



XXXIII JORNADAS SUDAMERICANAS
DE INGENIERIA ESTRUCTURAL
Santiago, 26 al 30 de Mayo de 2008



www.asaee.org.br

RESISTENCIA AL CORTE DE MUROS DE ALBAÑILERÍA REFORZADOS EXTERIORMENTE CON FIBRAS

Pablo Alcaíno R. (1); Hernán Santa María O. (2).

(1) Ingeniero Civil y M.Sc. de la Ingeniería, PUC; Profesor Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Av. Brasil 2147, 4^{to} piso. Valparaíso, Chile. (56-32) 227 38 91. palcaino@puc.cl.

(2) Ingeniero Civil, PUC; M.Sc. y Ph.D. U. Texas, Austin. Profesor Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile. (56-2) 354 42 07. hsm@ing.puc.cl.

Resumen

El presente trabajo consistió en Se caracterizó el comportamiento mecánico de muros de albañilería de ladrillos cerámicos a escala natural reforzados externamente con fibras de carbono (CFRP), sometidos a esfuerzos cíclicos de corte en su plano. Se estudiaron dos configuraciones de refuerzo: fibras orientadas horizontal y diagonalmente, adheridas en ambas caras de muros con dimensiones nominales de 2400x1975x140mm, diseñados para que la falla por corte precediera a la falla por flexión. Se ensayaron estudió el efecto del refuerzo de CFRP en 4 muros con armadura horizontal (RM) y 12 sin (URM) armadura horizontal (URM) de acero. Las respuestas de los muros con diferentes configuraciones y cantidades de refuerzo de CFRP fueron comparadas en términos de la primera grieta diagonal importante, patrón de agrietamiento, resistencia máxima, modo de falla, respuesta histerética y rigidez. Los muros URM reforzados tuvieron aumentos en resistencia máxima de entre 50 y 80%, mientras que los RM, entre 13 y 34%. Todos los muros tuvieron aumentos importantes en su capacidad de deformación lateral, aumentando entre 70 y 110% la deformación asociada a la carga máxima. El refuerzo CFRP redistribuyó las grietas y disminuyó su espesor. Se observó que si el refuerzo de CFRP se distribuye en el muro, la falla es menos frágil que si el refuerzo se concentra. Finalmente, se proponen expresiones que permiten estimar la resistencia última de muros reforzados con CFRP.

Palabras claves: fibras de carbono; rehabilitación sísmica; muros de albañilería; ensayos de corte.

Abstract

The presentThe objective of this study research was to characterize the mechanic behavior of full scale hollow clay bricks masonry walls externally retrofitted with carbon fiber fabric (CFRP), subjected to cyclic in plane shear load. Was studiedT two retrofitted configurations of the reinforcement were studied: fibers oriented horizontally or diagonally oriented, bonded on to both surfaces of the walls, with which had nominal dimensions of 2400x1975x140mm, and were designed for that theso shear failure occurred before the bending failure. Was studied the effect of the CFRP reinforcement onFour 4 walls with shear steel wire reinforcement (RM) and 12 walls without shear reinforcement (URM) were tested. horizontal steel wire reinforcement. The responses of the walls with different configuration and different amounts of CFRP reinforcement were compared in terms of the first major crack, cracking pattern, maximum strength, failure mode, hysteretic response and stiffness. The retrofitted URM walls had 50 to 80% increment in maximum strengthbetween 50 and 80% of increment in maximum strength , while the retrofitted RM walls had between an increase of 13 and to 34%. All retrofitted walls had an important increase in the drift capacity, increasingmenting between 70 and 110% the drift associateds with to the maximum strength. The CFRP reinforcement redistributed the cracks and decreased its their thickness. Concentrating If the CFRP



XXXIII JORNADAS SUDAMERICANAS
DE INGENIERIA ESTRUCTURAL
Santiago, 26 al 30 de Mayo de 2008



www.asaee.org.br

reinforcement is concentrated produced a the failure is more brittle failure than if the CFRP is distributed on the wall. Design equations were are proposed for to estimate the maximum strength of the retrofitted wall.

