

Comportamiento ante carga perpendicular al plano de muros de mampostería en concreto, reforzados con barras de FRP

Out-of-plane perpendicular load behavior of concrete masonry walls, reinforced with FRP bars

DANIEL OTÁLORA BARROS¹ - NANCY TORRES CASTELLANOS²

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

2. Doctora en Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia.

daniel.otalora@mail.escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 02/02/2019 Aceptado: 20/02/2019

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Se planteó un programa experimental para evaluar la capacidad ante cargas perpendiculares al plano de muros de mampostería reforzados internamente con barras de polímeros reforzados con Fiber Reinforced Polymer (FRP), con el fin de generar un protocolo de diseño preliminar para evaluar la capacidad teórica de dichos muros, tomando como base los requisitos especificados en el ACI 440.1R-15 y el TMS 402-16. Dentro del programa experimental, se construyeron y ensayaron catorce muros reforzados internamente con barras de FRP y dos muros reforzados con acero convencional. Se midieron deformaciones unitarias en las barras de refuerzo mediante deformímetros electrónicos e igualmente se registraron las deflexiones en la mitad de la altura de los especímenes mediante transformadores diferenciales lineales variables. Los muros reforzados con FRP, al ser sometidos a su máxima capacidad, presentaron un comportamiento de deflexiones elásticas y parcialmente recuperables hasta la falla; tienen la ventaja de que se pueden reparar debido a que su material de refuerzo carecía de una zona de plasticidad. El modo de falla presentado en los muros reforzados con FRP fue por aplastamiento en la mampostería, coincidiendo con la falla teórica esperada.

Palabras claves: mampostería, fibras reforzadas con polímeros (FRP), carga perpendicular al plano.

Abstract

A program was proposed to evaluate the capacity of loads perpendicular to the plane of masonry walls internally reinforced with FRP bars, to generate a preliminary design protocol to evaluate the theoretical capacity of these walls, based on the requirements specified in: ACI 440.1R-15 and TMS 402-16. Within the experimental program, 14 walls reinforced with FRP and two walls reinforced with conventional steel were constructed and tested. Unit deformations were measured on the reinforcing bars and walls by gauges and the deflections were recorded at half the height of the specimens by LVDT. FRP-reinforced walls, submitted to their maximum capacity presented a behavior of elastic deflections and partially recoverable until the fault. They have the advantage of being able to be repaired, because its reinforcing material does not show a zone of plasticity. The failure mode presented in the reinforced walls with FRP was by masonry crushing, coinciding with the expected theoretical failure.

Keywords: masonry, fiber reinforced polymer (FRP), out of plane load behavior.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, ni el título C ni el título D del Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes NSR-10 cubren los diseños de concreto ni de muros de mampostería utilizando como refuerzo interno los FRP; sin embargo, dadas las ventajas que presentan estos materiales en varios países se ha propagado su empleo para el reforzamiento de algunos tipos de estructuras.

El uso de los FRP ya está normalizado en países como Canadá con el CAN/CSA S806 y en Estados Unidos con el comité ACI 440, donde se han desarrollado guías para su uso, entre ellas la ACI 440.1R-15, la cual tuvo su primera edición en el año 2002, y posteriormente se realizaron actualizaciones en el 2008 y el 2015; esta guía cubre el diseño de elementos de concreto reforzados con barras de FRP y es parte fundamental en el desarrollo de la presente investigación.

En Colombia, es frecuente el uso de la mampostería estructural para satisfacer las necesidades de la población, principalmente en edificaciones habitacionales, en muros de cerramiento, en muros de sótanos y en muros de contención. En el ámbito internacional no se encuentra información sobre el diseño de muros de mampostería reforzados con barras de FRP para estructuras nuevas, y dados los beneficios que presenta en lo que se refiere a baja densidad del material, alta relación entre su esfuerzo resistente y peso, alta resistencia a la corrosión, baja conducción térmica, nulo magnetismo, transparencia a las ondas de radar, aislantes, poco mantenimiento requerido, gran durabilidad y alta resistencia al impacto, este material se puede utilizar idealmente en plantas de procesos químicos, plantas de tratamiento de aguas residuales, instalaciones petroquímicas, plantas nucleares, instalaciones con equipos de resonancia magnética y estructuras en general que estén expuestas a agentes corrosivos.

