

ENSAYO DE MURO DE ALBAÑILERÍA SIMPLE, REFORZADOS CON CFRP: REFUERZO DE BANDAS SUPERFICIALES (EB-CFRP)

L. Lobos Infante¹, C. Oyarzo Vera² y F. Sanhueza Espinoza³

RESUMEN: En este documento se presenta un estudio experimental realizado en un muro de albañilería simple a escala real. Como principal objetivo de este estudio es comprobar mediante técnicas no destructivas la efectividad del refuerzo de CFRP propuesto por Sika AG. Para esto, se ensayó un muro plano de albañilería simple de dimensiones 2400 (mm) de largo, 1600 (mm) de alto y un espesor de 140 (mm). Este muro se encuentra sobre una base de hormigón armado, la cual esta fija a una losa que impide el desplazamiento. En su coronamiento se dispuso una viga de acero, la cual permite transmitir mediante cadenas una pre-compresión de 2 (T) y conectar un actuador hidráulico que permite la aplicación de cargas cíclicas horizontales. Durante el ensayo a este muro, se utilizó una secuencia de cargas cíclicas (extensión y contracción) controlada por desplazamiento. El muro fue ensayado hasta conseguir la falla total del refuerzo de CFRP. Durante este experimento se pudo observar que al quedar el refuerzo de CFRP dentro de la fundación de hormigón armado, se aprovecha de mejor forma el anclaje mecánico entre CFRP y hormigón. La falla que se generó en este estudio es muy distinta a la que se genera en otros casos. En este caso se observó una falla dúctil con grietas múltiples, en forma de escalerilla y desplazamiento de su eje vertical.

PALABRAS CLAVES: Albañilería no reforzada, CFRP, Ensayo cíclico.

ABSTRACT: This document provides an experimental study performed on a full-scale unreinforced masonry wall. The main objective of this study is to test the effectiveness of the CFRP reinforcement proposed by Sika AG by applying non-destructive techniques. To accomplish this purpose, a masonry wall with dimensions 2400 (mm) long, 1600 (mm) high and a thickness of 140 (mm) was tested. This wall is placed on a reinforced concrete base, which is fixed to a strong-floor to prevent displacement. A steel beam was placed at the top of the wall to transmit a pre-compression of 2 (T) by means of chains and to connect a hydraulic actuator that allows the application of horizontal cyclic loads. During the testing of the wall, a sequence of cyclic loads (extension and contraction) controlled by displacement was used. The wall was tested until total failure of the CFRP reinforcement was achieved. This experiment demonstrated that the CFRP reinforcement is better optimized by remaining inside the reinforced concrete foundation, based on the mechanical anchorage between the CFRP and the concrete foundation. The generated failure in this study is significantly different from similar failures. In the present case, a ductile failure with multiple cracks in the shape of a staircase and a displacement of its vertical axis was observed.

KEYWORDS: Unreinforce Masonry, CFRP, Cyclic test.

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

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

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

1. INTRODUCCIÓN

La albañilería es un material heterogéneo, compuesto por ladrillos adheridos con mortero. Podemos encontrar tres tipos de albañilería, la primera se denomina albañilería simple y corresponde únicamente a un arreglo de ladrillos adheridos con mortero, sin ningún tipo de refuerzo adicional. El segundo tipo corresponde a la albañilería confinada, en la cual los paños de albañilería son encerrados lateralmente por pilares de hormigón armado y en su parte superior los confinan vigas de hormigón armado, llamadas cadenas. En este caso, los ladrillos cumplen la función de transmitir las cargas verticales al sobrecimiento, y la carga lateral es resistida por la acción conjunta de la albañilería y los elementos de hormigón armado [1]. Por último, el tercer tipo corresponde a la albañilería armada, en esta se utiliza el acero como refuerzo vertical en los muros. Para esto, los ladrillos poseen un diseño estructural que facilitan la inserción de los tensores garantizando una gran flexibilidad [2].

En el sismo de Chillán de 1939 (Mw 7.8), reportes oficiales registran el colapso del 50% de las construcciones existentes en la ciudad y 5.650 personas fallecidas. Por otro lado, el sismo de Valdivia 1960 (Mw 9.5) provocó la destrucción de más de 10.500 viviendas destruidas en Concepción y Talcahuano, y el terremoto de Lolleo 1985 (Mw 8.0) generó daños irreparables en 143.000 viviendas. En todos estos casos, las estructuras más seriamente dañadas fueron las de adobe y albañilería simple, lo que revela la alta vulnerabilidad sísmica de este sistema constructivo [3].

Crispieri [4] en el 2011, realizó una caracterización y diagnóstico del nivel de daño probable ante un escenario sísmico extremo en la ciudad de Arica. En este estudio, analizó un total de 4.487 viviendas sociales de albañilería construidas en los últimos 28 años, concluyendo que un 74.1% presentaría un daño sísmico alto y un 22.6% un daño sísmico moderado.

Por otro lado, Alcaíno *et al.*[5] realizó un levantamiento de información en terreno analizando el comportamiento de edificios en Chile producto del terremoto del Maule del 2010. Su investigación abarcó 162 edificaciones con un total de 1624 unidades habitacionales y detectó que los edificios de 1 a 5 pisos construidos en albañilería armada o confinada presentaron daños leves, moderados, severos e incluso el colapso.

Asimismo, Vega y Torres [6] califican a los muros de albañilería no armada como muy vulnerables sísmicamente, producto que son estructuras de baja ductilidad y baja capacidad de disipación de energía. Esto en base a observaciones de los efectos de los terremotos de Popayán 1983 [7], Northridge 1994 [8], Eje Cafetero 1999 [9], Tecmán [8] y Maule 2010 [10].

Producto de este mal comportamiento sísmico de las estructuras de albañilería, se han implementado distintas técnicas de refuerzo y/o reparaciones, dentro de los cuales están: el reemplazo de piezas dañadas, la reparación de grietas mediante la inyección de materiales cementantes o epóxicos, la inserción de barras de refuerzo a lo largo de las juntas de mortero, el revestimiento estructural con hormigón armado en una o ambas caras de la superficie del muro de albañilería, el encamisado con malla metálicas, el refuerzo con materiales compuestos de polímeros reforzado con fibra de vidrio (GFRP) o polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP), y que al ser adheridos a la superficie del muro mejoran significativamente su capacidad de carga y a la deformación última en los muros [11-12].

Existen distintos autores que han realizado estudios para evaluar la efectividad de refuerzos de FRP sobre muros de albañilería. Por ejemplo, Vega y Torres [6] evaluaron el comportamiento ante cargas laterales en muros de albañilería no estructural, reforzados mediante polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP). En dicho estudio se construyeron ocho muros de albañilería de arcilla, utilizando

bloques de perforación horizontal. Cuatro muros esbeltos y cuatro muros achaparrados. Los resultados demostraron que los muros esbeltos obtuvieron un incremento en la capacidad de carga en el plano de aproximadamente 13 a 19 veces la resistencia original, mientras que los muros achaparrados aumentaron aproximadamente 8 veces. Por otro lado, la investigación de Bernat-Manso *et al.* [13] se enfocó en muros de albañilería reforzados con fibras y sometidos a cargas excéntricas de compresión verificando un aumento del 200% de la capacidad portante y que los refuerzos verticales son más efectivos que los horizontales, obteniendo una contribución parcial de los refuerzos diagonales. Thambo *et al.* [14] demostró con sus experimentos que la unión de CFRP es efectiva para la deformación lateral y que el refuerzo puede aumentar entre un 10% - 20% la resistencia a compresión de muretes de albañilería en comparación con muretes no reforzados. Por último, Santa María *et al.* [15] investigó el comportamiento de muros de albañilería compuestos por ladrillos huecos y reforzados con bandas de CFRP en diagonales, sometidos a cargas cíclicas y monotónicas. Con esto, determinó que la rigidez bajo ensayos de compresión diagonal aumenta hasta en un 60%.

