

# Comportamiento a flexión pura de muros de mampostería en arcilla, reforzados con barras de FRP

## Out of plane flexural behavior of clay masonry walls reinforced with FRP bars

LUIS ALFONSO QUINTANA RUIZ<sup>1</sup> - NANCY TORRES CASTELLANOS<sup>2</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.

2. Magíster en Estructuras y doctora en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales. Profesora asociada de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

luis.quintana-r@mail.escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 16/06/2018 Aceptado: 31/07/2018

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

En razón del interés en el medio colombiano por estar a la vanguardia con las últimas tecnologías y materiales disponibles, se planteó en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito un proyecto de investigación con el fin de evaluar la capacidad a flexión de la mampostería de arcilla, reforzada internamente con barras de FRP ante cargas perpendiculares al plano y dar los primeros pasos para generar un protocolo preliminar de diseño para el futuro, basado en el ACI 440 y el TMS402/ACI 530, dado que aún no existe guía de diseño que contemple el comportamiento de mampostería ante esta solicitud. El programa experimental contempló la construcción y el ensayo de 16 muros de mampostería en arcilla, el reforzamiento de siete muros con barras de GFRP (*Glass fiber reinforced polymer*), los siguientes siete se reforzaron con barras de CFRP (*Carbon fiber reinforced polymer*) y los dos restantes se reforzaron con barras de acero convencional, para comparar los resultados. Las variables que se tuvieron en cuenta en la investigación fueron las dimensiones del muro en planta y las cuantías de refuerzo.

Los muros se ensayaron en un marco de prueba con una longitud entre apoyos de 2030 mm y con dos cargas distribuidas en los tercios a lo largo del muro, buscando un comportamiento de flexión pura en el tercio central.

Se observó un comportamiento muy similar del modelo analítico, comparado con los resultados experimentales para estados de carga de servicio (deflexiones). En cuanto a las cargas últimas, se encontraron diferencias entre la teoría y los ensayos.

**Palabras claves:** mampostería, flexión, flexión perpendicular al plano, flexión pura, barras de FRP

### Abstract

Due to the interest in the Colombian environment to be at the vanguard with the latest available technologies and materials, a research project was proposed to evaluate the flexion capacity of clay masonry, reinforced with FRP bars at plane-perpendicular loads, and take the first step to generate a preliminary design protocol for the future, based on ACI 440 and TMS402 / ACI 530, due to the lack of a design guide to assess the behavior of masonry under this approach. The experimental program included the construction and test of 16 masonry walls in clay, seven walls were reinforced with Glass fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars, and the other seven were reinforced with Carbon fiber Reinforced polymer (CFRP), and the remaining two were reinforced with conventional steel rods. The variables that were taken into account were the dimensions of the wall in plan and rebar.

The walls were tested on a test frame whose length between supports was 2,030 mm and two concentrated loads in the thirds along the wall, looking for a pure bending behavior in the central third.

A very similar behavior of the analytical model was observed, compared to the experimental results for service loads. As for the latest loads, differences were found between theory and tests.

**Keywords:** masonry, flexion, out of plane flexion, uniform flexion, FRP bars.

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha venido implementando el uso de barras de fibras (carbono, vidrio y aramida) como refuerzo principal en elementos de concreto en obras de infraestructura a escala internacional. De antemano se sabe que el comportamiento mecánico de estos polímeros reforzados con fibra no tiene un modo de falla dúctil, y por el contrario su modo de falla es de tipo frágil. En el medio colombiano existen empresas que han iniciado la comercialización de este producto, por lo que se ha despertado el interés de estudiar las propiedades mecánicas de este material y el comportamiento de elementos estructurales al ser reforzados con estas barras. Adicionalmente, dado que en Colombia predominan las obras en mampostería, también es interesante conocer la interacción que tienen estas barras al usarlas como refuerzo interno y su comportamiento estructural.

En el ámbito internacional ya se cuenta con guías para diseñar elementos de concreto reforzados con barras de FRP (*Fiber reinforced polymer*), pero aún no se cuenta con guías para el diseño de mampostería nueva reforzada con este material. Entre los países que han investigado el comportamiento de elementos estructurales reforzados internamente con barras de FRP se encuentran algunos europeos, Canadá y Estados Unidos, e incluso ya está anexo a sus reglamentos de concreto, como en el caso de Canadá con el código CAN/CSA S806 y en Estados Unidos con el comité del ACI 440.1.

Pese a que este material no se ha estudiado tanto como el acero durante varias décadas, se sabe que tiene suficientes ventajas en lo que respecta al acero estructural, como su bajo peso y su alta resistencia a la tensión y a la fatiga, aunque también tiene algunas desventajas, entre ellas su baja resistencia al impacto, su frágil comportamiento mecánico, además de su bajo módulo de elasticidad.

Debido a que hoy en día se carece de guías o reglamentos para el diseño de muros de mampostería reforzados con barras de FRP, en la Escuela Colombiana de Ingeniería se planteó hacer una investigación como un primer paso para hacer recomendaciones de diseño de la mampostería reforzada con barras de FRP ante sollicitaciones fuera del plano.

