la adherencia barra-concreto. El talón derecho empezó a triturarse. No se notó deslizamiento del muro. V = 7.2 ton. G = 11mm.



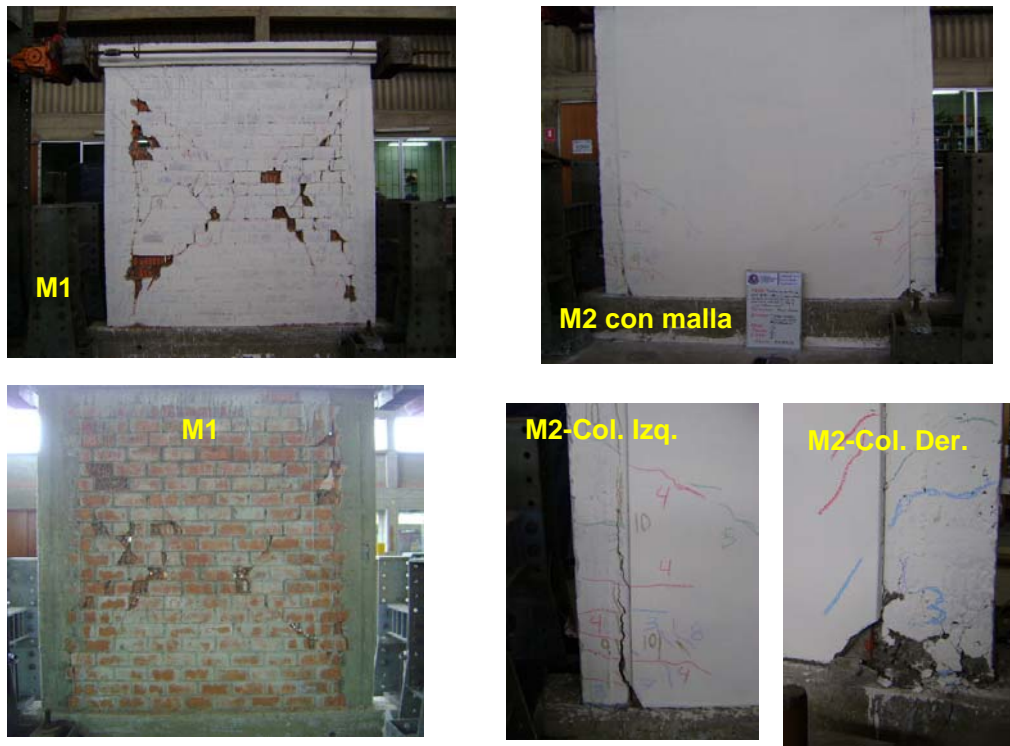


Fig.9. Estado final de los muros M1 (izq.) y M2 (der.) después de la fase armónica.

## 7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE M1 Y M2

### 7.1 Lazos de Histéresis y Envolvente V-D1

En la Fig.10 se muestran los lazos histeréticos Fuerza Cortante (V) – Desplazamiento Lateral (D1) correspondientes a los muros M1 y M2, trazados a la misma escala con fines comparativos. La forma de estos lazos, finos y pasando por el origen del sistema de referencia (propio de sistemas con rigidez degradante), es muy parecida, a pesar que ambos muros tuvieron formas de falla diferentes (por corte en M1 y por flexión en M2). Sin embargo, en M1 se aprecia para  $D1 = 4\text{mm}$  una caída brusca de la resistencia, producto de la falla por corte, algo que no ocurre en M2 ya que la malla controló el grosor de las fisuras diagonales. También se observa la continua degradación de resistencia, después de haberse superado la resistencia máxima en cada muro.

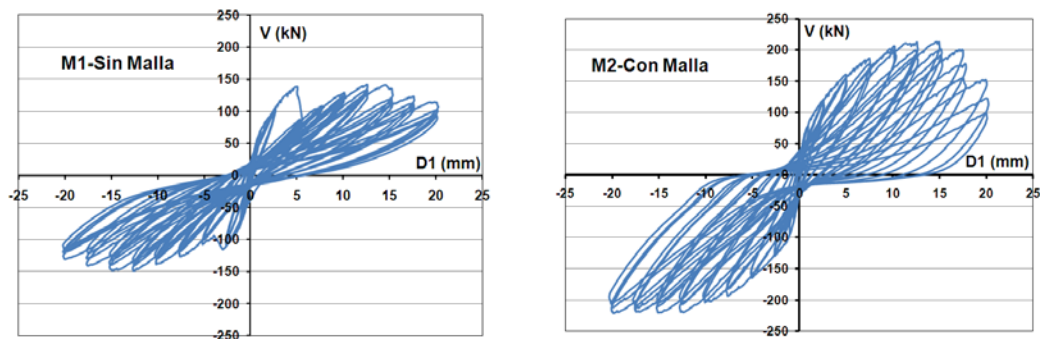


Fig.10. Lazos histeréticos V-D1 de M1 (izquierda) y M2 (derecha).

