

REPARACIÓN DE UN MURO DE ALBAÑILERÍA CONFINADA

Por: Angel San Bartolomé y Arturo Castro Morán
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

RESUMEN

Con el propósito de analizar la efectividad de una técnica de reparación, consistente en encamisar con mallas electrosoldadas a un muro de albañilería confinada que previamente había fallado por fuerza cortante, se desarrolló un proyecto de investigación en el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú con resultados satisfactorios.

1. INTRODUCCIÓN

La investigación estuvo orientada al desarrollo de una técnica de reparación aplicada en un muro de albañilería confinada que previamente había fallado por fuerza cortante. Dicha técnica consistió en encamisar a la albañilería con mallas electrosoldadas, interconectadas entre sí, para luego tarrajearlas con mortero en proporción volumétrica cemento-arena fina 1:4.

Durante el desarrollo de la investigación se realizaron ensayos de clasificación de los ladrillos, ensayos de compresión del mortero y del concreto empleado en la construcción del muro confinado, así como ensayos de tracción de la malla electrosoldada. Adicionalmente, se construyeron y ensayaron 4 pilas y 4 muretes de albañilería simple, con la finalidad de obtener su resistencia característica a compresión axial y a compresión diagonal.

La dimensiones del muro de albañilería confinada original (Fig.2) fueron: 2.6 m de longitud por 2.4 m de altura y un espesor de 13 cm. Este muro fue ensayado a carga lateral cíclica con desplazamiento horizontal controlado, obteniéndose una falla por corte. Luego se procedió a reparar al muro encamisando la albañilería con 2 mallas electrosoldadas (una en cada cara), para después, con fines comparativos, aplicarle la sollicitación a que estuvo sujeto el muro original.

2. MATERIALES

2.1 Unidad de Albañilería

La unidad de albañilería utilizada fue ladrillo de arcilla King Kong de fabricación industrial, con dimensiones nominales de 23x13x9 cm y perforaciones perpendiculares a la cara de asiento. Se ensayaron 10 ladrillos, obteniéndose los siguientes resultados:

- Variación dimensional: largo = 0.51 %, ancho = 0.84 %, altura = 0.82 %
- Alabeo: 0.8 mm
- Resistencia a compresión (f'_{b}): 155 kg/cm² sobre área bruta
- Porcentaje de perforaciones: 45 % del área bruta
- Succión: 27 gr / (200 cm² – min)

De acuerdo a la Ref.3, el ladrillo clasificó como tipo IV, pero no era apto para ser empleado en la construcción de muros portantes, ya que las perforaciones ocupaban más del 30% del área bruta, a pesar de ello, se utilizó esa unidad en vista que es de uso común en Lima. Además, la succión

resultó mayor que el límite máximo especificado en la Ref.3 (20 gr/ (200 cm² – min)), por lo que fue necesario regar las unidades durante media hora 12 horas antes de asentarlas.

2.2 Mortero y Concreto

El mortero utilizado en las juntas de la albañilería tuvo una proporción volumétrica cemento - arena gruesa 1:4. Los ensayos de compresión hechos en probetas cúbicas de mortero con 5 cm de lado y 28 días de edad, proporcionaron una resistencia promedio de 255 kg/cm².

El concreto utilizado para los elementos de confinamiento del muro tuvo una resistencia promedio a compresión $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$, en 7 probetas estándar ensayadas a los 28 días de edad.

2.3 Acero de Refuerzo

Las varillas de acero corrugado, utilizadas en los confinamientos, fueron de grado 60.

2.4 Malla Electrosoldada

La malla electrosoldada empleada en la etapa de reparación del muro confinado, estuvo compuesta por varillas de acero corrugado de 4.5 mm de diámetro, espaciadas a 15 cm; esta malla se comercializa en planchas de 2.4 x 5.0 metros. El ensayo de tracción hecho en tres muestras extraídas de la malla proporcionó una resistencia promedio última de 6114 kg/cm².