En razón de estas múltiples ventajas, se evidenció la pertinencia de estudiar el comportamiento de muros de mampostería reforzados internamente con barras de FRP; por lo tanto, en la Escuela Colombiana de Ingeniería se planteó un programa experimental macro, donde inicialmente se evaluó el comportamiento de mampostería en concreto reforzada con barras de FRP (vidrio GFRP y carbono CFRP) para estructuras nuevas, ante cargas perpendiculares al plano.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para evaluar la capacidad de la mampostería ante estas solicitaciones, se realizó una aproximación con los requisitos de los códigos estadounidenses de diseño:

- TMS 402-16, para diseño y construcción de estructuras en mampostería, publicado por The Masonry Society y designado anteriormente como ACI 530.
- ACI 440.1R-15, para diseño y construcción de concreto reforzado con barras de FRP.

Los resultados obtenidos analíticamente se compararon con los resultados experimentales, para lo cual se ensayaron con diferentes cuantías de refuerzo, siete muros de mampostería en concreto reforzados con CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) siete muros reforzados con GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) y dos muros reforzados con barras de acero convencionales, cuya capacidad era igual a la presentada por el muro tipo 1, para un total de 16 muros. La longitud de los muros varió desde 1,0 m hasta 1,8 m, con cuantías del 0,13 al 0,45 %. Se utilizó un diámetro de 12,7 milímetros para las barras de GFRP y CFRP, y la denominación de las barras de acero fue la barra #4. Más adelante se presenta la disposición en planta de los muros, así como también las dimensiones y la ubicación de las barras de refuerzo (figura 1).

CÁLCULO DE CAPACIDAD RESISTENTE DE MUROS

Debido a la ausencia de un código de análisis y diseño para mampostería de concreto reforzada con FRP, para el cálculo analítico de la cuantía, la cuantía balanceada, el modo de falla esperado, la deformación unitaria en las barras, el momento resistente nominal, la carga de falla, el momento de agrietamiento y las deflexiones máximas en el muro, se siguieron las recomendaciones estipuladas en el ACI 440.1R-15, en tanto que las ecuaciones propuestas en el TMS 402-16 se siguieron para el cálculo de las propiedades de la mampostería.

Se realizó un programa de caracterización para conocer las propiedades de los materiales que conformaron los muros de mampostería reforzados con FRP se obtuvieron los siguientes resultados:

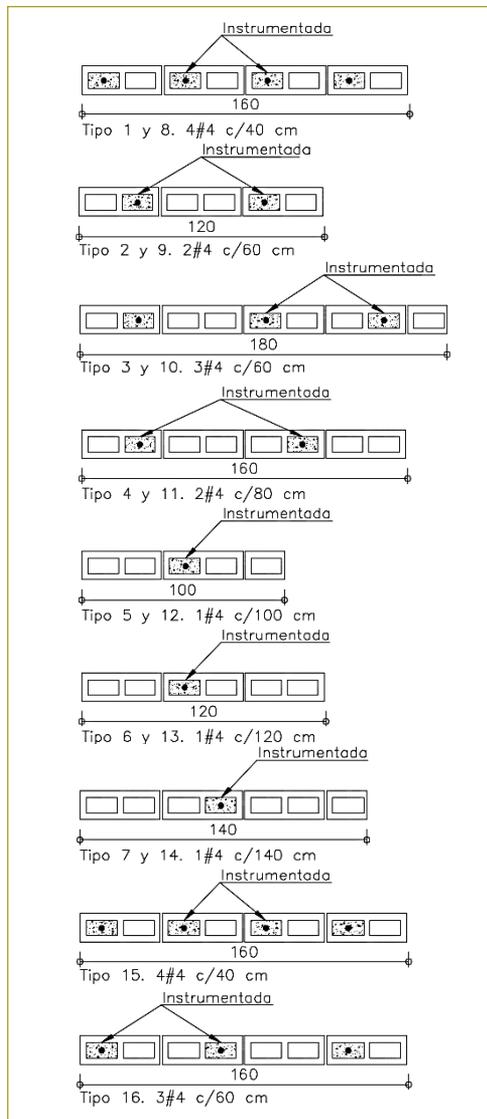


Figura 1. Configuración del refuerzo de los muros.

Fuente: Elaboración del autor.