Para la realización de la investigación se desarrolló un programa experimental, el cual se basó primero en determinar de manera teórica la resistencia a la flexión

perpendicular al plano de los muros reforzados con barras de FRP, combinando las metodologías descritas en el TMS402/ACI 530 y el código ACI 440.1R, y establecer también las deflexiones que éstos presentaban en diferentes estados de carga. Posteriormente se hicieron los ensayos experimentales de los muros y se analizaron los resultados.

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

### Metodología

En la construcción de los muros se utilizaron unidades de arcilla y se determinaron las dimensiones, cuantías y tipos de refuerzo que hay que usar en los muros. Posteriormente se procedió a caracterizar los materiales, para definir sus propiedades mecánicas basados en las respectivas normas ASTM. Una vez definidas estas variables, se calcularon teóricamente las capacidades y las deflexiones de los muros bajo cargas fuera del plano, utilizando las metodologías propuestas por el ACI 440 y el TMS402/ACI 530.

### Propiedades de los materiales

Para el mortero de pega se seleccionó un mortero de  $f'_{cp}$  de 17,5 MPa, en tanto que el *grout* de relleno de las celdas  $f'_{cr}$  se diseñó para 21 MPa: las unidades de arcilla que conformaron los muretes o prismas para el ensayo de compresión (norma NTC 3495) fueron unidades de la Ladrillera Santafe (ladrillo portante 30). A las barras de FRP, importadas de Italia (Sireg S. p A.), se les hicieron ensayos de tensión (norma ASTM D7205).

Para calcular la resistencia a compresión  $f'_m$  de la mampostería, se construyeron seis muretes de 290 mm de altura y 440 mm de ancho, de los cuales a tres se les inyectó *grout* de relleno en todas las celdas y los tres restantes se dejaron vacíos. De los ensayos se determinó la resistencia a la compresión de la mampostería  $f'_m = 13,7$  MPa, el módulo de elasticidad  $E_m = 6285$  MPa y la deformación unitaria última  $\epsilon_{mu} = 0,0023$ .

Para caracterizar las barras de FRP y brindar el anclaje suficiente en sus extremos, se cortaron tubos de acero de 450 mm de longitud, con un diámetro externo de 40 mm y un espesor de 4 mm, a los cuales se les soldaron arandelas en ambos extremos; estas arandelas tenían un diámetro interno de 12 mm y un diámetro externo de 40 mm (recomendación de la norma ASTM

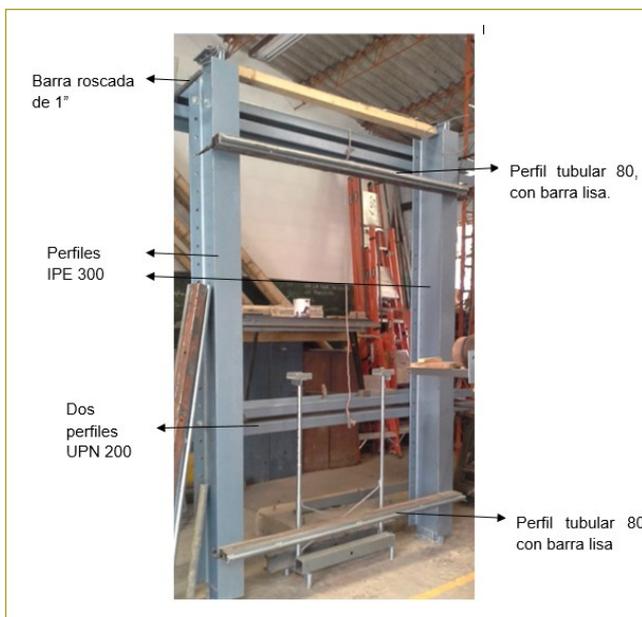
D7205). Una vez que se soldó la arandela al tubo, se colocó dentro la barra de FRP que hay que ensayar y se centró por medio de las arandelas; por último, se inyectó un mortero expansivo (CRAS TX40T232) en un caso y un epóxico adherente (Hilti RE500) en el otro, para generar la adherencia en la barra y la tubería. Los resultados de las propiedades mecánicas se resumen a renglón seguido (tabla 1).

**Tabla 1**  
Propiedades mecánicas de las barras de FRP

Propiedades mecánicas FRP		
	GFRP	CFRP
F <sub>fu</sub> (MPa)=	916	2300
ε <sub>fu</sub> =	0,0156	0,0180
E <sub>f</sub> (MPa)=	55510	126658

### Marco de prueba

Para realizar los ensayos de los muros de mampostería, se construyó un marco de prueba, el cual funcionaba como apoyo para los muros. A continuación se presenta un esquema del marco de prueba (figura 1).



**Figura 1.** Marco de prueba.

### Nomenclatura de muros

La nomenclatura de los muros, su ancho y el refuerzo colocado se pueden ver en la tabla siguiente (tabla 2).