3. PROPIEDADES DE LA ALBAÑILERÍA SIMPLE

Con el fin de determinar las propiedades de la albañilería, se realizaron ensayos de compresión axial en 4 pilas (Fig.1) de 60 cm de altura y 13 cm de espesor, y de compresión diagonal en 4 muretes cuadrados de 60 x 60 cm con 13 cm de espesor. De estos ensayos se obtuvo una resistencia característica a compresión axial $f'm = 86 \text{ kg/cm}^2$ y a compresión diagonal $v'm = 17 \text{ kg/cm}^2$. La falla de estos especímenes fue frágil, triturándose los ladrillos (Fig.1).



Fig.1. Pila.

4. MURO DE ALBAÑILERÍA CONFINADA ORIGINAL

El muro confinado tuvo las características mostradas en la Fig.2. El aparejo utilizado fue de soga y la conexión columna - albañilería fue dentada. No se utilizó refuerzo horizontal.

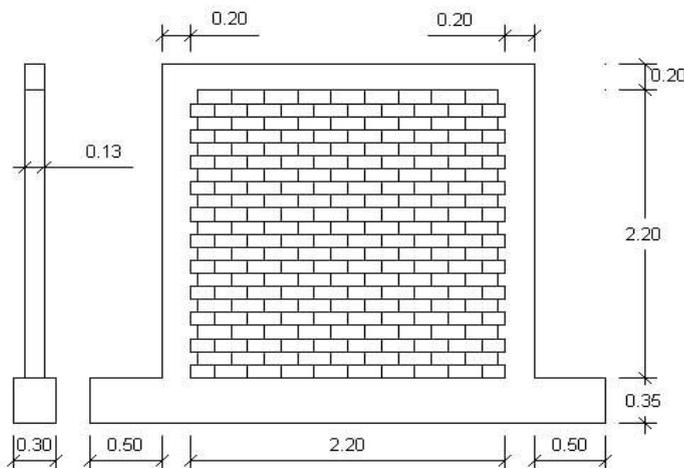


Fig.2. Características geométricas del muro de albañilería confinada. Dimensiones en metros.

Otras características del muro fueron las siguientes:

- Columnas de 13x20 cm, reforzadas con 4 ϕ 1/2" y estribos de 1/4" 1 @ 5, 4 @ 10, r @ 20 cm.
- Solera de 13x20 cm, reforzada con 4 ϕ 3/8" y estribos de 1/4", 1 @ 5, 4 @ 10, r @ 20 cm.
- Espesor de las juntas de mortero 1:4 igual a 1 cm.

5. ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA DEL MURO ORIGINAL

El muro se ensayó a carga lateral cíclica controlándose el desplazamiento horizontal (D_0 en la Fig.3) en 7 fases (Tabla 1) mediante un actuador dinámico, hasta alcanzar un desplazamiento de 12.5 mm, equivalente al límite de reparación especificado por la Ref.1 ($h/200 = 2400/200 = 12$ mm). La instrumentación utilizada permitió medir además:

- La deformación angular y el módulo de corte G, con los LVDT D1 y D2.
- El tamaño de las grietas acumuladas en la región central del muro, con el LVDT D3.

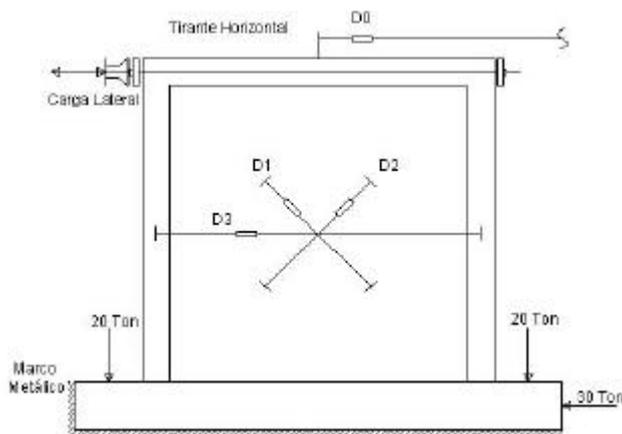


Fig.3. Instrumentación.

