

Desempeño ante cargas laterales de muros de mampostería no estructural reforzados con CFRP

Performance under lateral loads of non-structural carbon fiber reinforced polymer (CFRP) masonry walls

CAMILO JOSÉ VEGA VARGAS¹ - NANCY TORRES CASTELLANOS²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Doctora en Ciencia y Tecnología de los Materiales de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
Profesora de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

camilo.vega@mail.escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 14/03/2015 Aceptado: 20/08/2015

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En muchos países son tradicionales las viviendas construidas con muros de mampostería en arcilla no reforzada, lo que da lugar a edificaciones de baja resistencia y ductilidad, muy vulnerables a eventos sísmicos debido a su poca capacidad de disipación de energía que produce fallas importantes en ellas. En el presente artículo se exponen los resultados de un proyecto de investigación donde se evaluó el comportamiento ante cargas laterales en muros de mampostería no estructural, al ser reforzados mediante CFRP. En el programa experimental se construyeron diez muros de mampostería de arcilla, a escala real, utilizando bloque N.º 5, usado comúnmente en este tipo de edificaciones; cinco de ellos tenían dimensiones de 1,23 m de largo por 1,90 m de alto y los cinco restantes de 2,47 m de largo por 1,90 m de alto. Cuatro muros se ensayaron ante carga lateral estática y seis ante carga lateral cíclica en su plano. Se compararon las respuestas de los muros en cuanto a modos de falla, carga máxima y comportamiento histerético; los resultados muestran que el material de refuerzo mejoró significativamente la capacidad de carga última de los muros y que se mitigó la falla súbita, ya que fueron progresivas y menos frágiles, logrando de esta manera un mejor nivel de desempeño.

Palabras claves: mampostería no estructural, polímeros reforzados con fibra, reforzamiento sísmico, cargas laterales.

Abstract

In many countries, buildings are commonly made with unreinforced clay masonry walls, resulting in low resistance and ductility constructions, very vulnerable to seismic events due to low capacity of dissipation of energy, being highly susceptible to significant failures. This article reports on the results obtained from a research project wherein the behavior of CFRP-reinforced non-structural masonry walls exposed to lateral loads was evaluated. In the test program, 14 clay masonry walls were built at a normal scale, using No. 5 bricks, which is the one normally used in these types of buildings. Out of 10 walls, half of them were 1.23 meters long by 1.90 meters high and the other half 2.47 meters long and 1.90 meters high. Four walls were tested with static lateral load and six were reinforced and tested with cyclical lateral load on its plane. The walls behavior were compared in terms of failure modes, maximum load, and hysteretic behavior; the results revealed that the reinforced material significantly increased ultimate load capacity, sudden failure decreased because they were progressive and less fragile, attaining better performance levels of these elements.

Keywords: non-structural masonry; carbon fiber reinforced polymers; seismic retrofitting; lateral loads.

INTRODUCCIÓN

En Colombia, y en general en Latinoamérica, predominan las viviendas construidas con muros de mampostería en arcilla no reforzada, lo que da lugar a edificaciones muy vulnerables a los sismos. Esto ha quedado demostrado con la experiencia de sismos precedentes, como el de Popayán (Colombia) en 1983, Northridge (Estados Unidos) en 1994, Eje Cafetero (Colombia) en 1999, Tecomán (México) en 2003, la región central costera de Chile en 2010, donde el comportamiento de las edificaciones con muros no estructurales fue inadecuado debido a su baja ductilidad y poca capacidad de disipación de energía, produciendo en ellos grandes fallas que llevaron incluso al colapso total de las edificaciones; si a esto se suma que la mayoría de este tipo de viviendas se construyen sin una supervisión técnica adecuada y se encuentran ubicadas en zonas geológicas con un grado de amenaza sísmica considerable, las posibilidades de presentarse fallas son aún mayores.

Los polímeros reforzados con fibra (FRP, por su sigla en inglés) son compuestos que se han convertido en una alternativa para el reforzamiento de estructuras de mampostería; son ligeros, no corrosivos y presentan una alta resistencia a la tracción y el módulo elástico; adicionalmente, están disponibles en el mercado en diferentes presentaciones, entre éstas láminas y barras de refuerzo (ACI 440-7R, 2010, p. 3).

ANTECEDENTES

El uso de los FRP para el reforzamiento estructural de muros de mampostería se ha estudiado en diferentes investigaciones en el mundo, y sus resultados demuestran que este tipo de materiales puede mejorar la capacidad de disipación de energía en este tipo de elementos, convirtiéndolos en muros resistentes a cargas laterales (Tumialan et al., 2009). Este sistema de reforzamiento tendría algunas ventajas respecto a sistemas tradicionales, pues requiere menos demoliciones, es una técnica no invasiva y como resultado habría menor producción de polvo, ruido y escombros. Otros autores también afirman que el reforzamiento de muros de mampostería con compuestos de FRP les permiten alcanzar una mayor deformación en comparación con los muros no reforzados, mejorando así su capacidad a flexión y ductilidad (Elgawady et al., 2006).

Schwegler (1995) investigó métodos para mejorar la capacidad de muros de corte de mampostería con láminas de FRP; la fibra de carbono se colocó con una orientación diagonal en los muros de mampostería y se ancló mecánicamente. Los resultados de los ensayos mostraron que el muro tuvo un aumento en la resistencia a la rotura y el desplazamiento de 50 a 300 %, respectivamente, en comparación con el espécimen sin ningún material de refuerzo.