Key words: carbon fiber fabric; seismic retrofitting; masonry walls; shear tests.

1. INTRODUCCIÓN

Los polímeros reforzados con fibras o “*fiber reinforced polymer*” (FRP) son un material compuesto, formado por fibras de alta resistencia como carbono (CFRP), vidrio (GFRP), arámido (AFRP), basalto (BFRP), embebidas en una matriz de resina polimérica. Esta estructura hace que las fibras resistan los esfuerzos de tracción mientras que la matriz de resina los transmite entre fibras al mismo tiempo que resiste otros esfuerzos. Las fibras pueden estar orientadas en una o varias direcciones no necesariamente ortogonales.

La tecnología de reforzamiento de estructuras de hormigón con telas de FRP, ha sido típicamente utilizada, en refuerzo externo de flexión y corte en vigas y losas; refuerzo externo de flexión, confinamiento y corte en columnas y muros; y como refuerzo de confinamiento en uniones viga-columna, obteniéndose satisfactorios resultados satisfactorios desde el punto de vista estructural y económico, debido a la baja relación peso resistencia del refuerzo de FRP; despreciable peso propio adicional incorporado a la estructura reforzada (aproximadamente 225gr/m² de refuerzo); despreciables alteraciones a la geometría y arquitectura de la estructura reforzada, ya que el refuerzo de telas de FRP tiene un espesor del orden de 0,13mm a 0,2mm; y a sus cortos periodos de instalación.

Por otro lado, muchos edificios de albañilería han sufrido importantes daños por esfuerzo de corte en su plano durante sismos recientes, como pudo ser observado en los terremotos de 1985 en Viña del Mar, Chile [1]; de 1994 en Northridge, EE.UU.; de 2003 en Tecomán-Colima, México [2]; y en el de 2002 en Changureh-Avaj, Irán [3], dejando de manifiesto la necesidad de reforzar y/o reparar este tipo de estructuras. En este escenario, la técnica de refuerzo mediante telas de FRP adheridas externamente en ambas caras de los muros surge como una opción atractiva de reforzamiento dados los exitosos resultados obtenidos en el refuerzo externo de estructuras de hormigón armado.

El objetivo de esta investigación fue caracterizar el comportamiento mecánico de muros de albañilería de ladrillos cerámicos construidos a escala natural y reforzados externamente con telas de CFRP, sometidos a esfuerzos cíclicos de corte en su plano, estudiando dos configuraciones de refuerzo: fibras orientadas horizontalmente (paralelas a las hiladas de ladrillos) y diagonalmente (inclinadas en aproximadamente 45° respecto de las hiladas de ladrillos), adheridas en ambas caras de 3 muros con (RM) y 10 sin (URM) armadura horizontal de acero, con dimensiones nominales de 2400x1975x140mm. Además se ensayaron 2 muros URM y uno RM sin reforzamiento de FRP, completando un total de 16 muros ensayados.

Los resultados de los ensayos fueron usados para comparar el efecto de la configuración y cantidad de refuerzo de FRP en la respuesta del muro; evaluar la eficiencia del refuerzo de FRP en ambos tipos de muros (RM y URM); y finalmente proponer ecuaciones para estimar la resistencia de los muros, que puedan ser usadas en el diseño.

La respuesta histerética al esfuerzo de corte de los muros con distintas cantidades y configuraciones de refuerzos de CFRP ensayados fue comparada en términos de la primera grieta diagonal importante producida (definida por según SEPÚLVEDA [4] como aquella que incluye al

menos el 70% de las hiladas de ladrillos del muro), patrón de agrietamiento, resistencia máxima, modo de falla, respuesta histerética y degradación de rigidez.

