

REPARACIÓN Y REFORZAMIENTO DE UN MURO DE ALBAÑILERÍA CONFINADA MEDIANTE FIBRA DE CARBONO

Por: Ángel San Bartolomé y Cristhian Coronel
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

RESUMEN

Con el propósito de analizar la efectividad de una técnica de reparación y reforzamiento, consistente en resanar y adicionar exteriormente fibras de carbono (Mbrace CF130) a un muro de albañilería confinada, que previamente había fallado por fuerza cortante en un experimento de carga lateral cíclica, se desarrolló este proyecto en el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú, obteniéndose resultados relativamente satisfactorios después de someter al muro rehabilitado a la misma técnica de ensayo.

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras compuestas por muros de albañilería confinada tienen la tendencia de fallar por fuerza cortante cuando son sometidas a sismos severos. Eventos recientes ocurridos en el Perú, como el terremoto del 2007 en Pisco [4], confirman este hecho. Por lo tanto, se pone de manifiesto la necesidad de reparar y reforzar de alguna manera este tipo de estructuras.

En proyectos anteriores de rehabilitación de muros confinados [5], se utilizaron como refuerzo el encamisado con mallas electrosoldadas y las varillas de fibra de vidrio. En este proyecto, se plantea el reforzamiento exterior con fibras de carbono, para obtener una técnica adicional que permita ampliar las alternativas de reparación y reforzamiento. Para ello se utilizó un muro confinado que en un ensayo de carga lateral cíclica anterior [1] falló por fuerza cortante.

2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES ORIGINALES

El mortero utilizado en el muro original [1] tuvo una proporción cemento-arena gruesa 1:4 y las juntas tuvieron un espesor nominal de 1cm. Los resultados de los ensayos de los materiales empleados en muro original, de acuerdo a la Norma E.070 [2], fueron:

Ladrillos industriales de arcilla. La unidad de albañilería fue clase IV, con dimensiones 24x13x9cm y 18 perforaciones perpendiculares a la superficie de asiento, que ocuparon el 30% del área bruta, razón por cual calificó como "sólida". La resistencia característica a compresión fue $f'b = 152 \text{ kg/cm}^2$ y la succión resultó $44 \text{ gr/200 cm}^2\text{-min}$, por lo que las unidades fueron regadas durante 30 minutos unas 10 horas antes de asentarlas, para disminuir la succión.

Pilas. El ensayo de compresión axial sobre 4 pilas de albañilería, de altura nominal 60cm (6 hiladas), proporcionó una resistencia característica a la compresión: $f'm = 88 \text{ kg/cm}^2$.

Muretes. El ensayo de compresión diagonal sobre 4 muretes de albañilería, con dimensiones nominales de 60x60 cm, arrojó una resistencia característica a corte puro: $v'm = 9.38 \text{ kg/cm}^2$.

Concreto. El concreto de las columnas tuvo una resistencia a la compresión ($f'c$) igual a 188 kg/cm^2 .

3. CARACTERÍSTICAS DEL MURO ORIGINAL

El muro original [1] fue construido en aparejo de soga, con una conexión albañilería-columna a ras, pero con la adición de mechas de 6mm de diámetro cada 2 hiladas, embutidas 40cm en la albañilería y 15cm en la columna más un gancho vertical a 90° de 10cm (Fig.1). La viga solera fue reforzada con $4 \phi 3/8"$ y $\square 6\text{mm}$: $1 @ 5$, $4 @ 10$, $r @ 20\text{cm}$. Las columnas tuvieron un peralte de 20cm y el refuerzo utilizado fue: $4 \phi 1/2"$ con $\square 6\text{mm}$: $1 @ 5$, $4 @ 10$, $r @ 20\text{cm}$.