Los primeros siete muros llevan la letra “G”, la cual indica “Glass” y representa el refuerzo con barras de GFRP.

Los siguientes siete muros presentan en su nomenclatura la letra “C”, que indica “Carbón” y representa el refuerzo con barras de CFRP. Los últimos dos muros muestran la letra “S”, la cual hace referencia a “STEEL” e indica que éstos se reforzaron con barras de acero convencional. Para todos los muros reforzados con FRP se utilizaron barras de 12 mm de diámetro.

**Tabla 2**  
Nomenclatura de los muros

Muro	Nomenclatura	Ancho mm	Refuerzo
M1	M1-G	1045	4 barras de GFRP
M2	M2-G	1490	4 barras de GFRP
M3	M3-G	1345	3 barras de GFRP
M4	M4-G	745	1 barra de GFRP
M5	M5-G	890	1 barra de GFRP
M6			1 barra de GFRP
M7	M7-G	1490	1 barra de GFRP
M8	M8-C	1045	4 barras de CFRP
M9	M9-C	1490	4 barras de CFRP
M10	M10-C	1345	3 barras de CFRP
M11	M11-C	745	1 barra de CFRP
M12	M12-C	890	1 barra de CFRP
M13	M13-C	1190	1 barra de CFRP
M14	M14-C	1490	1 barra de CFRP
M15	M15-S	1490	4 barras de acero
M16	M16-S	1490	3 barras de acero

Más adelante se pueden ver los esquemas de los muros, con las dimensiones en planta y el refuerzo longitudinal, en los que se indica qué celdas van con refuerzo y *grout*, y qué tipo de refuerzo es. Los muros del 1 al 7 tienen la misma configuración geométrica y de refuerzo que los muros del 8 al 14, la diferencia radica en que los primeros llevan refuerzo en GFRP y los otros tienen refuerzos de CFRP.

Los últimos dos muros, el 15 y el 16, están reforzados con barras de acero convencional de media pulgada de diámetro, los cuales se construyeron con el fin de comparar los muros reforzados con FRP y con acero (figura 2).

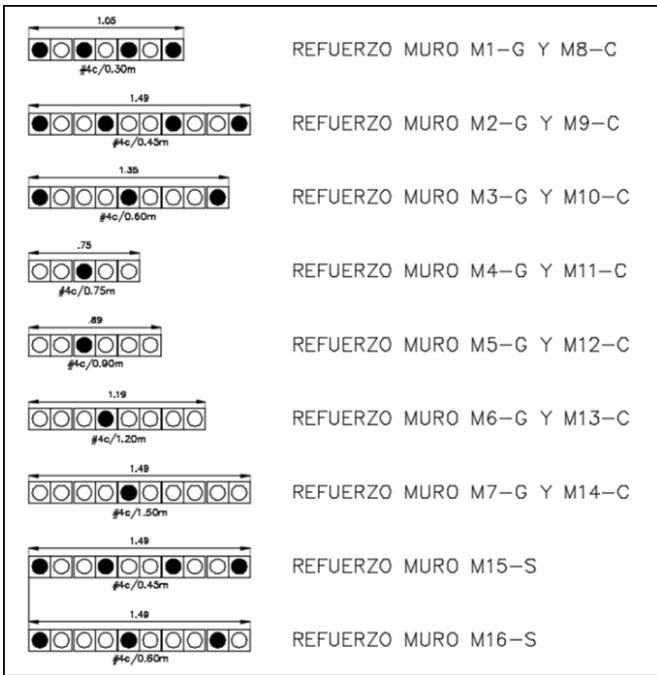


Figura 2. Configuración dimensional y de refuerzo de los muros.

Proceso constructivo

Para el soporte de los muros de mampostería se construyeron vigas de cimentación, cuyos planos se pueden observar seguidamente (figura 3).

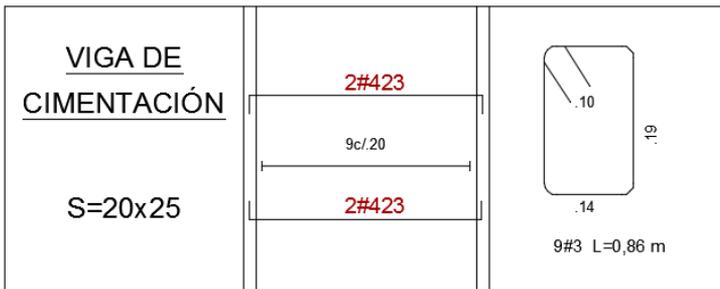


Figura 3. Esquemas del despiece de la viga de cimentación de los muros.

Después de la construcción de la viga se procedió a levantar los muros, y luego se procedió a instrumentar las barras de FRP colocando deformímetros electrónicos (*strain gauge*) con el fin de registrar las deformaciones unitarias durante el proceso de ensayo y evaluar con ellas los esfuerzos a que se veían sometidas las barras. Para evitar el contacto directo entre el *grout* de relleno y los deformímetros electrónicos, éstos se sellaron y prote-



Figura 4. Construcción de los muros.

gieron con cinta (figura 4). A continuación se muestra la instrumentación de las barras (figura 5).



