

ENSAYO DE MUROS DE ALBAÑILERÍA SIMPLE REFORZADOS CON CFRP: REFUERZOS DE CORDONES INSERTOS (NSM FRP)

D. Ortiz Inostroza¹, C. Oyarzo Vera² & F. Sanhueza Espinoza³

RESUMEN:

En el presente estudio se analizó el comportamiento de un muro de albañilería de dimensiones 2,7 m de largo x 1,8 m de alto y 0.14 m de espesor ante la acción de cargas cíclicas en el plano. Previo al ensayo el muro fue reforzado aplicando cordones de CFRP insertos en ranuras cerca de la superficie del muro, técnica conocida como *Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymers* (NSM-CFRP).

El muro fue sometido a cargas horizontales cíclicas de magnitud creciente por medio de un actuador hidráulico y cargas verticales aplicada mediante cadenas que evitan su volcamiento. El ciclo de cargas fue controlado por desplazamientos medidos horizontalmente en el extremo superior del muro.

Durante el ensayo se logró registrar la carga aplicada y los desplazamientos horizontales desde los 2 mm (sin daño aparente en la estructura), pasando por los 6 mm de desplazamiento donde se comienza a ver algo de daño, y finalizando en los 37 mm de desplazamiento cuando se genera una grieta diagonal a lo largo de todo el panel de albañilería.

Comparando los resultados de este ensayo con los resultados de un ensayo paralelo utilizando la técnica de reforzamiento con bandas de fibra de carbono adheridas externamente (EB-CFRP), se puede determinar que el reforzamiento mediante la técnica NSM-CFRP, resulta efectiva en términos de prevenir una falla frágil en las estructuras además de otorgar mayor capacidad elástica a la estructura reforzada.

PALABRAS CLAVES: Ensayos cíclicos, albañilería simple, CFRP.

ABSTRACT:

In this study, the behaviour of a masonry wall with dimensions 2.7 m long x 1.8 m high and 0.14 m thick was analyzed under the action of cyclic loads on the plane. Prior to the test, the wall was reinforced using CFRP cords inserted into gaps near the wall surface, technique known as *Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymers* (NSM-CFRP).

The wall was subjected to cyclic horizontal loads of increasing magnitude by a hydraulic actuator and vertical loads were applied by chains that prevents the wall from tipping over. The load cycle was controlled by horizontally measured displacements at the top end of the wall.

During the test, it was possible to record the applied load and horizontal displacements from 2 mm (without apparent damage to the structure), passing through the 6 mm displacement where some damage begins to be seen, and ending at the 37 mm when a diagonal crack is generated along the entire masonry panel.

By comparing the results of this test with the results of a parallel test using the externally bonded carbon fibre strip reinforcement technique (EB-CFRP), it can be determined that reinforcement using the NSM-CFRP technique is effective in terms of preventing brittle structural failure as well as giving greater elasticity to the reinforced structure.

KEYWORDS: Cyclic test, unreinforced masonry, CFRP

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE. dortizi@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE. coyartzov@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE. franksanhueza@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

La albañilería es una técnica utilizada desde hace muchos años en prácticamente todo el mundo para la construcción de edificaciones de baja y mediana altura. Muchas de estas edificaciones poseen gran valor patrimonial en diversos países, pero lamentablemente también son altamente vulnerables ante eventos sísmicos.

Por lo general, se ha observado que durante eventos sísmicos los muros de albañilería son sometidos a cargas en el plano con o sin pre-compresión, pudiendo fallar por agrietamiento diagonal en la extensión del muro (Figura 1a), por deslizamiento a lo largo de las juntas de mortero (Figura 1b), por volcamiento (Figura 1c), por aplastamiento (Figura 1d), por deflexiones en la dirección del eje débil o por una combinación de todas estas formas de falla [1], resultando en daños importantes a nivel estructural y con la posibilidad de causar lesiones de carácter grave o incluso la muerte en personas.

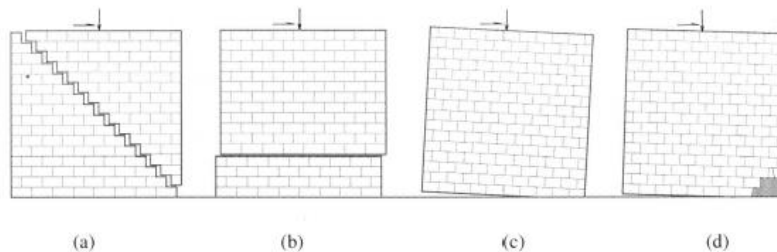


Figura 1: Modos de falla para ensayos en el plano: (a) falla por cortante; (b) falla por deslizamiento; (c) falla por volcamiento (d) falla por aplastamiento. **Fuente:** Mohamed A. ElGawady *et al* [2].

Debido a que muchas de estas estructuras han soportado el paso de los años es que existen edificios que requieren de la aplicación de medidas de refuerzo y/o reparaciones con el fin de asegurar la integridad de la construcción. Existen diversos métodos para reforzar estructuras de albañilería, como por ejemplo técnicas de hormigón proyectado (*shotcrete*), insertos de acero, refuerzos superficiales con polímeros, entre otras. De estas técnicas, varias implican añadirle un peso adicional a la estructura [3], lo que a la hora de estabilizar una estructura ya dañada no es del todo favorable. Por esta razón, el reforzamiento mediante fibras de polímero resulta muy atractivo, pues mejora la rigidez y resistencia de los elementos estructurales sin adicionar masa en exceso.

Entre las técnicas de refuerzos con polímeros se distinguen tres tipos de materiales: uno asociado a polímeros de fibra de vidrio (GFRP), otro asociado a fibras aramidadas, como, por ejemplo, el Kevlar (AFRP) y por último uno asociado a refuerzos con polímeros de fibra de carbono (CFRP) [4]. Y en lo que respecta a su forma de aplicación, también se destacan dos tipos de técnicas. En la técnica conocida como *Externally Bonded FRP* (EB-FRP) se adhieren superficialmente láminas de FRP mediante resina, mientras que en la técnica denominada *Near Surface Mounted FRP* (NSM-FRP) se insertan láminas, cordones o barras de FRP en ranuras previamente cortadas en el muro.

Respecto a la técnica NSM-FRP, Turco *et al.* [5] analizó el refuerzo a flexión y cortante por el sistema de barras de CFRP mediante la aplicación de cargas monotónicas, concluyendo que las barras circulares lisas son apropiadas para el refuerzo a cortante y las barras rectangulares de CFRP son buenas para el fortalecimiento a flexión de la estructura. Por otro lado, Bournas *et al.* [6] analizó la técnica NSM-FRP utilizando tanto fibra de vidrio como fibra de carbono, bajo la acción de cargas horizontales y cargas de precompresión. Sus resultados determinan que, si se refuerzan las estructuras, ya sea, con GFRP o CFRP se obtiene un incremento similar en capacidad de carga, sin embargo, el GFRP demostró admitir mayores deformaciones, es decir, aporta mayor capacidad elástica a la estructura a reforzar.

En la mayoría de los estudios realizados sobre NSM-FRP se han ejecutado ensayos a pequeña escala, tales como ensayos de corte con carga diagonal sobre muretes y prismas [7,8,9,10,11], o bien, se analizan los métodos de reforzamiento mediante la aplicación de cargas fuera del plano intentando simular las cargas aplicadas por el viento ante la acción de un huracán o terremoto [12] y generalmente se analizan los efectos aplicando cargas monotónicas [13]. Reportes de ensayos en muros a escala real en la dirección de su plano y aplicando cargas cíclicas son aún escasos en la literatura. La mayoría de estos estudios [7,14,15] coinciden en que la aplicación de las técnicas de reforzamiento de tipo NSM FRP suelen ser más efectivas que las EB FRP, ya que permiten una instalación mucho más sencilla, lo que disminuye enormemente los costos de mano de obra para la aplicación de este reforzamiento, estéticamente son mucho menos invasivos, por lo que son altamente útiles a la hora de reforzar o reparar una estructura con valor histórico o patrimonial, poseen mejor protección al fuego y al vandalismo [2] y, finalmente, se obtiene un incremento en la resistencia y ductilidad del muro, considerable con respecto al muro sin reforzar.

