

REFORZAMIENTO DE VIVIENDAS EXISTENTES HECHAS CON LADRILLOS PANDERETA

Por: Ángel San Bartolomé, Daniel Quiun, Tania Araoz y Jhonatan Velezmoro
Pontificia Universidad Católica del Perú

RESUMEN

Por razones económicas, en el Perú muchas personas construyen sus viviendas utilizando ladrillos pandereta en los muros portantes de albañilería confinada, lo que está prohibido por la Norma E.070 dada su fragilidad ante los terremotos. En este contexto, se busca analizar experimentalmente una técnica de reforzamiento en base a malla electrosoldada recubierta con mortero, con miras de evitar el colapso de esas viviendas ante sismos futuros.

1. INTRODUCCIÓN

Al construir una vivienda uno de los factores más importantes es el económico, es por ello que muchas personas optan por edificarlas con materiales baratos, y seleccionan al ladrillo pandereta (tubular), desconociendo que estos ladrillos fueron creados para usarlos sólo en tabiquerías y que se encuentran prohibidos de emplearlos en los muros portantes por la Norma E.070 [1], dada la fragilidad que tienen ante los sismos (Fig.1). Ante el problema descrito, se necesita tomar medidas preventivas para evitar el colapso de estas viviendas, como ocurrió en el sismo de Pisco del 2007.



Fig.1. Viviendas con ladrillo pandereta y colapso en el sismo de Pisco del 2007.

En este proyecto se plantea reforzar a los muros existentes hechos con ladrillos pandereta mediante mallas electrosoldadas recubiertas con mortero. La efectividad de este reforzamiento fue probada experimentalmente con éxito en muros hechos con ladrillo del tipo King Kong con 40% de huecos [2], que habían quedado seriamente dañados por fuerza cortante en un ensayo de carga lateral cíclica previo. De este modo, usando ladrillos pandereta, se construyeron bajo las mismas condiciones dos muros confinados a escala natural (M1 y M2), uno de ellos (M2) fue reforzado externamente con la malla. Ambos muros fueron sometidos a ensayos de carga lateral cíclica, lográndose mejoras significativas en M2, aunque su comportamiento sísmico podría optimizarse aún más.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

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

- Ladrillos. Industriales de arcilla tipo Pandereta Acanalado de 9x11x23 cm (Fig.2). Variación dimensional: 4.65%, alabeo: 0.3mm, resistencia a compresión: $f'c = 56 \text{ kg/cm}^2$, absorción: 14%, y succión: 46 gr/(200cm²-min), razón por la cual fueron regados durante 30 minutos unas 10 horas antes de asentarlos [1]. Este ladrillo calificó como Clase I [1].
- Mortero. Dosificado en proporción volumétrica cemento-arena gruesa 1:4, tipo P2 [1]. El grosor de las juntas horizontales y verticales en la albañilería fue 1.5cm.
- Cemento. Portland tipo I, embolsado.
- Concreto. En vigas soleras y columnas se usó concreto de $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$, con piedra de $\frac{1}{2}$ ".
- Aceros de Refuerzo. ASTM A615, grado 60 ($f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$).
- Malla Electrosoldada. Compuesta por varillas de acero corrugado de 4.5mm de diámetro, espaciadas a 15cm, cumple con las normas ASTM A496 – 94 (Alambres Trefilados Corrugados) y ASTM A497 – 94. La resistencia máxima a tracción fue 5500 kg/cm². Para conectar la malla a la albañilería del muro M2 se usó alambre #8, cada 45cm.
- Pilas de Albañilería Simple. El ensayo de compresión axial de 4 pilas de 11x23x60cm, sujetas a una velocidad de carga de 5 ton/min, proporcionó una resistencia característica $f'm = 24 \text{ kg/cm}^2$. La falla para todos los casos fue muy frágil y explosiva, lo que demuestra lo peligroso de usar ladrillos pandereta en la construcción de muros portantes (Fig.3).
- Muretes de Albañilería Simple. El ensayo de compresión diagonal de 4 muretes de 11x60x60cm, a una velocidad de carga de 1 ton/min, proporcionó una resistencia característica a corte puro $v'm = 9.28 \text{ kg/cm}^2$. La falla para todos los casos fue por tracción diagonal, frágil y explosiva (Fig.3).

Fig.2

Ladrillo pandereta y prueba de succión.



Fig.3

Pilas y muretes. En las pilas Se usó 2 LVDT para medir el módulo de elasticidad "Em".



3. CARACTERÍSTICAS DE LOS MUROS

Los muros M1 (sin malla, Fig.4) y M2 (con malla, figuras 4 y 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 trituración de los ladrillos pandereta.