Figura 5. Instrumentación de las barras.

Posteriormente, se colocó la barra dentro de la celda y se inyectó el mortero de relleno (figura 6).



Figura 6. Ubicación de la barra e inyección del mortero de relleno.

Por último, se llevó el muro al marco de prueba y se instrumentó con transductores de desplazamiento LVDT en la cara sometida a tensión, y se instrumentó

la cara a compresión del muro de mampostería mediante un *strain gauge* que se ubicaba enfrente al de la barra de FRP (figura 7).



**Figura 7.** Instrumentación en las caras de tensión y compresión del muro.

### RESISTENCIA TEÓRICA A FLEXIÓN PERPENDICULAR AL PLANO DE LA MAMPOSTERÍA

Para calcular el momento resistente ante cargas perpendiculares de la mampostería, primero se debe determinar si su modo de falla es rotura en el FRP o aplastamiento en la mampostería, dependiendo de la cantidad de refuerzo que se ponga en el muro. Si la cantidad de refuerzo es mayor que la cuantía balanceada, se espera una falla de aplastamiento en la mampostería, y en caso de que el refuerzo colocado no supere la cuantía balanceada, se espera que la falla se presente por rotura en el FRP.

Se debe tener en cuenta que la cuantía balanceada corresponde a la cantidad de refuerzo necesaria para que se alcance la rotura en el FRP simultáneamente con el aplastamiento en la mampostería.

A continuación se presentan las expresiones para calcular el momento resistente de un muro de mampostería cuando su modo de falla es aplastamiento en la mampostería y rotura en el FRP.

### Momento resistente de un muro que falla por aplastamiento en la mampostería

Cuando la cuantía de refuerzo es mayor que la cuantía balanceada, la mampostería alcanza su deformación unitaria última antes que el FRP. El esquema de esfuerzos y deformaciones unitarias para aplastamiento en la mampostería se presenta en la figura siguiente (figura 8).

De la compatibilidad de deformaciones y del equilibrio de fuerzas se llega a la expresión de momento resistente que se expone en la siguiente ecuación:

$$Mn = \alpha 1 \times f' m \times \beta 1 \times c \times b \times \left( d - \frac{\beta 1 \times c}{2} \right) \quad (1)$$

Donde:

$Mn$ : momento nominal.

$f'm$ : resistencia a la compresión en la mampostería.

$c$ : profundidad del eje neutro del muro.

$b$ : ancho del muro

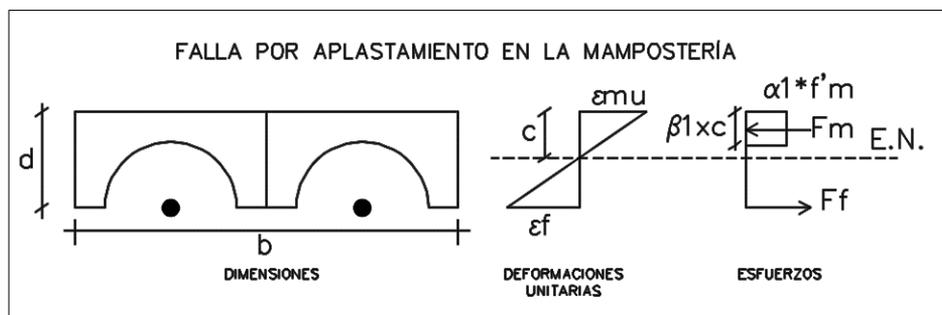
$d$ : profundidad efectiva del muro

$\alpha 1$ : relación del promedio de esfuerzos del bloque de compresiones ACI 530

$\beta 1$ : factor para calcular la altura del bloque de compresiones

### Momento resistente de un muro que falla por rotura en el FRP

Si la cuantía de refuerzo es menor que la cuantía balanceada, la falla se presenta por rotura en las barras de FRP, dado que alcanza su deformación unitaria última. El ACI 440.1R permite utilizar de manera conservadora la deformación unitaria última de la mampostería para el cálculo del momento resistente.



**Figura 8.** Esquema de esfuerzos y deformaciones unitarias para aplastamiento en la mampostería.

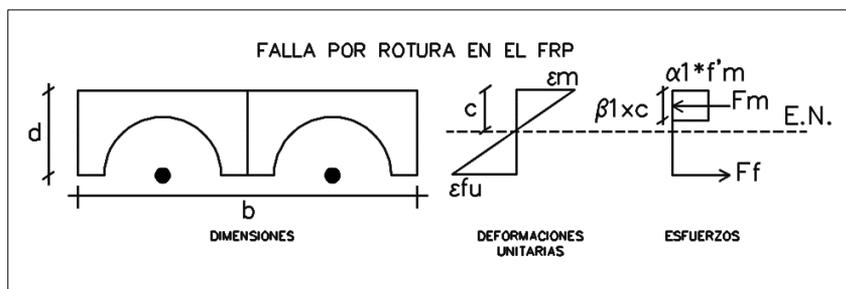


Figura 9. Esquema de esfuerzos y deformaciones unitarias para rotura en el FRP.