Tabla 1. Fases del Ensayo de Carga Lateral Cíclica. Velocidad: 1 ciclo en 4 minutos.

Fase	1	2	3	4	5	6	7
D_0 (mm)	0.5	1.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5
Ciclos	1	1	2	2	2	2	2

5.1 Descripción de las Fallas Observadas

En la fase 2 se presentaron fisuras por flexión en los bordes libres de las columnas. Luego, en la fase 4 ocurrió la falla por corte, manifestada por una grieta diagonal (Fig.4). En la fase 6 algunos ladrillos se trituraron, y en la fase 7 uno de los nudos (unión solera-columna) se agrietó.



Fig.4. Falla por corte (izq.) y trituración de algunos ladrillos (der.).



6. TÉCNICA DE REPARACIÓN

Luego de ensayar al muro original, se le reparó reforzándolo por corte de la siguiente manera:

- Se procedió al picado de las fisuras gruesas en la albañilería, para luego limpiarlas, humedecerlas y rellenarlas con mortero 1:3 (Fig.5). Las fisuras finas no fueron resanadas.
- Los ladrillos triturados fueron reemplazados por concreto simple.
- En uno de los nudos dañados (Fig.5), el concreto fue sustituido por otro de similar característica, empleándose resina epóxica en la unión de ambos materiales con distintas edades. Las fisuras finas existentes en las columnas no se resanaron.



Fig. 5. Picado y resane con mortero en las grietas gruesas (izq.) y picado de uno de los nudos con el retiro de los ladrillos triturados (der.).



- Luego se procedió a pañetear al muro (Fig.6) con un mortero cemento-arena gruesa 1:4.
- Para interconectar las mallas electrosoldadas, se realizaron perforaciones en la albañilería con un cincel de 1/4" cada 45 cm (tres veces la distancia entre los nudos de la malla con cocada de 15 cm). Enseguida estas perforaciones fueron limpiadas con aire comprimido.



Fig.6. Pañeteo del muro (izq.) y perforaciones con cincel (der.).



- Se colocaron las mallas, para luego introducir los conectores (alambre # 8) a través de las perforaciones, atortolándolos contra los nudos de la malla mediante alambre #16 (Fig.7).
- Luego se taponaron las perforaciones con una lechada de mortero que tenía una relación cemento-arena fina 1:3. Para esta operación se usó una botella de plástico como inyector.



Fig.7. Atortolado de la malla con los conectores (izq.) y taponado de las perforaciones con lechada de mortero 1:3 con un inyector (der.).



- Finalmente, se tarrajeó el muro con un mortero que tenía una relación cemento-arena fina 1:4. El espesor final del muro fue 18 cm (incluyendo el pañeteo, las mallas y el tarrajeo).

7. ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA DEL MURO REPARADO

El ensayo de carga lateral se llevó a cabo bajo las mismas condiciones con que se ensayó el muro original (Fig.3), con la diferencia que se aplicaron dos fases adicionales a las indicadas en la Tabla 1 (fase 8: $D_o = 15$ mm y fase 9: $D_o = 17.5$ mm, con 3 ciclos cada una), ya que se pretendió llevar al muro a condiciones extremas. Después de aplicar las 9 fases, el muro reparado fue sometido a un movimiento armónico con una frecuencia de 1 Hz y un desplazamiento máximo de 10 mm (fase 10), cuya intención fue observar el tipo de falla predominante.