Para trazar la envolvente V-D1 (Fig.11) y comparar el comportamiento de ambos muros, se consideró la rama positiva correspondiente al primer ciclo de cada fase, porque fue la que mostró mayor degradación de resistencia. Allí se nota una mayor rigidez y resistencia a corte de M2 (con malla) sobre M1 (sin malla), aunque la degradación de resistencia al terminar el ensayo fue la misma. Sin embargo, el muro M2 tuvo mayor espesor (18.5cm) que M1 (12.5cm), por lo que en la Fig.12 se dibujó la envolvente de esfuerzos cortantes ( $v = V / Ac$ ). En esta última figura se aprecia que la resistencia unitaria máxima es prácticamente la misma en ambos muros.

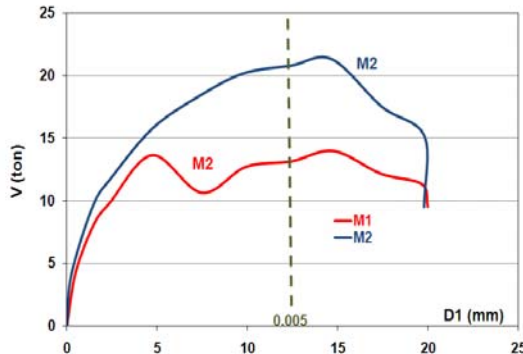


Fig.11. Envolvente V-D1 de M1 y M2.

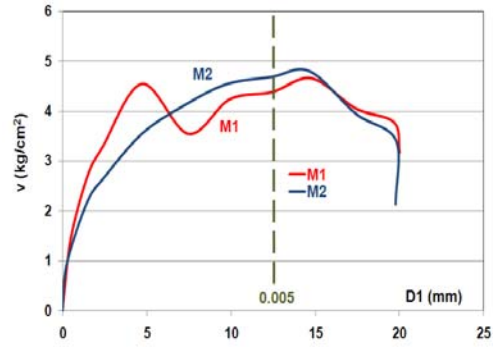


Fig.12. Envolvente de esfuerzo cortante.

## 7.2 Rigidez Lateral Inicial

Antes que se forme la primera fisura de tracción por flexión en la base de la columna de M1, durante la fase 1, se determinó la rigidez lateral. El valor experimental obtenido fue 10 ton/mm, mientras que el resultado teórico fue 23% mayor ( $K_o = 12.3$  ton/mm, ver el acápite 4.2).

En el muro M2 la rigidez inicial experimental fue 16.56 ton/mm, 65% mayor que la de M1 (10 ton/mm), pero esto se debe al mayor espesor (48%) que tuvo M2 (18.5cm) en relación al que tuvo M1 (12.5cm), y a que M2 fue tarrajado con mortero de cemento.

## 7.3. Resistencia a Tracción por Flexión

En el muro M1 la primera fisura de tracción por flexión en la base de la columna ocurrió durante la fase 1 del ensayo, para una carga de 6.5 ton, mientras que la resistencia teórica asociada a esta fisura fue 8% mayor (7 ton, acápite 4.3). Esta fisura ocurrió en M2 en la fase 3 del experimento, para una carga de 11.5 ton, 77% mayor que la registrada en M1 (6.5 ton); esta diferencia también se explica por el mayor grosor que tuvo M2 en relación a M1 dada por las capas de tarrajeo.

## 7.4 Resistencia al Agrietamiento Diagonal

La rotura diagonal en M1 se produjo durante la fase 4 del ensayo, para una carga de 12.6 ton, mientras que la resistencia teórica (acápite 3.1) fue 16% menor (10.8 ton). En M2 se produjeron durante la fase 5 del ensayo fisuras diagonales muy finas en su mitad inferior, para una carga de 16.2 ton, en tanto que la resistencia teórica (acápite 3.2) considerando el incremento del espesor de M2, fue 1% menor (16 ton). Esto querría decir, tal como se indica en la Norma E.070 [1], que para hallar la resistencia a corte de un muro donde el tarrajeo se ha aplicado sobre una malla debidamente conectada al muro, debe trabajarse con el espesor total del muro.