El objetivo del presente estudio es analizar la efectividad de la técnica de reforzamiento NSM-CFRP en muros de albañilería simple y comparar el comportamiento de esta técnica con un ensayo paralelo de un muro reforzado mediante la técnica EB-CFRP, realizado bajo las mismas condiciones de construcción y carga, así obtener una idea del comportamiento y efectividad de la técnica estudiada.

2. METODOLOGÍA

2.1 Descripción del muro ensayado

Para el desarrollo de esta investigación se construyó un muro de albañilería simple de 240 cm de largo, 180 cm de alto y 14 cm de espesor utilizando ladrillos macizos de arcilla de dimensiones 28 cm x 14 cm x 5 cm y mortero pre mezclado de la marca Topex con una adición de 20% de arena para reducir su resistencia, esto con la finalidad de asegurar una falla en el panel de albañilería.

El muro se construyó sobre una fundación de hormigón armado de grado G-25 elaborada in-situ mediante el uso de moldajes de madera y una armadura de diámetro 8 mm y 10 mm, la que se dejó curar por 7 días antes de su desmoldaje y 28 días antes de su transporte y utilización. Para mejorar la adherencia entre el muro y la fundación se utilizó un puente de adherencia Pegadur-32 de la marca Topex y barras insertas en la fundación adheridas con Sika Anchorfix 1 que mejoran el traspaso de carga con la fundación del muro. Sobre el muro de albañilería se fabricó una viga de hormigón armado de sección 20 cm x 24 cm (Figura 2)



(a)



(b)

Figura 2: Muro de albañilería simple utilizado en los ensayos. (a) vista general, (b) detalle viga de coronamiento.

Una vez transcurridos los 28 días se procedió a pintar el muro de blanco con la finalidad de que las futuras fallas resalten a simple vista y, posteriormente, se procedió a aplicar el reforzamiento NSM FRP, comenzando por la confección de 4 surcos verticales de 10 mm de ancho y 20 mm de profundidad equidistantes entre si (Figura 3). Para el presente estudio se utilizarán cordones de CFRP marca Sika tipo SikaWrap FX-50C de sección transversal 28 mm² y un módulo de elasticidad característico de 173 GPa. Estos cordones fueron humectados con resina fluida para inyección Sikadur-52, luego fueron insertos en las 4 ranuras y finalmente fueron cubiertos con resina epóxica Sikadur-300, siguiendo el procedimiento descrito en el manual de aplicación de Sika [16] (Figura 4).

Sobre la viga de coronamiento, se instaló un aparejo consistente en un conjunto de piezas de acero que facilitan la aplicación de cargas tanto verticales como horizontales sobre el muro. La carga horizontal se aplicó mediante un actuador hidráulico Enerpac modelo BRD-2510, accionado por una bomba hidráulica Enerpac modelo ZU4. La fundación del muro fue fijada al suelo mediante cadenas de 13 mm de diámetro capaces de resistir más de 10 T. La carga vertical sobre el muro se aplicó a través del aparejo de carga mediante cadenas tensadas desde el suelo, cuya carga fue controlada mediante dinamómetros durante todo el ensayo.

Todo este conjunto se instaló en el muro de reacción del Laboratorio de Estructuras San José Obrero de la UCSC y una vista general del montaje del ensayo con sus diferentes componentes se muestra en la Figura 5.



Figura 3: Muro con los surcos para la instalación de refuerzo.

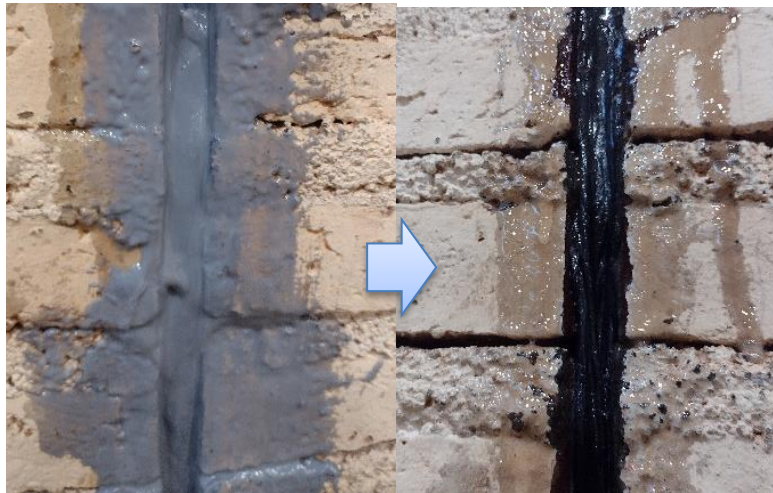


Figura 4: Procedimiento de instalación de refuerzo

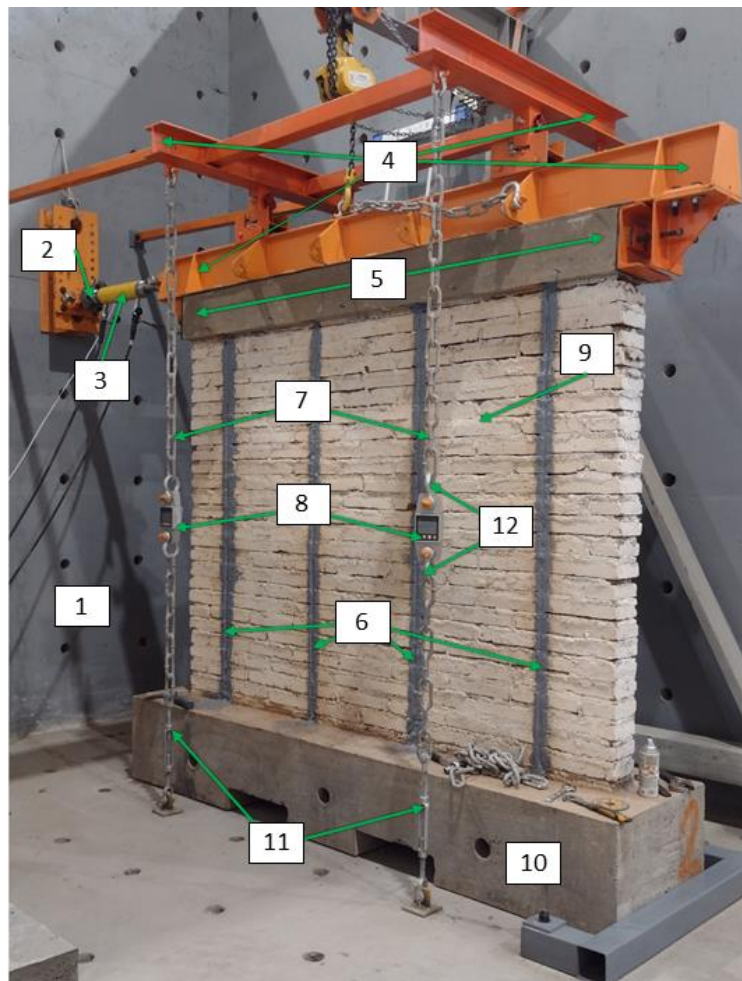


Figura 5: Vista General del montaje del experimento: [1] Muro de reacción, [2] Celda de carga 25 T, [3] Actuador Hidráulico 25 T, [4] Aparejo de carga compuesto por diversas piezas de acero (en naranja), [5] Viga hormigón armado (20x24x240cm), [6] Refuerzos NSM CFRP Sika FX-50C, [7] Cadenas 13 mm, [8] Dinamómetros de 3 T, [9] Muro albañilería simple, [10] Fundación de hormigón armado, [11] Tensores 3/4" Grillete – Grillete, [12] Grilletes Lira con perno de 3/4" 4,75 T.