El esquema de esfuerzos y deformaciones unitarias para rotura en el FRP se presenta en la figura anterior (figura 9).

De la compatibilidad de deformaciones y del equilibrio de fuerzas se llega a la expresión de momento resistente que se expone en la ecuación 2:

$$Mn = Af \times f_{fu} \times \left( d - \frac{\beta 1 \times c}{2} \right) \quad (2)$$

Donde:

Af: área de refuerzo.

Ffu: resistencia a la rotura barra FRP.

En la tabla siguiente se presenta el resumen de resultados de cálculos de momentos nominales teóricos, el modo de falla y el valor del eje neutro de la sección de los catorce muros reforzados con barras de FRP (tabla 3).

### CÁLCULO TEÓRICO DE LAS DEFLEXIONES

Para determinar las deflexiones en los muros, se utilizaron dos metodologías; la primera, propuesta por Branson, la cual se basa en determinar una inercia efectiva enfocándose en la rigidez, y la metodología de Bischoff, que se fundamenta en determinar una inercia efectiva enfocándose en la flexibilidad.

La determinación de la inercia efectiva con el método de Branson se muestra en la ecuación 3:

$$I_e = \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \times \beta d \times I_g + \left( 1 + \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right) \times I_{cr} \leq 1,0 \quad (3)$$

Donde:

Ie: momento de inercia efectivo.

Mcr: momento de agrietamiento.

Tabla 3  
Resultados de resistencia teórica de muros reforzados con FRP

Muro	Cant.	Af	b	d	$\rho$	$\rho b$	Tipo de falla	c	Mn
		(mm <sup>2</sup> )						(mm)	(mm)
M1-G	4#4	507	1050	72,5	0,00666	0,00123	Aplastamiento	19,33	11,53
M2-G	4#4	507	1490	72,5	0,00469	0,00123	Aplastamiento	16,63	14,31
M3-G	3#4	380	1350	72,5	0,00388	0,00123	Aplastamiento	15,31	12,03
M4-G	1#4	127	750	72,5	0,00233	0,00123	Aplastamiento	12,18	5,42
M5-G	1#4	127	890	72,5	0,00196	0,00123	Aplastamiento	11,27	5,98
M6-G	1#4	127	1190	72,5	0,00147	0,00123	Aplastamiento	9,85	7,05
M7-G	1#4	127	1495	72,5	0,00117	0,00123	Rotura de FRP	9,32	7,98
M8-C	4#4	507	1050	72,5	0,00666	0,00043	Aplastamiento	27,01	15,34
M9-C	4#4	507	1490	72,5	0,00469	0,00043	Aplastamiento	23,53	19,39
M10-C	3#4	380	1350	72,5	0,00388	0,00043	Aplastamiento	21,78	16,45
M11-C	1#4	127	750	72,5	0,00233	0,00043	Aplastamiento	17,56	7,56
M12-C	1#4	127	890	72,5	0,00196	0,00043	Aplastamiento	16,30	8,39
M13-C	1#4	127	1190	72,5	0,00147	0,00043	Aplastamiento	14,34	9,99
M14-C	1#4	127	1490	72,5	0,00117	0,00043	Aplastamiento	12,97	11,41

Ma: momento actuante.

Ig: inercia del muro.

Icr: inercia con la sección agrietada del muro.

Bd: factor que tiene en cuenta la adherencia entre la barra y el concreto.

Para determinar la inercia efectiva por el método de Bischoff, se aplica la siguiente ecuación (ecuación 4).

$$le = \frac{lcr}{1 - \gamma \times \left(\frac{Mcr}{Ma}\right)^2 \times \left(1 - \frac{lcr}{lg}\right)} \quad (4)$$

Donde:

$\gamma$ : factor que depende de la carga y de las condiciones de contorno en la zona no fisurada del miembro.

## RESULTADOS

De los resultados obtenidos de los LVDT y la carga reportada en la celda de carga, se construyeron las gráficas de los muros. En la figura siguiente se presenta la curva de carga contra deflexión del muro M2-G, donde se pueden observar los ciclos de carga y descarga que se realizaron durante el ensayo; en las ordenadas se grafican las cargas y en las abscisas, las deflexiones en el

centro de la altura del muro. Como se puede observar, la gráfica tiene una pendiente alta en el primero y parte del segundo ciclo (donde el muro aún no se ha fisurado). Una vez que el muro se fisura la pendiente disminuye y ésta se mantiene hasta la falla del muro. También se puede apreciar que después que se descarga el muro éste tiende a recuperar su posición inicial, simulando un comportamiento elástico (figura 10).

A continuación se presentan las curvas envolventes de todos los muros, reforzados con barras de GFRP y CFRP.