Los muros URM reforzados tuvieron aumentos en resistencia máxima entre 50 y 80%, mientras que los RM, entre 13 y 34%. Todos los muros reforzados con CFRP tuvieron aumentos importantes en su capacidad de deformación lateral, aumentando entre 70 y 110% la deformación asociada a la carga máxima. Se observó que el refuerzo CFRP redistribuye las grietas y disminuyendo su espesor. Respecto del modo de falla se pudo observar que si el refuerzo de CFRP se distribuye en el muro, la falla se hace menos frágil que si el refuerzo se concentra. Finalmente, se estudió un modelo simple a partir del cual se proponen ecuaciones sencillas para estimar, en forma razonablemente conservadora, la resistencia última de un muro de albañilería reforzado con telas de FRP.

2. INVESTIGACIONES ANTERIORES

En estudios dirigidos a evaluar el comportamiento fuera del plano de muros reforzados con FRP [5, 6, 7, 8, 9, 10], se observó que mediante el uso de telas o láminas de CFRP o GFRP se alcanzan importantes incrementos de ductilidad y de resistencia al vaciamiento, en muros de albañilería con y sin armadura de acero.

El refuerzo al corte en el plano del muro a través de usando FRP adherido externamente en muros de albañilería ha sido estudiado desde 1995. En ese año SCHWEGLER [11], publicó los resultados de la primera experiencia del uso de FRP como refuerzo al corte en siete muros de albañilería contruidos a escala real y reforzados externamente con dos configuraciones básicas: franjas diagonales de CFRP formando una especie de redmalla anclada en la losa de hormigón o telas horizontales de CFRP cubriendo la totalidad de la superficie del muro. Estos muros fueron sometidos a ensayos de corte cíclico obteniendo aumentos de resistencia de aproximadamente un 30% e importantes aumentos en la capacidad de deformación lateral.

Posteriormente, VALLUZI [12], mostró resultados de ensayos de 24 muretes de albañilería reforzados externamente con FRP y sometidos a compresión diagonal monotónica, logrando entre 15 y 70% de aumento en la resistencia, teniendo mayores aumentos los muretes reforzados diagonalmente en comparación con los reforzados usando una cuadrícula de franjas horizontales y verticales.

Seis muros de albañilería contruidos a media escala, cuatro reforzados con telas horizontales de FRP cubriendo el total de la superficie del muro y dos sin reforzar, fueron ensayados en corte monotónico por STRATFORD [13], obteniendo incrementos en la resistencia del orden de 50%, pero sin incrementos en la capacidad de deformación lateral.

ELGAWADY [14] realizó ensayos dinámicos de corte, usando registros de sismos artificiales, a 11 muros de albañilería contruidos a media escala y reforzados externamente con FRP usando dos configuraciones: franjas de tela diagonales o cubriendo completamente la superficie con telas horizontales, obteniendo en ambos casos fuertes aumentos de resistencia, pero no observó aumentos de capacidad de deformaciones. El mismo ELGAWADY [15], realizó ensayos de corte estático sobre a 7 muros de albañilería de ladrillos cerámicos contruidos a media escala y reforzados con FRP, logrando considerables aumentos en la resistencia máxima al esfuerzo de corte y un efectivo control del agrietamiento.

Ensayos de corte cíclico en el plano de 6 muros de albañilería de bloques de hormigón fueron realizados por HAROUN [16]. Estos muros fueron reforzados al corte con láminas de diferentes materiales de FRP, obteniéndose importantes aumentos en la resistencia lateral, con un modo de falla dominado por la compresión excesiva de la zona comprimida en la albañilería. El modelo analítico utilizado para estimar la resistencia de los muros reforzados, sobreestimó considerablemente la resistencia real desarrollada en los ensayos, debido principalmente a que el modelo consideraba otro un modo de falla diferente al realmente ocurrido.