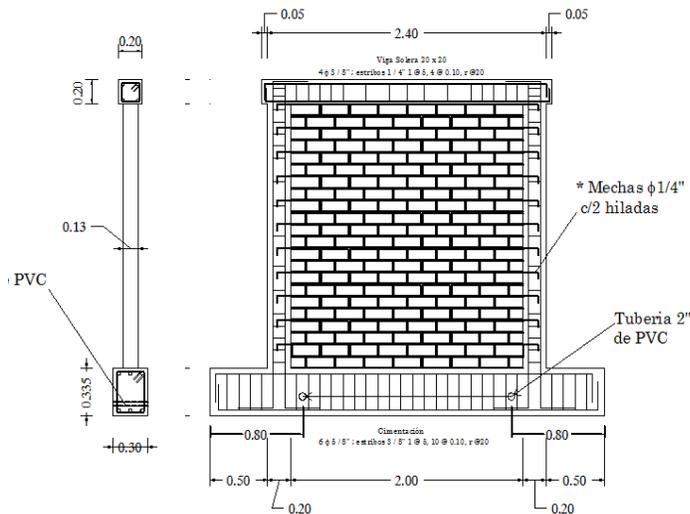


Fig.1. Características y construcción del muro original [1].

4. ENSAYO DEL MURO ORIGINAL

4.1 Instrumentación y Fases del Ensayo

El ensayo realizado fue de carga lateral cíclica ("V") con desplazamiento horizontal ("D1" en la Fig.2) controlado. Se emplearon un total de 13 LVDT que permitieron obtener desplazamientos absolutos y relativos. El ensayo constó de 8 fases (Tabla 1), con una deriva de hasta 0.006 para que el muro quede en un estado reparable. En cada fase se aplicó un determinado número de ciclos hasta que se establecen los lazos histeréticos V-D1. Es necesario indicar que la Fase 7 del experimento presenta la deriva máxima (0.005) permitida por la Norma Sísmica E.030 [3], para la albañilería confinada.

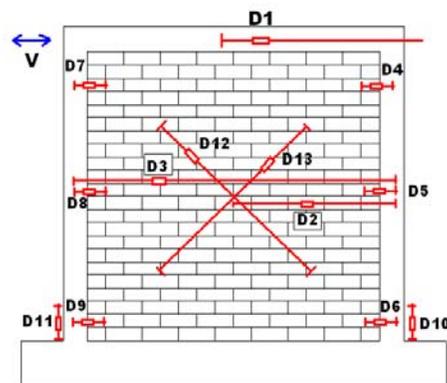


Fig.2. Instrumentación [1].

Tabla 1. Fases del Ensayo del Muro Original [1].

Fase	1	2	3	4	5	6	7	8
D1 (mm)	0.5	1.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15
Ciclos	2	1	2	3	3	3	3	3

4.2 Comportamiento del Muro Original [1]

En las dos primeras fases no se produjeron fisuras. En la fase 3 se presentó la primera grieta diagonal en la mitad inferior de la albañilería y fisuras de tracción por flexión en las columnas. En la fase 4 se presentaron 2 grietas diagonales que abarcaron la totalidad de la albañilería. En la fase 7 se inició la trituración del talón izquierdo y la trituración de la albañilería en la zona de intersección de las grietas diagonales. En la fase 8 se trituró completamente el talón izquierdo, descubriéndose posteriormente que hubo una cangrejera interna en la base de esa columna. En la Fig.3 se muestra el estado final en que quedó el muro original.



Fig.3. Estado del muro original en la fase 8 del ensayo [1].

En la sección 8 de este artículo se discuten los resultados numéricos del muro original comparándolos con los obtenidos en el muro rehabilitado.

5. REPARACIÓN DEL MURO

La técnica de reparación de la albañilería consistió en profundizar unos 2cm las grietas más importantes existentes en ambas caras del muro, y remover la zona central triturada (intersección de grietas diagonales), para después limpiarlas, humedecerlas y taponarlas manualmente con mortero 1:4, mientras que la zona central fue rellenada con concreto simple. Para el caso de las dos columnas, se removió el concreto triturado localizado en 3 extremos, para después limpiar esa zona, aplicar resina epóxica y rellenarla con concreto simple.