Valluzzi et al. (2002) estudiaron el comportamiento al corte de especímenes de mampostería reforzados con láminas de FRP; el reforzamiento se evaluó colocando la fibra en una cara y en ambas caras y sometiendo las muestras a pruebas de tracción diagonal; los especímenes reforzados por una sola cara presentaron un patrón de falla con una grieta a lo largo de la diagonal, con cargas de falla incluso inferiores a las de los especímenes sin refuerzo; en los especímenes reforzados por ambas caras, el mecanismo de falla se presentó por el desprendimiento o ruptura de la lámina de la superficie del muro, aumentando la resistencia a la rotura del muro notablemente.

Por otro lado, Elgawady et al. (2006) estudiaron el comportamiento sísmico en el plano de muros de mampostería reforzados con compuestos de FRP; ensayaron once muros utilizando configuraciones de reforzamiento en diagonal y cubriendo completamente el muro de fibra, y encontraron un incremento en la resistencia lateral entre 1,3 y 2,9 veces al compararla con los muros sin refuerzo.

Por su parte, Santa María & Alcaíno (2008) evaluaron la resistencia al corte en el plano de muros de mampostería reforzados exteriormente con fibras de carbono (CFRP). En su investigación construyeron 16 muros utilizando dos configuraciones de reforzamiento: una horizontal y otra en diagonal; los muros tuvieron aumentos importantes en su capacidad de deformación lateral, incrementando entre 70 y 110 % la deformación asociada a la carga máxima. El refuerzo de CFRP redistribuyó las grietas y disminuyó su espesor.

En Colombia se han hecho investigaciones para evaluar el desempeño de muros de mampostería cuando se refuerzan con FRP. López (2012) desarrolló una investigación donde estudió el comportamiento estructural bajo cargas laterales cíclicas en el plano de pórticos de concreto con muros de relleno, reforzados con tejidos de CFRP adheridos externamente en la mampostería.

Los resultados de la investigación mostraron incrementos en la resistencia entre 3,0 y 3,7 veces con respecto a los especímenes sin reforzar, la capacidad de deformación también mejoró y alcanzó valores de hasta el 3,0 % de la altura del elemento.

Bastidas et al. (2002) construyeron 26 muretes de mampostería de arcilla de bloques de perforación horizontal y un muro a escala real, y los reforzaron con fibra de vidrio (GFRP) utilizando diferentes configuraciones de reforzamiento. Los muretes se sometieron a ensayos de tracción diagonal y el muro a escala real, a carga cíclica en el plano. Los resultados de la investigación encontraron que el reforzamiento de estructuras de mampostería con materiales compuestos es de gran ayuda a la hora de reducir los daños causados por fenómenos telúricos, ya que se mejoran la resistencia al corte y la capacidad de deformación del sistema, reduciendo el daño global y generando una mayor estabilidad de la estructura.

Con los antecedentes descritos anteriormente, cabe destacar que el uso de materiales compuestos para reforzar estructuras de mampostería es cada día más frecuente, dado que mejora notablemente su capacidad a la hora de resistir cargas laterales en su plano. Esta investigación buscó aplicar dichos conceptos de reforzamiento a muros construidos con características y materiales del medio local para confirmar las ventajas y beneficios de los polímeros reforzados con fibra; contrario a las investigaciones ya realizadas, los ensayos en este proyecto se hicieron sin carga axial en los elementos, considerando que este es el caso más crítico para los sistemas de anclaje, además de que en las edificaciones de uno y dos pisos, a las cuales aplicarían los resultados de esta investigación, la carga axial en sus elementos es baja. Dado que se quería buscar un trabajo eficiente de los muros ante estas cargas, necesariamente debían anclarse a la cimentación; por lo tanto, se hizo un importante énfasis en encontrar el sistema de anclaje adecuado que permitiera la transferencia de cargas del muro a la cimentación. En los muros de prueba se utilizaron dos configuraciones de reforzamiento: una en malla y otra en diagonal; se construyeron diez muros de mampostería de arcilla, a escala real, utilizando bloque N.º 5, usado comúnmente en este tipo de edificaciones. Finalmente, con el propósito de estudiar el comportamiento a corte y flexión en los muros se utilizaron dos relaciones de esbeltez: una de 1,54 (flexión) y otra de 0,77 (corte).

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Descripción de materiales

Los especímenes de prueba se construyeron utilizando bloque de arcilla de perforación horizontal, conocido tradicionalmente en el medio colombiano como bloque N.º 5, de dimensiones 0,30 x 0,20 x 0,12 m, y una resistencia a compresión promedio de 9,8 MPa. Las unidades de mampostería se pegaron con mortero de resistencia a compresión promedio de 20 MPa; se realizaron ensayos de compresión en muretes (prismas), obteniendo una resistencia a compresión promedio, f'_m , de 5,3 MPa; los concretos utilizados para las vigas de cimentación, vigas de borde superior y los sistemas de anclaje tenían una resistencia a compresión a los 28 días de 28 MPa; el acero empleado en los elementos de concreto fue de grado 60, con una resistencia a la fluencia mínima de 420 MPa. El material de refuerzo adherido externamente a los muros consistió en tejidos de fibra de carbono de 0,34 mm de espesor, 4200 MPa de resistencia a la tensión y 240.000 MPa de módulo de elasticidad; para fines de diseño del reforzamiento, los valores reportados por el fabricante de la fibra curada con el adhesivo epóxico fueron de 1016 mm de espesor, 651 MPa de resistencia a tensión y 62.354 MPa de módulo elástico.