En paralelo a la construcción del muro se elaboraron probetas de mortero de 4 x 4 x 16 cm y prismas de albañilería los que fueron ensayadas a compresión según la norma NCh 2123 of 1997 [17]. Estas muestras fueron extraídas a distintos niveles de avance en la construcción del muro, tal como se ilustra en la Figura 6. A partir de estos ensayos se determinó una resistencia media del mortero a compresión de 7,62 MPa (CoV 33%) y una resistencia media a compresión del conjunto mortero/ladrillo de 2,31 MPa (CoV 11,8%), tal como se indica en la Tabla 1 y 2.

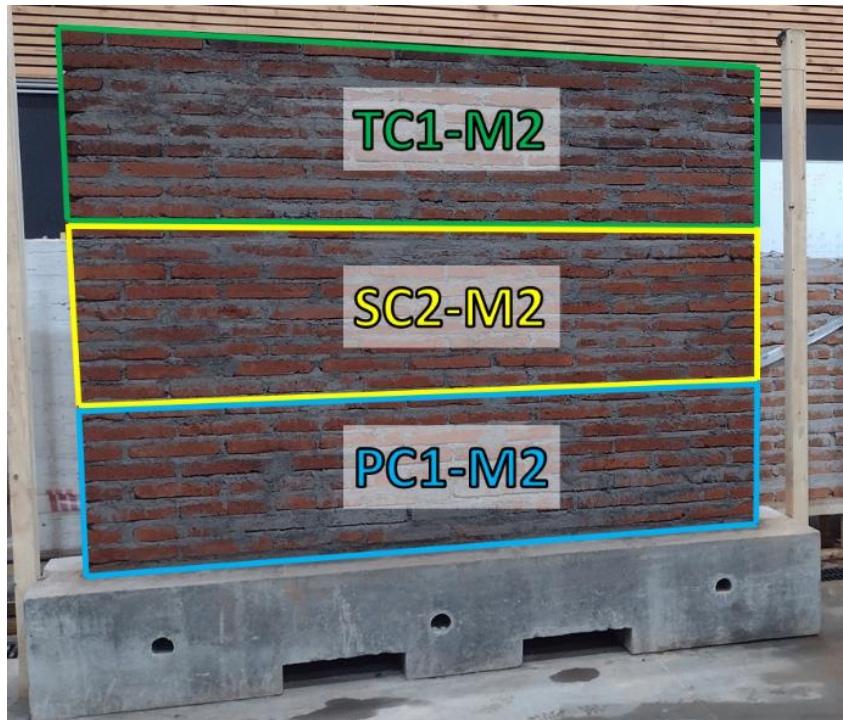


Figura 6: Distribución de prismas extraídos del muro

Tabla 1: Resistencia a compresión de probetas de mortero con 20% de arena adicional.

Probeta	Resist. máx. (MPa)
PC1-M2-1.1b	11,453
PC1-M2-1.1a	11,453
PC1-M2-1.2a	10,037
PC1-M2-1.2b	10,233
PC1-M2-1.3a	10,264
PC1-M2-1.3b	11,98
SC2-M2-3.1a	5,469
SC2-M2-3.1b	5,929
SC2-M2-3.2a	5,579
SC2-M2-3.2b	5,941
SC2-M2-3.3a	6,554
SC2-M2-3.3b	5,911
TC1-M2-6.1a	5,586
TC1-M2-6.1b	5,53

TC1-M2-6.2a	6,033
TC1-M2-6.2b	5,708
TC1-M2-6.3a	6,242
TC1-M2-6.3b	5,911

Tabla 2: Resistencia a compresión de prismas de albañilería.

Probeta	Resist. máx. (MPa)
PC1a	2,26
PC1b	2,55
PC1c	2,05
SC2a	2,20
SC2b	2,73
TC1a	1,87
TC1b	2,42
TC1c	2,40

2.2 Descripción de la instrumentación y procedimiento de ensayo

A fin de registrar las deformaciones experimentadas por el muro durante los ensayos, se instalaron 4 sensores de desplazamiento (LVDT), 2 de ellos fueron ubicados al tope del muro para registrar los desplazamientos que se generan al nivel del actuador, y otros 2 en la base del muro para registrar potenciales levantamientos desde la base. Además, se ubicaron 4 dinamómetros en las cadenas que aseguran el muro contra el suelo en la disposición antes descrita, con el fin de llevar un control exacto de la cantidad de carga vertical que recibe el muro en todo momento. Adicionalmente, se creó una grilla de 12 acelerómetros uniaxiales distribuidos tal como se indica en la Figura 7 para registrar los modos de vibración propios de la estructura al momento de ir sufriendo daños por las cargas aplicadas, datos que serán procesados en una investigación posterior.

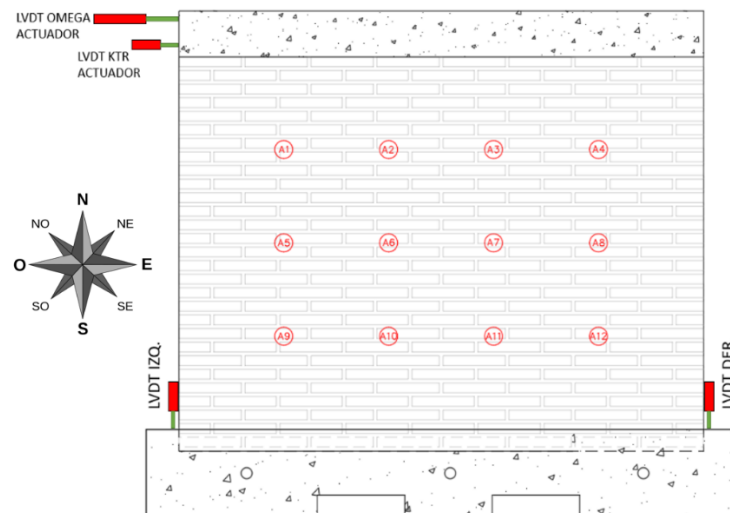


Figura 7: Grilla que describe la distribución de 12 acelerómetros uniaxiales.

Mediante los tensores grillete-grillete se aplicó una carga de 2 toneladas distribuidas en las 4 cadenas que afianzan el muro al suelo, con la finalidad de simular cargas normales de uso en una estructura a escala real. Se aseguró la fundación a la losa del muro de reacción mediante una cadena central, piezas de acero tanto a ras de suelo y sobre

los bordes de la fundación aseguradas mediante hilos que traspasan los 80 cm de losa del muro de reacción de forma de evitar levantamientos y desplazamientos horizontales de la estructura completa.

Una vez asegurada toda la estructura, se procede a aplicar carga en la viga de coronamiento del muro, mediante una secuencia controlada por desplazamientos siguiendo el patrón de cargas descrito en la Figura 8, comenzando por un desplazamiento de 2 mm, el cual se repite 3 veces en cada dirección, para luego aumentar 2 mm cada 3 ciclos, similar al protocolo de ensayo propuesto por Konthesingha *et al.* [7]. Los desplazamientos fueron controlados por LVDT (Figura 9) situados en el actuador. Después de cada ciclo de desplazamiento se analiza el muro en busca de grietas o daños de cualquier tipo, luego volvían a ajustar la carga vertical, y se ejecutaban ensayos de vibraciones para estudios posteriores.

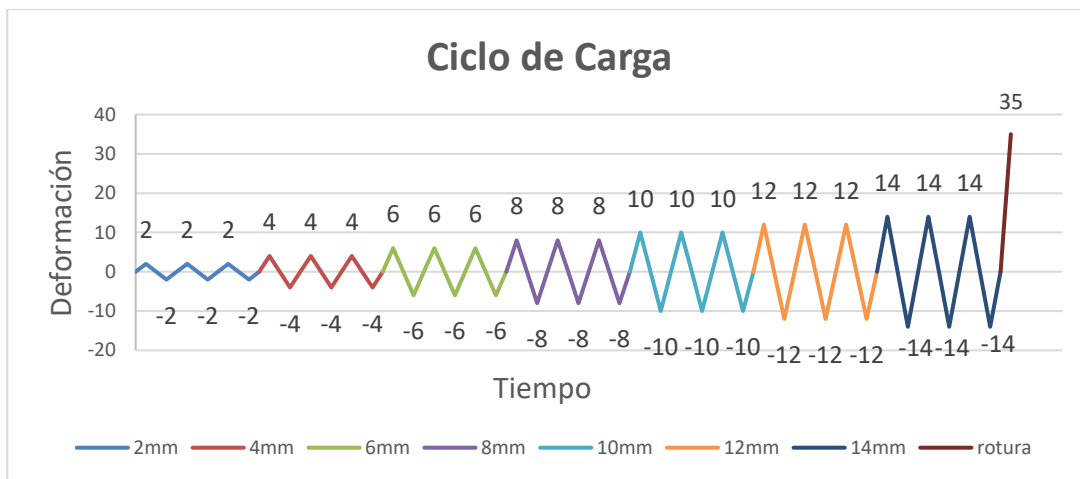


Figura 8: Ciclo de carga aplicado al muro reforzado.