Ocho muros construidos a escala real con bloques de hormigón y reforzados con 4 diferentes configuraciones telas de GFRP, fueron sometidos a ensayos dinámicos utilizando registros sísmicos asociados al nivel de diseño y al nivel último o de sobrevivencia. En los ensayos se observó que todos los muros tuvieron un buen desempeño para el nivel de diseño, pero, sólo 3 de 4 muros reforzados repitieron el buen comportamiento en el nivel de sobrevivencia [17].

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Dieciséis muros de albañilería de bloques cerámicos, de dimensiones nominales iguales a 1975x2400x140mm, fueron sometidos a ensayos de corte cíclico. Los muros fueron proyectados con una vigas de transferencia de carga de hormigón armado, inferior y superior, de dimensiones iguales a 2260x300x400mm y 2260x325x400mm, respectivamente. También los muros incluyeron una cadena de hormigón armado superior e y otra inferior de hormigón armado de dimensiones 1975x200x140mm, y un paño de albañilería de 16 hiladas de 6½ ladrillos cada una, con un espesor de mortero de aproximadamente 13mm, que junto a los 112mm de alto de cada ladrillo, completaron una altura de escantillón de 125mm, dando al paño de albañilería una altura de 2000mm.

Los muros fueron diseñados para que la falla por corte anteciedera la falla por flexión, lo cual se logró utilizando como armadura de borde, dos barras de acero A63-42H con diámetro $\phi 25\text{mm}$ y tensión de fluencia de 420MPa, obteniendo un momento de fluencia de la armadura de borde de 618kN·m, equivalentes a un esfuerzo de corte basal, para las condiciones de vinculación usadas en esta investigación, de 364kN; mientras que para la falla por compresión de la albañilería, el momento flector necesario fue de 681kN·m, obtenidos con un corte basal de 401kN. Los detalles de las dimensiones de los muros y armaduras de acero en los muros se muestran en la Figura 1.

De los 16 muros, 12 correspondieron a muros URM, es decir, sin armadura horizontal de corte (escalerillas), mientras que los 4 restantes correspondieron muros RM, los que contaron con 4 escalerillas formadas por dos barras paralelas de acero AT56-50H de acero con diámetro $\phi 4.2\text{mm}$ y tensión de fluencia nominal de fluencia y rotura de 500 y 560MPa, respectivamente. Las 4 cuatro escalerillas fueron colocadas cada 3 hiladas de ladrillos, obteniendo una cuantía de refuerzo de acero horizontal, ρ_{sh} , de 0.04‰, valor inferior al mínimo establecido por la norma chilena NCh 1928Of.1993 [18], en la que se exige un ρ_{sh} de al menos 0.06‰.

El refuerzo de CFRP consistió en de franjas de telas de CFRP adheridas externamente en ambas superficies de los muros de albañilería. Las diferentes configuraciones de los refuerzos utilizados son mostradas en la Figura 1.

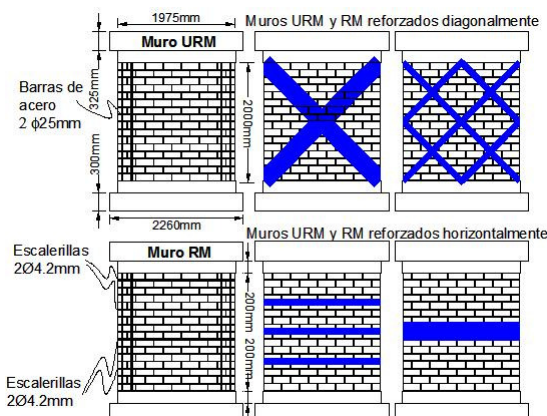


Figura 1 – Dimensiones de los muros y armaduras y configuraciones del refuerzo de CFRP