Las fisuras con grosores menores que 1mm, existentes tanto en la albañilería como en las columnas, no fueron resanadas. El concreto simple, usado para rellenar las zonas dañadas, tuvo una resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Cabe mencionar que se usó un encofrado en forma de embudo para que rebalse el concreto nuevo y al secar no se separe del concreto existente o de la albañilería.

En la Fig.4 se aprecia las etapas de la reparación.



Fig.4
Etapas de la reparación.



6. REFORZAMIENTO CON FIBRA DE CARBONO

6.1 Características de la Fibra de Carbono y de los Pegamentos

La fibra de carbono utilizada fue Mbrace CF130 (Fig.5), que se comercializa en rollos de 50cm de ancho por 50m de largo con un espesor de 0.165mm, una resistencia a tracción de 38000 kg/cm² y un módulo de elasticidad de 2270000 kg/cm² en la dirección longitudinal de la fibra (a lo largo del rollo), mientras que en la dirección transversal (ancho del rollo) la resistencia es nula.

Los pegamentos utilizados fueron (Fig.5):

- Mbrace Primer. Es un compuesto epóxico que se utiliza como imprimante para sellar los poros de la albañilería y el concreto.
- Mbrace Putty. Es una pasta epóxica que sirve para nivelar defectos y generar una superficie lisa.
- Mbrace Saturant. Es una resina epóxica que se emplea para encapsular las fibras de carbono.

Cada uno de los tres pegamentos indicados presenta dos componentes (A y B) que deben mezclarse con una batidora (Fig.5). Tanto la fibra de carbono como los pegamentos fueron donados, preparados y colocados por personal de BASF The Chemical Company, siguiéndose las especificaciones técnicas dadas en la Ref.6.

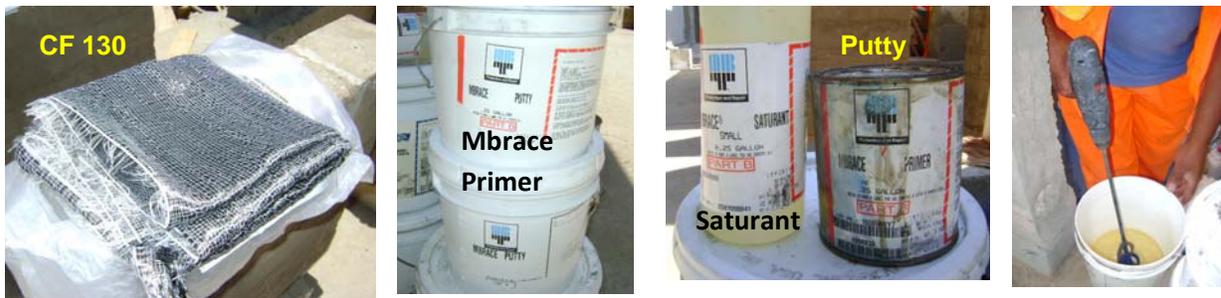


Fig.5. Fibra de carbono, pegamentos y batido mecánico de los componentes.

6.2. Cálculo de las Bandas de Carbono a Emplear

La carga que teóricamente produce la rotura diagonal de la albañilería (V_m), fue determinada mediante la expresión indicada por la Ref.2: $V_m = 0.5 v'm \alpha t L + 0.23P_g$, donde: $v'm = 9.38 \text{ kg/cm}^2$ (ver la sección 2), $\alpha =$ coeficiente de reducción por esbeltez = 1 para muros cuadrados, $t = 13\text{cm}$ = espesor efectivo del muro, $L = 240\text{cm}$ = longitud total del muro, $P_g =$ carga de gravedad = 0 (los muros fueron ensayados sin carga vertical). Con lo cual resulta: $V_m = 14.6 \text{ ton}$; esta falla se presentó durante la fase 4 del experimento del muro original, para una carga de 13.8 ton [1], 6% menor.