• Mortero de pega	f'_c	23,0	MPa
• Mortero de relleno	f'_{cp}	29,6	MPa
• Mampostería en concreto	f'_m	10,0	MPa
• Barras GFRP	f_{fu}	916	MPa
• Barras CFRP	f_{fu}	2300	MPa

Para predecir el modo de falla, se procedió a revisar si la cuantía dispuesta en cada muro era mayor que la cuantía balanceada para determinar si la falla que se presentaba era por aplastamiento en la mampostería o por fluencia en las barras de refuerzo. Se calculó como se indica en la ecuación 1 y la ecuación 2.

$$\rho_b = (\alpha_1) \left(\frac{f'_m}{F_{fu}} \right) (\beta_1) \left(\frac{\epsilon_{mu}}{\epsilon_{mu} + \epsilon_{fu}} \right) \quad (1)$$

$$\rho = \frac{A_f}{(b)(d)} \quad (2)$$

Se calculó analíticamente la deformación unitaria en las barras de refuerzo mediante la ecuación 3.

$$\epsilon_f = \frac{(d-c)(\epsilon_{mu})}{c} \quad (3)$$

Se calcularon analíticamente las capacidades de los muros – momento nominal – sometidos a cargas perpendiculares al plano mediante la ecuación 4.

$$Mn = (\alpha_1)(f'_m)(b)(\beta_1)(c) \left\{ d - \left[(\beta_1) \left(\frac{c}{2} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

Se calculó analíticamente la deflexión máxima del muro mediante la ecuación 5.

$$\delta = \left(\frac{(23)(M_{cr})(L^2)}{(216)(E_m)(I_g)} \right) + \left(\frac{(23)(M_n - M_{cr})(L^2)}{(216)(E_m)(I_{cr})} \right) \quad (5)$$

Donde: $\alpha_1 = 0,8$, $\beta_1 = 0,8$, f'_m la resistencia a la compresión de la mampostería, F_{fu} la resistencia a la rotura de las barras de FRP, ϵ_{mu} la deformación unitaria de la mampostería, ϵ_{fu} la deformación unitaria de las barras de FRP, A_f el área de refuerzo, b el ancho del muro, d la distancia del eje de la barra a la fibra extrema en compresión del muro, c la profundidad eje neutro del muro, M_{cr} el momento de agrietamiento del muro, L el alto del muro, E_m el módulo de elasticidad de la mampostería, I_g la inercia bruta del muro e I_{cr} la inercia agrietada del muro.

En la tabla siguiente se muestran los resultados de la cuantía, la cuantía balanceada, la deformación unitaria de las barras de refuerzo, la deflexión en el centro vertical del muro y el momento nominal resistente (tabla 1).

Después de los análisis, se puede predecir que el modo de falla es por aplastamiento en la mampostería.

Una vez evaluadas las capacidades teóricas de los muros, se preparó el protocolo de ensayo, el cual se aplicó en cuatro etapas para ensayar cada muro y llevarlo en la etapa final hasta la falla. La base del protocolo fue

la carga máxima estimada y se aplicó en las siguientes cinco etapas:

1. Cargar el muro al 20 % de su resistencia admisible.
2. Descargar el muro al 5 % de su resistencia admisible.
3. Cargar el muro al 40 % de su resistencia admisible.
4. Descargar el muro al 5 % de su resistencia admisible.
5. Cargar el muro al 80 % de su resistencia admisible.
6. Descargar el muro al 5 % de su resistencia admisible.
7. Cargar el muro hasta llegar a la falla.

Tabla 1
Capacidades teóricas de los muros

Muro	A_f (mm ²)	ρ	ρ_b	ε_f (%)	δ (mm)	M_n (kN m)
Tipo 1	507	0,0045	0,0010	0,66	34,3	12,3
Tipo 2	253	0,0030	0,0010	0,83	44,3	7,9
Tipo 3	380	0,0030	0,0010	0,83	41,6	11,8
Tipo 4	253	0,0023	0,0010	0,98	48,9	9,4
Tipo 5	127	0,0018	0,0010	1,11	56,9	5,3
Tipo 6	127	0,0015	0,0010	1,23	60,5	5,9
Tipo 7	127	0,0013	0,0010	1,33	63,7	6,5
Tipo 8	507	0,0045	0,0003	0,42	26,1	16,0
Tipo 9	253	0,0030	0,0003	0,53	33,0	10,5
Tipo 10	380	0,0030	0,0003	0,53	31,6	15,7
Tipo 11	253	0,0023	0,0003	0,63	36,9	12,6
Tipo 12	127	0,0018	0,0003	0,72	42,3	7,3
Tipo 13	127	0,0015	0,0003	0,79	45,5	8,1
Tipo 14	127	0,0013	0,0003	0,87	48,3	8,9

Fuente: Elaboración del autor.