Figura 9: LVDT (Transductor de Desplazamiento Lineal Variable)

3. RESULTADOS

El ensayo comenzó con 2 mm de deformación, siguiendo el patrón de cargas de la Figura 8. Se alcanzaron los 3,35 mm de deformación con una carga a compresión del actuador de unos, 4581 kg, mientras que a extensión se alcanzaron los 2,59 mm producto de una carga de 5186 kg. Estos valores representan los valores máximos alcanzados en uno de los 3 ciclos de carga. La gráfica de carga-deformación correspondiente a la fase de carga de 2 mm se observa en la Figura 10a. Así mismo, para los ciclos de los 4 mm se alcanza una compresión de 5,14 mm con una carga de 5228 kg y a extensión se registran 4,45 mm con una aplicación de 6210 kg de carga, extraídos de la gráfica carga-deformación de la Figura 10b obtenida durante el ensayo. Ambas fases se completan sin registrar daño visible en el muro u otro inconveniente en la aplicación de cargas, en ambos procesos el muro se comporta de forma elástica volviendo a su posición inicial casi en su totalidad luego de liberar las cargas aplicadas

después de cada ciclo, mientras que los desplazamientos remanentes se pueden atribuir a un desplazamiento o ajuste del conjunto completo, esto incluye holguras en aparejo de carga y sistemas de sujeción del conjunto fundación-muro al suelo.

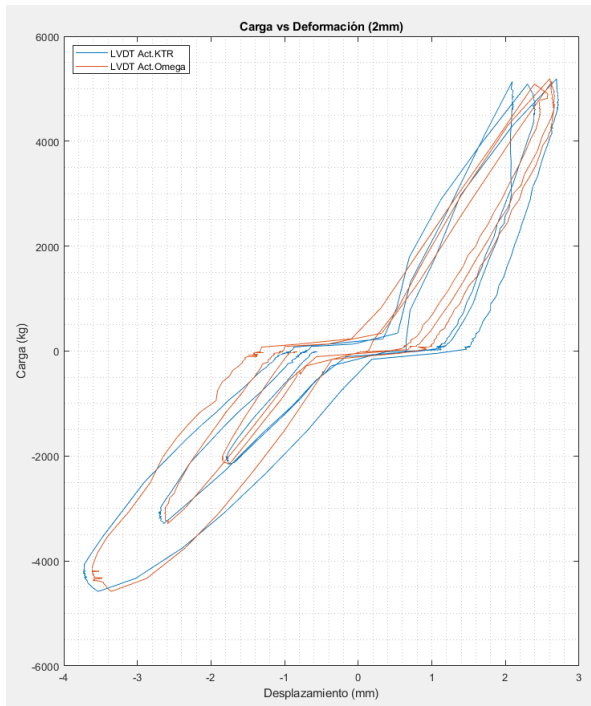
La siguiente fase corresponde a los 6 mm, antes de ejecutar el ensayo se procedió a ajustar todas las piezas móviles, además, de las cargas verticales que se vieron modificadas durante el ensayo producto del volcamiento potencial de la estructura. Una vez ejecutado el ensayo se alcanzan desplazamientos a compresión y extensión de 6,22 mm y 6,03 mm con cargas de 5558 kg y 7181 kg, respectivamente. Estos datos se extraen de la gráfica carga-deformación obtenida en tiempo real representada en la Figura 10c. En esta fase del ensayo se comienzan a apreciar fallas por deslizamiento en la base del muro (Figura 12) con una tendencia a volcar hacia el oeste en el proceso de extensión del actuador hidráulico y hacia el este en el proceso de contracción del actuador, sin apreciar fallas o fisuras en el resto del muro. Posteriormente, se vuelve necesario reajustar nuevamente las piezas móviles y tensiones verticales luego de cada fase de carga para asegurar la homogeneidad de cargas durante todo el experimento.

Para las cargas de 8 mm se obtiene la gráfica carga-deformación de la Figura 10d de donde se obtienen desplazamientos de 7,96 mm a compresión con cargas de 6061 kg y 8,65 mm a extensión con cargas de 8320 kg. En este proceso se hace más visible la fisura obtenida anteriormente, sin embargo, aún se aprecian fallas individuales a cada lado del muro y sin presentar fallas adicionales, grietas u otros problemas tanto en el resto del muro como en el reforzamiento de este mismo.

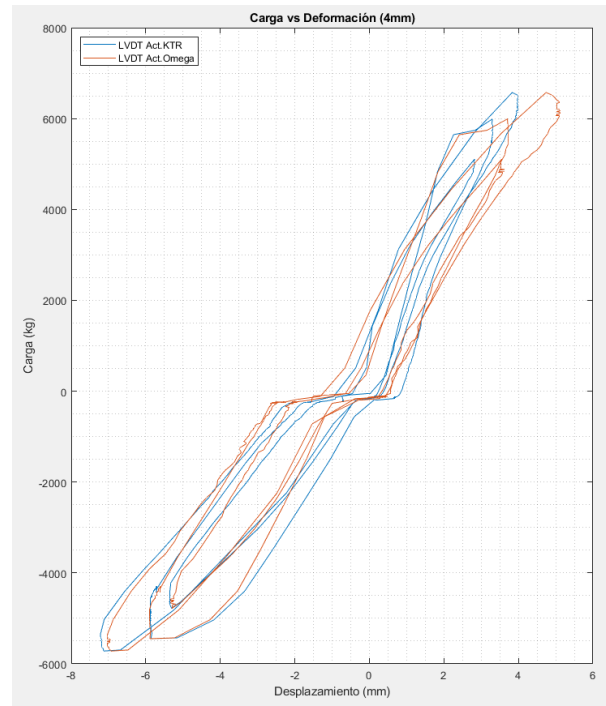
En la fase de carga correspondiente a los 10 mm de desplazamiento horizontal se obtiene la gráfica carga-deformación de la Figura 11a, de donde se obtienen valores máximos de desplazamiento en compresión y extensión de 10,17 mm y 10,01 mm, respectivamente. Mientras que se alcanzan cargas de compresión y extensión máximas de 7260 kg y 8319 kg, respectivamente. Si comparamos las cargas obtenidas en esta fase y en la anterior, es posible ver que en el proceso de extensión del actuador hidráulico se obtuvieron cargas que difieren en apenas 1 kg. En esta fase de carga es fácil observar la falla por deslizamiento descrita anteriormente, como una falla a lo largo de toda la base del muro y se registran desplazamientos residuales luego de las secuencias de carga y descarga del muro. A esto se le puede atribuir el hecho de que se requiera la misma carga del actuador que en la fase anterior para imprimir un desplazamiento mayor en el muro. Esto es claramente visible en la Figura 13 entre los 8 mm y 10 mm del ciclo de extensión (Curva roja). En esta fase no se registran daños adicionales a la estructura o sus componentes.