El objetivo de este estudio es determinar la rigidez y resistencia de un muro plano de albañilería simple reforzado con tiras diagonales de CFRP propuesto por Sika AG mediante métodos destructivos, el muro será ensayado de forma cíclica aplicando una carga horizontal a su viga de coronamiento, se aumentará progresivamente hasta la falla. Finalmente se comparan los resultados con otro muro ensayado bajo las mismas condiciones y solo modificando el refuerzo que consistió en cordones de NSM-CFRP (*Near Surface Mounted*) en disposición vertical introducidos en el muro de albañilería simple, otra solución propuesta por Sika AG.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 Descripción del espécimen

Para el correcto ensayo del espécimen se construyó una fundación de hormigón armado de 2700 (mm) de largo, 600 (mm) de ancho y 400 (mm) de alto, la cual posee una armadura confeccionada con barras de 8 (mm) y 10 (mm) de diámetro. (Figura 1). El hormigón utilizado fue de calidad G-25. En la mitad de la fundación se dejó un surco de 2400 (mm) de largo, 160 (mm) de ancho y 100 (mm) de profundidad para la instalación adecuada de los ladrillos (Figura 2).



Figura 1: Moldaje y armadura para fundación
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 2: Moldaje recién hormigonado
(Fuente: Elaboración propia)

Luego de esperar 28 días para el fraguado de la fundación, se realizó la instalación de 5 espigas de acero fijadas mediante Sika Anchorfix-1 a una profundidad de 100 (mm) (Figura 3). En el surco de la fundación se agregó un puente adherente de junta fría Pegadur 32 Topex para mejorar la unión con el mortero de pega de la albañilería (Figura 4).

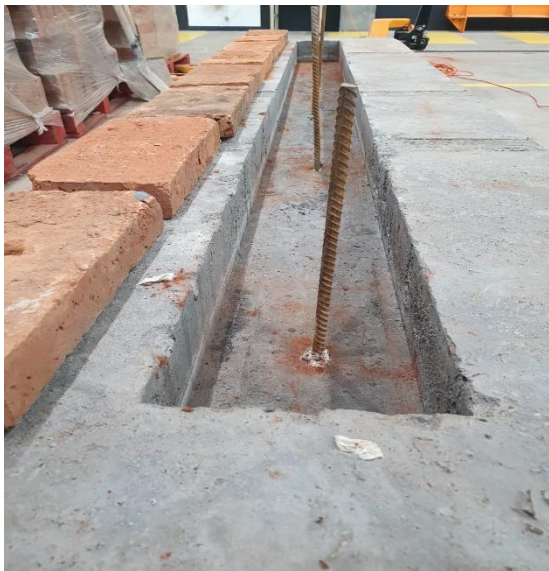


Figura 3: Espigas de acero incrustados en el surco (Fuente: Elaboración propia)



Figura 4: Distribución del puente adherente en las paredes y base del surco (Fuente: Elaboración propia)

Al momento de distribuir el puente adherente en el surco, se colocaron las 2 primeras corridas de ladrillos dejándose secar por un día; lo que permitió poder asegurar de mejor forma la adherencia entre la fundación y el muro de albañilería simple. Luego se construyó el muro a escala real, cuyas dimensiones fueron de 2400 (mm) de largo, 1800 (mm) de alto y 140 (mm) de espesor (Figura 5).



Figura 5: Muro de albañilería simple (Fuente: Elaboración propia)

Como se indicó anteriormente, los ladrillos que se utilizaron para la construcción del espécimen son ladrillos macizos con dimensiones de 290 (mm) de largo, 140 (mm) alto y 50 (mm) de espesor. Se utilizó la disposición de aparejo en soga, unidos por un mortero predosificado marca Topex, con una relación de agua: mortero de 3.7 (L) / 25 (kg) de mezcla seca según fabricante. Esta predosificación se modificó agregando un 20% adicional de arena con la finalidad de reducir su resistencia y propiciar más fácilmente la falla.

Durante la construcción de muro se extrajeron muestras de mortero y se construyeron prismas de albañilería. Este muestreo se realizó en 3 etapas tal como se ilustra en la Figura 6. Las probetas de mortero fueron fabricadas y ensayadas de acuerdo a lo especificado en la norma NCh2123 [21], mientras que los prismas de albañilería se confeccionaron y ensayaron según las normas NCh167 [17] para adherencia y NCh2123 para compresión de prismas. Los resultados de estos ensayos determinaron una resistencia promedio a la compresión del mortero de 6,272 MPa (Tabla 1) y en el caso de los prismas la resistencia fue de 2.057 MPa (Tabla 2), en ambos casos medidos a los 28 días.

Sobre el muro de albañilería construyó una viga de hormigón armado de 2400 (mm) de largo, 200 (mm) de ancho y 240 (mm) de alto. Este elemento se construyó con la finalidad de transmitir de mejor forma las cargas horizontales y verticales desde el aparejo de carga al muro de albañilería. Posterior a esto, se procedió a pintar el muro de color blanco para poder apreciar en un futuro las posibles fallas de manera más clara y oportuna.

Finalmente, el muro fue reforzado utilizando tiras de 250 (mm) de ancho de fibra de carbono CFRP Sika Wrap – 300C y adheridas con Sikadur – 300, las cuales cubren solo por una cara el muro siguiendo la forma de X (Figura 7). Las especificaciones técnicas de material de refuerzo utilizado indican una resistencia a la tracción del tejido de fibra seca de 4 (kN/mm²) y un módulo de elasticidad en tracción de la fibra seca de 230 (kN/mm²).



Figura 6: Distribución de preparación de mortero en 3 etapas (Fuente: Elaboración propia)



Figura 7: Muro de albañilería simple, con viga de hormigón armado, pintado blanco y reforzado con tiras de CFRP (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 1: Resistencia máxima a compresión de probetas con agregado de 20% de arena a la mezcla original, correspondientes a la primera, segunda y terca mezcla (Fuente: Elaboración propia).

Probeta	Resistencia máx. (MPa)
PC1-M1a	7,057
PC1-M1b	7,431
PC1-M2a	5,684
PC1-M2b	6,806
PC1-M3a	6,634
PC1-M3b	6,260
SC2-M1a	6,235
SC2-M1b	6,211
SC2-M2a	6,162
SC2-M2b	6,511
SC2-M3a	6,769
SC2-M3b	6,879
TC1-M1a	5,120
TC1-M1b	5,647
TC1-M2a	6,205
TC1-M2b	6,180
TC1-M3a	5,776
TC1-M3b	5,334
Promedio (MPa)	6.272

Tabla 2: Resistencia máxima a compresión de prismas de mortero/ladrillo con agregado de 20% de arena a la mezcla original, correspondientes a la primera, segunda y terca mezcla (Fuente: Elaboración propia).

Prisma	Resistencia máx. (MPa)
PC1a_M1	2,262
PC1b_M1	2,551
PC1c_M1	2,054
SC2a_M1	2,306
SC2b_M1	1,697
SC2c_M1	2,038
TC3a_M1	1,789
TC3b_M1	2,170
TC3c_M1	1,643
Promedio (MPa)	2,057

Durante el proceso de posicionamiento del espécimen para el montaje del experimento, el muro sufrió una ruptura accidental en su base a lo largo de la primera fila de ladrillos (Figura 8). Afortunadamente, esto solo fue un daño localizado que se resolvió reparando la grieta generada con epóxico y elevando la fundación 200 (mm), de manera de llevar el nivel de empotramiento a la tercera hilera de ladrillo (Figura 9 y 10). Esta reparación demostró ser efectiva, pues no se observó levantamiento del muro en la zona de ruptura accidental, durante los ensayos posteriores.



Figura 8: Colapso del muro de albañilería reforzado, producto de su traslado
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 9: Disposición de la armadura de reparación (Fuente: Elaboración propia)



Figura 10: Hormigonado de fundación posterior a reparación (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, sobre el muro se instaló un aparejo de carga que consta de una viga de acero color naranja, un actuador hidráulico marca ENERPAC modelo RD2510 y conectado a una celda de carga de 25 (T). A su vez, el aparejo fue conectado a la losa de reacción mediante 4 cadenas cuya carga fue controlada por 4 dinamómetros tal como se observa en la Figura 11.