7.1 Descripción de las Fallas Observadas en el Muro Reparado

En la fase 2 se originaron fisuras por flexión en los borde libres de las columnas. Luego, en la fase 3 aparecieron fisuras diagonales por corte muy finas, debido a que la malla electrosoldada no permitió su abertura. Como las grietas por corte estaban controladas, el muro empezó a mostrar un patrón de fallas por flexión (Fig.8). En la fase 5 se presentaron las primeras fisuras en la base de las columnas. En la fase 7 empezó a producirse una falla por deslizamiento en la base del muro, asimismo, se formó una fisura vertical en la parte inferior de la unión albañilería-columna, esto se debió a que la malla no fue conectada a la columna; esta fisura se presentó para una distorsión angular similar al límite máximo impuesto por la Ref.1 (1/200). En la fase 9 empezó a desprenderse el tarrajeo ubicado en la parte inferior de la conexión dentada entre la albañilería y la columna; en esta fase el deslizamiento del muro fue del orden de 1cm.

Durante el movimiento armónico (fase 10) las grietas diagonales permanecieron finas, notándose el deterioro en las bases de las columnas (Fig.9), así como también el deslizamiento del muro sobre la cimentación. Por lo tanto, se concluye que la falla por flexión del muro reparado degeneró en un marcado deslizamiento a través de su base.



Fig.8. Muro reparado después de la fase 9 (izq.) y grieta vertical en la unión columna-albañilería (der.).



Fig.9. Observaciones post-ensayo del muro reparado (para una mejor visualización se removió una parte del tarrajeo). Deslizamiento en la base (izq.) y pandeo del refuerzo vertical (der.).



8. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL MURO ORIGINAL Y EL REPARADO

8.1 Rigidez Lateral

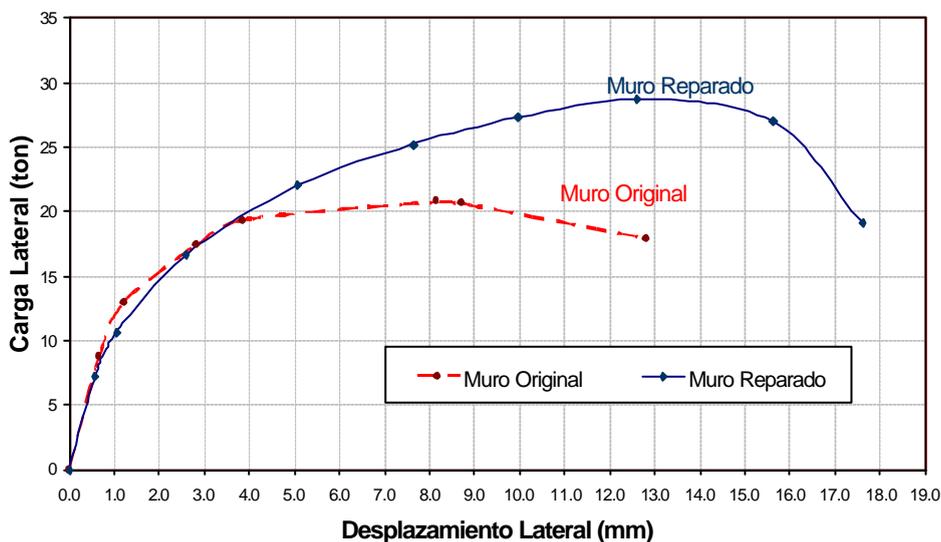
La rigidez lateral (K) inicial y final del muro original y del reparado fueron:

Espécimen	K inicial (ton/mm)	K final (ton/mm)
Muro Original	13.80	1.40 (fase 7)
Muro Reparado	11.70	1.10 (fase 9)

La rigidez lateral elástica del muro reparado alcanzó el 85% de la rigidez lateral elástica del muro original, la recuperación no fue completa debido a que las fisuras finas existentes en la albañilería y en las columnas del muro original no fueron resanadas; sin embargo, la rigidez lateral inicial del muro reparado se incrementó notablemente (8 veces) con relación a la rigidez que tuvo el muro original al final de su ensayo.