Para la fase de 12 mm se modificó el aparejo de cargas, dado que algunos componentes llegaron a sus resistencias máximas de trabajo, por lo que se simplificó, anclando directamente la viga del aparejo de carga al suelo mediante cadenas y controlando la carga vertical mediante los dinamómetros instalados. Durante el ensayo se aprecia una rotación leve (4 a 5 mm) en el muro sobre en el punto de falla por deslizamiento. Esto puede deberse al método de aplicación de cargas verticales sobre el muro, ya que inducen una componente horizontal de carga, sin embargo, no se aprecian daños adicionales en el panel de albañilería u otro componente. Se obtuvieron valores máximos de desplazamiento de 12,41 mm y carga de 6082 kg a compresión, mientras que a extensión se alcanzaron los 12,16 mm y carga de 10509 kg, obteniendo la curva carga-deformación de la Figura 11b. Es posible observar el mismo fenómeno que en la fase anterior, donde se requiere menos carga para un mayor desplazamiento, en este caso en los ciclos de contracción, lo que es claramente visible en la Figura 14 (Curva azul).

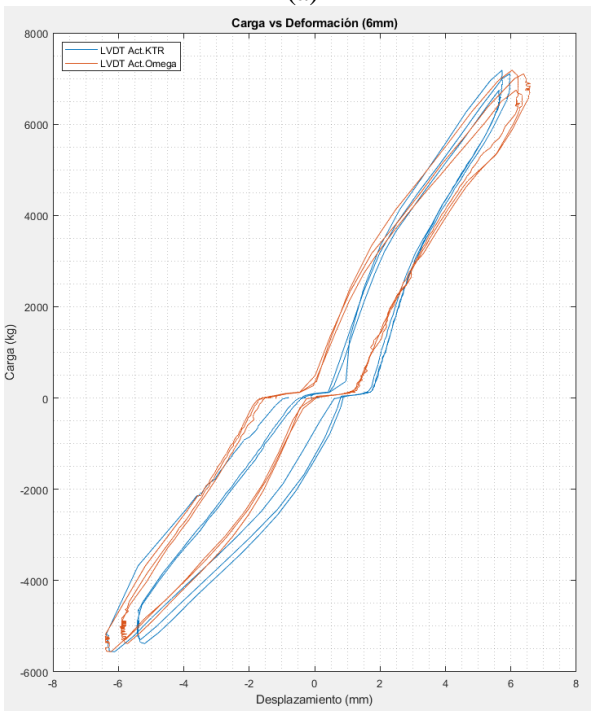
En cuanto a la fase de 14 mm se excedió la capacidad de carga de los dinamómetros, por lo que se decidió quitar los elementos para no dañarlos, quedando así la cadena de extremo a extremo. Una vez terminada esta fase de carga no se observa daño en ningún componente de la estructura, alcanzando desplazamientos de 14,07 mm a contracción y 15,47 mm a extensión, con cargas 8130 kg y 13005 kg en cada caso, tal como se observa en la Figura 11c. Aquí es posible distinguir un desfase entre el primer ciclo de carga y los dos ciclos posteriores, esto es atribuible a la falla por desplazamiento, ya que se puede ver que en el primer ciclo se requiere una carga notablemente menor que en los 2 posteriores.



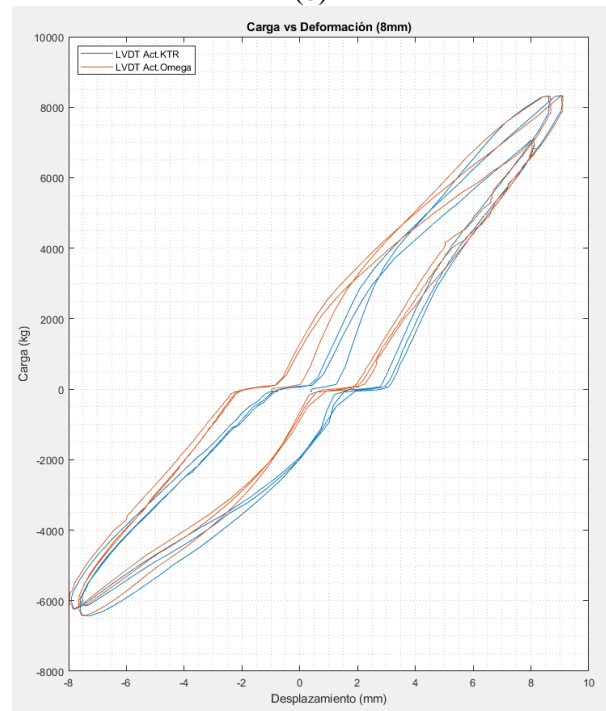
(a)



(b)

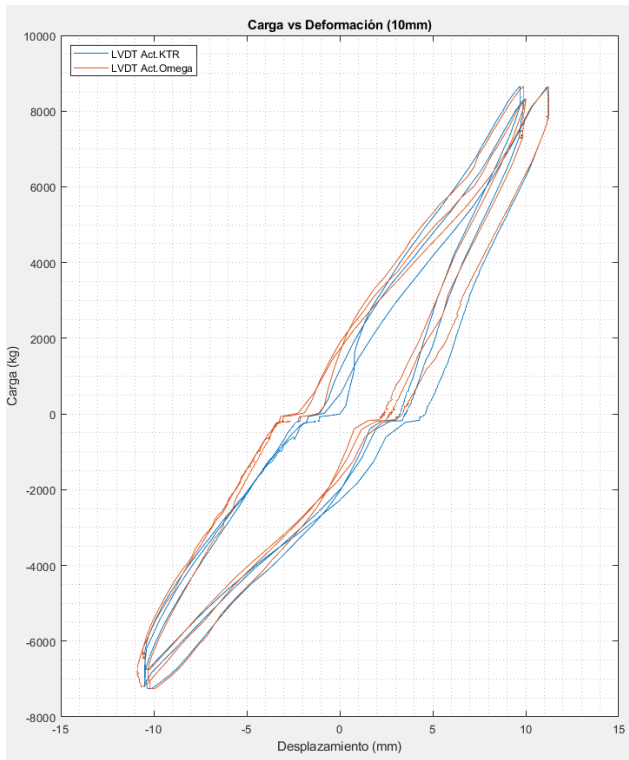


(c)

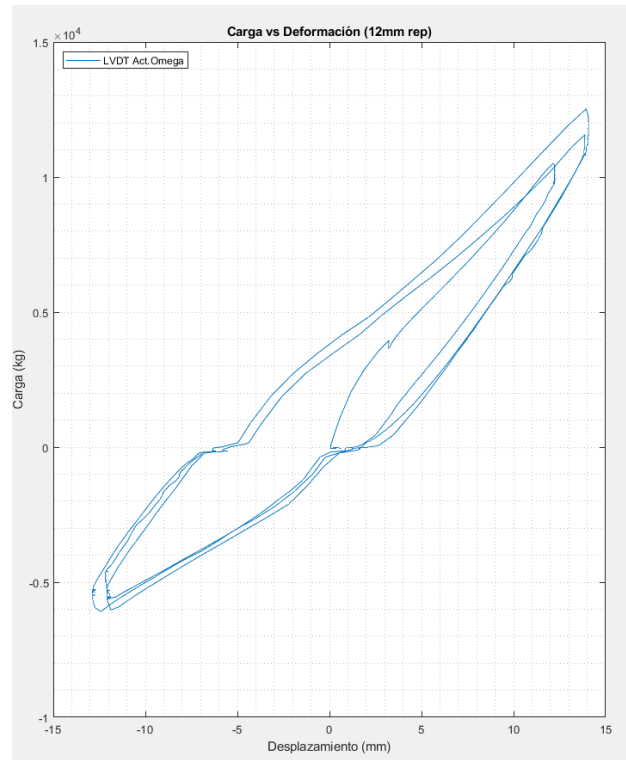


(d)