## 7.5 Resistencia Máxima

En ambos muros, la resistencia máxima se alcanzó durante la fase 7 del ensayo, lográndose valores de 14.85 ton para M1 y 21.96 ton para M2. Si bien la carga máxima alcanzada en M2 fue 48% mayor que la de M1, a nivel de esfuerzos cortantes la resistencia unitaria fue prácticamente

la misma:  $v(M1) = 14850 / (12.5 \times 240) = 5.16 \text{ kg/cm}^2$  y  $v(M2) = 21960 / (18.5 \times 240) = 4.95 \text{ kg/cm}^2$ , con una diferencia de 4% a favor de M1. Lo indicado fue corroborado gráficamente en la Fig.12.

Por otro lado, asumiéndose que el refuerzo vertical fluía, en el acápite 4.5 se determinó teóricamente la resistencia a flexión  $V_f = 19.9 \text{ ton}$ . Este valor es mayor que la resistencia máxima alcanzada por el muro M1, debido a que M1 falló por fuerza cortante; en cambio es apenas 10% menor que la resistencia máxima que tuvo M2 (21.96 ton), porque este muro falló por flexión. Esa diferencia de 10% podría atribuirse a que en la etapa de grandes desplazamientos laterales, el refuerzo vertical ingresa a su zona de endurecimiento, además, M2 no pudo aumentar más su resistencia porque durante la fase 9 del ensayo se produjo una grieta vertical que condujo a una falla por adherencia del refuerzo vertical interno de la columna izquierda.

## 7.6 Derivas

La Norma sísmica E.030 [2], establece que la deriva máxima en la albañilería confinada no debe ser mayor que 0.005, a fin de que los muros queden en un estado reparable después de un sismo severo. Esta deriva corresponde a la fase 7 del experimento ( $D1 = 12.5 \text{ mm}$ ), mientras que la degradación de resistencia se inició en ambos muros a partir de la fase 8 ( $D1 = 15 \text{ mm}$ ). Si bien es cierto que en M1 (ladrillos huecos sin malla) la degradación de resistencia empezó para una deriva 20% mayor que la reglamentaria, no puede aceptarse los ladrillos huecos en la construcción de los muros portantes confinados, debido a que el ensayo fue lento. Lo indicado fue corroborado cuando M1 fue solicitado armónicamente con una frecuencia de 2 Hz y un desplazamiento de 15mm, menor a los 20mm alcanzados en la fase 10, y pese a ello, la trituración de los ladrillos huecos fue mucho más notoria.

## 7.7 Grosos de Grietas

Para cada fase del ensayo, en la Tabla 2 se indica el grosor máximo (G) que tuvo la grieta diagonal en M1 (que falló por corte) y la grieta vertical existente en la columna izquierda M2 (que falló por flexión). Estos grosos máximos de grietas aparecen en la Fig.13, donde se aprecia que M2 (con malla) alcanzó menores grosos de grietas que M1 (sin malla). Por otro lado, en la Fig.14 se graficó la variación del desplazamiento horizontal relativo entre las partes medias de las columnas ( $D2$  en la Fig.8), versus el desplazamiento lateral  $D1$ . El LVDT "D2" mide los grosos acumulados de las grietas diagonales existentes en la parte intermedia del muro. En la Fig.14 se aprecia que el uso de la malla en M2 permitió controlar en mucho mayor grado al grosor de estas grietas ( $D2$  alcanzó hasta 0.35mm) que en M1 ( $D2$  llegó hasta 21mm), lo que resulta adecuado para controlar la trituración de los ladrillos huecos.

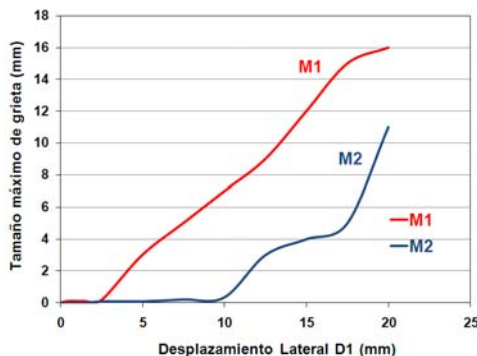


Fig.13. Tamaño máximo de grietas.