### Muros reforzados con barras de GFRP

Las curvas de la envolvente de momento contra deflexión se presentan más adelante (figura 11). Se muestran los resultados de todos los muros reforzados con barras de GFRP, así como muros que están reforzados con barras de acero convencional para comparar el comportamiento en una misma escala.

Igualmente, se puede observar que en las curvas para todos los muros de mampostería reforzados con FRP se presenta una recta con una pendiente alta hasta el momento de agrietamiento, de allí en adelante la pendiente disminuye y se mantiene hasta la falla del muro con un comportamiento lineal elástico.

En las curvas de los muros que contenían acero se pueden observar tres pendientes: la primera se presenta

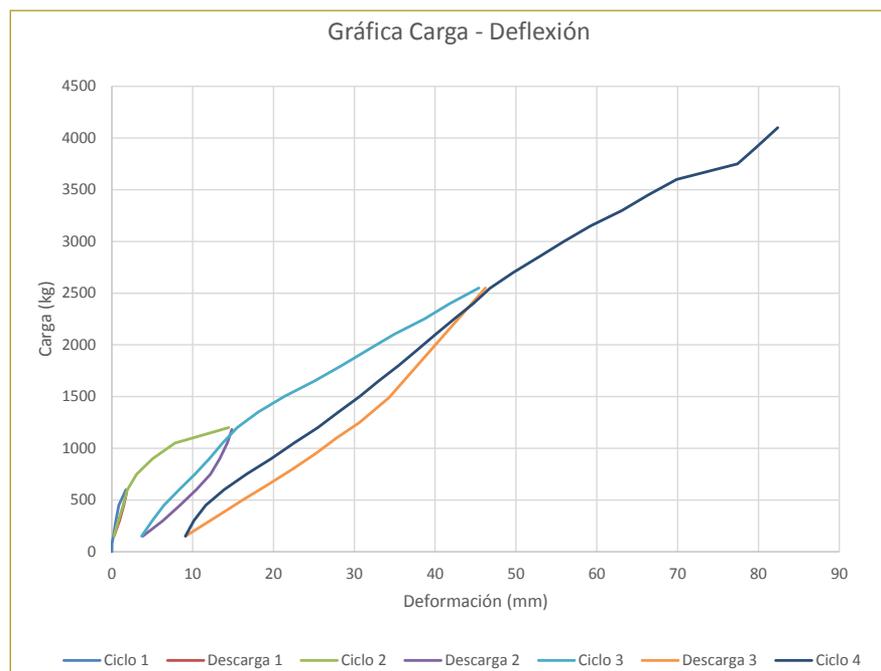


Figura 10. Curva de carga contra deflexión muro M2-G.

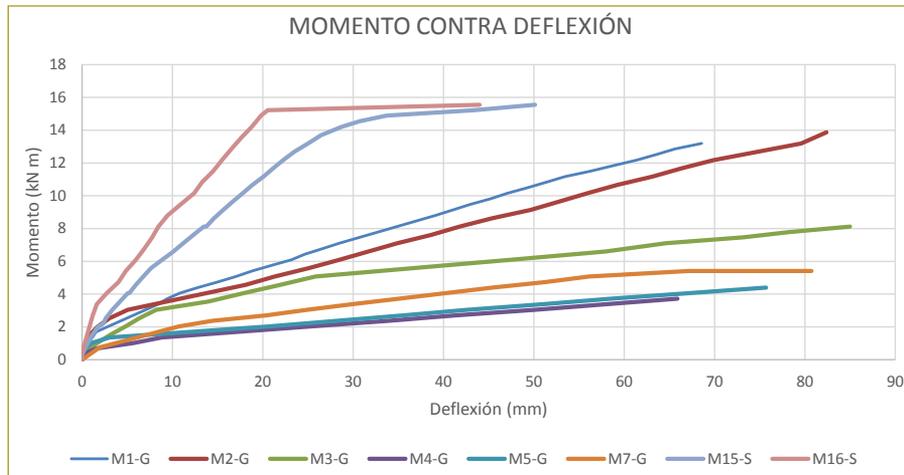


Figura 11. Curvas de momento contra deflexión de los muros reforzados con GFRP.

hasta el momento de agrietamiento del muro, la segunda hasta el punto de fluencia del acero y de allí en adelante una recta sin pendiente hasta la falla del muro.

el momento de agrietamiento y otra pendiente menor a partir de dicho momento.

A continuación se presentan los modos de falla típicos en los muros (figura 13).

### Muros reforzados con barras de GFRP

Con base en los resultados obtenidos de los deformímetros electrónicos y la carga registrada en la celda de carga se construyó la envolvente de carga de los muros (figura 12). Se muestran los resultados de todos los muros reforzados con barras de CFRP, así como los muros que están reforzados con barras de acero convencional para comparar el comportamiento en una misma escala. Al igual que los muros reforzados con barras de GFRP, en las gráficas se registra un comportamiento linealmente elástico hasta la falla, con una pendiente hasta

### Comparación de los resultados

En la figura siguiente se aprecian las relaciones entre los momentos calculados teóricamente y los experimentales. La recta representa el valor teórico del momento y los puntos representan los resultados experimentales.