El confinamiento de ambos muros estuvo compuesto por: columnas de 13x20cm reforzadas con $4\Phi\frac{1}{2}$ " y estribos de: $\text{L} \frac{1}{4}$ " 1 @ 5cm, 4 @ 10cm, resto @ 20cm, y una viga solera de 13x20cm reforzada con $4\Phi\frac{3}{8}$ " y estribos de: $\text{L} \frac{1}{4}$ " 1 @ 5cm, 4 @ 10cm, resto @ 20cm (Fig.4).

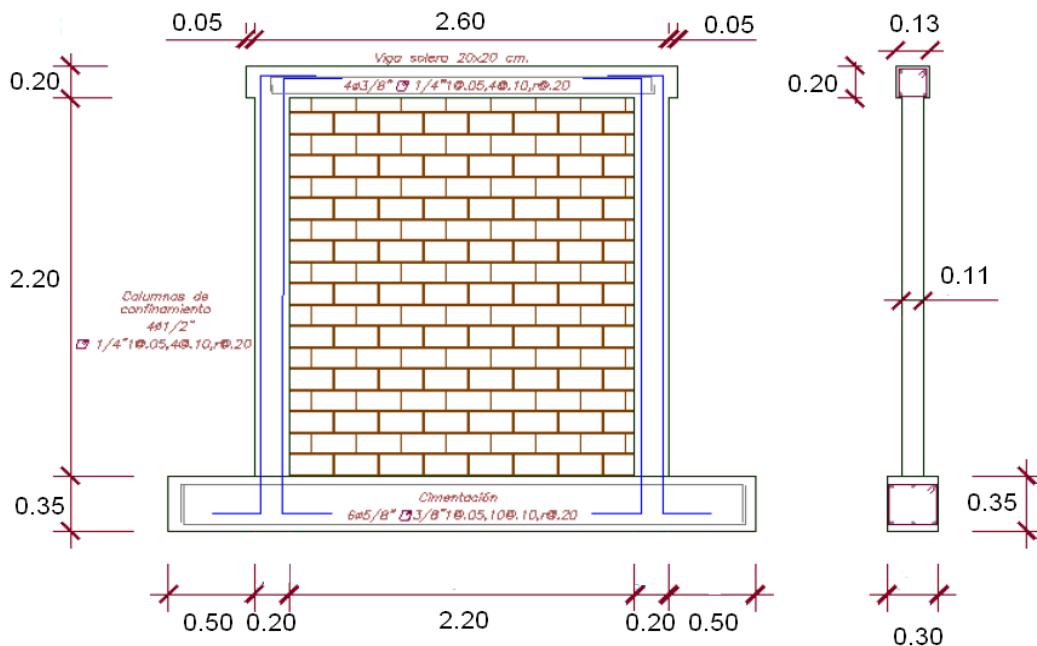


Fig.4. Características de M1 y M2. Dimensiones en metros.

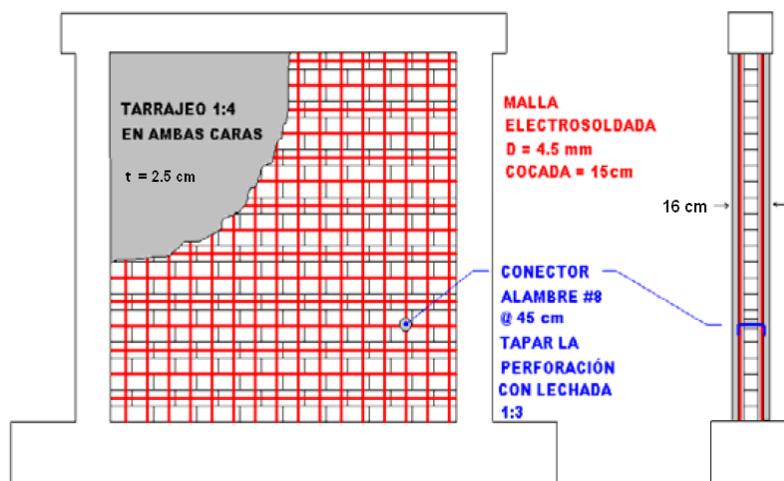


Fig.5. Reforzamiento de M2.

3.1 Diseño de la Malla Electrosoldada en M2

Para el diseño de la malla electrosoldada empleada en M2 se consideró que este refuerzo debía absorber la carga que produce el agrietamiento diagonal de la albañilería (V_m). El valor " V_m " fue determinado considerando un aumento en el espesor del muro en 5cm, proporcionado por el tarrajeo (2.5cm en cada cara). Usando la expresión de la Ref.1, se obtiene:

- $V_m (M2) = 0.5 \alpha v'm t L + 0.23 P_g = 0.5 \times 1 \times 9.28 \times 16 \times 260 + 0.23 \times 0 = 19.3 \text{ ton}$
- $A_s (\text{malla de cocada } s = 15\text{cm}) = V_m s / (f_y L) = 19.3 \times 15 / (4.2 \times 260) = 0.27 \text{ cm}^2$
- Se usó doble malla de 4.5mm: $A_s = 2 \pi (0.45)^2 / 4 = 0.32 \text{ cm}^2 > 0.27 \text{ cm}^2 \text{ Ok.}$

Cabe acotar que el valor $v'm = 9.28 \text{ kg/cm}^2$ (acápite 2), corresponde al de la albañilería no reforzada, por lo cual, estos cálculos son aproximados. Sería ideal tener un valor de “ $v'm$ ” para la albañilería enmallada y tarajeada, lo cual se dejará como línea futura de investigación.