Descripción de los muros

En el programa experimental se construyeron diez muros de mampostería de arcilla, cinco de ellos, denominados muros cortos, tenían dimensiones de 1,23 m de largo por 1,90 m de alto y los cinco restantes, llamados muros largos, tenían dimensiones de 2,47 m de largo por 1,90 m de alto. La altura de los dos tipos de muros requirió nueve hiladas de bloque, dimensiones de muros seleccionadas que representan las construcciones de este tipo en Colombia. Los especímenes se pusieron sobre una viga de cimentación de 0,25 x 0,30 m de sección transversal, y 1,73 m de longitud para los muros cortos y 2,97 m para los muros largos. En la parte superior de los muros se construyó una viga de borde de 0,15 x 0,15 m de sección transversal, cuya longitud estaba determinada por el largo del muro. Los espesores del mortero de pega variaron entre 7 y 13 mm, para un promedio aproximado de 10 mm (1 cm).

A continuación se presenta el resumen de los ensayos realizados con la configuración de reforzamiento utili-

Tabla 1
Resumen de los especímenes y ensayos realizados

Especímen N.º	Especímen reforzado	Configuración de reforzamiento	Tipo de espécimen	Tipo de ensayo	Código de ident.
1	No	-	Corto	Estático	SR-C-1-ES
2	No	-	Largo	Estático	SR-L-1-ES
3	Sí	Malla	Corto	Estático	R-M-C-1-ES
4	Sí	Diagonal	Largo	Estático	R-D-L-1-ES
5	Sí	Malla	Corto	Dinámico	R-M-C-1-DI
6	Sí	Diagonal	Largo	Dinámico	R-L-D-1-DI
7	Sí	Diagonal	Corto	Dinámico	R-D-C-1-DI
8	Sí	Malla	Largo	Dinámico	R-M-L-1-DI
9	Sí	Diagonal	Largo	Dinámico	R-D-L-2-DI
10	Sí	Diagonal	Corto	Dinámico	R-D-C-2-DI

zada en cada uno de los muros de prueba (tabla 1). En el código de identificación de cada espécimen, el primer término indicaba si el espécimen estaba reforzado (R) o no (SR); el segundo, la configuración de reforzamiento, *M* si era en malla o *D* si era en diagonal; el tercer término, el tamaño del muro, *C* para muro corto y *L* para muro largo; el cuarto, el consecutivo de cada ensayo, y finalmente el último término indicaba si el ensayo era estático (ES) o dinámico (DI).

El material de refuerzo consistió en tejidos de fibra de carbono adheridos a la superficie externa de los muros de mampostería, mediante un adhesivo epóxico; este reforzamiento se hizo por una sola cara; se utilizaron dos configuraciones de reforzamiento: una en malla y otra en diagonal. El diseño de los reforzamientos con FRP de los especímenes de prueba se basó siguiendo los planteamientos establecidos en el documento ACI 440. 7R-10.

La configuración de refuerzo en malla estaba conformada por cinco tiras horizontales de 0,10 m de ancho, colocadas cada 0,40 m entre centro y centro de cada tejido; verticalmente, se utilizaron dos tiras ubicadas cerca de los extremos de los muros de 0,10 m de ancho para los muros cortos y 0,15 m de ancho para los muros largos (figura 1); con esta orientación, se buscó que las tiras horizontales asumieran los esfuerzos por corte y las verticales los esfuerzos producidos por los efectos de flexión. La configuración en diagonal estaba compuesta por tiras colocadas formando un ángulo aproximado de 45° con la horizontal; con esta orientación, se buscó que una parte de estos tejidos asumieran los esfuerzos por corte y otra parte los esfuerzos producidos por los efectos de flexión. Se utilizaron cuatro tiras de 0,10 m de ancho para los dos tipos de muros (figura 2).