Figura 11: Muro montado para ensayo con aparejo de carga (Fuente: Elaboración propia)

2.2 Descripción de la instrumentación y secuencia de carga

El muro de albañilería se instrumentó por una de sus caras con 12 acelerómetros (Figura 12), generando una grilla como se puede ver en la imagen mencionada, con el objetivo de captar adecuadamente las formas modales del muro en el ensayo. Estos datos serán procesados en otra investigación realizada en paralelo.

En el extremo del actuador se instaló un LVDT de 150 (mm) de recorrido, con la finalidad de poder medir el desplazamiento que experimenta el muro en tiempo real. Además, de un segundo LVDT de 25 (mm) de recorrido junto al LVDT antes mencionado (Figura 13), para contrastar resultados en un rango de desplazamiento más pequeño.

Tal como se mencionó anteriormente, se instalaron 4 dinamómetros de 3 (T) en las cadenas, la cuales están conectadas mediante grilletes a la viga metálica superior y al suelo. Con ello se proporcionó una carga de 500 (kg) por cadena a fin de entregar al muro una pre-compresión de 2 (T) durante los ensayos modales.

Durante el ensayo se utilizó una secuencia de cargas cíclicas (extensión y contracción) controlada por desplazamiento consistente en 3 ciclos de desplazamiento de 2 (mm), los cuales luego se fueron incrementando en 2 (mm) para los 3 ciclos siguientes (Figura 14), lo que se repitió hasta la falla total del refuerzo del muro. Después de cada secuencia de 3 ciclos, se suspendía el ensayo para detectar grietas y ejecutar los ensayos modales.



Figura 12: Grilla de 12 acelerómetros en una cara del muro de albañilería (Fuente: Elaboración propia)

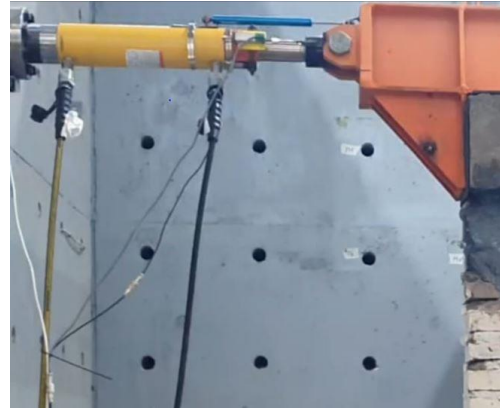


Figura 13: Disposición de LVDT (150 mm) sobre actuador y LVDT (25 mm) (Fuente: Elaboración propia)

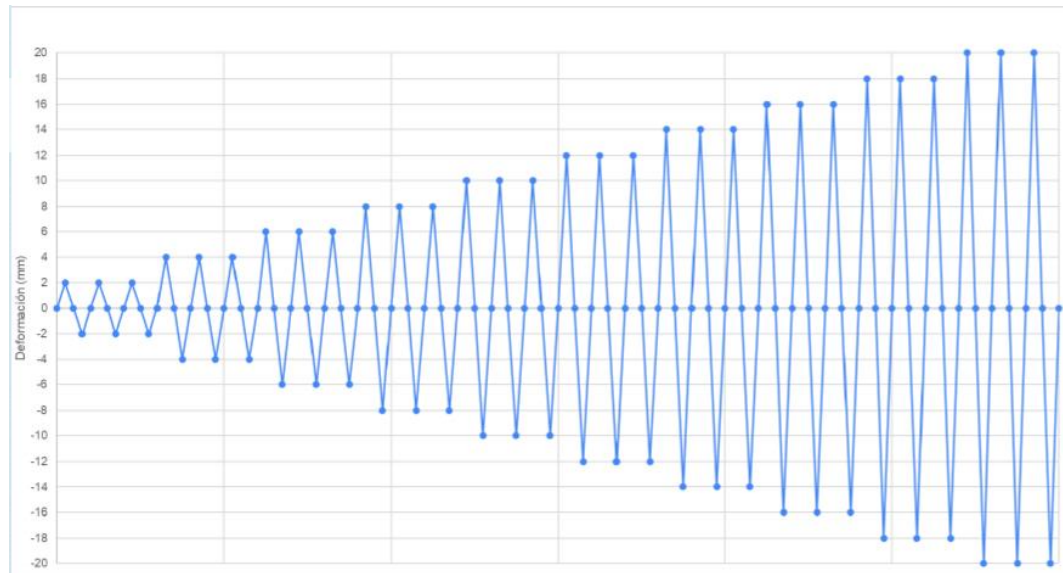


Figura 14: Secuencia de desplazamiento aplicada al muro (Fuente: Elaboración propia)

3. RESULTADOS

En la Figura 15 se puede apreciar el valor máximo de extensión de 6,609 (T) y un desplazamiento que llegó a los 3,122 (mm). En contracción se llega a un valor de 5,106 (T) y un desplazamiento de -2,598 (mm). Cabe destacar, que se excedió en la deformación, ya que, se estaba controlando manualmente el actuador. No se registraron grietas en el espécimen y no se ve alterado el refuerzo, de igual forma no presento problemas la fundación con respecto a la reparación que se realizó en el muro.

En la Figura 16 el valor máximo de extensión de 8,968 (T) y un desplazamiento que llegó a los 6,853 (mm). En contracción se llega a un valor de 4,513 (T) y un desplazamiento de -4,513 (mm). Tampoco se registraron grietas en el espécimen y no se ve alterado el refuerzo, solo presenta desprendimiento del pegamento epóxico en un borde de no más de 30 (mm).

En la Figura 17 se obtiene como valor máximo de extensión de 9,767 (T) y un desplazamiento que llegó a los 7,875 (mm). En contracción se llega a un valor de 9,510 (T) y un desplazamiento de -6,158

(mm). Al momento de llegar a la carga máxima en contracción del actuador, se presenta una primera grieta horizontal y un desprendimiento por falla de adherencia de la tercera fila de ladrillos del lado derecho del espécimen hasta el refuerzo de CFRP, sumado a esto el refuerzo se desprendió en 2 tramos cortos de 120 (mm) (Figura 19 y 20).

En la Figura 18 se puede apreciar el valor máximo de extensión de 12,596 (T) y un desplazamiento que llego a los 9,399 (mm) En contracción se llega a un valor de 11,192 (T) y un desplazamiento de -8,336 (mm). En el primer ciclo de los 8 (mm) se acentúa la grieta que surgió en los ciclos de 6 (mm), pero se mantiene el desprendimiento del refuerzo de CFRP sin verse modificado, sumado a esto se presenta una grieta en la parte posterior del muro (Figura 21). Siguiendo con los dos ciclos restantes de 8 (mm), se presentan múltiples grietas en la parte posterior (Figura 22) y en la cara frontal en la cual se presenta una falla por adherencia (Figura 23) en la sexta fila que va desde el lado izquierdo del muro hasta el refuerzo de CFRP, una grieta entre las dos bandas de refuerzo y pequeñas grietas aparentemente mostrando otra falla por adherencia (Figura 24).

En la Figura 25 se notar el valor máximo de extensión de 13,302 (T) y un desplazamiento que llego a los 11,792 (mm). En contracción se llega a un valor de 13,801 (T) y un desplazamiento de -9,957 (mm). En el ciclo de 10 (mm) cuando se extiende el actuador, se desplaza el lado izquierdo del muro saliendo de su eje vertical hacia la cara no reforzada del muro (Figura 26) desde la falla por adherencia de la sexta fila mencionada en el ciclo de 8 (mm), posteriormente en el proceso de contracción, aparece brusca y notoriamente una falla de adherencia en la cuarta fila que se desplaza al lado derecho con dirección hacia la cara que no está reforzada (Figura 27 y 28).

En la Figura 29 se puede apreciar el valor máximo de extensión de 14,960 (T) y un desplazamiento que llego a los 14,002 (mm). En contracción se llega a un valor de 16,038 (T) y un desplazamiento de -11,810 (mm). Durante estos ciclos de 12 (mm) a pesar de haber sobrepasado el límite de desplazamiento, se mantienen las mismas grietas y fallas, incrementando discretamente el desplazamiento del muro desde su eje principal en ambos costados.