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 el módulo de elasticidad proveniente del ensayo de las pilas (Fig.3): $E_m = 25837 \text{ kg/cm}^2$, un módulo de corte $G_m = 0.4E_m = 10334 \text{ kg/cm}^2$, un módulo de elasticidad del concreto $E_c = 15000 \sqrt{f'_c} = 198431 \text{ kg/cm}^2$. Con lo cual, la relación de módulos de elasticidad resulta: $n = E_c / E_m = 7.68$.

4.1 Propiedades de la Sección Transformada

Para la evaluación de la rigidez lateral y la resistencia a tracción por flexión del muro confinado M1, se transformó la sección de las columnas de concreto en un área equivalente de albañilería. Para ello, el espesor real de la columna (13cm), se multiplicó por $n = 7.68$, manteniendo constante su peralte (20cm). Se obtuvieron las siguientes propiedades de la sección transformada:

- $A = 0.641 \text{ m}^2 = \text{área axial}$
- $A_c = 0.11 \times 2.2 + 2 \times 0.13 \times 0.20 = 0.294 \text{ m}^2 = \text{área de corte}$
- $f = A/A_c = 2.18 = \text{factor de forma}$
- $I = 0.675 \text{ m}^4 = \text{momento de inercia}$

4.2 Rigidez Lateral Inicial (K_0)

Para el cálculo de la rigidez lateral elástica (K_0) de M1, se utilizó la siguiente fórmula, válida para muros que trabajan en voladizo dentro del régimen elástico:

$$K_0 = \frac{E_m}{\frac{h^3}{3I} + \frac{f h E_m}{G_m A}}$$

Donde $h = 2.3 \text{ m} = \text{altura del muro hasta el eje de la solera}$. Se obtuvo: $K_0 = 10.1 \text{ ton/mm}$.

4.3 Fisuración en Tracción por Flexión (F)

La resistencia (F) asociada a la formación de la primera fisura en tracción por flexión en la base de 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:

$$\sigma_t = \frac{My}{I} = \frac{f't}{n} = \frac{2\sqrt{f'_c}}{n}$$

Donde:

- $M = F h$ = momento flector en la base del muro producida por la carga lateral “F”.
- $y = 1.3m$ = distancia desde el centroide de la sección hasta la fibra extrema en tracción.

De esta manera se obtuvo: $F = 7.78$ ton.

4.4 Resistencia al Agrietamiento Diagonal (V_m)

La resistencia al agrietamiento diagonal de la albañilería es: $V_m = 0.5 \alpha v'm t L + 0.23 Pg$, donde $\alpha = 1$ para muros cuadrados y $Pg = 0$ (carga vertical nula en el ensayo). Se obtuvo: $V_m = 13.27$ ton.

4.5 Resistencia a Flexión (V_f)

Despreciándose el peso propio del muro M1, la resistencia (V_f) 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 = $M = V_f h = As f_y D$, obteniéndose $V_f = 19.6$ ton. En esta expresión:

- $As = 4x1.29 = 5.16\text{cm}^2$ (4 $\phi \frac{1}{2}$ ”)
- $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ = esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo
- $D = 0.8 L = 2.08\text{m}$ = peralte efectivo

4.6 Tipo de Falla Esperada

En vista que la resistencia a flexión $V_f = 19.6$ ton resulta mayor que la resistencia a corte $V_m = 13.27$ ton, el tipo de falla esperada es por fuerza cortante en el muro M1, debiendo formarse previamente las fisuras de tracción por flexión en las columnas ($F = 7.78$ 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 ($V_f = 19.6$ ton), ya que las varillas verticales de la malla no se conectaron a la cimentación. En este caso la resistencia a corte ($V_m = 19.3$ ton, acápite 3.1) es parecida a “ V_f ”, por lo que se desconoce qué tipo de falla tendría M2, aparte que ambos refuerzos podrían incursionar en la zona de endurecimiento en la etapa de grandes desplazamientos laterales, incrementándose ambas resistencias.

5. CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS Y REFORZAMIENTO DE M2

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 del tipo soga.
- Las juntas horizontales y verticales fueron de 1.5 cm de grosor.
- La proporción cemento - arena gruesa del mortero de asentado fue 1: 4.
- Los ladrillos fueron regados 10 horas antes del asentado durante 30 minutos.
- La conexión columna - albañilería fue dentada. Se taponó con papel los agujeros de los ladrillos pandereta (Fig.6), dejando 2 cm para el ingreso del concreto de las columnas.
- El recubrimiento del refuerzo para las columnas y soleras fue de 3 cm.
- La resistencia a compresión del concreto de las columnas y vigas soleras fue 175 kg/cm^2 .
- El tiempo de fraguado fue de 28 días.
- Primero se construyó la albañilería en 2 jornadas (Fig.6), después se vació el concreto de las columnas y, finalmente, se vació el concreto de la viga solera. El concreto de los confinamientos fue curado regándolo con agua 1 vez al día, durante la primera semana de edad.



Fig.6. Construcción de M1 y M2, taponado con papel y vibración del concreto.

5.2 Reforzamiento con Malla Electrosoldada del Muro M2

Se trató de simular el caso de una albañilería existente hecha con ladrillos pandereta que se iba a reforzar con la malla, por lo cual, una vez finalizada la construcción de los muros se procedió a instalar la malla en ambas caras de M2, abarcando solo la albañilería (Fig.7). Se perforó con cincel los ladrillos por donde pasan los conectores (alambrés #8), ubicados cada 45 cm, equivalente a tres veces la distancia entre los nudos de la malla. Estos conectores fueron doblados 90° y amarrados a las 2 mallas con alambrés #16. Después se procedió a taponar las perforaciones con una lechada cemento - arena fina en proporción 1:3. Luego, se tarajeó (Fig.8), lanzando una primera capa de mortero (cemento-arena fina 1:4), después se aplicó una segunda capa de mortero enrásándolo con una regla, finalmente, se espolvoreó cemento seco y se dio el acabado final con la plancha.



Fig.7. Reforzamiento de M2, conector de alambre #8 y taponado de perforaciones.

Fig.8
Tarajeo de M2.



6. ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA

El ensayo al que se sometieron los dos muros constó de dos partes. La primera parte, consistió en aplicar cíclicamente un desplazamiento lateral prefijado (D1 en la Tabla 1 y Fig.9), que fue incrementándose gradualmente; el número de ciclos aplicados en cada fase dependió de la estabilidad del lazo histerético V-D1 observada durante el ensayo. En la segunda parte se aplicaron desplazamientos laterales armónicos, con una amplitud de 15mm y una frecuencia de 2 Hz.

6.1 Instrumentación

Se utilizaron 6 LDVT (Fig.9) para registrar desplazamientos. “D1” se usó para controlar el ensayo (Tabla 1), “D2” para registrar el grosor acumulado de las grietas diagonales en la parte central de la albañilería, D3 y D4 para medir posibles separaciones entre la albañilería y las columnas, y D5 con D6 para analizar el comportamiento de los extremos inferiores de las columnas.

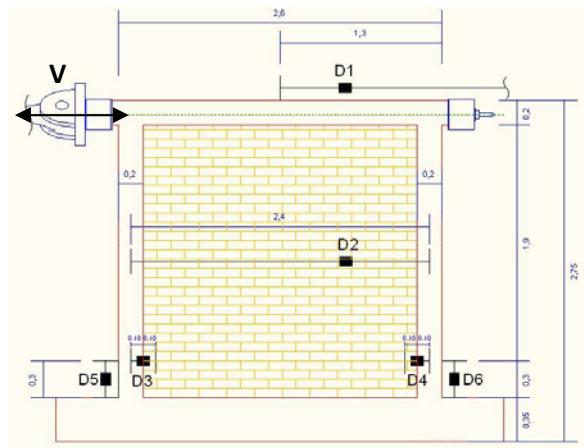


Fig.9. Instrumentación empleada en M1 y M2.

Tabla 1. Fases del ensayo (*). Etapa 1.

Fase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D1 (mm)	0.5	1.5	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
Nº de Ciclos	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3

(*) M1 fue ensayado sólo hasta la Fase 8.

6.2 Comportamiento Cualitativo de los Muros

En la Tabla 2 se indica el comportamiento cualitativo que tuvieron los muros en cada fase del ensayo. En esta tabla “G” es el grosor de la mayor grieta existente en cada muro (en milímetros) y “V” es la fuerza cortante actuante (en toneladas). En la Fig.10 se muestra el estado en que quedaron ambos muros al finalizar la primera etapa del ensayo.

En la segunda parte del ensayo, el deterioro de ambos muros se acentuó (Fig.11), notándose una mayor trituración de los ladrillos en M1, y una mayor trituración de las bases de las columnas en M2. En M1 la falla fue asimétrica y las grietas diagonales nunca llegaron a interceptarse, por lo que la región central de la albañilería quedó en buen estado. En ambos muros la falla final fue por deslizamiento, localizada en la penúltima hilada para M1 y en la base de la albañilería para M2.