Las observaciones 1 y 2 se refieren a:

- *Observación 1.* Indica que el ensayo fue adecuado y que los resultados se admiten, aunque el muro M9-C tuvo una carga experimental un poco inferior a la

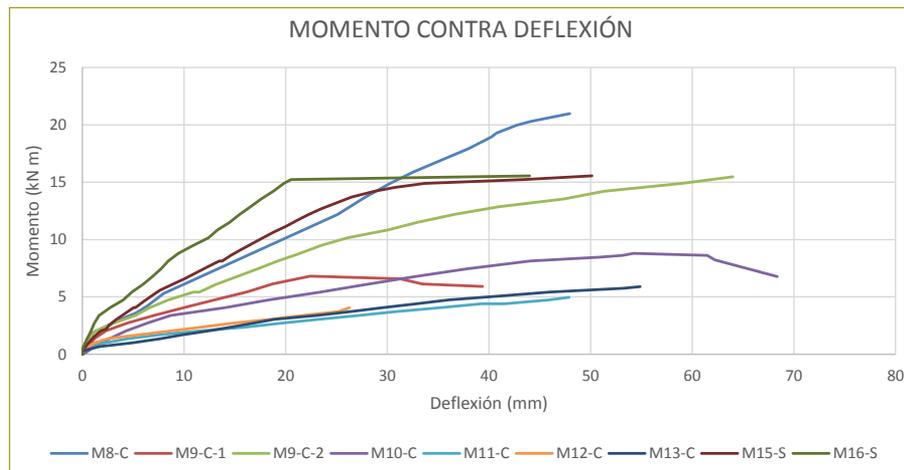


Figura 12. Curvas de momento contra deflexión de los muros reforzados con CFRP.

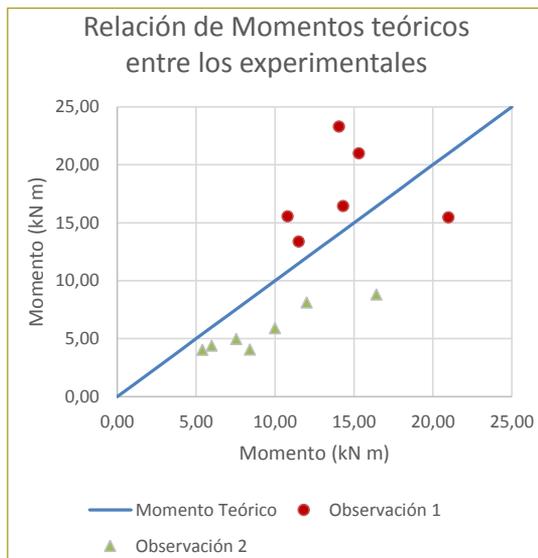


**Figura 13.** Modos de falla típicos en los muros.

carga teórica y esto se debe a que durante el ensayo se alcanzó una deformación muy grande (la cual ofreció inestabilidad y posible colapso del muro) y por motivos de seguridad no se continuó aumentando la carga.

- *Observación 2.* Hace referencia a que el ensayo no alcanzó la carga teórica debido a que posiblemente no hubo suficiente adherencia entre los materiales (*grout* de relleno, barras de FRP y unidades de arcilla).

Cabe anotar que más adelante se muestran los resultados de resistencia última de los muros, y que el 57 % de ellos no alcanzó el resultado esperado, por los motivos que se presentan en las conclusiones del documento. Sin embargo, los muros se revisaron en estados límites de servicio, donde su carga teórica resistente se factora por 0,625 (lo cual simula las combinaciones de servicio), y se presenta la gráfica de momento contra deflexión para uno de ellos, resultados que se ajustan



**Figura 14.** Momentos experimentales máximos de muros en relación con los teóricos.

satisfactoriamente a los teóricos para todos los muros (figura 14).

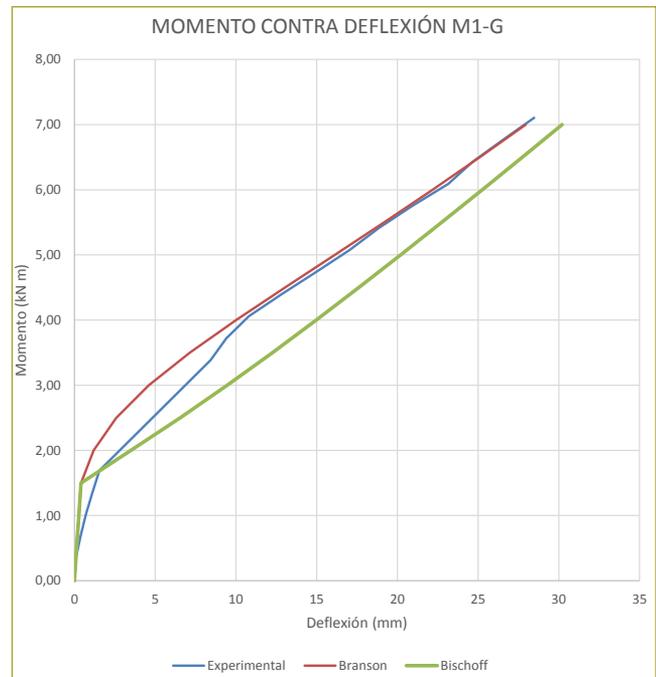
### Comparación de deflexiones teóricas contra experimentales

Para comparar las deflexiones calculadas teóricamente contra las experimentales, se grafican en un mismo sistema coordinado la curva experimental y la curva teórica de momento flector contra la deflexión en el centro del muro.