El código alfanumérico para identificar las probetas (muros) ensayadas, indica en primer lugar la configuración de reforzamiento de CFRP, el tipo de muro y la cantidad de refuerzo. El esquema de identificación fue: El primer término indica si las franjas de tela de CFRP están dispuestas horizontalmente (*H*), es decir formando un ángulo de 0° con respecto a las hiladas de ladrillos, o si las franjas están dispuestas diagonalmente (*D*), es decir, forman un ángulo de aproximadamente 45° con respecto a las hiladas de ladrillos. El siguiente conjunto de caracteres identifica el tipo de muro que ha sido reforzado, RM o URM con (*RM*) o sin escalerillas (*URM*). Los siguientes dígitos indican el número de franjas paralelas entre sí, que se han dispuesto en cada cara del muro y el ancho de cada una de ellas. Finalmente, se indica el número correlativo de la probeta. En la Tabla 1, se indican los nombres de las identificaciones de los muros de albañilería ensayados, una breve descripción de la configuración del refuerzo de CFRP, el ancho total de refuerzo de CFRP en cada dirección, b_{CFRP} (obtenido como la suma de los anchos las franjas de telas de ambas caras del muro), y la superficie total de refuerzo S_{CFRP} (incluyendo la superficie de ambas caras del muro, en ambas direcciones).

TABLA 1. Muros ensayados y características de las configuraciones de refuerzo de CFRP.

Probeta	Configuración de refuerzo	b_{CFRP} (mm)	S_{CFRP} (m²)
URM-1	-	-	-
URM-2	-	-	-
D-URM-1x300-1	Una franja diagonal	600	3.37
D-URM-1x300-2	Una franja diagonal	600	3.37
D-URM-1x200-1	Una franja diagonal	400	2.25
D-URM-1x200-2	Una franja diagonal	400	2.25
D-URM-3x100-1	Tres franjas diagonales	600	2.25
H-URM-3x150-1	Tres franjas horizontales	900	1.78
H-URM-3x150-2	Tres franjas horizontales	900	1.78
H-URM-3x100-1	Tres franjas horizontales	600	1.19
H-URM-3x100-2	Tres franjas horizontales	600	1.19
H-URM-1x300-1	Una franja horizontal	600	1.19
RM-1	-	-	-
D-RM-1x100	Una franja diagonal	200	1.12
D-RM-1x200	Una franja diagonal	400	2.25
H-RM-3x100	Tres franjas horizontales	600	1.19

3.1 Materiales

Los muros fueron contruidos utilizando ladrillos cerámicos hechos a máquina con dimensiones nominales de 140x290x112mm y que cumplen con las especificaciones para ser clasificados como ladrillos del tipo MqP, grado G2 según se establece en la norma NCh 1928Of.1993 [18].

Las unidades de albañilería fueron pegadas usando un mortero de cemento predosificado, correspondiente al grado M10 según lo establecido en la norma NCh 2123Of.1997 [19]. Las resistencias máximas del mortero fueron obtenidas mediante extracción y ensayo de muestras Rilem, según se establece en la norma NCh 158Of.1967 [20], observándose una tensión máxima de flexotracción igual a 5.0MPa y una tensión máxima en compresión de 23.4MPa.

De acuerdo a lo establecido en la norma NCh 1928Of.1993 [18], se realizaron 21 ensayos de compresión prismática de la albañilería de acuerdo a lo establecido en la norma NCh 1928Of.1993 [18], obteniendo una resistencia a la compresión media en la albañilería (f_m') de 11.3MPa y un módulo de elasticidad medio (E_m) de 6618MPa.

Del mismo modo, cumpliendo con lo establecido en la norma NCh 2123Of.1997 [19] se realizaron 24 ensayos de compresión diagonal de muretes de albañilería, según la norma NCh 2123Of.1997 [19], obteniendo en promedio una tensión máxima de corte (τ_m) de 0.81MPa y un módulo de corte medio en la albañilería (G_m) igual a 2571MPa.