Siguiendo el protocolo de carga, se hicieron los ensayos a cada uno de los muros.

Posteriormente, con el fin de generar un circuito cerrado de reacción para someter los muros a flexión perpendicular al plano en su posición vertical, se usó el pórtico del actuador dinámico de la Escuela para reaccionar contra éste, un gato hidráulico de 100 kN que empujó dos vigas, simulando las cargas en los tercios de los muros de ensayo, contra un marco de soporte de los muros, el cual consistió en una estructura ensamblada con perfiles metálicos que se sujetaban por medio de barras de 1^{1/2}" al pórtico del actuador dinámico (foto 1).

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

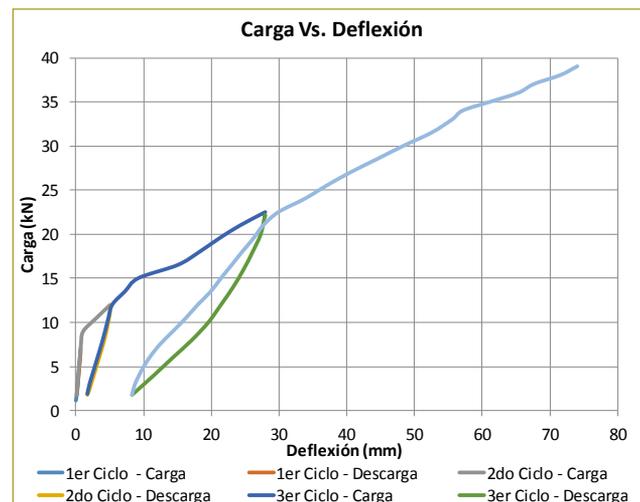
A modo de ejemplo, en la gráfica siguiente se presenta la curva de Carga vs. deflexión en el centro de la altura,



Foto 1. Vista general del montaje.

Fuente: Elaboración del autor.

obtenidos para el muro tipo 1, graficados para cada ciclo de carga y descarga. Como se puede observar, después de la descarga de cada uno de los ciclos el muro tendía a volver a su posición inicial, mostrando su comportamiento elástico. Así mismo, se evidencia que la curva tiene dos pendientes: la primera termina en el punto donde la mampostería se agrieta en la zona a compresión del muro y la segunda pendiente continúa lineal hasta la falla (gráfica 1).

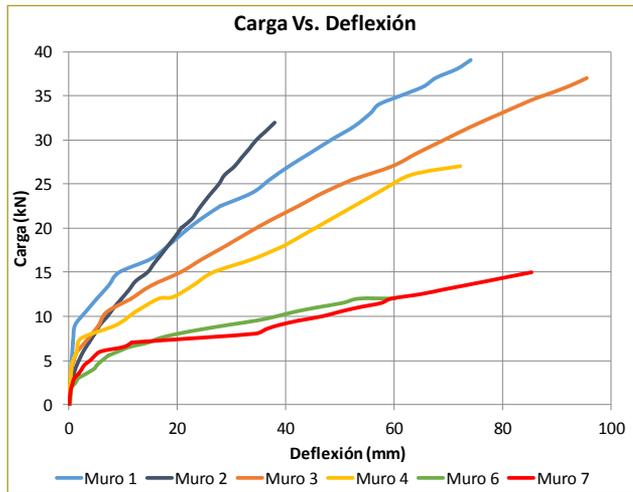


Gráfica 1. Carga vs. deflexión típica.

Fuente: Elaboración del autor.