Tabla 2. Comportamiento de los muros en la Etapa 1 del ensayo.

FASE	M1 (sin malla)	M2 (con malla)
F1 - D = 0.5 mm	No se presentaron fisuras.	No se presentaron fisuras.
F2 - D = 1.0 mm	Aparecieron fisuras horizontales en la parte inferior e intermedia de las columnas. V = 9.3.	Comportamiento elástico, no se presentaron fisuras.
F3 - D = 2.5 mm	Se presentaron fisuras en las columnas que se extendieron diagonalmente en la albañilería. G = 0.8, V = 11.69	Se presentaron fisuras horizontales de tracción por flexión en las columnas. G = 0.05, V = 12.56.
F4 - D = 5.0 mm	Apareció una grieta diagonal (falla por corte). G = 3, V = 14.8.	Aparecieron fisuras horizontales en la zona baja de las columnas que se extendieron diagonalmente en el muro. G = 0.1, V = 19.8
F5 - D = 7.5 mm	Surgieron otras fisuras diagonales. G = 6, V = 14.27.	Similar a F4, pero con fisuras localizadas en la parte intermedia. G = 0.15, V = 24.37.
F6 - D = 10.0 mm	Trituración de varios ladrillos en la parte superior del muro, en las zonas en contacto con las columnas. G = 9.	Apareció una grieta vertical (h = 40cm) en la parte baja de la conexión muro – columna derecha. G = 5, V = 28.98
F7 - D = 12.5 mm	Aumentaron los daños en los ladrillos superiores. Se formó una grieta horizontal en la penúltima hilada, notándose deslizamiento de la solera en esa zona. G = 11.	La grieta vertical en la columna derecha se extendió hacia arriba (h = 100cm, G = 12), desprendiéndose parte del concreto. Esta grieta también se presentó en la columna izquierda (h = 35cm, G = 7).
F8 - D = 15.0 mm	Se acentuó la trituración de los ladrillos superiores. Por la degradación de resistencia que hubo, se decidió terminar la primera parte del ensayo.	Las grietas verticales en la conexión columna-albañilería se extendieron hasta llegar a más de la mitad de la altura del muro. G = 12, V = 20.96.
F9 - D = 17.5 mm	---	Se notó deslizamiento entre la albañilería y la cimentación (11mm), las columnas no deslizaron, pero empezaron a triturarse sus bases, con más notoriedad en la columna derecha. G = 16.
F10 - D = 20.0 mm	---	El deslizamiento de la albañilería llegó a 15 mm. Las grietas verticales alcanzaron G = 15. El tarajeo empezó a desprenderse en la zona de la base de la columna derecha.



Fig.10. Estado final de M1 y M2. Etapa 1 del ensayo.



Fig.11. Estado final de M1 y M2. Etapa 2 del ensayo (prueba armónica).

6.3 Inspección Pos Ensayo de M2

Luego de culminar el ensayo, se realizó el picado en la conexión albañilería-columna derecha del muro M2, notándose que la grieta vertical se había formado en el recubrimiento del refuerzo vertical interno (Fig.12), con lo cual, al perder adherencia este refuerzo dejó de aportar resistencia a carga lateral, lo que en conjunto con la trituración del concreto en la base de las columnas y el deslizamiento que hubo, produjo la degradación de resistencia a corte en este muro.

Fig.12
Inspección pos
ensayo de M2.



7. PROCESAMIENTO Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

7.1 Lazos Histeréticos y Envolvente V-D1

En la Fig.13 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. En ambos casos existe asimetría, esto se debió a que en M1 la falla por corte no fue simétrica, mientras que en M2 existió una cangrejera en una de las columnas (Fig.15), aparte que las grietas verticales que se formaron en las uniones columna-albañilería tuvieron distintas longitudes. Por otro lado, en M2 se nota a partir de $D_1 = 12.5\text{mm}$ grandes desplazamientos laterales remanentes a carga nula, producto del deslizamiento de la albañilería sobre la cimentación. Adicionalmente, para $D_1 = -10\text{mm}$, en M1 se observa una fuerte degradación de resistencia, causada por la trituración de los ladrillos superiores, que originó una pérdida de área de corte causando el deslizamiento en la penúltima hilada, mientras que en M2 la degradación de resistencia es gradual.