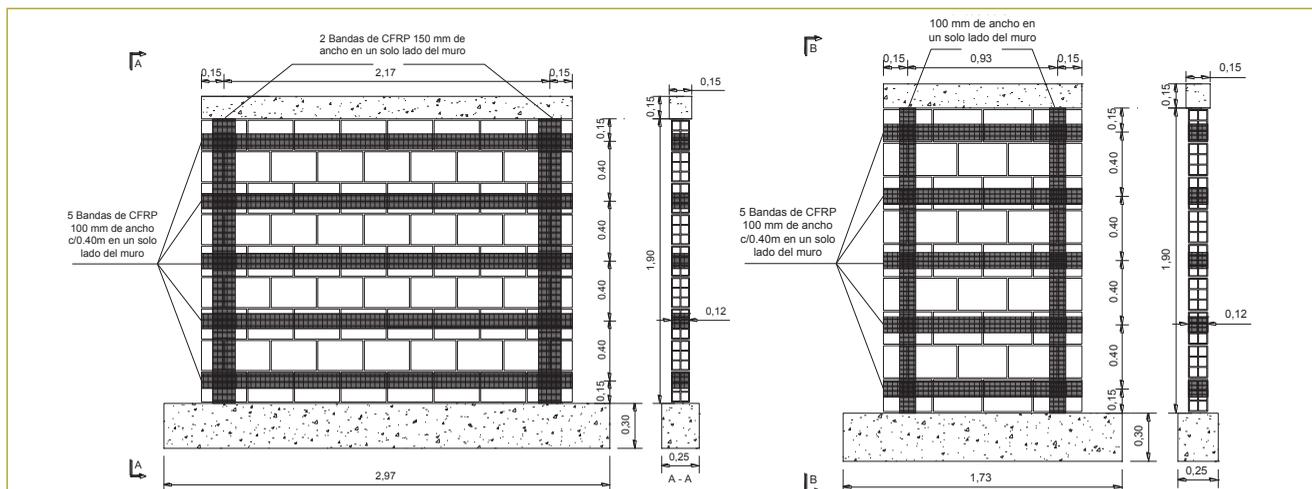


Figura 1. Dimensiones y reforzamiento en malla de los muros. Unidades en metros.

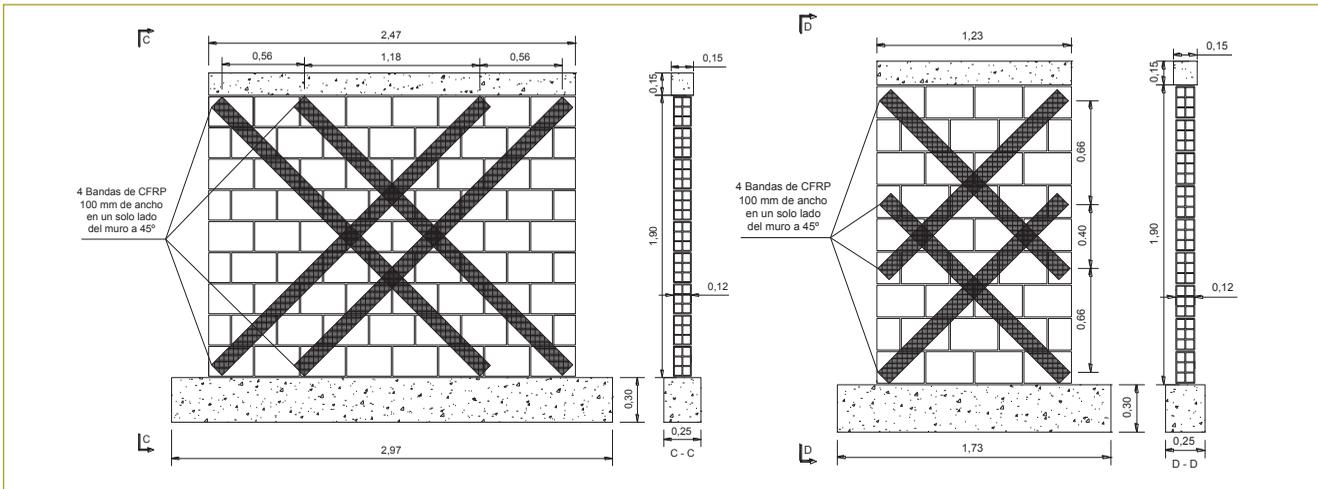


Figura 2. Dimensiones y reforzamiento en diagonal de los muros. Unidades en metros.

El sistema de anclaje empleado para garantizar la continuidad del muro con la cimentación consistió en eliminar los dos ladrillos de las esquinas de la base de los muros cortos y dos y medio ladrillos para los muros largos; en remplazo de estas unidades se fundieron macizos de concreto anclados a la cimentación con dos barras N.º 4 a una profundidad de 0,15 m, dejando un espacio para que pudiera pasarse el FRP con el ancho calculado a través del macizo en medio de las dos barras. El macizo se fundió en dos etapas; en la primera etapa se fundió la parte superior, colocando una sección de poliestireno en la parte baja de la formaleta de aproximadamente 8 cm de espesor. Una vez fraguada esta

primera etapa, se eliminó la sección y se colocó la fibra pasándola por la parte baja del macizo ya fundido; seguido a esto se realizó la segunda fundida de concreto, completando el macizo y dejando la fibra en medio de éste (figura 3).

Montaje de los muros para el ensayo

Para los ensayos estáticos se colocó cada espécimen de prueba en un marco de carga; se instrumentó por medio de deformímetros mecánicos de sensibilidad 10^{-2} milímetros, ubicados en la cara opuesta a la aplicación de carga (uno superior, δ_1 , y otro inferior, δ_2 , para medir