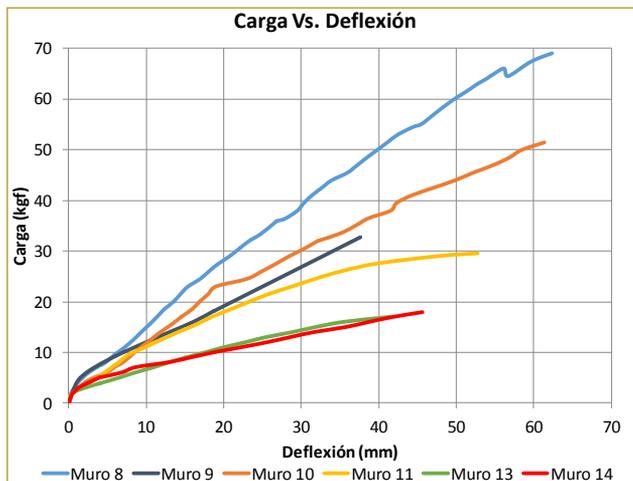
A continuación se muestran las envolventes de las curvas de carga vs. deflexión para cada uno de los muros, obtenidas de los ensayos de laboratorio. En las gráficas siguientes se muestran las curvas de los muros

reforzados con GFRP y CFRP, respectivamente. El comportamiento fue el esperado; después de presentarse los agrietamientos las pendientes de las curvas continúan constantes, debido a que las barras de refuerzo permanecen en su zona elástica hasta la falla; no se evidencia plastificación (gráficas 2 y 3).



Gráfica 2. Carga vs. deflexión en muros GFRP.

Fuente: Elaboración del autor.



Gráfica 3. Carga vs. deflexión en muros CFRP.

Fuente: Elaboración del autor.

A continuación se presenta el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos para cada uno de los muros en estudio; las deformaciones experimentales en las barras de refuerzo se consiguieron de las lecturas de los deformímetros electrónicos (tabla 2).

Tabla 2
Resultados de los ensayos

Muro	A_f (mm ²)	ρ	ρ_b	ε_f (%)	δ (mm)	M_n (kN m)
Tipo 1	507	0,0045	0,0010	0,66	74,1	13,2
Tipo 2	253	0,0030	0,0010	0,83	37,9	10,8
Tipo 3	380	0,0030	0,0010	0,83	95,5	12,5
Tipo 4	253	0,0023	0,0010	0,98	72,2	9,1
Tipo 6	127	0,0015	0,0010	1,23	53,5	4,1
Tipo 7	127	0,0013	0,0010	1,33	97,2	5,1
Tipo 8	507	0,0045	0,0003	0,42	62,3	23,3
Tipo 9	253	0,0030	0,0003	0,53	37,7	11,1
Tipo 10	380	0,0030	0,0003	0,53	61,4	17,4
Tipo 11	253	0,0023	0,0003	0,63	52,8	10,0
Tipo 13	127	0,0015	0,0003	0,79	41,4	5,8
Tipo 14	127	0,0013	0,0003	0,87	41,1	6,1

Fuente: Elaboración del autor.

El modo típico de falla para los muros reforzados con FRP, tal como se esperaba, fue por aplastamiento en la mampostería (foto 1).



Foto 2. Aplastamiento en la mampostería.

Fuente: Elaboración del autor.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la tabla siguiente se comparan, por medio de una relación, los momentos máximos teóricos y los momentos máximos experimentales de los muros; los resultados ideales son aquellos en los cuales los momentos máximos experimentales son mayores que los momentos máximos teóricos.