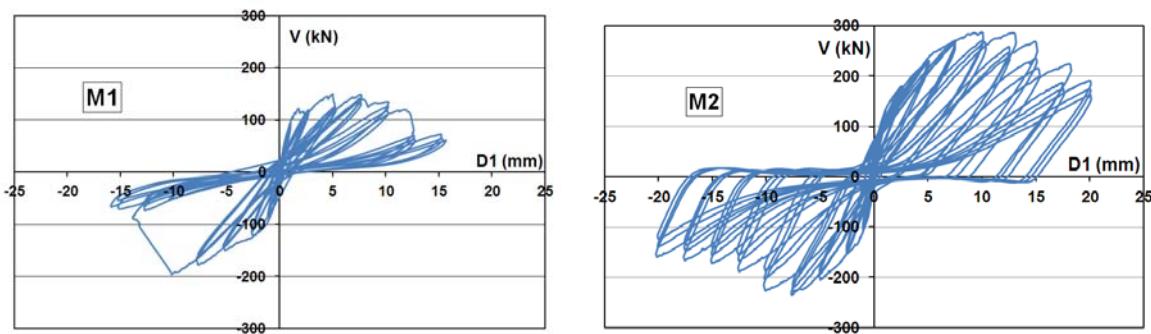


Fig.13. Lazos histréticos V-D1 en M1 y M2.

En la Fig.14 aparece la envolvente de los lazos histeréticos V-D1 correspondientes al primer ciclo de cada fase. Puesto que los muros presentaron distintos espesores (figuras 4 y 5), también se trazó la envolvente de esfuerzo cortante ($v = V / t L$) versus la deriva ($D1 / h$, donde $h = 2300\text{mm}$), allí además se indica la deriva máxima permitida por la Norma E.070 [1]: 0.005, asociada a $D1 = \pm 11.5\text{mm}$.

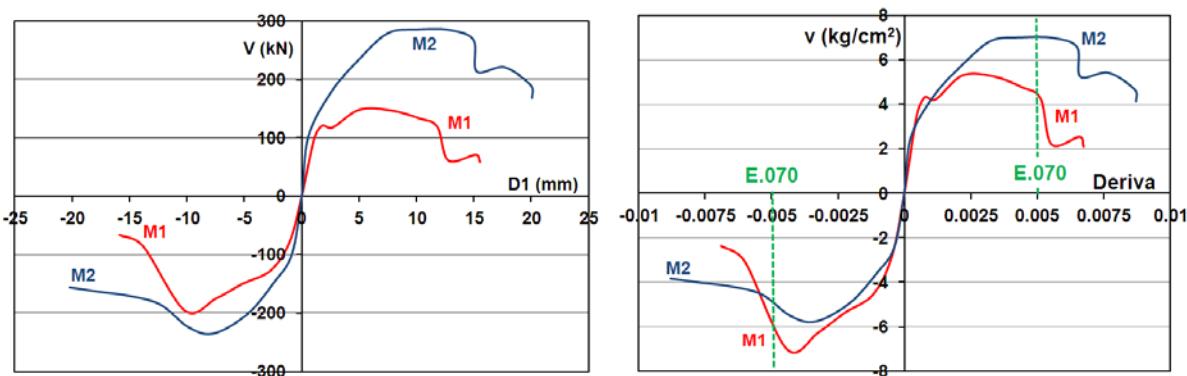


Fig.14. Envolventes V-D1 (izquierda) y esfuerzo cortante-deriva (derecha).

Puesto que la trituración de los ladrillos de los ladrillos superiores de M1 se hizo notoria desde la fase 6 del ensayo (deriva = 0.0043), asociada a una deriva menor que la reglamentaria, generando fuerte degradación de resistencia, no se puede permitir el uso del ladrillo pandereta en la construcción de muros portantes. Además, las condiciones del ensayo eran ideales: sin carga vertical, poco momento flector y solicitación aplicada lentamente, por lo que se presume que en condiciones reales la trituración de los ladrillos pandereta debería iniciarse con derivas menores que la indicada. Cabe remarcar que en la prueba armónica la trituración de los ladrillos pandereta se intensificó.

Para el caso del muro M2, si bien es cierto que la degradación de resistencia también se inició para una deriva menor que la reglamentaria (fase 6), el problema podría solucionarse controlando la grieta vertical en la conexión columna-albañilería, mediante la prolongación del refuerzo horizontal de la malla, o añadiendo chicotes.

7.2 Rigidez Lateral Inicial (K)

Para obtener el valor de la rigidez inicial (K) se utilizaron los valores V-D1 asociados al primer ciclo de la Fase 1, donde ambos muros tuvieron un comportamiento elástico.

El valor teórico de la rigidez de M1 fue 10.1 ton/mm (acápite 4.2), fue 8% menor que la rigidez experimental: 11.02 ton/mm; mientras que M2 presentó una rigidez real (15.54 ton/mm) 41% mayor que la de M1, debido al incremento de 45% en el espesor dado por el tarajeo.

Por otro lado, conociéndose la rigidez real de M1 y asumiéndose que el módulo de corte era $G_m = 0.4 E_m$, se calculó en forma indirecta el módulo de elasticidad real de la albañilería. El resultado fue $E_m = 28850 \text{ kg/cm}^2$, mayor en 11% en relación al obtenido en las pilas: $E_m = 25837 \text{ kg/cm}^2$.