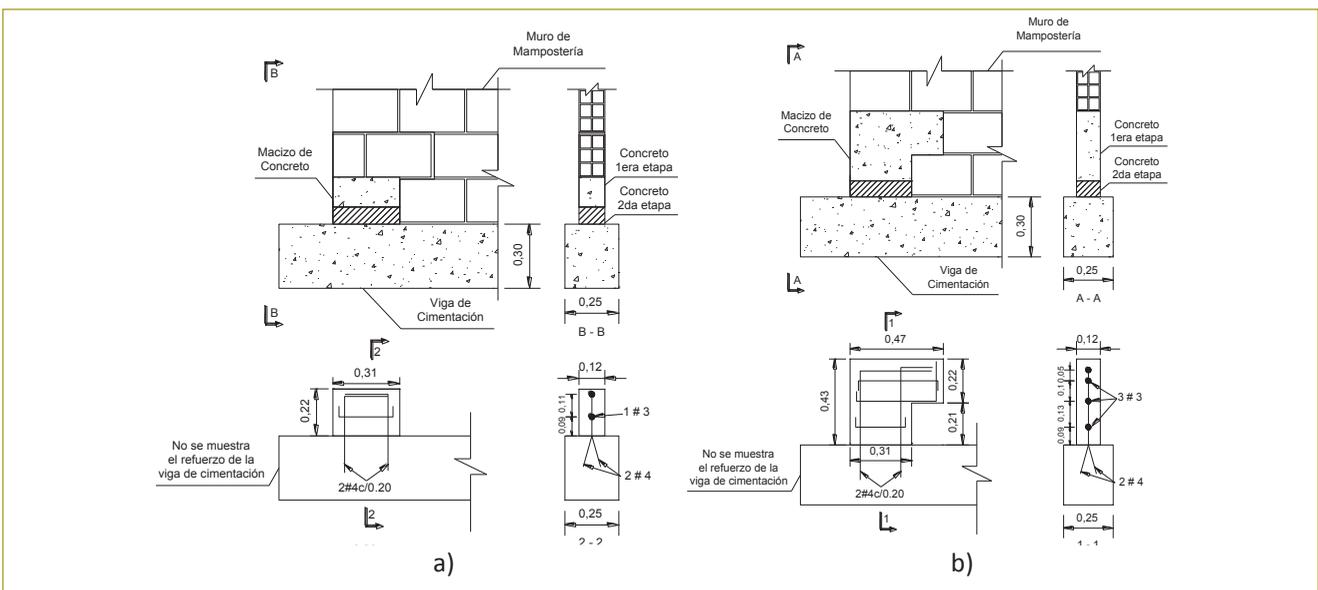


Figura 3. Dimensiones y refuerzo del sistema de anclaje. a) Macizo de muro corto. b) Macizo de muro largo. Unidades en metros.

el desplazamiento lateral). Se aplicó fuerza lateral por medio de un gato hidráulico de 250 kN de capacidad y la carga se midió a través de una celda de carga de 50 kN de capacidad y sensibilidad de 10 N. Para los ensayos dinámicos la instrumentación se realizó por medio de LVDT en dirección horizontal; para la aplicación de la carga se empleó un actuador dinámico de 250 kN de capacidad a tracción, 300 kN a compresión y 500 mm de recorrido. El proceso de carga se suspendió al obtenerse la falla del muro, la cual superaba las condiciones de servicio. En la figura siguiente se presenta el montaje del ensayo dinámico de uno de los muros de prueba (figura 4).



Figura 4. Montaje del ensayo dinámico.

RESULTADOS

Modos de falla

Los especímenes sin refuerzo (SR-C-1-ES y SR-L-1-ES) presentaron una falla controlada por la flexión,

donde los esfuerzos de tensión fueron superiores a la adherencia entre el mortero de pega y las unidades de mampostería, generando un desprendimiento del muro en una de las primeras hiladas y el correspondiente aplastamiento de algunas unidades en la zona de compresión del muro (figura 5).

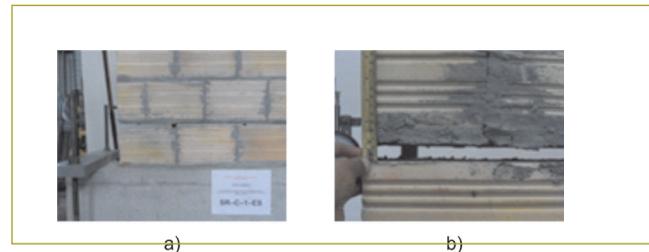


Figura 5. a) Modo de falla de los especímenes no reforzados. b) Detalle del desprendimiento de una de las hiladas.

Los especímenes reforzados en diagonal presentaron una falla por flexión en su base, generando el desprendimiento de las juntas de pega de las primeras hiladas y el posterior rompimiento de las unidades de mampostería debido a los esfuerzos de compresión producidos; la fibra de carbono presenta una rotura en la zona del anclaje junto con un desprendimiento (*pull off*) del muro, produciendo fracturas por tensión en algunas unidades. Las grietas generadas se encuentran principalmente en las juntas de pega y algunas pequeñas grietas en las unidades de mampostería de la base del muro (figura 6 a). Los especímenes largos presentaron una grieta principal en forma de escalera iniciada en la altura media del muro hasta la base de éste; a pesar de que la forma de este tipo de grietas suele representar

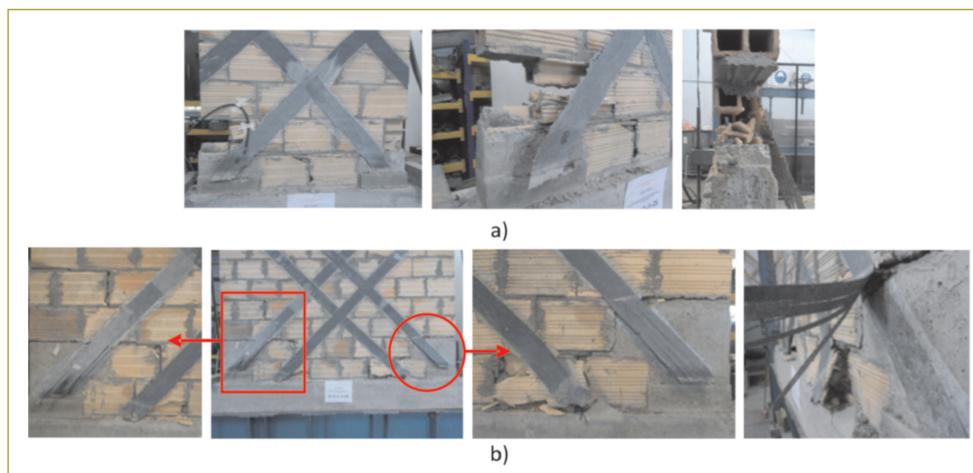


Figura 6. Modos de falla de los especímenes reforzados en diagonal. a) Muros cortos. b) Muros largos.