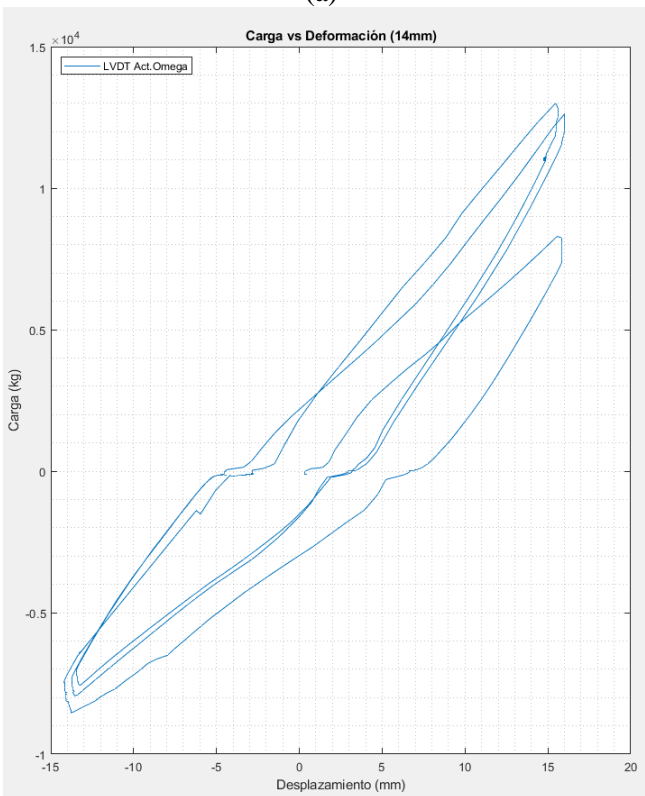
Figura 10: Registro carga vs deformación de ensayos en muro para ciclos de (a) 2 mm, (b) 4 mm, (c) 6 mm y (d) 8 mm



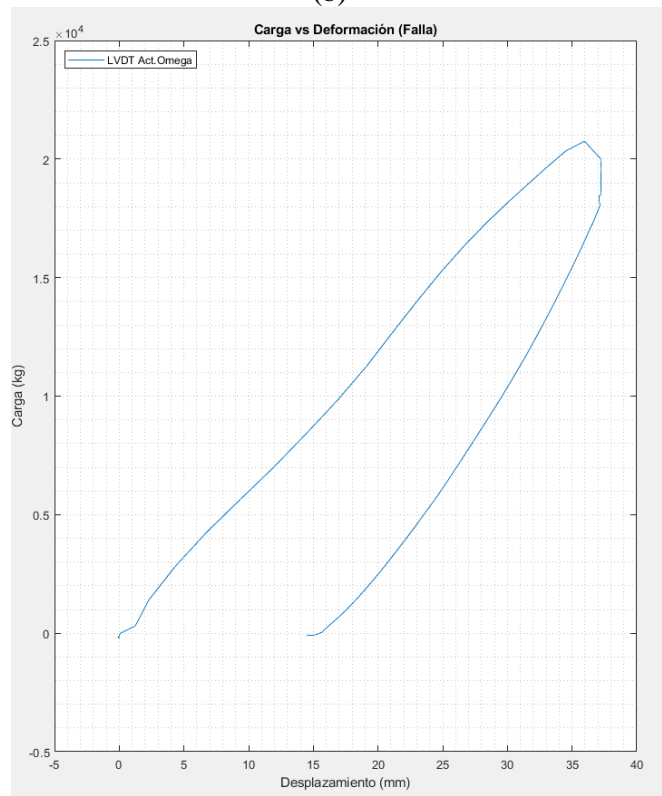
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 11: Registro carga vs deformación de ensayos en muro para ciclos de
(a) 10 mm, (b) 12 mm, (c) 14 mm y (d) falla

El siguiente ensayo corresponde a una carga hasta la falla, resultando el gráfico de carga versus deformación de la Figura 11d. Se decidió ejecutar solo un proceso de carga a extensión, el cual se realizó de forma lenta hasta que se obtuvo una fisura diagonal en el muro, alcanzando finalmente una carga de 20752 kg y un desplazamiento horizontal de 35,96 mm. En la Figura 11d es posible ver este *peak* de carga, sin embargo, es posible ver también un punto máximo de desplazamiento ocurrido inmediatamente después con una carga menor de 19976 kg. Con esta información podemos concluir que el muro ya había fallado y no resistiría más carga. Finalmente, se produce una grieta diagonal (Figura 13) visible a lo largo de las juntas de mortero y atravesando algunos ladrillos. Los valores máximos alcanzados se presentan en la Tabla 3, con la que es posible elaborar el gráfico de la Figura 14 donde se aprecia el comportamiento general del muro durante el ensayo y describe la elasticidad de la estructura sometida a cargas.



Figura 12: Falla por deslizamiento en la base del muro por sobre la fundación



Figura 13: Grieta diagonal desde la esquina superior izquierda a la esquina inferior derecha del muro.

Tabla 3: Cargas y desplazamientos máximos obtenidos por cada ciclo de carga experimental.

Desplazamiento Esperado (mm)	Carga Máxima Contracción (kg)	Despl. Experimental Contracción (mm)	Carga Máxima Extensión (kg)	Despl. Experimental Extensión (mm)
2	4581,5	3,35	5186,7	2,59
4	5228,2	5,14	6210,4	4,45
6	5558,1	6,22	7181,1	6,03
8	6061,2	7,96	8320,8	8,65
10	7260,7	10,17	8319,0	10,01
12	6082,6	12,41	10509	12,16
14	8130,8	14,07	13005	15,47
--	-	-	20752	35,96
--	-	-	19976	37,26

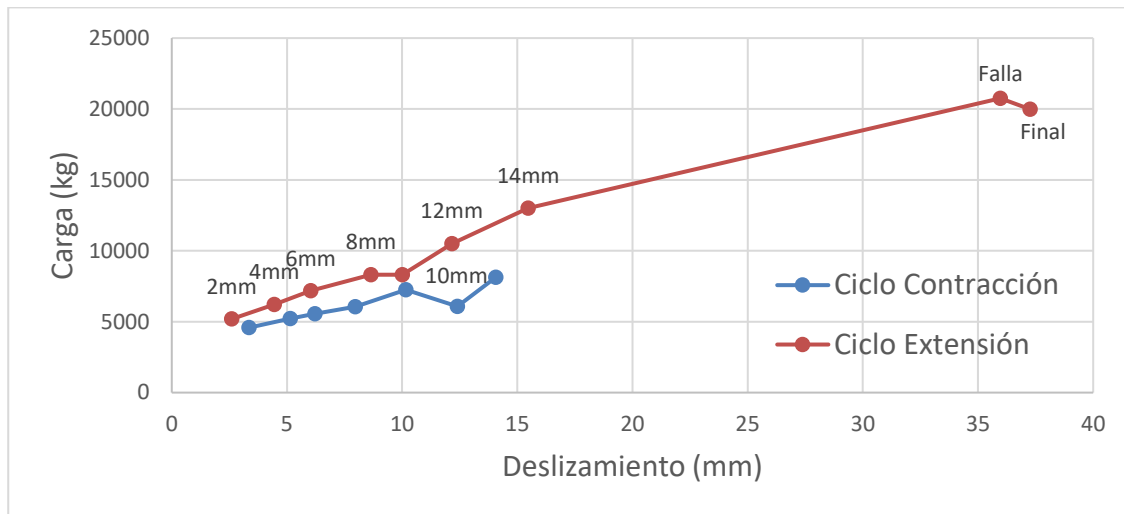


Figura 14: Gráfico carga vs desplazamiento.

4. DISCUSION DE RESULTADOS

En ensayos previos realizados en el laboratorio se observó una falla frágil en los muros de albañilería sin refuerzo, desprendiéndose de manera abrupta una fracción de muro, lo que en términos de seguridad y estructurales no resulta conveniente ni deseable. Para el caso de este estudio no se obtuvieron fallas de carácter frágil, sino más bien dúctiles, ya que el CFRP dificulta este fenómeno y mejora la adherencia entre los elementos constitutivos de la estructura, lo cual, sin importar las cargas aplicadas resulta en un punto a favor para la utilización de FRP como técnica de reforzamiento.

De manera preliminar se podría indicar que el reforzamiento fue efectivo en el sentido de prevenir o retardar fallas diagonales en la estructura principal. Lo anterior, a base de estudios anteriores de Konthesingha et al. [18] en los que se comparan muros no reforzados con otros reforzados mediante la técnica NSM FRP ante la acción de cargas cíclicas, con la diferencia de que la albañilería es de ladrillos cerámicos de fabricación industrial y construido bajo otras normas por lo que los valores obtenidos no serían comparables, sin embargo, el patrón de falla es el mismo.