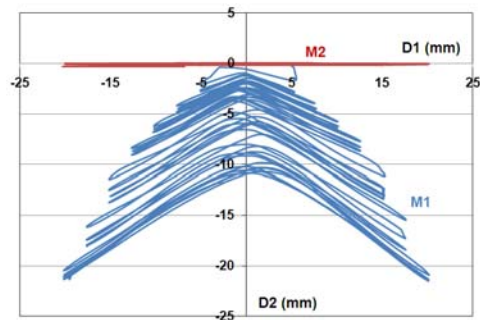


Fig.14. Variación de D2 vs D1

## 8. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se vierten en este trabajo se encuentran limitadas por la poca cantidad de especímenes ensayados; sin embargo, constituyen un indicio de la mejora sustancial que se

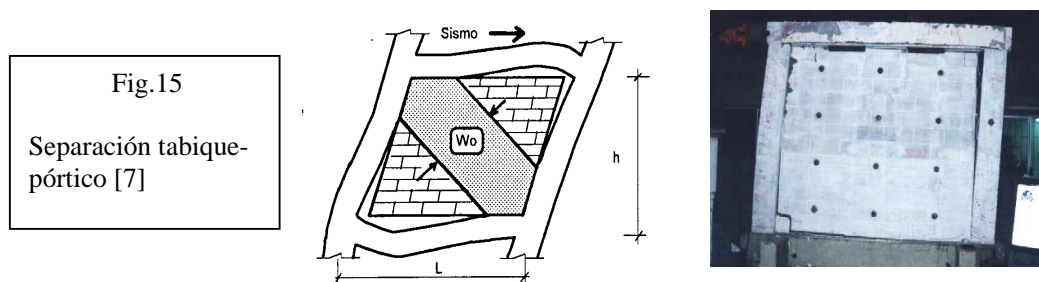
obtuvo al reforzar con malla electrosoldada (muro M2) a un muro portante confinado que se había construido con ladrillos huecos (muro M1), prohibido por la Norma E.070 [1], dado su pésimo comportamiento sísmico. Para un mejor entendimiento de estas conclusiones, debe remarcarse que ambos muros tuvieron las mismas características, con la excepción de que en ambas caras de M2 se adicionó la malla recubriéndola con mortero 1:4.

1. De acuerdo a la Norma E.070 [1], el ladrillo empleado en este proyecto calificó como tipo V, pero con 46% de huecos. Este tipo de ladrillo sólo puede utilizarse en la construcción de muros portantes confinados cuando se demuestra que la albañilería se comporta elásticamente ante los sismos severos.
2. La albañilería simple hecha con ladrillos huecos y mortero 1:4, tuvo una resistencia a compresión axial  $f'm = 78 \text{ kg/cm}^2$  y a corte puro  $v'm = 7.2 \text{ kg/cm}^2$ , mostrando en los ensayos de ambos casos la trituración de los ladrillos huecos.
3. En el ensayo del muro M1 (sin malla), pudo verificarse la razón por la cual en la Norma E.070 se prohíbe el uso de ladrillos huecos en la construcción de muros portantes confinados. La trituración de los ladrillos huecos ocurrió después de haberse formado las grietas diagonales, causando una gran degradación de la resistencia a fuerza cortante.
4. La trituración de los ladrillos huecos fue mucho mayor cuando se sometió al muro M1 a un ensayo armónico ( $f = 2 \text{ Hz}$ ), con un desplazamiento lateral (15mm) menor al máximo empleado en el ensayo estático previo (20mm). La trituración hubiese sido aún en mayor grado si M1 hubiese estado sujeto a carga vertical y a mayores momentos flectores.
5. El muro patrón M1 fue diseñado de acuerdo a las especificaciones de la Norma E.070 (exceptuando el uso de ladrillos huecos), y los errores en la predicción teórica de su rigidez lateral, carga de fisuración en tracción por flexión y carga de agrietamiento diagonal fueron pequeños: 22%, 8% y 16%, respectivamente.
6. El refuerzo adicional empleado en M2 (malla electrosoldada recubierta con mortero), incrementó el grosor efectivo del muro en 48%. Esto hizo que aumente la resistencia a corte y modifique el tipo de falla: de una falla por corte en M1 a una falla por flexión en M2.
7. El mayor espesor (48%) de M2 sobre M1 hizo que su rigidez lateral inicial, la carga asociada a la fisura de tracción por flexión, la resistencia al agrietamiento diagonal y la resistencia máxima sean 65%, 77%, 50% y 48%, respectivamente, mayores. Sin embargo, las resistencias unitarias de M2 y M1 fueron prácticamente las mismas; esto corrobora lo indicado en la Ref.1, donde se dice que el grosor del tarrajeo se considera en el cálculo del espesor efectivo de la albañilería, siempre y cuando éste se aplique sobre una malla debidamente conectada al muro.
8. La resistencia máxima a flexión del muro M2 pudo ser predecida con 10% de error.
9. Las fisuras diagonales que se formaron en M2 (cuya falla fue por flexión), fueron muy finas al ser controladas por la malla electrosoldada, esto evitó la trituración de los ladrillos huecos, cumpliéndose así con el objetivo principal del proyecto, problema que se atenuó medianamente cuando se usó solo refuerzo horizontal [5].
10. En ambos muros, la degradación de la resistencia máxima se inició a partir de la fase 8 del ensayo, para una deriva de 0.006, 20% mayor que la máxima deriva (0.005) permitida por la Ref.2. En el caso del muro M1 (falla por corte) la degradación de resistencia se debió a la trituración de los ladrillos huecos, mientras que en M2 (falla por flexión), se debió a la formación de una grieta vertical en la columna izquierda que hizo que su refuerzo vertical interno pierda adherencia. Lo último es menos grave que lo primero, dado que la albañilería triturada de M1 no podría soportar cargas verticales, mientras que la albañilería de M2 quedó con leves fisuras. En el acápite 9 se presentan alternativas para controlar la grieta vertical que se produjo en la columna de M2.