Para el siguiente ciclo de 14 (mm) solo se procede a realizar el proceso de extensión sin realizar el de contracción, debido a la limitante del actuador (máximo a contracción de 15 (T)). También se desconecta el LVDT Superior que llego a su recorrido máximo. En la Figura 30 se puede apreciar el valor máximo de extensión de 15,047 (T) y un desplazamiento que llego a los 15,096 (mm). De igual forma que en el ciclo anterior se reitera el fallo del muro con la elevación del lado izquierdo vista frontal del muro y además de una leve desviación hacia la cara no reforzada desde su eje central, mostrando una tendencia a la falla que aparentemente se puede apreciar en las imágenes anteriores.

Luego de haber terminado estos 3 ciclos con 14 (mm) de deformación, se procede al siguiente ciclo de 16 (mm) solo de extensión sin realizar el de contracción, por la limitante del actuador (máximo a contracción de 15 (T)). En la Figura 31 se puede apreciar el valor máximo de extensión de 19,778 (Ton) y un desplazamiento que llego a los 16,627 (mm). Ya en el ciclo de 16 (mm) se acentúa claramente la falla por adherencia en el espécimen (Figura 32), incluso se pueden visualizar nuevas grietas en la parte posterior señaladas por las flechas (Figura 33). Nuevamente se incrementa el desfase (Figura 34) mostrando claramente su tendencia que seguirá desplazándose a medida que se le siga aumentando la carga del actuador.

Concluidos los 3 ciclos con 16 (mm) de deformación, se quita la tensión de las cadenas quedando solo con el peso propio del aparejo de carga, esto con la finalidad de no exigir al máximo los dinamómetros y poder llegar a los ciclos de 18 (mm). En la Figura 35 se puede apreciar el valor máximo de extensión de 19,445 (Ton) y un desplazamiento que llego a los 17,117 (mm). Se procede en este último ciclo buscar los 18 (mm) de desplazamiento, pero se llega a 17,2 (mm) obteniendo la

falla del material de refuerzo CFRP, desprendiéndose completamente desde el centro del muro hacia la derecha y en la parte inferior del lado izquierdo; permaneciendo el CFRP adherido al muro de albañilería en la parte derecha superior desde el centro de este. En la Figura 36 se puede apreciar el momento en que se desprende bruscamente; en la Figura 37 se observa como quedo desprendido el refuerzo de CFRP cuando se estabiliza y en la Figura 38, se evidencia de mejor manera el desprendimiento del refuerzo utilizado.

En lado posterior, se aprecia una nueva grieta en la parte inferior del muro que conecta ambas fallas por adherencia en una misma fila, pudiendo apreciar la falla predominante al termino del ensayo (Figura 39). Es importante agregar, que al momento de falla del CFRP el muro vuelve gradualmente a su posición inicial del eje vertical.

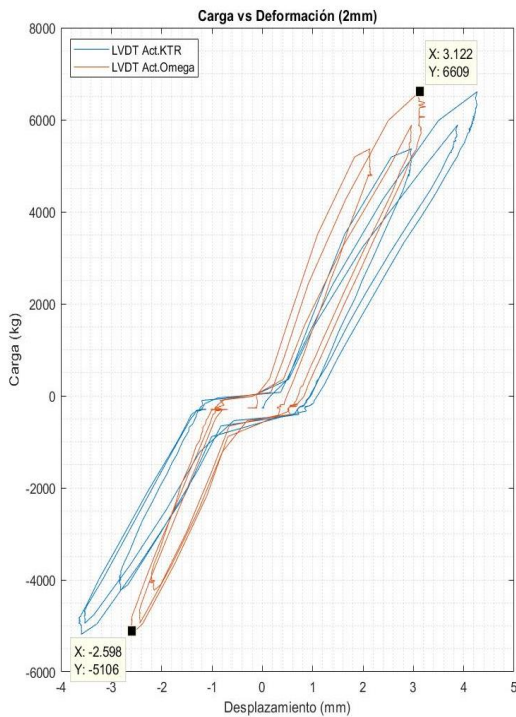


Figura 15: Carga v/s Desplazamiento correspondiente a ciclos de 2 (mm) (Fuente: Elaboración propia)

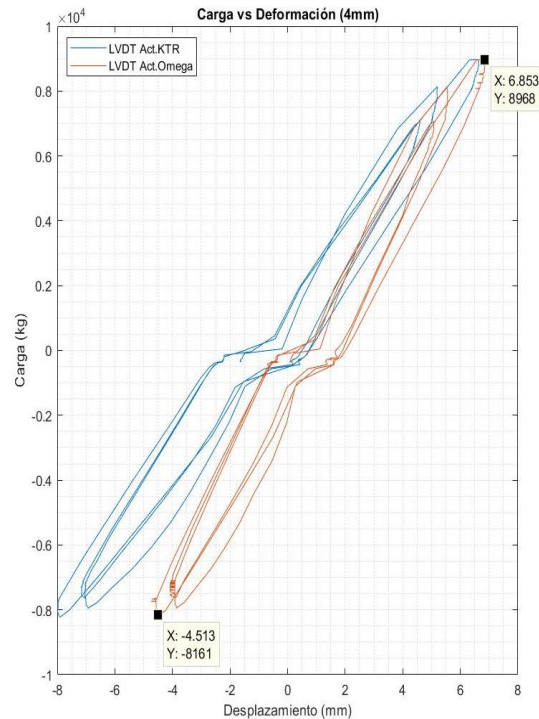


Figura 16: Carga v/s Desplazamiento correspondiente a ciclos de 4 (mm) (Fuente: Elaboración propia)

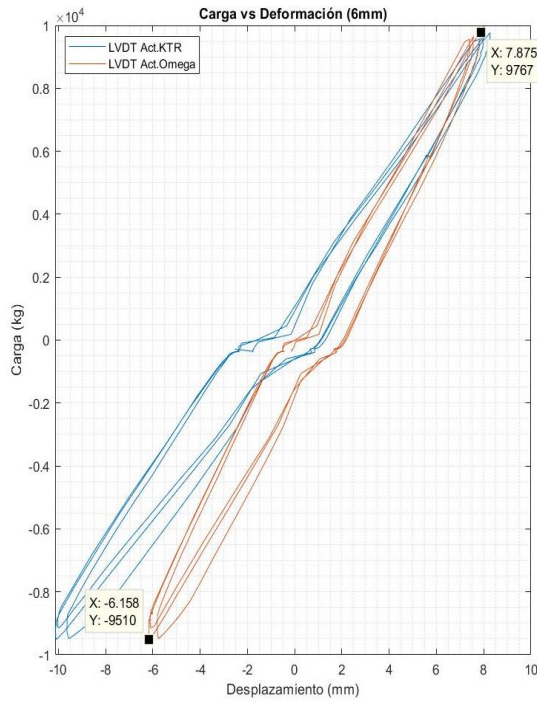


Figura 17: Carga v/s Desplazamiento correspondiente a ciclos de 6 (mm) (Fuente: Elaboración propia)

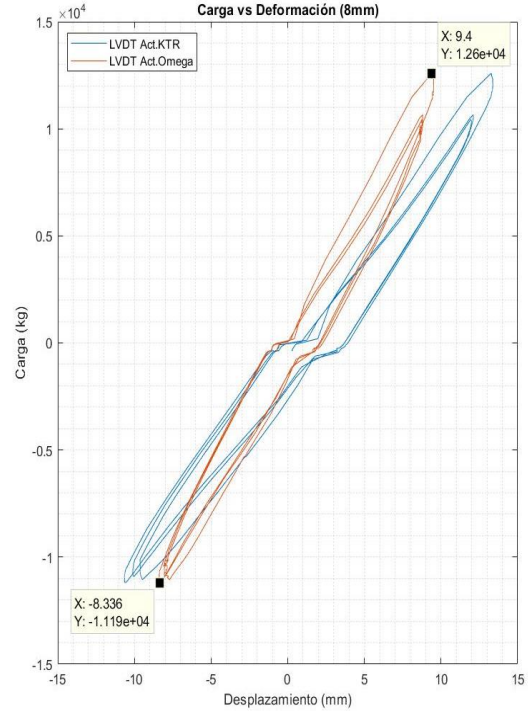


Figura 18: Carga v/s Desplazamiento correspondiente a ciclos de 8 (mm) (Fuente: Elaboración propia)