Por otro lado, Magenes et al [19], basándose en experimentos sobre muros reforzados con NSM, indica que se puede mejorar el desempeño del muro incrustando los cordones de CFRP en la fundación del muro, pues esto mejora su resistencia a la adherencia y evitar así la falla por deslizamiento en la base del muro (Figura 1b), en la cual se producen grandes desplazamientos sin la pérdida de integridad del resto del muro. En dicho caso el daño y la disipación de energía se concentran en una junta, tal como se observó en este experimento donde se observó una grieta entre la primera fila de ladrillos y la fundación de hormigón (Figura 12). Este anclaje de los cordones en la fundación es difícil de implementar en terreno y, por lo tanto, poco frecuente, lo que atenta con la efectividad del reforzamiento con FRP [7].

Puesto que de forma paralela a este estudio se analizó un muro reforzado mediante la técnica EB-CFRP bajo las mismas condiciones en términos constructivos y de aplicación de cargas, podemos comparar algunos valores obtenidos respecto de las cargas y deformaciones admitidas por las estructuras, determinando que la técnica NSM admite mayor elasticidad y no falla la adherencia del compuesto epóxico como ocurre en la técnica EB-CFRP. Por ejemplo, de la Figura 15 se puede inferir que la técnica NSM-CFRP alcanza mayores deformaciones finales para una misma carga sin observarse una falla frágil de la estructura, lo que se traduce en una dotación de mayor capacidad elástica hacia el muro, mientras que la técnica EB-CFRP aporta mayor rigidez en todo momento al muro reforzado (Figura 16, Tabla 4).

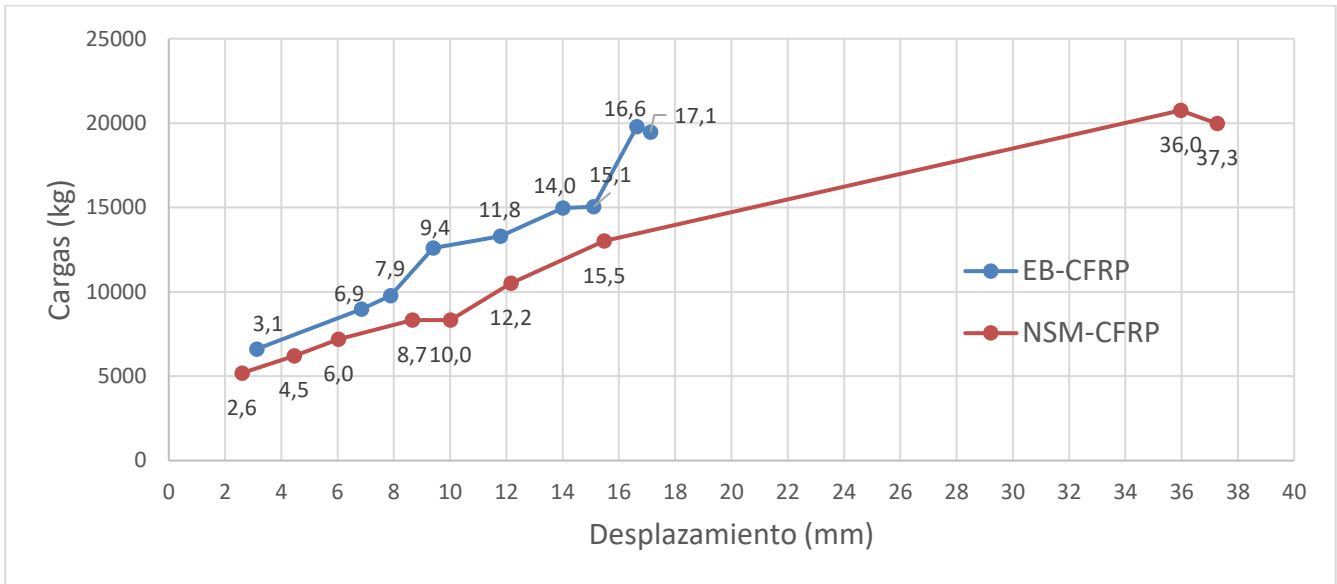


Figura 15: Carga vs Desplazamiento de técnica NSM-CFRP y EB-CFRP

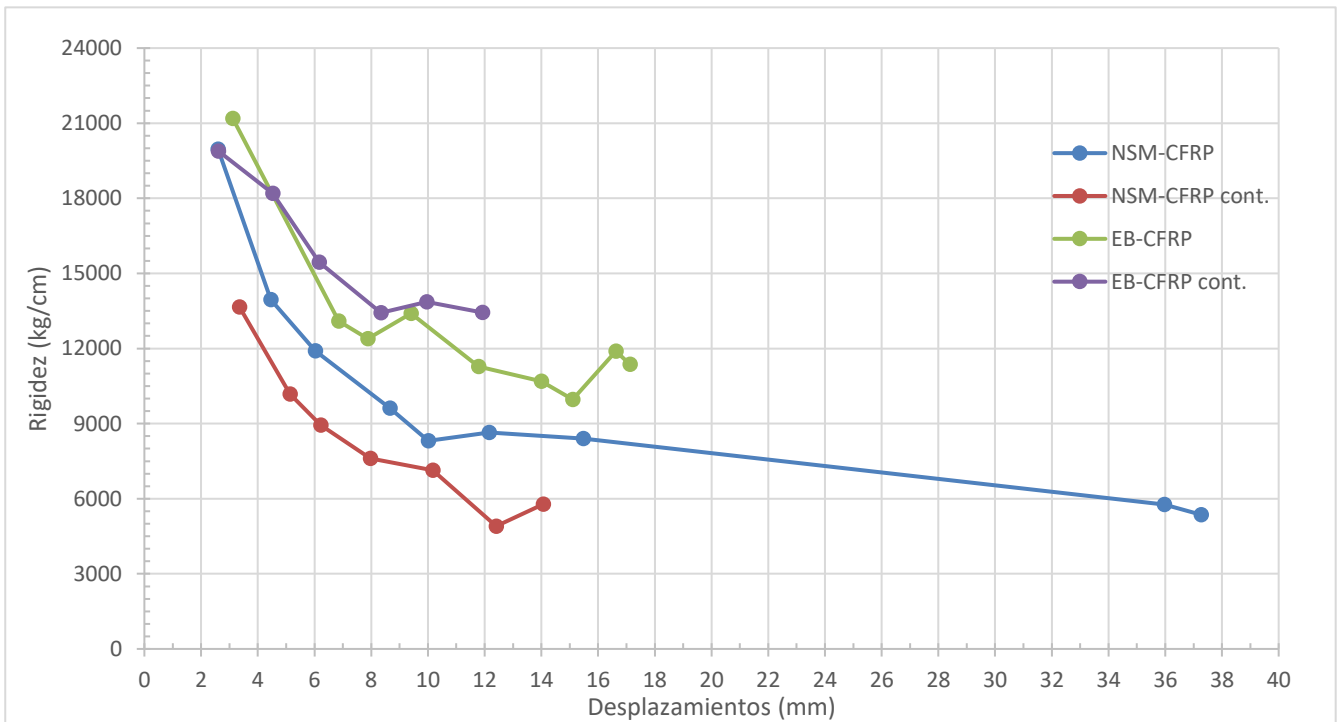


Figura 16: Rigidez (kg/cm) de técnica NSM-CFRP y EB-CFRP.

Tabla 4: Cargas (kg), desplazamientos (mm) y rigidez (kg/cm) obtenidas por cada ciclo de carga experimental tanto para la técnica EB como NSM en contracción y extensión.