7.3 Tracción por Flexión

Las primeras fisuras de tracción por flexión aparecieron en la base de las columnas de M1 en la Fase 2 del ensayo, para una fuerza de 9.54 ton, mayor en 23% que el valor teórico (7.78 ton, acápite 4.3); mientras que para M2 la fuerza asociada a esta falla (Fase 3) fue 10.8 ton, resultado que es cercano a M1, ya que las columnas de ambos muros no cambiaron de espesor.

7.5 Agrietamiento Diagonal

La falla por corte se manifestó en M1 en la Fase 4 para una fuerza de 14.8 ton, 12% mayor que la resistencia teórica al agrietamiento diagonal (13.27 ton, acápite 4.4); mientras que en M2 se formaron fisuras diagonales del orden de 0.5mm para una fuerza de 19.78 ton (Fase 4), 34% mayor que la de M1 y 2% mayor que el valor teórico calculado en el acápite 3.1 ($V_m = 19.3 \text{ ton}$).

7.6 Resistencia Máxima

En cuanto a la resistencia máxima no se puede llegar a ninguna conclusión, debido a que las cargas máximas en las ramas positivas y negativas de la envolvente V-D1 fueron muy distintas, tanto para el muro M1 como para M2, debido a la asimetría en la forma de falla en M1 y a las cangrejeras presentes en una de las columnas de M2 (Fig.15).

Fig.15

Cangrejera y resane en una de las columnas de M2.



8. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se vierten a continuación se encuentran limitadas por la poca cantidad de muros ensayados, además en el muro M2 (con malla) se presentó cangrejeras en una de sus columnas, que influyó en el comportamiento sísmico de este muro. Sin embargo, de obviarse este defecto en la construcción, podría decirse que la malla electrosoldada recubierta con mortero cumplió con el objetivo de evitar la trituración de los ladrillos pandereta, por lo que constituye una medida preventiva que podría aplicarse en aquellas viviendas informales, cuyos muros portantes han sido construidos con ladrillos tubulares. Además, el proyecto dejó una serie de resultados experimentales que servirán como base en la aplicación de este tipo de reforzamiento en futuras investigaciones.

1. Según los ensayos clasificatorios de la Norma E.070 [1], los ladrillos pandereta utilizados calificaron como Clase I (la más baja calificación).

2. El taponado con papel de aquellos ladrillos ubicados en la interfase con las columnas, evitó que la lechada de cemento del concreto se filtre al interior de los huecos del ladrillo, lo cual hubiese debilitado a las columnas.
3. La resistencia a compresión axial de la albañilería ($f'm = 24 \text{ kg/cm}^2$) resultó muy baja y las pilas tuvieron un comportamiento sumamente frágil, razones por las cuales debería descartarse el uso del ladrillo pandereta en la construcción de muros portantes. Sin embargo, la resistencia a corte puro ($v'm = 9.28 \text{ kg/cm}^2$) resultó elevada, lo cual podría deberse a que el mortero de las juntas verticales penetró al interior de los huecos del ladrillo formando llaves de corte que incrementaron la resistencia a fuerza cortante en los muretes.
4. La expresión $Em = 500 f'm$ dada por la Norma E.070 [1] para determinar el módulo de elasticidad, no es aplicable para el caso de los ladrillos pandereta. Sin embargo, la instrumentación colocada en las pilas permitió obtener $Em = 25800 \text{ kg/cm}^2$, valor que fue corroborado indirectamente al evaluar la rigidez lateral experimental del muro M1 (sin malla), asumiéndose el módulo de corte $Gm = 0.4 Em$ indicado en la Norma E.070.
5. En el ensayo de M1 (sin malla) se presentó la falla por corte en la fase 4 ($D = 5\text{mm}$). Durante la fase 6 ($D = 10\text{mm}$), asociada a una deriva menor que la máxima permitida por la Norma sísmica E.030 (0.005, $D = 11.5\text{mm}$), se generó la trituración de los ladrillos ubicados en las hiladas superiores y al perderse parte del área de corte, se produjo deslizamiento en la penúltima hilada, todo esto condujo a una drástica reducción de la resistencia a fuerza cortante. Cabe además mencionar que la falla por corte de este muro fue asimétrica, sin que se lleguen a encontrar las grietas diagonales en la parte central del muro, lo que hubiese producido una trituración mayor de estos ladrillos.
6. En el ensayo armónico de M1 se acentuó la trituración del ladrillo pandereta en la zona superior en contacto con las columnas. Esta trituración podría ser mayor en condiciones reales, donde la carga vertical y los momentos flectores son importantes en los edificios.
7. Para predecir los valores teóricos de M1, se siguieron las especificaciones de la Norma E.070, salvo la utilización del ladrillo pandereta. Comparando los resultados experimentales con los teóricos, se halló que la rigidez lateral, la carga de fisuración en tracción por flexión y la carga de agrietamiento diagonal, tuvieron poca diferencia: 8%, 23% y 12%, respectivamente.
8. La malla electrosoldada recubierta de mortero adicionada en M2, modificó el tipo de falla, de una falla por corte en M1 a una falla por flexión en M2, derivada en la separación entre la albañilería y las columnas y en el deslizamiento de la albañilería sobre la cimentación. Esto se debió al incremento en el espesor del muro (de 11cm a 16cm), que causó un aumento de la resistencia a fuerza cortante, y a que las mallas controlaron la trituración de los ladrillos al cerrar las grietas diagonales. De este modo, la rigidez lateral, la carga de fisuración en tracción por flexión, la carga de agrietamiento diagonal y la resistencia máxima en M2 fueron 41%, 13%, 34% y 42%, respectivamente, mayores que los valores obtenidos para el muro M1.
9. En el ensayo de M2 la grieta vertical en la unión albañilería-columna empezó a formarse en la base del muro desde la fase 6 del ensayo ($D = 10\text{mm}$) y paulatinamente fue extendiéndose hacia arriba conforme se incrementaban los desplazamientos laterales. Esta grieta se ubicó en el recubrimiento del refuerzo vertical interno de ambas columnas, causando la pérdida de adherencia del refuerzo mencionado, lo cual motivó la continua degradación de resistencia a fuerza cortante en este muro. Posterior a la formación de la grieta vertical, sobrevino el deslizamiento de la albañilería sobre la cimentación, sin que deslicen las columnas. Sin embargo, estos problemas no descartan el empleo de la malla electrosoldada como técnica