Por otro lado, adoptando bandas de fibra de carbono de 10cm de ancho y un factor de seguridad igual a 3 (valor elevado debido a la fragilidad de su falla), la resistencia admisible a tracción de cada banda resulta (ver el acápite 6.1): $R_a = 38000 \times 0.0165 \times 10 / 3 = 2090\text{kg}$. Asumiéndose que el 100% del cortante de agrietamiento (V_m) debe ser absorbido por la fibra de carbono, se obtiene un total de 7 bandas dispuestas en forma alternada: 3 bandas en una cara y 4 bandas en la cara opuesta.

6.3. Instalación de la Fibra de Carbono

En primer lugar el rollo fue recortado en su dirección longitudinal con una tijera, de acuerdo a las medidas del muro y formando bandas de 10cm de ancho (Fig.6), luego las zonas del muro a reforzar, fueron alisadas con un esmeril, para enseguida delinear con ocre la zona donde van las bandas.



Fig.6. Recorte de la fibra de carbono, esmerilado y marcación de la zona a reforzar.

Enseguida, utilizando un rodillo se aplicó el imprimante Mbrace Primer (Fig.7) sobre la superficie seca y limpia donde van las bandas, para después, usando una espátula, sellar las imperfecciones con la pasta Mbrace Putty.



Fig.7. Aplicación del imprimante Mbrace Primer y de la pasta Mbrace Putty.

Posteriormente, empleando un rodillo, se aplicó la resina Mbrace Saturant (Fig.8), para después instalar la fibra de carbono y pasarle un rodillo metálico acanalado en la dirección longitudinal hasta notar el sangrado del Mbrace Saturant a través de la fibra. Finalmente se volvió a aplicar otra capa de Mbrace Saturant para que la fibra de carbono quede encapsulada.



Fig.8. Aplicación del Mbrace Saturant, instalación de la banda, rodillo metálico, aplicación de la segunda capa de Mbrace Saturant y estado final del muro reparado y reforzado en las 2 caras.

7. ENSAYO DEL MURO REHABILITADO

La técnica de ensayo aplicada en el muro rehabilitado y la instrumentación, fueron las mismas que las empleadas en el muro original (ver el acápite 4.1), con la diferencia que se agregaron las 3 fases adicionales indicadas en la Tabla 2.

Fase	9	10	11
D1 (mm)	17.5	20	25
Ciclos	3	3	1

Fig.9
Ensayo del muro rehabilitado.



7.1. Comportamiento del Muro Rehabilitado

A partir de la fase 3 se iniciaron las fisuras diagonales en la mitad superior del muro, en la zona que había sido reparada. En las fases 4, 5, 6 y 7, las fisuras diagonales se extendieron en todo el muro, sin embargo, no cortaron a la fibra de carbono (Fig.10).

Fig.10
Fase 6, D1 = 10mm.



En la fase 8 se produjo una pequeña ruptura en el borde superior de una de las bandas de carbono localizada en una cara del muro y un pequeño despegue en la cara opuesta (Fig.11). Las 2 bandas mencionadas estuvieron localizadas en la zona central del muro. En esta fase se produjo otra grieta diagonal, localizada en la mitad inferior del muro, fuera de la zona reparada.

Fig.11
Fase 8, D1 = 15mm.



En la fase 9 las grietas diagonales aumentaron de espesor (Fig.12) y se produjo la ruptura de una de las bandas de carbono (la fisurada previamente en la fase 8, Fig.11). En esta fase se presentó otra grieta diagonal, que abarcó todo el muro, en una zona distinta a la reparada.

Fig.12

Fase 9, D1 = 17.5mm.



En la fase 10 se produjo la ruptura parcial y el despegue parcial de otras bandas de carbono, así como una grieta diagonal que abarcó todo el muro en una zona distinta a la reparada (Fig.13).

Fig.13

Fase 10, D1 = 20mm.