NSM-CFRP						EB-CFRP					
Extensión			Compresión			Extensión			Compresión		
Carga (kg)	Despl. (mm)	Rigidez (kg/cm)	Carga (kg)	Despl. (mm)	Rigidez (kg/cm)	Carga (kg)	Despl. (mm)	Rigidez (kg/cm)	Carga (kg)	Despl. (mm)	Rigidez (kg/cm)
5186,7	2,6	19959,6	4581,5	3,4	13653,3	6609,3	3,1	21183,7	5183,0	2,6	19889,6
6210,4	4,5	13946,2	5228,2	5,1	10173,6	8967,9	6,9	13091,8	8235,0	4,5	18199,0
7181,1	6,0	11906,0	5558,1	6,2	8933,0	9767,4	7,9	12395,2	9509,9	6,2	15444,3
8320,8	8,7	9616,0	6061,2	8,0	7609,7	12596,1	9,4	13400,1	11192,7	8,3	13426,5
8319,0	10,0	8310,7	7260,7	10,2	7141,4	13303,0	11,8	11283,3	13802,0	10,0	13862,1
10509,0	12,2	8643,7	6082,6	12,4	4903,3	14960,5	14,0	10686,1	16019,0	11,9	13444,1
13005,0	15,5	8404,4	8130,8	14,1	5780,9	15047,1	15,1	9965,0	-	-	-
20752,0	36,0	5770,4	-	-	-	19778,9	16,6	11893,5	-	-	-
19976,0	37,3	5361,2	-	-	-	19455,1	17,1	11363,9	-	-	-

En términos de seguridad, parece ser más segura la técnica NSM-CFRP, ya que en ningún momento del ensayo se presentaron fallas en la adherencia del epóxico a la albañilería, mientras que en la técnica EB-CFRP alcanzada la carga final registrada en la Figura 15 el CFRP se despegó prácticamente en su totalidad, dejando la estructura nuevamente como un muro no reforzado y propenso a fallas de carácter frágil.

Además, estéticamente la técnica NSM es menos invasiva visualmente que la técnica EB lo que resulta muy conveniente a la hora de querer reforzar estructuras de carácter histórico o patrimonial, además de quedar protegida de factores externos como el fuego o el vandalismo [1].

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La técnica NSM CFRP resulta ser de fácil instalación, sin embargo, es sumamente necesario que sea ejecutada por personal calificado, ya que de lo contrario podría no quedar bien adherida la fibra y lograr un efecto contrario al deseado, debilitando el muro con los surcos que es necesario elaborar para la instalación de las fibras.

Los reforzamientos aumentan la rigidez del muro y esta va disminuyendo a medida que este va recibiendo carga, independiente si se produzcan fallas visibles o no. Hasta alcanzar un punto de rigidez mínima en la que el muro o el reforzamiento sufre algún tipo de falla importante.

Comparando la técnica estudiada en el presente informe con un ensayo paralelo ejecutado bajo las mismas condiciones de construcción y aplicación de cargas, pero bajo la técnica de reforzamiento EB-CFRP, se puede indicar que la técnica de reforzamiento EB-CFRP vuelve más rígida la estructura limitando sus desplazamientos con elevadas cargas, mientras la técnica NSM-CFRP dota de mayor elasticidad al muro.

Es recomendable comparar los resultados de este estudio con el análisis de un muro sin reforzar, tal como se realizó en muchas investigaciones externas, para así poder determinar a cabalidad el aumento en la capacidad de resistencia efectiva que otorga el CFRP a la albañilería simple, puesto que en casi todos los estudios internacionales se utilizan otros tipos de albañilería, en general de manufactura industrial, de otros materiales, como concreto y otras configuraciones en el proceso de construcción.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por ANID/CONICYT en el marco del proyecto FONDECYT Iniciación 11200117. Además, se contó con el apoyo de la empresa Sika Chile quienes donaron el material para el reforzamiento de los muros ensayados.

7. REFERENCIAS

- [1] Tomažević, M. (1999). “Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings” (1.^a ed.). London, Singapore, River Edge, NJ: Imperial College Press. London, Singapore, River Edge, NJ: Imperial College Press.
- [2] ElGawady MA, Lestuzzi P, Badoux M. (2007) “Static cyclic response of masonry walls retrofitted with fiber-reinforced polymers”. *Journal of Composites for Construction* 11(1);50–61.
- [3] Konthesingha, K. M. C., Masia, M. J., Petersen, R. B., and Page, A. W. (2009). “Bond behaviour of NSM FRP strips to modern clay brick masonry prisms under cyclic loading.” *Proc., 11th Canadian Masonry Symp. (CD-ROM)*, McMaster Univ., Hamilton, Canada.
- [4] Zhuge, Y. (2010) “FRP Retrofitted URM Walls under In-Plane Shear - Review and Assessment of Available Models ” *Journal of Composites for Construction*, 14(6).
- [5] Turco V, Secondin S, Morbin A, Valluzzi MR, Modena C. Flexural and shear strengthening of un-reinforced masonry with FRP bars. *Compos Sci Technol* 2006;66:289–96.
- [6] Bournas, D.A., and Triantafillou, T.C., (2009). “Flexural Strengthening of RC Columns with NSM FRP or Stainless Steel” *ACI Structural Journal* V.106, 495-505
- [7] Konthesingha, K. M. C., Masia, M. J., Petersen, R. B., Mojsilovic, N., Simundic, G., and Page, A. W. (2013). “Static cyclic in-plane shear response of damaged masonry walls retrofitted with NSM FRP strips—An experimental evaluation.” *Eng. Struct.*, 50, 126–136.
- [8] Dizhur, D., Griffith, M. and Ingham, J. (2013). “In-Plane Shear Improvement of Unreinforced Masonry Wall Panels Using NSM CFRP Strips” *Journal of Composites for Construction*, 17(6).
- [9] Dizhur D, Griffith MC, Ingham JM. (2014). “Pullout strength of NSM CFRP strips bonded to vintage clay brick masonry.” *Eng Struct* 2014;69:25–36.
- [10] Mahmood, H., and Ingham, J. M. (2011). “Diagonal compression testing of FRP-retrofitted unreinforced clay brick masonry wallettes.” *Journal of Composites for Construction*, 15(5), 810–820.
- [11] Houria H, Benchaa B, Madyan A, Rajab A, Abdelhamid G. (2020). “Strengthening of masonry walls with CFRP composite: experiments and numerical modeling.” *Epitoanyag 72 - Journal of Silicate Based and Composite Materials*; 2-11
- [12] Dillon S. Lunn and Sami H. Rizkalla, F.ASCE (2011). “Strengthening of Infill Masonry Walls with FRP Materials” *Journal of Composites for Construction*, 2011.15:206-214.
- [13] Petersen RB. In-plane shear behaviour of unreinforced masonry panels strengthened with fibre reinforced polymer strips. PhD-thesis. The University of Newcastle; 2009.

- [14] Seracino, R., Jones, N. M., Ali, M. S. M., Page, M. W., and Oehlers, D. J. (2007). “Bond strength of near-surface mounted FRP strip-to-concrete joints.” *Journal of Composites for Construction*, 11(4), 401–409.
- [15] Petersen RB, Masia MJ, Seracino R. (2009) “Bond Behavior of Near-Surface Mounted FRP Strips Bonded to Modern Clay Brick Masonry Prisms: Influence of Strip Orientation and Compression Perpendicular to the Strip.” *Journal of Composites for Construction*. 13(3):169-78
- [16] SIKA, S.A.U., & Martínez, R. M. (2017, abril). Refuerzo a flexión por el sistema NSM (Near Surface Mounted) (N.o 1). DEPARTAMENTO TÉCNICO.
- [17] NCh2123.Of 1997 Mod 2003. Albañilería confinada – Requisitos de diseño y cálculo.
- [18] K.M.C., Konthesinghala, M.J.Masia, R.B.Petersen, A.W.Page (2014). “Experimental Evaluation of Static Cyclic In-Plane Shear Behavior of Unreinforced Masonry Walls Strengthened with NSM FRP Strips” *Journal of Composites for Construction* 19(3); 04014055(1) – 04014055(15)
- [19] Magenes, G., and Calvi, G. M. (1997). “In-plane seismic response of brick masonry walls.” *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 26(11), 1091–1112.