Figura 19: Registro general de muro de albañilería, de grieta a los 6 (mm) (Fuente: Elaboración propia)



Figura 20: Acercamiento a la grieta y desprendimiento en extremo de refuerzo de CFRP (Fuente: Elaboración propia)



Figura 21: Primera grieta visible en la parte posterior del muro de albañilería (Fuente: Elaboración propia)



Figura 22: Múltiples grietas en la parte posterior del muro de albañilería (Fuente: Elaboración propia)



Figura 23: Falla por adherencia en lado izquierdo del muro, vista frontal, sexta fila (Fuente: Elaboración propia)



Figura 24: Múltiples grietas en la parte posterior del muro de albañilería (Fuente: Elaboración propia)

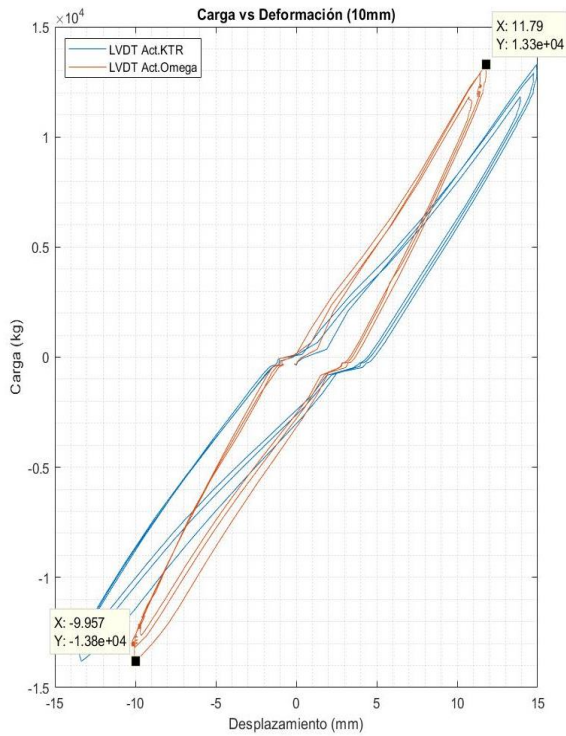


Figura 25: Carga v/s Desplazamiento correspondiente a ciclos de 10 (mm) (Fuente: Elaboración propia)

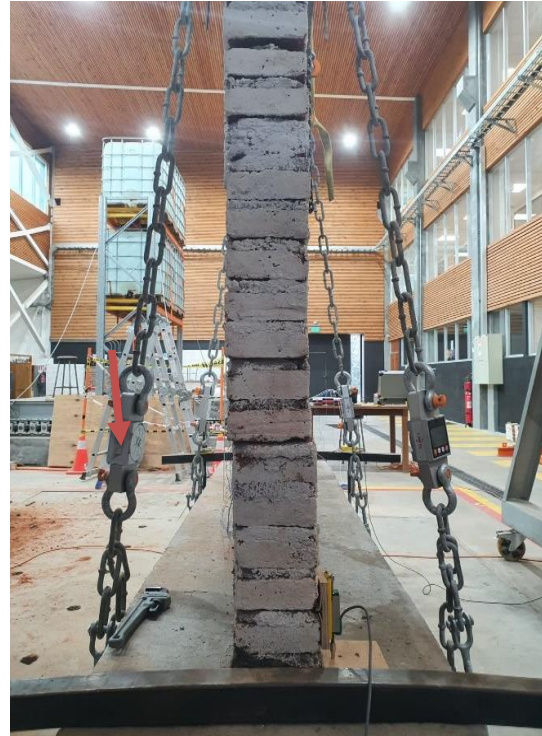


Figura 26: Desplazamiento del eje vertical original del muro de albañilería, ensayado en el ciclo de 10 (mm), en el proceso de extensión del actuador (Fuente: Elaboración propia)



Figura 27: Falla por adherencia en la cuarta fila, en el proceso de contracción del actuador, en el ciclo de 10 (mm) (Fuente: Elaboración propia)

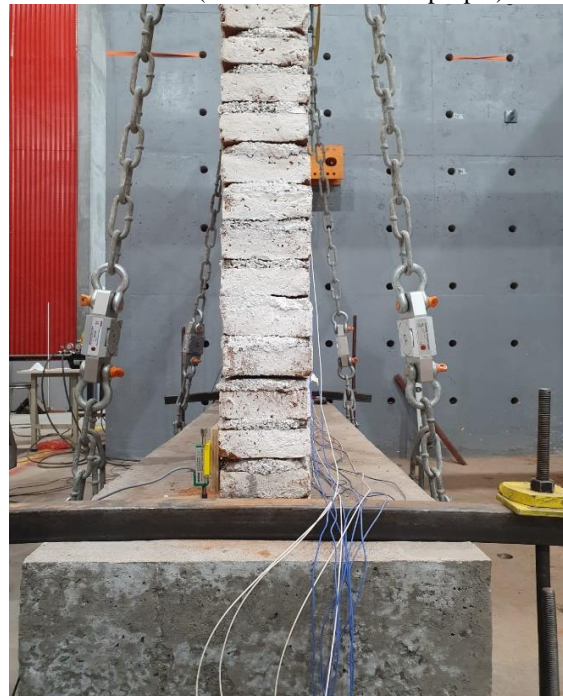


Figura 28: Desplazamiento del eje vertical original del muro de albañilería, ensayado en el ciclo de 10 (mm), en el proceso de contracción del actuador (Fuente: Elaboración propia)

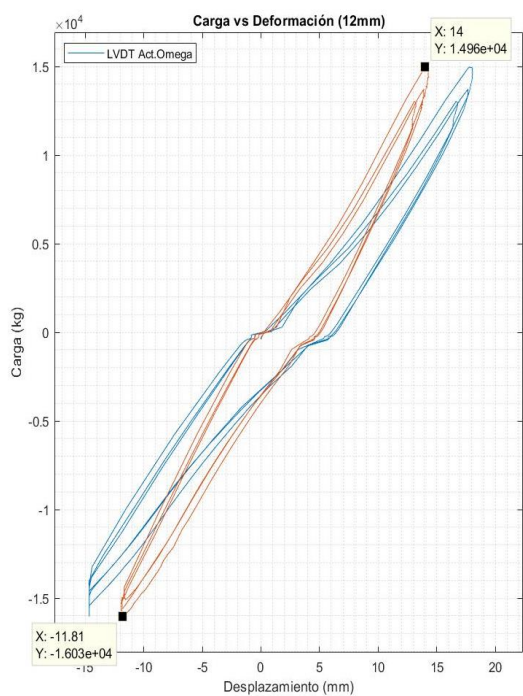


Figura 29: Carga v/s Desplazamiento correspondiente a ciclos de 12 (mm) (Fuente: Elaboración propia)

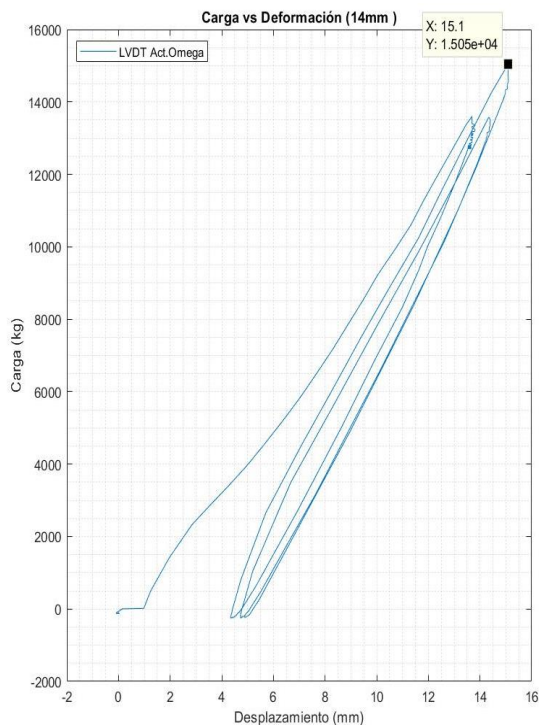


Figura 30: Carga v/s Desplazamiento correspondiente a ciclos de 14 (mm) (Fuente: Elaboración propia)