En la fase 11 se produjo la ruptura y el despegue de 5 bandas (Fig.14), quedando en buen estado las 2 bandas ubicadas en la parte superior del muro (una en cada cara). La ruptura de las bandas se produjo en la zona donde existían grietas diagonales, en forma frágil y explosiva (el video aparece en la Ref.5). La albañilería quedó muy dañada, mientras que los extremos reparados de las columnas quedaron en buen estado. En la Fig.14 puede notarse que la albañilería y el concreto se deslaminaron, quedando parte de estos materiales adheridos a la banda de carbono.



Fig.14. Fase 11 (D1 = 25mm), deriva 0.01. Ruptura y despegue de las bandas.

8. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE EL MURO ORIGINAL Y EL REPARADO

En la Fig.15 aparecen los lazos histeréticos cortante-desplazamiento lateral (V-D1) del muro original y del reparado, trazados a la misma escala con fines comparativos, mientras que en la Fig.16 aparecen la envolvente de los lazos histeréticos V-D1, y la envolvente del desplazamiento horizontal relativo entre las partes intermedias de las columnas (D3 en la Fig.2). En ellas puede notarse lo siguiente:

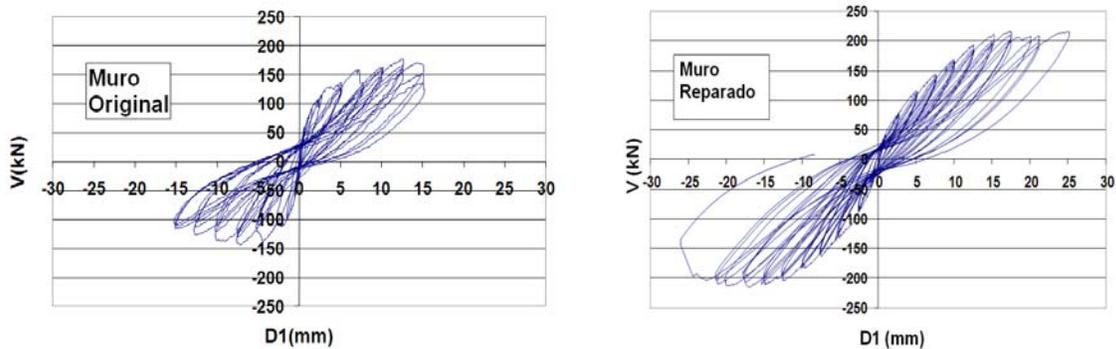


Fig.15. Lazos histeréticos V-D1 del muro original y del reparado.

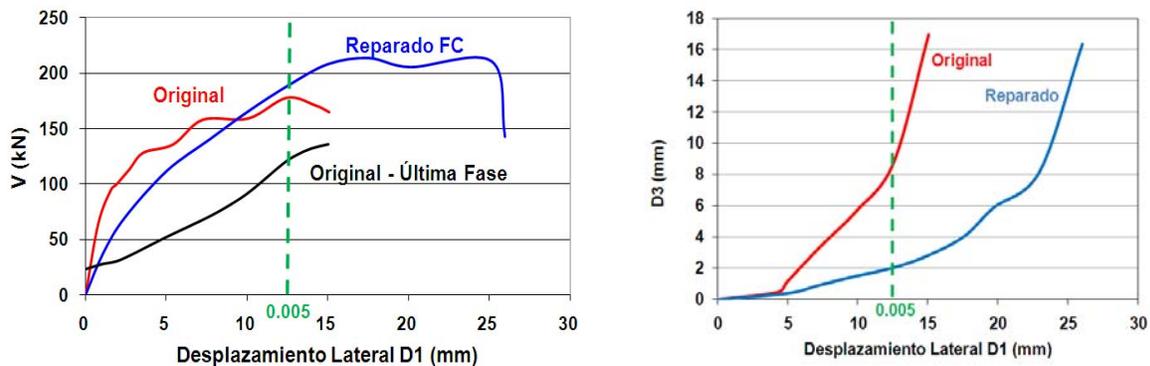


Fig.16. Envolturas V-D1 (izquierda) y D1-D3 (derecha).