Los hormigones utilizados en los distintos elementos que conformaron los muros (vigas de transmisión de esfuerzos y cadenas) tuvieron una resistencia a la compresión cilíndrica a los 28 días (f_c'), obtenida según lo establecido en la norma NCh 1037Of.1977 [21], que varió entre 11 y 28MPa.

Las telas CFRP utilizadas fueron tejidas con las fibras orientadas en forma unidireccional, con un espesor nominal de 0.13mm e instaladas usando el procedimiento indicado por el fabricante. El módulo de elasticidad nominal informado por el fabricante es de 230kN/mm², pero, en resultados experimentales realizados por [22] se obtuvo un módulo de elasticidad de 250.1kN/mm². La resistencia nominal máxima a la tracción informada por el fabricante de las telas, es de 4.3kN/mm², pero, en este caso no fue posible verificar experimentalmente este valor.

3.2 Adherencia y longitud de desarrollo

Previo al diseño de los ensayos de corte cíclico de los muros reforzados, se determinó la fuerza máxima de adherencia por unidad de ancho ($\tau_{máx}$) y longitud de anclaje (longitud de desarrollo, L_d) del refuerzo de telas de CFRP aplicado sobre las unidades de albañilería utilizadas en esta investigación. Adicionalmente se estudió el efecto de la preparación superficial de la albañilería, ya que resultados previos de otros investigadores, como HAMOUSH [23], DUARTE [22] y SANTA MARÍA [24], mostraron importantes incrementos en las tensiones máximas de adherencia del refuerzo de FRP cuando la superficie de la albañilería había sido previamente acondicionada con un tratamiento mecánico.

Para este fin se construyeron 21 probetas de albañilería, consistentes en columnas de 6 hiladas de $\frac{1}{2}$ ladrillo cada una, en cuyo eje se colocó una barra de acero A63-42H con diámetro $\phi 12$ mm, discontinua en la mitad de la altura de la columna. Para suplir esa discontinuidad en la armadura se colocaron en dos caras opuestas de la columna, refuerzos de telas de CFRP adheridas externamente a la albañilería. Los refuerzos tuvieron diferentes anchos y longitudes en cada probeta. El esquema y una fotografía de las probetas ensayadas se puede observar en la Figura 2.

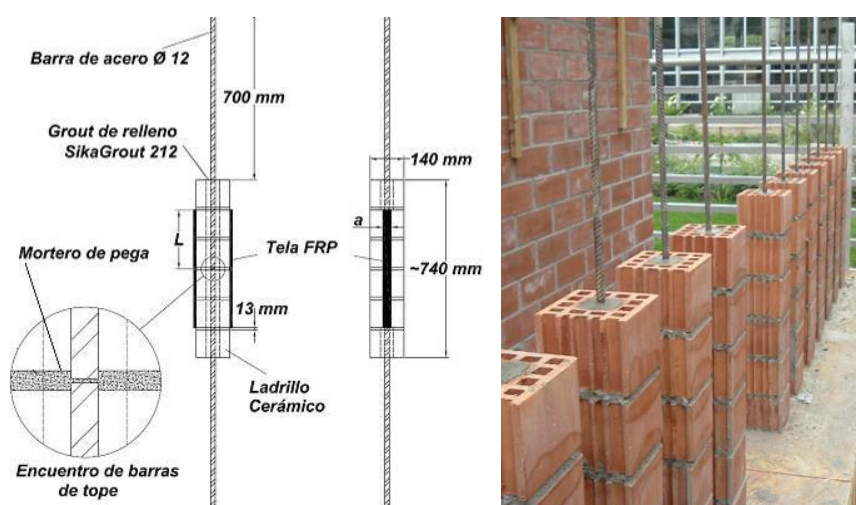


Figura 2 – Probeta para ensayo de adherencia entre albañilería y telas de CFRP.