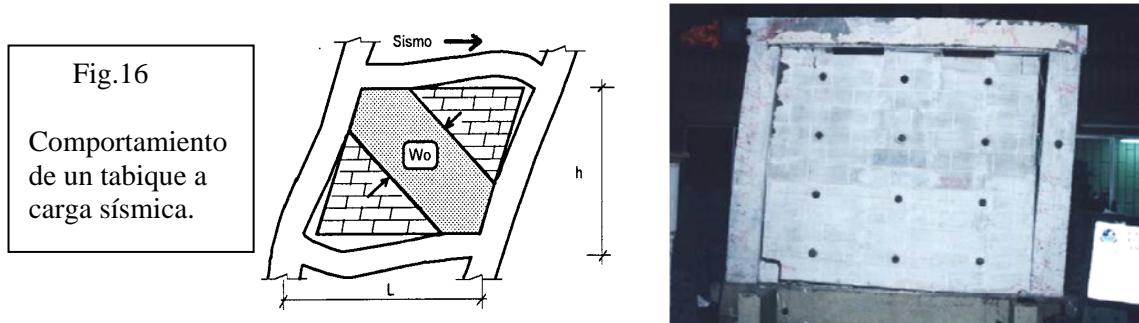
para controlar la trituración del ladrillo pandereta, en vista que pueden solucionarse prolongando la malla o añadiendo chicotes horizontales.

En otras palabras, la reducción del área del muro M1 causada por la trituración de los ladrillos pandereta, comprometería su capacidad portante a carga vertical, mientras que el reforzamiento sugerido (M2), mantendría intacta la resistencia a compresión.

9. Línea Futura de Investigación

Los resultados hallados en esta investigación han sido satisfactorios pero al mismo tiempo han despertado la curiosidad por esclarecer nuevos escenarios en base a las condiciones de reforzamiento que quedarían como temas de futuros proyectos:

1. Realizar ensayos en muretes taponando los ladrillos tubulares (pandereta) para evitar que ingrese el mortero de las juntas verticales, para verificar si fue el motivo por el cual el valor de la resistencia a corte puro ($v'm$) resultó elevado.
2. Realizar ensayos en los prismas de albañilería (pilas y muretes) adicionando la malla electrosoldada recubierta con mortero 1:4, para hallar los valores de las resistencias a compresión ($f'm$) y corte puro ($v'm$), lo que permitiría conocer las propiedades experimentales de la albañilería reforzada.
3. En vista que en M2 se produjeron grietas verticales en las columnas, se propone extender el refuerzo horizontal de la malla electrosoldada soldándolo con las varillas verticales de la columna, o extender la malla de tal manera de cubrir totalmente la columna. De esta manera se evitaría que el muro portante intente comportarse en forma similar a un tabique que trata de separarse de las columnas de confinamiento (Fig.16).



REFERENCIAS

1. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma Técnica E.070 "Albañilería".
2. San Bartolomé, A., Barr, K. y Pineda, C., 2011. Control de la trituración de los ladrillos huecos mediante malla electrodoblada en muros de albañilería confinada. Blog de investigaciones en albañilería <http://blog.pucp.edu.pe/albanileria>
3. San Bartolomé, Á., Quiun, D. y Silva, W., 2011. Diseño y construcción de estructuras sismorresistentes de albañilería. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.