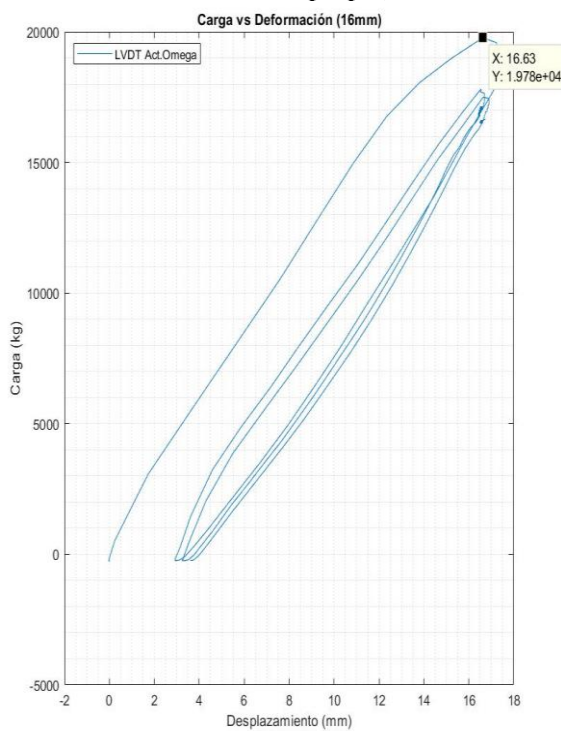


Figura 31: Carga v/s Desplazamiento correspondiente a ciclos de 16 (mm) (Fuente: Elaboración propia)



Figura 32: Falla por adherencia en la sexta corrida, momento justo en que se detiene el actuador en el proceso de extensión (Fuente: Elaboración propia)



Figura 33: Nuevas grietas en el proceso de extensión del actuador, en desplazamiento de 16 (mm) (Fuente: Elaboración propia)

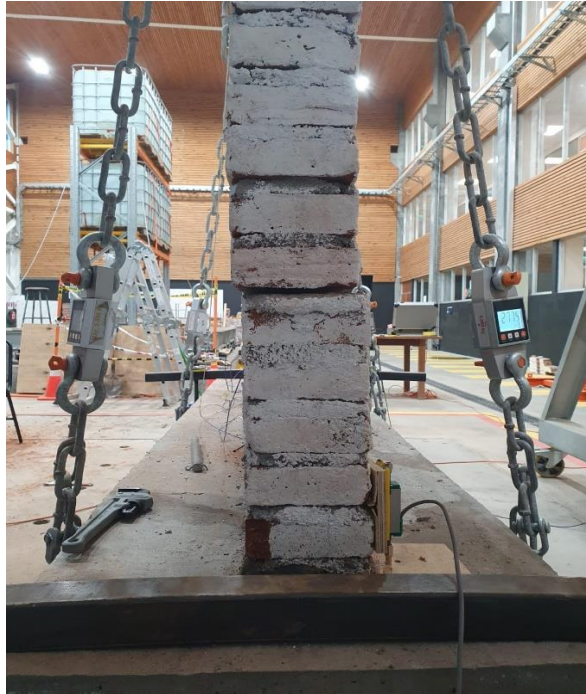


Figura 34: Desplazamiento aún más notorio del eje vertical original del muro de albañilería, ensayado en el ciclo de 16 (mm), en el proceso de extensión del actuador (Fuente: Elaboración propia)

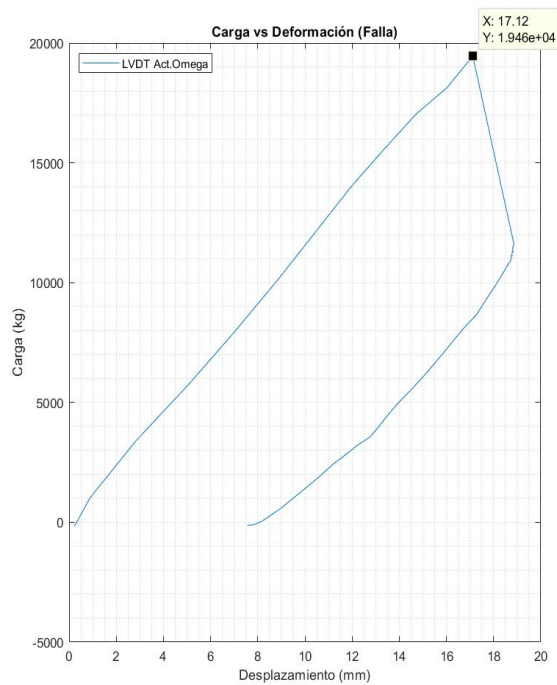


Figura 35: Carga v/s Desplazamiento correspondiente a ciclo de Falla (Fuente: Elaboración propia)

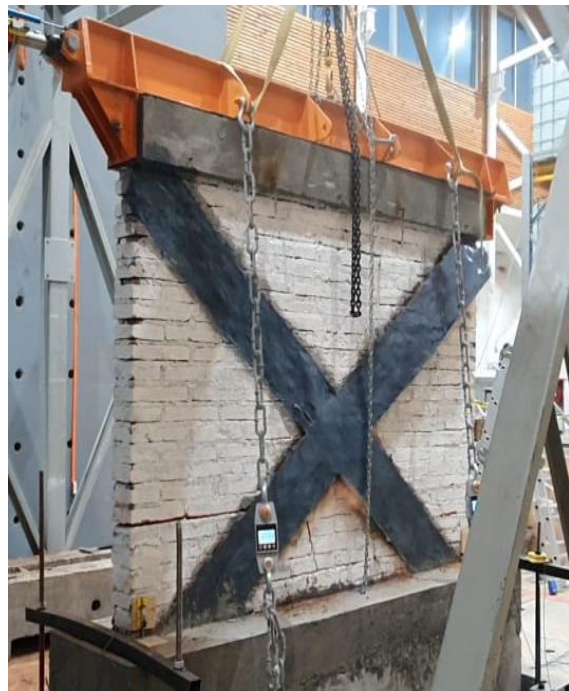


Figura 36: Falla del refuerzo de CFRP en el instante en que se desprende del muro de albañilería (Fuente: Elaboración propia)



Figura 37: Luego de la falla del refuerzo de CFRP se estabiliza (Fuente: Elaboración propia)



Figura 38: Falla del refuerzo de CFRP, visto desde otra perspectiva (Fuente: Elaboración propia)



Figura 39: Grietas de la parte posterior del muro no reforzado (Fuente: Elaboración propia)

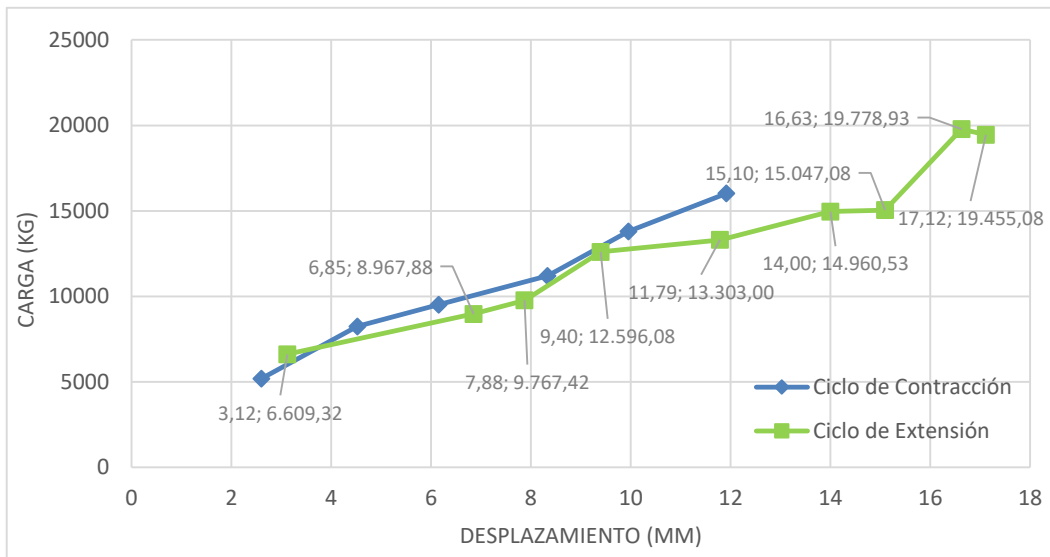


Figura 40: Carga v/s Desplazamiento (Fuente: Elaboración propia)

Observando la Figura 40 solo en el ciclo de extensión (línea verde), se logra apreciar un decremento de la fuerza medida por la celda de carga al momento de colapsar el refuerzo de CFRP, pudiendo interpretar el fallo del muro de albañilería como una falla dúctil hasta llegar a la ruptura con una deformación de 16.63 (mm) y una carga admitida de 19,778 (T).