una falla por corte, la rotura de la fibra en la zona del anclaje y el rompimiento de algunas unidades de mampostería indican que la falla se produce sobre todo por flexión (figura 6 b)).

Los especímenes reforzados en malla también presentaron una falla por flexión en su base, causando el rompimiento de unidades de mampostería por los esfuerzos de compresión y grietas principales horizontales en la primera junta de pega y entre los macizos de concreto y el muro; esta última falla entre estos dos elementos produjo un desplazamiento del muro con respecto a uno de los macizos del anclaje, en el espécimen largo, que finalmente disminuyó la capacidad de carga del espécimen (figura 7 b)); en el muro corto se produjo una falla en la junta de construcción de los dos concretos de edades diferentes del anclaje y se presentaron una serie de grietas por tensión en algunas unidades de la base del muro (figura 7 a)). Debido a este comportamiento, el material de refuerzo no pudo trabajar a su máxima capacidad y sólo presentó una pequeña falla por adherencia en la zona del macizo de concreto (figura 7 b)).

Capacidades de carga

En la tabla siguiente (tabla 2) están consignados los resultados de carga máxima resistida por cada uno de los muros durante los ensayos estáticos y dinámicos. Los resultados muestran cómo la capacidad de carga de los

muros depende de diferentes factores, el primero de los cuales es el tamaño de los especímenes; aunque desde el punto de vista geométrico los muros denominados largos tienen el doble de longitud que los muros denominados cortos, esa relación 2:1 en su longitud no se mantiene en el valor de carga máxima; para los muros sin refuerzo dicho valor está en una proporción 6.3:1, para los reforzados la configuración en diagonal está en 3.5:1 y la de malla en 2.7:1. Esto indica que la capacidad de resistencia de dicha clase de elementos no tiene una relación directa o preestablecida con su geometría, sino que depende mucho del material de refuerzo que tenga, así como de su orientación.

El segundo factor que hay que analizar es la configuración de reforzamiento; según los resultados obtenidos, se observa que el reforzamiento en malla presenta valores más altos en la capacidad de carga que los especímenes con una configuración en diagonal, con respecto a los muros cortos sin ningún material de refuerzo. Los especímenes reforzados tuvieron un aumento en su resistencia de hasta 12,8 veces en la configuración en diagonal y 18,8 en la configuración en malla; en los muros largos estos valores fueron de 7,1 y 8,1 para las configuraciones en diagonal y malla, respectivamente, lo que demuestra que, independientemente del valor en que aumente la resistencia dependiendo de la configuración que se utilice, el material de refuerzo mejora en forma sustancial la resistencia y el desempeño de este tipo de elementos frente a las sollicitaciones estudiadas.

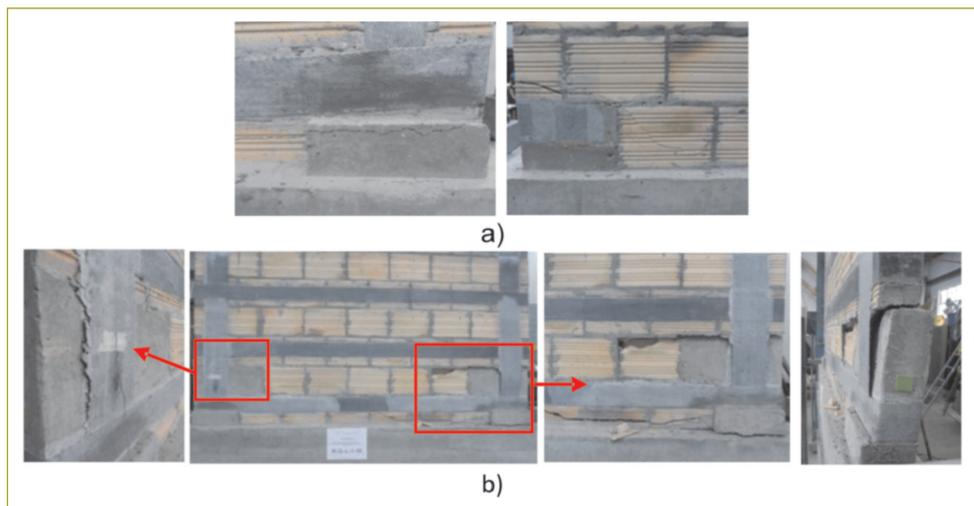


Figura 7. Modos de falla de los especímenes reforzados en malla. a) Muros cortos. b) Muros largos.