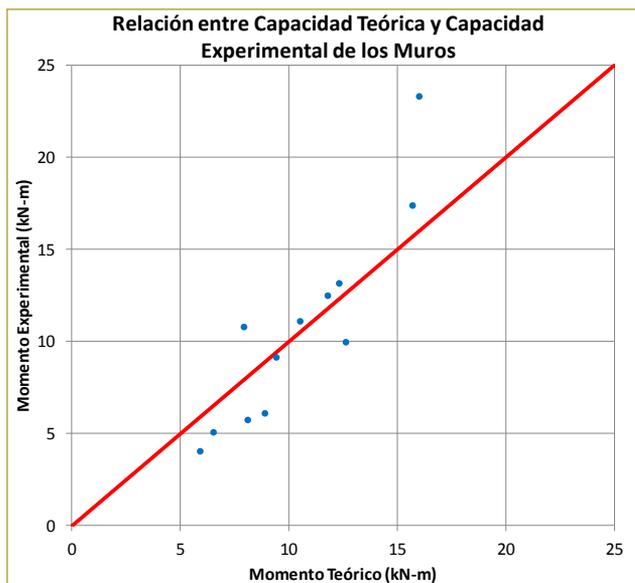
Tabla 3

Relación entre capacidad teórica y capacidad experimental

Muro	Longitud (cm)	Núm.	Tipo de refuerzo	M_{exp} (kN-m)	M_{teo} (kN-m)	M_{teo}/M_{exp}	P_{falla} (kN)
Tipo 1	160	4#4	G	13,2	12,3	0,93	39,0
Tipo 2	120	2#4	G	10,8	7,9	0,73	32,0
Tipo 3	180	3#4	G	12,5	11,8	0,94	37,0
Tipo 4	160	2#4	G	9,1	9,4	1,03	27,0
Tipo 6	120	1#4	G	4,1	5,9	1,45	12,0
Tipo 7	140	1#4	G	5,1	6,5	1,28	15,0
Tipo 8	160	4#4	C	23,3	16,0	0,69	69,0
Tipo 9	120	2#4	C	11,1	10,5	0,95	32,8
Tipo 10	180	3#4	C	17,4	15,7	0,9	51,5
Tipo 11	160	2#4	C	10,0	12,6	1,26	29,5
Tipo 13	120	1#4	C	5,8	8,1	1,41	17,0
Tipo 14	140	1#4	C	6,1	8,9	1,46	18,0

Fuente: Elaboración del autor.

Hubo seis muros en los cuales la relación entre momento, teórico y experimental fue mayor que 1.0; esos muros fueron los de menor cuantía de refuerzo y mayores separaciones entre barras. Tales resultados se hacen más evidentes gráficamente (gráfica 1), para cada uno de los muros en estudio; en las ordenadas se ubican los momentos experimentales y en las abscisas, los momentos teóricos.

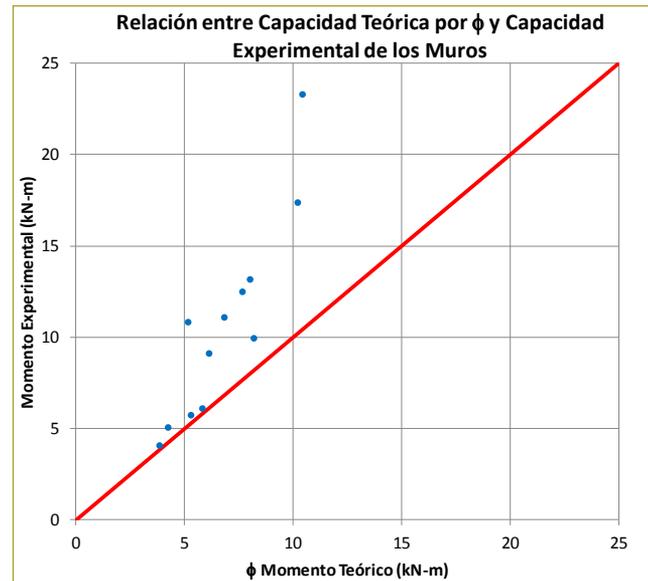


Gráfica 4. Relación entre capacidad teórica y capacidad experimental de los muros.

Fuente: Elaboración del autor.

Para cumplir con las relaciones entre momento teórico y momento experimental, es evidente que debe existir un límite mínimo de la cuantía de refuerzo y de separación de barras.

El modo de falla esperado en los resultados teóricos era el aplastamiento de la mampostería, que coincidió con el obtenido experimentalmente; por lo tanto, se aplicó el factor de reducción ϕ de 0,65 a la capacidad nominal a flexión, de acuerdo con lo estipulado en el ACI 440.1R-15. A continuación se muestran los resultados de los momentos máximos experimentales y los momentos máximos teóricos, afectando estos últimos por el factor ϕ (gráfica 5).



Gráfica 5. Relación entre capacidad teórica por ϕ y capacidad experimental de los muros.

Fuente: Elaboración del autor.

Una vez afectado el valor del momento máximo teórico por el factor ϕ calculado, todos los resultados se encuentran por encima de la línea roja, lo que significa que el momento máximo experimental es mayor que el momento máximo teórico.