8.2 Resistencia

En la Fig.10 se muestra las envolventes de carga lateral máxima del muro original y del muro reparado, allí se puede observar el incremento de resistencia (40%) del muro reparado con relación al original. Por otro lado, mientras que la resistencia del muro original empezó a degradar a partir de un desplazamiento de 9 mm (menor al límite de reparación $2400/200 = 12$ mm), por la trituración de los ladrillos huecos, el muro reparado lo hizo a partir de 14 mm debido a la falla por deslizamiento. Esto demuestra la eficacia de la técnica de reforzamiento aplicada, ya que incluso sería posible reforzar muros que se hayan construido con ladrillos huecos, en vista que la malla al cerrar las fisuras del muro, evitó la trituración de los ladrillos huecos.



*Fig.10
Envolvente de
carga lateral
máxima.*

La resistencia al primer agrietamiento diagonal del muro reparado (14.5 ton en la fase 3) fue el 78% de la resistencia original (18.7 ton en la fase 4); sin embargo, debe tenerse en cuenta que el muro reparado presentó un patrón de fisuras diagonales finas, mientras que en el muro original las grietas fueron hasta de 1 cm de ancho, esto se puede apreciar en la Fig.11.

Adicionalmente, el muro reparado soportó una carga lateral máxima de 29.12 ton (en la fase 7), mientras que el muro original tuvo una resistencia máxima de 20.76 ton (en la fase 5), lo que quiere decir que se logró un incremento sustancial (40 %) en la capacidad de carga lateral.

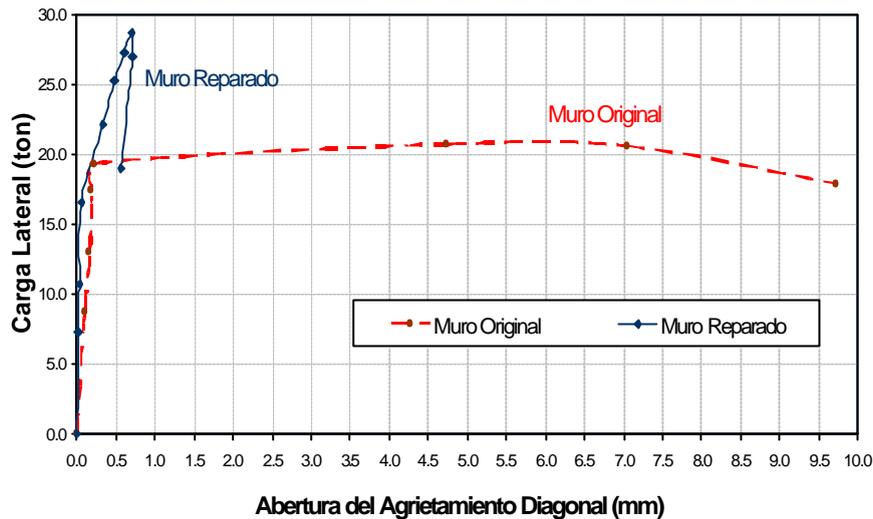


Fig. 11
Carga lateral vs.
abertura de la grieta
diagonal.

8.3 Tipo de Falla

La falla del muro original fue por corte, mientras que el muro reparado falló por flexión, degenerando finalmente en deslizamiento con el pandeo del refuerzo vertical en las bases de las columnas, pero ello ocurrió para un desplazamiento de 15 mm, mayor que el límite de reparabilidad especificados por las Refs. 1 y 3.

8.4 Módulo de Corte

El valor del módulo de corte del muro reparado ($G = 24000 \text{ kg/cm}^2$) fue 33% mayor que el módulo de corte del muro original ($G = 18000 \text{ kg/cm}^2$), mientras que lo contrario ocurrió con la rigidez lateral (ver 8.1), esta incongruencia se debe a que el tarrajeo disminuyó la deformación por corte en el muro reparado, en tanto que la rigidez lateral depende además de la deformación por flexión (las fisuras finas por flexión existentes en las columnas no fueron resanadas).