Tabla 2
Capacidades de carga de los muros ensayados

Especimen N.º	Código de ident.	Carga máx. (kN)
1	SR-C-1-ES	1,3
2	SR-L-1-ES	8,2
3	R-D-L-1-ES	40,9
4	R-M-C-1-ES	23,4
5	R-D-C-1-DI	16,5
6	R-D-C-2-DI	16,6
7	R-D-L-1-DI	56,7
8	R-D-L-2_di	58,1
9	R-M-C-1-DI	24,4
10	R-M-L-1-DI	66,6

Respuesta histerética

Más adelante se presentan las envolventes de las curvas de histéresis de cada uno de los especímenes de prueba ensayados bajo carga lateral dinámica; en los gráficos se muestran en las ordenadas la carga y el esfuerzo cortante a los que se sometieron los muros y en las abscisas los desplazamientos producidos (figura 8).

Las envolventes de las curvas muestran que los muros, tanto cortos como largos, tienen un comportamiento lineal elástico hasta una deriva del 0,3 %, aproximadamente, excepto el espécimen R-M-L-1-DI, que alcanza un valor de 0,5 %; a partir de estos valores, el comportamiento de los muros entra en el

rango inelástico con ciclos de carga y descarga que van disminuyendo la rigidez de los elementos hasta un desplazamiento cercano al 2,0 % de deriva en los muros cortos y 1,5 % en los largos; finalmente, el aumento de fisuras importantes y la degradación de la rigidez disminuyen la capacidad de carga del elemento.

La relación de esbeltez es otro factor que se puede analizar en el comportamiento de los muros; en los especímenes cortos se observa que tienen desplazamientos laterales mucho mayores que los largos, lo cual se debe a que estos elementos, al ser más esbeltos, exhiben una rigidez mucho menor que los muros largos (menos esbeltos) y, por tanto, van a tener desplazamientos más grandes.

Otro factor que afecta la respuesta histerética en este tipo de elementos es la presencia de carga axial; para el caso en estudio los muros de prueba no tenían esta sollicitación, por lo que la consecución de falla por corte, como inicialmente se había querido estudiar, sobre todo en los muros largos, no fue posible y por el contrario predominó la falla por flexión, a pesar de que en algunos de los muros largos se intentó formar la falla buscada; de igual manera, la ausencia de carga axial también ayuda a que el desplazamiento lateral llegue a valores cercanos al 2,0 % de deriva, contrario a ensayos donde sí se tiene esta sollicitación y los desplazamientos son del orden del 1,0 % de deriva, según los resultados de Santa María & Alcaíno (2008).

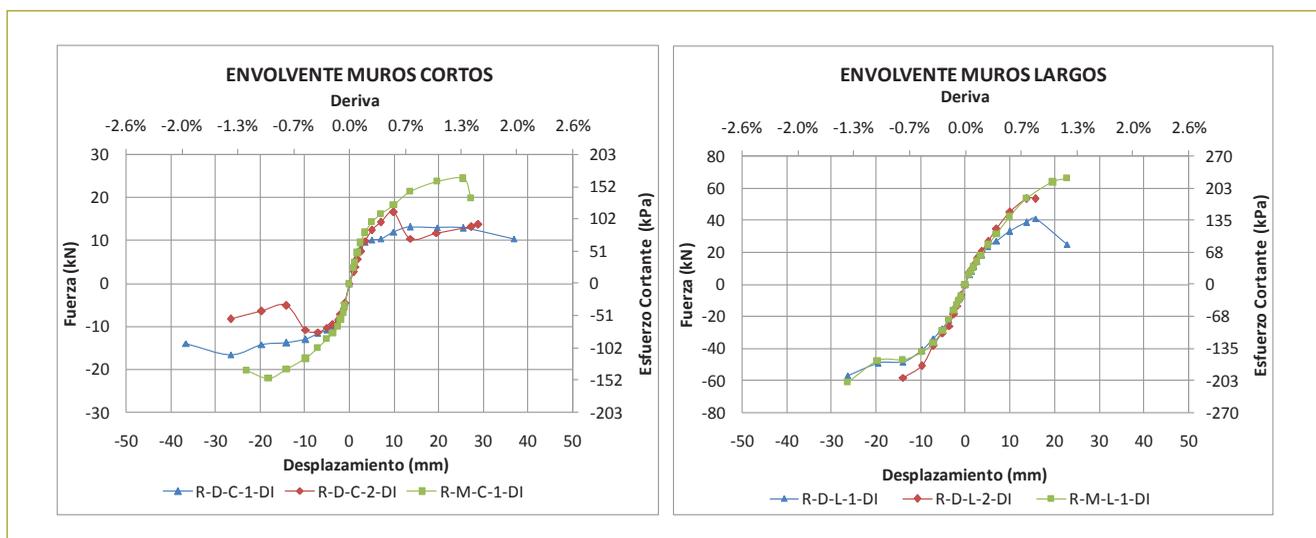


Figura 8. Envolventes de las curvas de histéresis.