## 9. LÍNEA FUTURA DE INVESTIGACIÓN

En este proyecto se alcanzó la meta principal: el control de la trituración de los ladrillos huecos mediante el empleo de la malla electrosoldada, pero también surgieron dudas que deberían ser aclaradas en el futuro, para lo cual se plantea lo siguiente:

- La fórmula especificada en la Norma E.070 [1] para determinar la resistencia al agrietamiento diagonal de los muros ( $V_m$ ), depende de la resistencia a corte puro de los muretes ( $v'm$ ). Como la resistencia  $v'm$  se desconoce para el caso en que la albañilería esté reforzada con malla electrosoldada recubierta con mortero, se plantea determinarla mediante ensayos de compresión diagonal, donde se varíe tanto la malla como la calidad del mortero de tarrajeo
- En el muro M2 (con malla), la degradación de su resistencia máxima se produjo por la aparición de una grieta vertical en una de las columnas, que condujo a una pérdida de la adherencia del refuerzo vertical interno (cercano a la albañilería), por lo que sería adecuado, mediante un experimento de carga lateral cíclica, observar si envolviendo totalmente a la columna con la malla, podría controlarse la grieta mencionada, o también, prolongando el refuerzo horizontal de la malla y soldándolo con el refuerzo vertical de la columna. Cabe indicar que en los tabiques de los edificios aporticados, con pequeños desplazamientos laterales el tabique se separa del pórtico (Fig.15); algo similar debió ocurrir en M2, aunque por tratarse de un muro confinado, la separación ocurrió en la etapa de grandes desplazamientos laterales (con derivas mayores que 0.005).



## REFERENCIAS

1. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma Técnica E.070 "Albañilería".
2. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma Técnica E.030 "Diseño Sismorresistente".
3. San Bartolomé, A., Quiun, D. y Silva, W., 2011. Diseño y Construcción de Estructuras Sismorresistentes de Albañilería. Fondo Editorial PUCP.
4. San Bartolomé, A. y Angle, P., 2009. Comparación del comportamiento sísmico de muros confinados construidos con ladrillos de concreto y de arcilla. Libro de Ponencias del XVII Congreso Nacional de Ingeniería. Chiclayo.
5. San Bartolomé, A., Paredes, J. y Caycho, D., 2009. Control de la trituración de los ladrillos huecos en muros de albañilería confinada sujetos a carga lateral cíclica. Libro de Ponencias del XVII Congreso Nacional de Ingeniería. Chiclayo.
6. San Bartolomé, A., y Ordoñez, J., 2005. Comparación del comportamiento sísmico de un muro de albañilería tradicional y otro caravista. Revista COSTOS, edición 134, mayo del 2005.
7. San Bartolomé, A., 2007. Blog de investigaciones en albañilería <http://blog.pucp.edu.pe/albanileria> Contiene los artículos 4, 5 y 6, y los comentarios a la Norma E.070 citada en la referencia 1.