- La rigidez lateral inicial del muro rehabilitado (5.6 ton/mm) fue el 50% de la correspondiente al muro original (11.6 ton/mm), sin embargo, la reparación incrementó en 1100% a la rigidez que tuvo el muro original en la última fase del ensayo (0.45 ton/mm para $D1 = 15\text{mm}$).
- Recién a partir de un desplazamiento lateral de 8mm la resistencia del muro rehabilitado empezó a superar a la del muro original, llegando a alcanzar un valor máximo de 21.3 ton (22% mayor que la del muro original: 17.4 ton), aunque ello ocurrió en la última fase del ensayo del muro rehabilitado ($D1 = 25\text{mm}$), donde se produjo la ruptura y el despegue de las bandas de carbono.
- El refuerzo controló el grosor de las grietas diagonales. Así, por ejemplo, para la deriva máxima especificada por la Ref.3 (0.005), los grosores acumulados de las grietas existentes en la parte intermedia del muro original fue $D3 = 8.7\text{mm}$, mientras que en el reparado se obtuvo $D3 = 2\text{mm}$.
- A partir de la fase 8 ($D1 = 15\text{mm}$) del ensayo del muro rehabilitado, empezaron a romperse y a despegarse parcialmente las bandas de carbono, esto originó que la resistencia a corte del muro se mantuviese constante hasta alcanzar una deriva de 0.01, equivalente al doble del valor máximo especificado por la Ref.3 (0.005), donde se produjo la ruptura de 5 bandas, con el consecuente incremento del grosor de las grietas diagonales y el deterioro de la albañilería.

9. CONCLUSIONES

- a. A diferencia de otras técnicas de reparación y reforzamiento [5], donde se deben hacer perforaciones en el muro para conectar las mallas electrosoldadas, o ranuras para adicionar varillas horizontales, las bandas delgadas de fibra de carbono se pegan al muro sin ocasionar mayores daños adicionales en la albañilería, excepto su alisamiento con un esmeril.
- b. La baja rigidez lateral inicial que tuvo el muro rehabilitado se debió a que las fisuras finas existentes tanto en las columnas como en la albañilería no fueron resanadas; asimismo, el taponado con mortero de las grietas diagonales principales se realizó manualmente, por lo que cabe la posibilidad de que el mortero no haya sellado completamente la parte interna de la grieta, por ello se recomienda lanzar este mortero con un equipo neumático (Fig.17).

Fig.17

Lanzado manual del mortero y equipo neumático sugerido.



- c. La banda de carbono resultó efectiva al incrementar la resistencia a corte en la etapa de grandes desplazamientos laterales, asociados a sismos severos; sin embargo, la baja rigidez inicial que tuvo el muro reparado haría que las grietas diagonales se formen para acciones de sismos moderados, por lo que de seguirse la técnica de reparación y reforzamiento indicada en este artículo, habría que tratar de restablecer la rigidez inicial con algún elemento estructural adicional.

REFERENCIAS

1. San Bartolomé, A., Bernardo, J. y Peña M. (2009). Efectos del peralte de las columnas en el comportamiento sísmico de los muros de albañilería confinada. Congreso Nacional de Ingeniería Civil. XVII CONIC 2009. Chiclayo, Perú.
2. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma Técnica E.070 “Albañilería”.
3. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente”.
4. San Bartolomé, A., Quiun, D. y Silva, W., 2011. Diseño y Construcción de Estructuras Sismorresistentes de Albañilería. Fondo Editorial. Pontificia Universidad Católica del Perú.
5. San Bartolomé, A., 2007. Capítulo “Reparación y Reforzamiento” del Blog de Investigaciones en Albañilería <http://blog.pucp.edu.pe/albanileria>
6. BASF The Chemical Company. Sistemas compuesto de refuerzo Mbrace. http://www.basf-cc.com.mx/es/productos/Sistemas_Compuestos_Refuerzo/Pages/default.aspx