La curva experimental se obtuvo de los resultados leídos en los transductores de desplazamiento (LDVT) y de la carga aplicada en los tercios de la luz mediante el gato mecánico. Para la construcción de la curva teórica se utilizó la metodología del cálculo de deflexiones propuesta por Branson, al igual que el método del cálculo de la inercia efectiva propuesto por Bischoff.

A continuación se presentan las curvas teóricas por el método de Branson y por la metodología de Bischoff, y la curva experimental del muro M1-G, el cual está reforzado con barras GFRP (figura 15).

La curva experimental se ajusta bien a los resultados teóricos propuestos por el método de Branson, y está por encima de la curva teórica propuesta por Bischoff.



**Figura 15.** Curva experimental y curva teórica (Branson y Bischoff) de momento contra deflexión del muro de mampostería de concreto M1-G.

## CONCLUSIONES

- Como se muestra tanto teórica como experimentalmente, los muros reforzados con barras de FRP experimentan deflexiones mayores que los muros reforzados con acero convencional (debido a su bajo módulo de elasticidad). Por tal motivo, se debe prestar especial atención a los estados límites de servicio en el diseño de estos muros, ya que las deflexiones son altas en estados de carga bajos.
- Los momentos o cargas resistentes teóricas estuvieron por encima de los resultados experimentales en la mayoría de los ensayos, debió posiblemente a dos motivos: primero a que las barras tenían un corrugado con una capa de arena, por lo que la adherencia entre el mortero de relleno y la barra se perdía en cierto estado de carga, lo cual hacía que el muro perdiera resistencia, o como segunda hipótesis podría pensarse que la adherencia entre el *grout* de relleno y la unidad de mampostería posiblemente no era la más óptima. Y segundo, las deflexiones en estados de carga altos (tercer y cuarto ciclo de carga) presentaban deformaciones muy altas en el muro, lo cual hacía que los ladrillos se separaran del mortero de pega y que el muro no pudiera absorber más carga.
- Cuando se compara el diseño de muros con acero convencional y el de muros reforzados con FRP se debe prestar especial atención a los estados límites de servicio, ya que los muros reforzados con FRP presentan deflexiones mayores y, por lo tanto, anchos de fisuras mayores que los de acero bajo cargas relativamente bajas (para el primer y segundo ciclo de carga). En cuanto al estado límite de resistencia, la mampostería reforzada con FRP podría tener valores mayores que si se reforzara con acero convencional y si se mejorara la adherencia entre mortero de pega y las unidades de arcilla, y entre barras y mortero de relleno; esto demuestran los cálculos teóricos.
- Los muros reforzados con acero tienen deflexiones menores que los muros reforzados con FRP para un mismo estado de carga, y además presentan menor

cantidad de fisuras y anchos de fisuras inferiores a los muros reforzados con barras de FRP.

- Los resultados experimentales muestran que los muros con cuantías superiores a 0,0047 alcanzan momentos similares a los momentos teóricos, esto para los muros reforzados con GFRP y con CFRP. Los muros que tenían cuantías inferiores estuvieron lejos de las cargas teóricas, lo cual indica que aun cuando el modo de falla sea aplastamiento en la mampostería, se debería tener una mínima cantidad de refuerzo para que el comportamiento sea el que indica la teoría.
- Los muros reforzados con una sola barra fueron los que indicaron un comportamiento bastante inferior al esperado por los cálculos teóricos. Claramente, estos muros eran los que tenían las cuantías más bajas y fueron los que tuvieron un comportamiento inferior al teórico en cuanto a resistencia.
- La metodología de Branson para el cálculo de las deflexiones de los muros de esta investigación subestima el valor de la deflexión de los muros, y aunque la metodología de Bischoff ajusta un poco mejor los resultados, las deflexiones experimentales de los muros resultaron mayores que las deflexiones teóricas calculadas mediante estos dos métodos.

## REFERENCIAS

- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Bogotá: AIS.
- American Concrete Institute, ACI Committee 440.
- American Concrete Institute, ACI Committee 530.
- 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.
- 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.
- American Society for Testing and Materials (2011). Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars (ASTM D7205).
- Nanni, A., Luca A. & Zadeh, H. (2014). Reinforced Concrete with FRP Bars Mechanics and Design. CRC Press. Taylor & Francis Group.