A renglón seguido se comparan, por medio de una relación, las deformaciones unitarias teóricas y las deformaciones unitarias experimentales, registradas en las barras de refuerzo (tabla 4):

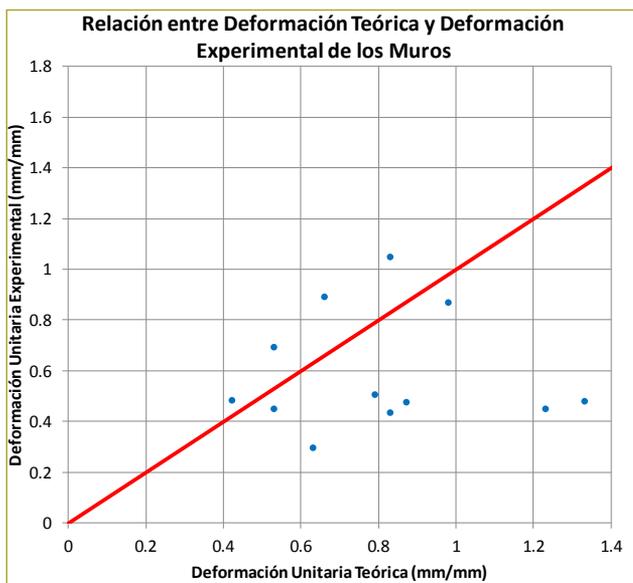
Tabla 4
Relación entre deformación teórica y deformación experimental

Muro	Longitud (cm)	Núm.	Tipo de refuerzo	$\varepsilon_{f_{exp}}^f$ (%)	$\varepsilon_{f_{teo}}^f$ (%)	$\frac{\varepsilon_{f_{teo}}^f}{\varepsilon_{f_{exp}}^f}$
Tipo 1	160	4#4	G	0,89	0,66	0,74
Tipo 2	120	2#4	G	0,44	0,83	1,9
Tipo 3	180	3#4	G	1,05	0,83	0,79
Tipo 4	160	2#4	G	0,87	0,98	1,13
Tipo 6	120	1#4	G	0,45	1,23	2,72
Tipo 7	140	1#4	G	0,48	1,33	2,77
Tipo 8	160	4#4	C	0,48	0,42	0,87
Tipo 9	120	2#4	C	0,45	0,53	1,18
Tipo 10	180	3#4	C	0,7	0,53	0,76
Tipo 11	160	2#4	C	0,3	0,63	2,12
Tipo 13	120	1#4	C	0,51	0,79	1,56
Tipo 14	140	1#4	C	0,48	0,87	1,83

Fuente: Elaboración del autor.

Con respecto a la comparación de deformaciones máximas (tabla 4), los muros en los cuales la relación entre deformación, teórica y experimental de las barras instrumentadas fue mayor que 1.0 coinciden con los muros de menores cuantías y separaciones entre barras.

A continuación se muestra la relación entre la deformación teórica y la deformación experimental de las barras instrumentadas en los diferentes muros (gráfica 6).



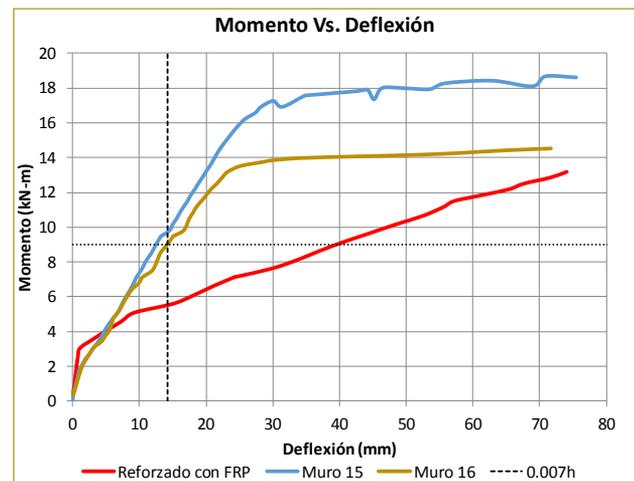
Gráfica 6. Relación entre deformación teórica y deformación experimental de los muros.

Fuente: Elaboración del autor.

Adicionalmente, por su similitud en geometría y cuantías de refuerzo, se compararon los resultados de la gráfica de momentos vs. deflexión, del muro tipo 15 y el muro tipo 16 reforzado con acero, con el muro tipo 1 reforzados con GFRP. El diseño de los muros reforzados con acero es subreforzado, por lo que se esperaba que su falla se presentara por fluencia en el acero de refuerzo. Los modos de falla en ambos muros fue el esperado.