El ensayo, muy similar a los realizados por TOUTANJI [25], consistió en traccionar las probetas desde las barras de acero y medir mediante strain gauges las tensiones en los refuerzos

externos de tela. El esquema del ensayo y una fotografía del montaje de una de las probetas se muestran en la Figura 3.

El tratamiento realizado a algunas probetas de adherencia, y posteriormente a los muros, consistió en desbastar la capa externa y enlozada del ladrillo con un esmeril angular acondicionado con un disco de desgaste. Este tratamiento resulta muy simple para superficies pequeñas, como en las que se realizaron las pruebas; sin embargo, intentar realizar este tipo de tratamiento sobre las caras de un muro a escala real resulta muy difícil, lento y poco preciso, por lo que fue necesario introducir algunas modificaciones a la forma de lograr el estado final de la superficie, reemplazando el esmeril angular por una lijadora de banda de 3x21" acondicionada con lijas comunes de carbono-silicio de granos 24 o 32 (lijas gruesas), como puede apreciarse en la Figura 4.

Luego del lijado se procedió a limpiar con aire comprimido la superficie, de forma de dejarla libre de polvo o restos de lija, lo cual resulta fundamental para lograr una buena adherencia. Adicionalmente se rellenaron las irregularidades producto de la cantería, no para obtener una superficie perfectamente lisa, sino que para tener una superficie con irregularidades suaves.

En la Tabla 2 se resumen los resultados de los ensayos de adherencia entre albañilería y las telas de CFRP utilizadas en esta investigación. En ella se indica el número de la probeta; el tipo de tratamiento superficial realizado a la probeta: sin tratamiento (*ST*) o desbastado superficial (*DS*); la longitud del refuerzo de CFRP (L_{CFRP}); ancho del refuerzo en cada cara (a); el modo de falla registrado en el ensayo; la fuerza máxima de tracción medida ($F_{m\acute{a}x}$); la fuerza máxima por unidad de ancho transmitida por el refuerzo de CFRP ($\tau_{m\acute{a}x}$) obtenida como:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{2 \cdot a} \quad (1)$$

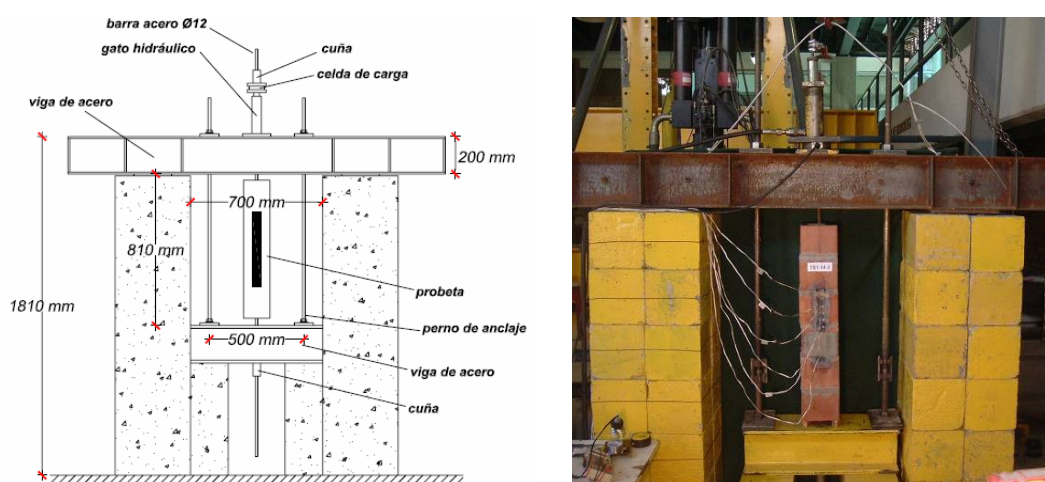


Figura 3 – Ensayo de de adherencia entre albañilería y telas de CFRP.



Figura 4 – Tratamiento superficial en probetas de adherencia y en muros.