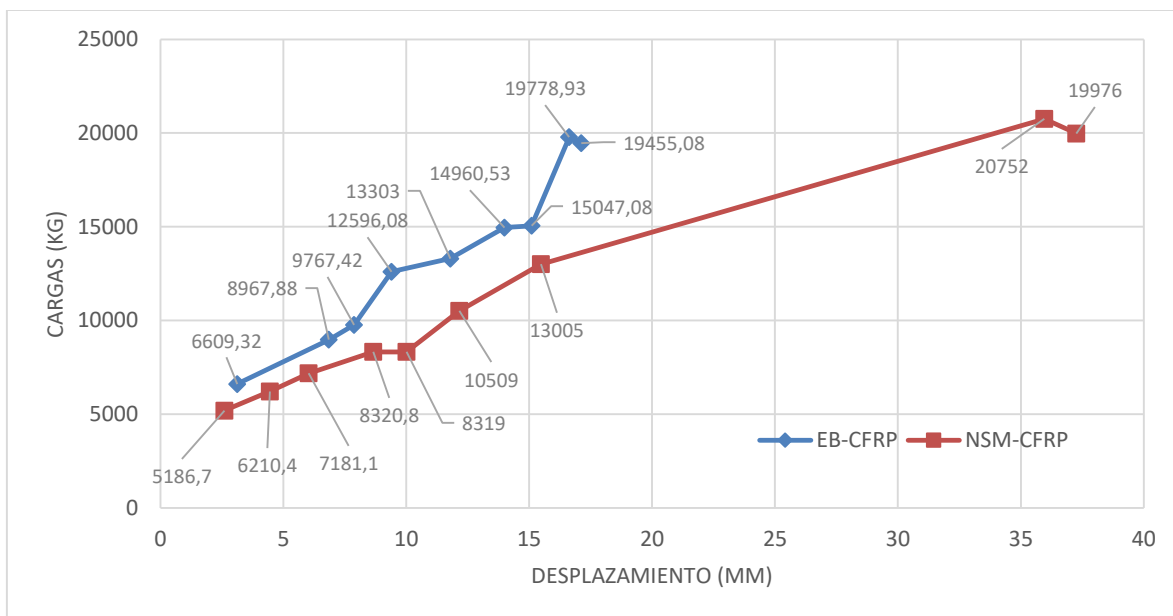


Figura 41: Comparación de resultados entre ensayo EB-CFRP y NSM-CFRP (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 41 se presenta el comportamiento del ciclo de cargas de extensión para el presente estudio de EB-CFRP representado por el color azul y el estudio a comparar con refuerzo de NSM-CFRP representado por la línea roja.

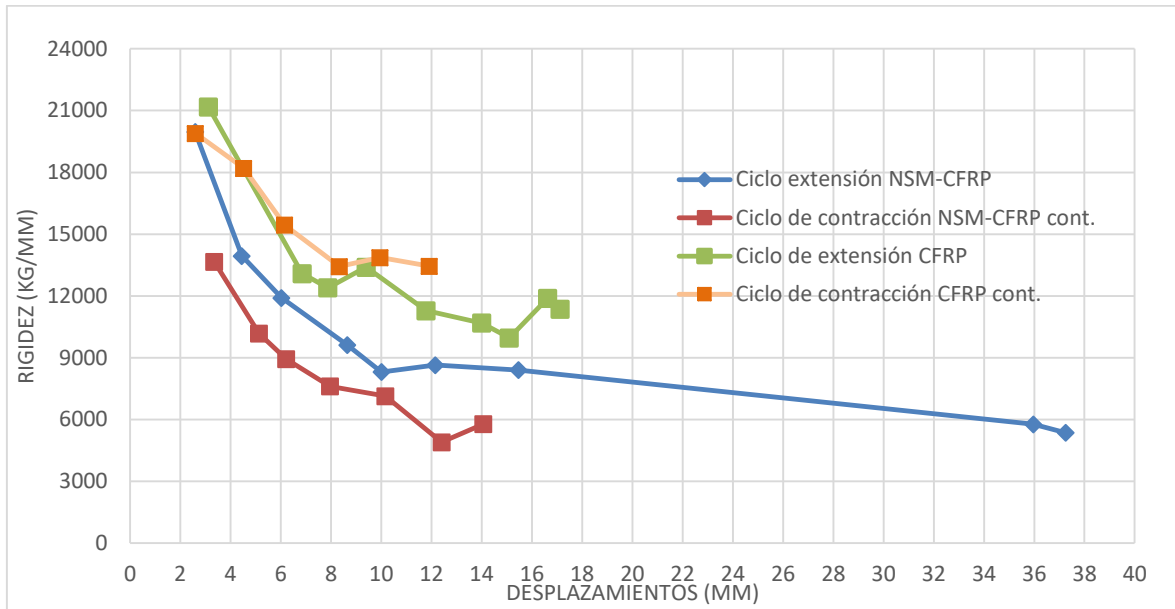


Figura 42: Evolución de la degradación de rigidez (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 42 se presenta las rigideces en ambos casos, con la finalidad de observar mejor el comportamiento de uno respecto del otro. En particular, para el muro de interés en el presente estudio se registran rigideces de mayor magnitud en todo momento para ambos ciclos de carga a los que fue sometido la estructura, respecto del estudio con el que fue comparado (NSM – CFRP).

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Analizando la primera grieta que se visualiza en el ciclo de 6 (mm), cuando se realiza el proceso de contracción, esto es el indicio de una falla de adherencia parcial en la cuarta fila de los ladrillos de albañilería. De igual forma en el ciclo de 8 (mm) cuando se realiza el proceso de extensión del actuador, se genera una falla de adherencia entre mortero y ladrillo, pero a diferencia de la falla mencionada anteriormente, esta se presenta en la sexta fila de ladrillos y luego avanza esta grieta en diagonal hacia la segunda fila de ladrillos. En este ciclo de 8 (mm) se acentúa la falla de la cuarta fila mencionada anteriormente y esta baja de la misma forma hasta la segunda fila de ladrillos. Se destaca que se mantiene por todos los ciclos, predominando esta falla que se conecta en la segunda fila.

En el ciclo de 10 (mm) se aprecia que se desplaza en ambas fallas el muro desde su eje vertical, hacia la cara que no está reforzada. A simple vista esto se origina producto que, en la falla de la cuarta fila, se debilita en ese sector la tira de CFRP, desprendiéndose en un borde que limita con la cuarta fila donde comienza la grieta.

En los siguientes ciclos, se sigue desalineando desde su eje vertical el muro y se producen unas grietas no significativas en la parte posterior, a la altura bajo el refuerzo de CFRP en el centro del muro de albañilería, las cuales se deben al aplastamiento y momento que se genera en esa zona.

Cuando se llega al ciclo de falla del espécimen, el refuerzo falla frágilmente, desprendiéndose bruscamente cortándose en un pequeño tramo a lo largo de una tira. Este desprendimiento se produce en ambas tiras en su totalidad, menos en la que comienza desde el lado superior izquierdo.