Se pudo observar que para un desplazamiento máximo permitido en la mampostería reforzada con acero de $0,007h = 14,2$ mm, se tiene un momento resistente de 9,0 kN-m. Para este mismo momento, el muro de mampostería de concreto reforzada con GFRP permitiría un desplazamiento máximo de $39,7$ mm = $0,020$ h.

Los valores expuestos anteriormente se resumen de la siguiente manera (gráfica 7):



Gráfica 7. Comparación de momento vs. deflexión de muro reforzado con FRP y muros reforzados con acero.

Fuente: Elaboración del autor.

Tal como se observa, los rangos de desplazamientos para los muros reforzados con FRP son mayores que los rangos para los muros reforzados con acero convencional, con la ventaja de que antes de la falla nunca se plastificarán las barras de refuerzo, y si hay fallas en las piezas de mampostería, éstas se podrán reparar.

Se podría decir que los desplazamientos admisibles para los muros de mampostería en concreto reforzados con FRP podrían ser mayores que los calculados de $0,014$ h, y llevarlos aproximadamente a $0,030$ h; sin embargo, los datos de esta investigación aún no son suficientes para sustentar tales aseveraciones y se dejarán como recomendación para futuras investigaciones (gráfica 6).

CONCLUSIONES

Los muros ensayados y presentados en esta investigación tuvieron un comportamiento monolítico entre sus componentes: mortero de pega, mortero de relleno, refuerzo y mampostería.

En todos los muros ensayados, debido a que la cuantía de refuerzo fue mayor que la cuantía balanceada, el modo predominante de falla fue por aplastamiento en la mampostería. No obstante, se deben realizar más investigaciones para poder especificar una cuantía de refuerzo mínima y una separación entre barras máxima para que este modo de falla prevalezca.

Debido a que las cargas de agrietamiento para los muros reforzados con CRFP fueron menores que las cargas de agrietamiento de los muros reforzados con GFRP, es aconsejable reforzar los muros con GFRP. Lo recomendable es no llevar los diseños a condiciones de falla, pues al presentarse fisuras por aplastamiento, se pierde adherencia entre la pieza de mampostería y el mortero de relleno que envuelve el refuerzo, por lo que el sistema puede perder la capacidad de trabajar monolíticamente.

Los muros de mampostería reforzados con FRP se pueden reparar si sufren daños en las piezas de mampostería por cargas que les generen efectos de flexión; debido a que las deflexiones no son permanentes porque su material de refuerzo no tiene una zona de plasticidad, su comportamiento es elástico hasta la falla.

Se tuvo una buena aproximación de las capacidades calculadas experimentalmente por medio de los ensayos en el laboratorio con las calculadas teóricamente, basadas en los códigos TMS 402-16 y ACI 440.1R-15.

Los muros reforzados con FRP, comparados con los muros de mampostería reforzados con acero, permiten mayores deflexiones ante cargas de servicio y presentan menores deflexiones residuales.

Agradecimientos

Queremos dar las gracias a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito; al ingeniero Gustavo Tumialán, asesor de la investigación y miembro del comité ACI 440, y a las empresas Kreato, Hilti, Sika y Sireg por sus materiales.

REFERENCIAS

- Micelli, F., & Nanni, A. (2001). Propiedades mecánicas y de durabilidad de las barras de FRP. Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Missouri y Departamento de Innovación de Ingeniería de la Universidad de Lecce.
- Triwiyono, A. et al. (2015). Resistencia a la flexión y ductilidad de muros de mampostería en concreto reforzados con barras de acero. Yogyakarta, Indonesia: Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental, Universidad de Gadjah Mada.
- Hughes Brothers, Inc. (2002). Anclaje de barras de refuerzo de GFRP para ensayos a tracción. Seward, Nebraska.
- Galati, N., Tumialán, G., & Nanni, A. (2005). Reforzamiento con barras de FRP de mampostería no reforzada sometidos a cargas fuera del plano. Departamento de Ingeniería Civil, Arquitectura y Medio Ambiente de la Universidad de Missouri, junto a Simpson Gumpertz & Heger Inc.
- De la Cruz, C. (2004). Resistencia a la flexión y adherencia en vigas de hormigón armado con barras FRP. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Herrera, A., & Madrid, G. (2003). *Manual de construcción de mampostería de concreto*. Bogotá: Instituto Colombiano de Productores de Cemento.