CONCLUSIONES

- Los tejidos de fibra de carbono usados en el reforzamiento estructural contribuyen significativamente a mejorar el desempeño de estas edificaciones frente a solicitaciones de diferente índole, en especial las producidas por sismos, siempre y cuando se tengan adecuados sistemas de anclaje; tanto en los ensayos monotónicos como dinámicos se lograron aumentos en la resistencia de hasta 18,8 veces. Uno de los especímenes cortos sin refuerzo presentó una carga de falla de 1,3 kN y el mismo espécimen reforzado alcanzó una carga de falla de 24,4 kN en el ensayo dinámico, lo cual demuestra la gran contribución del material de refuerzo.
- El modo de falla predominante en los ensayos fue la flexión; a pesar de que se quería obtener una falla por corte en los muros largos, como se supuso en algunos diseños, no se pudo lograr debido a la ausencia de carga axial en los ensayos y a que la contribución en resistencia de la mampostería sin refuerzo fue muy baja; este modo de falla se evidenció más en los especímenes cortos con relación de esbeltez de 1,54; en los especímenes largos inicialmente se formó la falla buscada, pero al final se impuso la falla por flexión.
- El uso de FRP como material de refuerzo disminuyó la falla frágil en los muros, el modo de falla se caracterizó por la formación de una grieta principal y la posterior aparición de pequeñas fisuras en las unidades y juntas de pega; en los especímenes con reforzamiento en diagonal se logró la rotura de la fibra, mientras que los de la configuración en malla presentaron una falla en su anclaje.
- Para que se cumplan las ecuaciones y principios establecidos en el Documento ACI 440.7R-10, es importante garantizar que el anclaje del muro a su cimentación cumpla su función de monolitismo y transferencia de cargas entre los dos elementos; el sistema de anclaje estudiado tuvo un buen desempeño, ya que logró que los tejidos de FRP trabajaran a su máxima capacidad.
- En cuanto a desplazamiento se encontró que los especímenes tienen un comportamiento elástico hasta aproximadamente una deriva del 0,5 %; de ahí en adelante mantienen un comportamiento inelástico, hasta alcanzar un desplazamiento máximo entre 1,5 % y 2,0 % de deriva.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por la financiación de este proyecto y a su personal del Laboratorio de Estructuras y Materiales por la construcción y posterior ensayo de cada uno de los muros de prueba, al igual que a las empresas Sika Colombia S.A. y Ladrillera Prisma S.A., las que también patrocinaron la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACI Committee 440 & American Concrete Institute (2010). *Guide for the design and construction of externally bonded fiber-reinforced polymer systems for strengthening unreinforced masonry structures (7th)*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
2. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica & Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero (Forec) (2001). *Manual de construcción, evaluación y rehabilitación sismorresistente de viviendas de mampostería*. Bogotá, D.C.
3. Bastidas, E., Molina, L., Yamin, L., Sarria, A., Ortega, J. & Tumialan, G. (s.f.). Non-structural masonry walls strengthened with GFRP laminate (pp. 12). Bogotá, D.C.: Universidad de los Andes.
4. Elgawady, M., Lestuzzi, P. & Bardoux, M. (2006). Aseismic retrofitting of unreinforced masonry walls using FRP. *Composites Part B: engineering*, 37 (2-3), 148-162.
5. Federal Emergency Management Agency (2007). *Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Non-structural Components (FEMA, 461)*. Washington, D.C.
6. Ingeominas (1986). *El sismo de Popayán de marzo 31 de 1983*. Bogotá, D.C.: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras.
7. Ingeominas (1999). Terremoto del Quindío: enero 25 de 1999. Informe Técnico Preliminar N.º 2 Armenia, Quindío (pp. 32). Bogotá, D.C.
8. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (1998). *Ingeniería civil y arquitectura. Cementos. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado (NTC 220)*. Bogotá, D.C.: Icontec.
9. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2003a). *Concretos. Métodos de ensayo para determinar la evaluación en laboratorio y en obra, de morteros para unidades de mampostería simple y reforzada (NTC 3546)*. Bogotá, D.C.: Icontec.
10. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2003b). *Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muretes de mampostería (NTC 3495)*. Bogotá, D.C.: Icontec.
11. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2005). *Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla (NTC 4017)*. Bogotá, D.C.: Icontec.
12. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2010). *Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto (NTC 673)*. Bogotá, D.C.: Icontec.
13. Klingner, R. (2006). Behavior of masonry in the Northridge (US) and Tecoman-Colima (Mexico) earthquakes: Lessons

learned, and changes in US design. *Construction and Building Materials*, 20(4), 209-219.

14. López, H. (2012). *Comportamiento de muros diafragma en mampostería de concreto reforzados con tejidos de FRP*. Tesis de maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C.

15. Santa María, H. & Alcaíno, P. (2008). *Resistencia al corte de muros de albañilería reforzados exteriormente con fibras*. Paper presented at the XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Santiago, Chile.

16. Santa María, H. & Alcaíno, P. (2011). Repair of in-plane shear damaged masonry walls with external FRP. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1172-1180.

17. Schwegler, G. (1995). *Masonry Construction Strengthened with Fiber Composites in Seismically Endangered Zones*. Paper presented at the Tenth European Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam, Netherlands.

18. Sika Colombia S.A. (2012). *Manual de productos 2012*. En Sika Colombia S.A. (ed.) (2012 ed., pp. 686). Bogotá, D.C.: Sika Colombia S.A.

19. Tumialan, G., Vatovec, M. & Kelley, P. (2009). FRP Composites for Masonry Retrofitting: Review of Engineering Issues, Limitations and Practical Applications. *Structure Magazine*, 12-14.

20. Valluzzi, M., Tinazzi, D. & Modena, C. (2002). Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates. *Construction and Building Materials*, 16 (7), 409-416.