9. CONCLUSIONES

9.1 Muro Original

- En este proyecto se utilizaron ladrillos que calificaron como huecos. Estas unidades empezaron a triturarse, disminuyendo la resistencia a fuerza cortante, para distorsiones angulares menores que $1/200$ (límite máximo especificado por la Ref.1). Esta trituración pudo haberse producido en mayor grado de haberse aplicado carga vertical en el muro, o por flexo compresión en muros de varios pisos, por lo que el uso de esos ladrillos debe descartarse en la construcción de los muros portantes confinados (Refs. 2 y 3).

9.2 Muro Reparado

- La técnica de reparación resultó sencilla de aplicar. Se pudo observar que no se requería de taladro para perforar los ladrillos (bastó con el uso de cincel), ni de soldadura para unir los conectores con las mallas (bastó atortolarlos con alambre # 16).
- La técnica de reparación empleada hizo que la rigidez lateral inicial se recupere en 85% respecto a la del muro original, por lo que se requiere la adición mínima de otros elementos estructurales en un supuesto edificio a reparar (por ejemplo, placas de concreto armado) en

caso se necesite recuperar o incrementar su rigidez. Puesto que la rigidez del muro reparado no pudo evaluarse teóricamente, porque las fisuras muy finas existentes en gran cantidad en la albañilería y en las columnas permanecieron, se recomienda trabajar para fines de análisis estructural del edificio a reparar con el 85% de la rigidez original.

- El módulo de corte del muro reparado fue 33% mayor que el del muro original, sin embargo, la rigidez lateral del muro reparado fue 15% menor que la del muro original. Esta incongruencia podría explicarse porque la rigidez lateral depende no solo de la deformación por corte, sino también de la deformación por flexión, y en la reparación no se contempló el resane de las fisuras finas existentes en las columnas ni la mejora de la resistencia a flexión.
- La técnica de reparación empleada proporcionó al muro un mejor comportamiento sísmico, ya que las grietas diagonales del muro original se transformaron en fisuras finas y la resistencia a carga lateral se incrementó sustancialmente (40%). Asimismo, la falla en el muro reparado fue por flexión, que finalmente derivó en deslizamiento y pandeo del refuerzo vertical para distorsiones mayores que 1/200. Puesto que las fallas que se puedan generar por encima de la distorsión máxima reglamentaria (1/200) son irrelevantes, se concluye que la técnica de reparación aplicada en este proyecto es adecuada.

9.3 Línea Futura de Investigación

En lo relacionado con el presente trabajo se recomienda para futuras investigaciones:

- a) Encamisar todo el muro con la malla, buscando la forma de pasar conectores a través de las columnas para amarrar las mallas, de este modo se podrá evitar la falla vertical en el encuentro albañilería-columna. Otra solución sería remover el recubrimiento de la columna para que una malla en forma de U la cubra, soldándola con el refuerzo existente en la columna y también contra la malla colocada en la albañilería, para luego tarrajear.
- b) Conectar la malla con la cimentación, a través de espigas ancladas en la cimentación y soldadas con la malla, para así evitar o atenuar la falla por deslizamiento.
- c) Construir dos muros de albañilería confinada, reforzando uno de ellos con la malla electrosoldada, para analizar los efectos que tendría el uso de esta técnica en un muro sin daños. Esto permitiría realizar reforzamientos preventivos en caso que una edificación carezca de una densidad adecuada de muros, ó que se hayan utilizado ladrillos huecos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Reglamento Nacional de Construcciones NTE E-030 Diseño Sismorresistente, SENCICO. Lima. 1997.
2. San Bartolomé, Angel. Construcciones de Albañilería, Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural. Pontificia Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial, 1998.
3. San Bartolomé, Angel. Proyecto de Normas Técnicas de Edificación E-070 “Albañilería”. Documento actualmente en revisión por el Comité Técnico de la Norma E-070-SENCICO.