Al sufrir la ruptura accidental en el traslado del muro, no se apreció daños en las tiras de CFRP,

tampoco se pudo saber si el muro sufrió internamente agrietamientos o microfisuras. Con esto antes mencionado, es posible afirmar que el muro junto a su refuerzo pudo haber resistido más.

Otro punto importante, es que, al reparar la ruptura del muro por volcamiento, elevando la fundación se logró una muy buena fijación encapsulando 200 (mm) el refuerzo de CFRP contra el muro. Esto ayudó a que no se desprendiera antes el refuerzo del muro tal como lo describe Bischof *et al* [22] en su propio estudio quien recomienda anclar mecánicamente el CFRP y con la fundación.

A diferencia del estudio de Rahman y Ueda [23] donde se observa un corte de los refuerzos de CFRP, en este experimento solo se observó un desprendimiento del refuerzo. (Figura 36 y 38) y la consiguiente pérdida de resistencia.

Por otra parte, al comparar los resultados de bandas diagonales de CFRP, con el estudio de refuerzo mediante la técnica NSM – CFRP que se realizó bajo las mismas condiciones, se puede observar analizando la Figura 41 y Figura 42, que la reparación con bandas diagonales obtiene una mayor rigidez, respecto del muro reforzado con la técnica NSM – CFRP, es decir, esta última admite mayores desplazamientos con ultimas similares.

5. CONCLUSIONES

El refuerzo de bandas diagonales de CFRP aporta rigidez al muro, la cual va disminuyendo progresivamente a medida que incrementa el daño, obteniendo así, menores desplazamientos finales en cada ciclo de carga. En consecuencia, al momento de fallar la adherencia del refuerzo de bandas diagonales de CFRP, el muro pierde totalmente la rigidez aportada por esta técnica, quedando expuesto a una falla frágil, es decir, propensa al colapso del muro si este continúa recibiendo cargas sin su refuerzo.

La gran diferencia que se menciona al comparar el estudio en paralelo de NSM – CFRP bajo las mismas condiciones, es que este tiene una menor rigidez. Luego de la falla el refuerzo de NSM – CFRP sigue intacto sin verse dañado y pudiendo así seguir aportando rigidez al muro, por consecuencia, el muro podría recibir aun mayor carga que el muro estudiado en este artículo, sin provocar una falla frágil.

En cuanto a las instalaciones de EB- CFRP, estas resultan ser de muy fácil aplicación, pero como lo indica el manual de instalación SikaWrap (Aplicación en húmedo), debe ser llevado a cabo por especialistas entrenados y calificados, con el fin de realizar una instalación apropiada. Este método al no ser invasivo como el método que se compara de NSM – CFRP, se puede aplicar a estructuras muy dañadas, tanto con una distribución en diagonal, como la envoltura total del muro.

Se recomienda realizar un estudio de un muro no reforzado y que luego este de haber presentado grietas o una notoria falla, se refuerce con el método de bandas de CFRP, y se analice cuanto es el incremento de la rigidez que se le aporta al muro y ver el real aumento de la capacidad de resistencia del refuerzo de CFRP. Dado que no existe comparación en la literatura con este método, porque utilizan otro tipo de albañilería, otra configuración de la disposición de los ladrillos y de igual forma son las calidades de los materiales.

Por último, al realizar un anclaje mecánico en la parte inferior del muro, proporciona mayor rigidez provocando que no ocurra una falla por adherencia como en muchos casos de la literatura, este anclaje resistirá hasta que falle el hormigón o bien que el CFRP se corte.



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] **Instituto Nacional de Normalización. (2003).** “Albañilería confinada - Requisitos de diseño y cálculo”. Norma Chilena Oficial. Nch 2123 of 2003.
- [2] **Instituto Nacional de Normalización. (2009)** “Albañilería Armada - Requisitos de diseño y cálculo”. Norma Chilena Oficial. Nch 1928 of 2009.
- [3] **Bustamante, Guillermo, & Aránguiz, Rafael. (2011).** Daños estructurales en construcciones patrimoniales de la Iglesia Católica en la Arquidiócesis de Concepción producto del sismo del 27 de febrero 2010. *Obras y proyectos*, (10), 27-34.
- [4] **Crispieri Raggio, A. A. (2011).** Caracterización y diagnóstico sísmico de las viviendas sociales de albañilería de la ciudad de Arica.
- [5] **Alcaíno, P., Ruiz, T., Rivera, R. (2010).** “Análisis de daños y comportamiento de edificios de albañilería producto del sismo del 27 de febrero de 2010”. En Memoria Congreso Iberomet XI, X CONAMET/SAM.
- [6] **Vega, C., & Torres, N. (2018).** External strengthening of unreinforced masonry walls with polymers reinforced with carbon fiber. *Ingeniería e Investigación*, 38(3), 15-23.
- [7] **Ingeominas. (1986).** El sismo de Popayán de marzo 31 de 1983. Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico – Mineras.
- [8] **Klingner, R. (2006).** Comportamiento de la mampostería en los terremotos de Northridge (EE.UU.) y Tecomán-Colima (México): Lecciones aprendidas y cambios en las disposiciones de diseño de EE.UU. *construcción y materiales de construcción*, 20(4), 209-219.
- [9] **Ingeominas. (1999).** Terremoto del Quindío: enero 25 de 1999. Informe Técnico Preliminar No. 2 Armenia – Quindío. Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico – Mineras.
- [10] **FOPAE - Fondo de Prevención y Atención de Emergencias. (2010).** Visita técnica comisión de dirección de prevención y atención de emergencias - FOPAE - San Pedro de la Paz - Concepción – Chile. Informe técnico. Bogotá D.C.: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- [11] **Alcocer, S., (2002).** “Rehabilitación de estructuras de mampostería, Instituto de Ingeniería, UNAM, México”.
- [12] **Manual de Construcción, Evaluación y Rehabilitación Sismo Resistente de Viviendas en Mampostería, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, (2001),** Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- [13] **Bernat-Maso, E., Gil, L., & Escrig, C. (2015).** Analysis of brick masonry walls strengthened with fibre reinforced polymers and subjected to eccentric compressive loads. *Construction and Building Materials*, 84, 169-183.
- [14] **Thamboo, J., Navaratnam, S., Poologanathan, K., & Corradi, M. (2021).** Characteristics of CFRP strengthened masonry wallettes under concentric and eccentric compression. *Case Studies in Construction*



Materials, 14, e00472.

[15] **Santa-Maria, H., Duarte, G. y Garib, A. (2004).** “Investigación experimental de paneles de mampostería reforzados externamente con laminados y telas CFRP sujetos a carga de corte en el plano”. En la 8.^a Conferencia Nacional de EE. UU. sobre Ingeniería Sísmica, San Francisco, EE. UU., Documento (No. 1042).

[16] **ASTM C67-17. (2009).** “Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile”. Official Standard, ASTM International, West Conshohocken, Pa, USA.

[17] **NCh 167 of 200.** “Construcción - Ladrillos cerámicos – Ensayos”. Norma Chilena Oficial, PA,2001.

[18] **ASTM C109 / C109M-99 (2001).** “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”. Official Standard, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001.

[19] **NCh 158.of 1976** “Cementos- Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento”. Norma Chilena Oficial, PA,1967.

[20] **ASTM C 952 -12. (2012).** “Standard Test Method for Bond Strength of Mortar to Masonry Units”. Official Standard, ASTM International, West Conshohocken, Pa, USA.

[21] **NCh2123.Of 1997 Mod 2003.** Albañilería confinada – Requisitos de diseño y cálculo.

[22] **Bischof, P., Suter, R., Chatzi, E., & Lestuzzi, P. (2014).** Sobre el uso de láminas CFRP para la modernización sísmica de muros de mampostería y la influencia del anclaje mecánico. *Polímeros*, 6(7), 1972-1998.

[23] **Rahman, A., & Ueda, T. (2016).** Rendimiento de cizallamiento en plano de muros de mampostería después del refuerzo por dos FRP *diferentes*. *Journal of composites for construction*, 20(5), 04016019.