Además se incluye la tensión de corte máxima promedio (τ_{corte}) transmitida en la zona, medida entre strain gauges consecutivos, obtenida como:

$$\tau_{corte} = \tau_{corte-i,i+1} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{F_{i+1} - F_i}{a \cdot s_i}}{n-1} \quad (2)$$

donde n es la cantidad de strain gauges en la tela, s_i es la distancia entre strain gauges i e $i+1$ consecutivos y F_i es la fuerza medida en la tela en el strain gauge i .

Finalmente, se indica la longitud de desarrollo (L_d) obtenida para cada probeta, utilizando la metodología propuesta por Zhao [26]. Asumiendo una distribución lineal de tensión de corte a lo largo de la tela, como se muestra en la Figura 5, mediante equilibrio de fuerzas se obtiene:

$$F_{m\acute{a}x} = a \cdot L_d \cdot \frac{\tau_{corte}}{2} \cdot 2 \Rightarrow L_d = \frac{F_{m\acute{a}x}}{a \cdot \tau_{corte}} \quad (3)$$

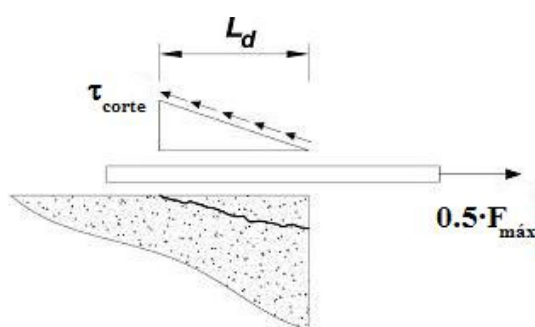


Figura 5 – Equilibrio de fuerzas en el momento de la falla del refuerzo de CFRP.

En la Tabla 2, se puede observar que en aquellas probetas sin tratamiento superficial el modo de la falla ocurrió entre fue por insuficiencia del adhesivo y la superficie del ladrillo, requiriendo longitudes de desarrollo mayores a las requeridas por las probetas con desbaste superficial, en cuyo caso predominó la falla por arrancamiento (pull off), controlada fundamentalmente controlada por la resistencia del ladrillo, como puede verse en la Figura 6.

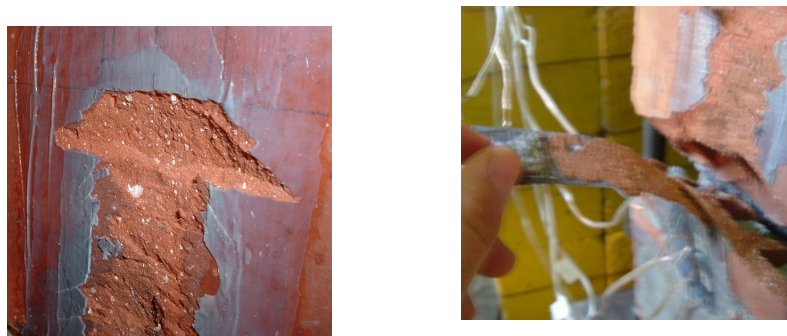


Figura 6 – Falla por arrancamiento del refuerzo de CFRP controlado por resistencia del ladrillo.

Considerando que en el caso de las probetas con desbaste superficial, la longitud de desarrollo disminuyó considerablemente y se alcanzaron mayores cargas transmitidas a través del refuerzo, se optó por reproducir este tratamiento superficial en los muros.

Para determinar los parámetros más relevantes para el diseño de los ensayos de corte en los muros, la longitud de desarrollo y resistencia máxima por unidad de ancho de refuerzo de CFRP, sólo se consideraron los resultados de probetas con desbaste superficial, que fallaron por arrancamiento y cuya longitud real de refuerzo (L_{CFRP}) resultó ser mayor o igual a la longitud de

desarrollo obtenida calculada (probetas 8, 10, 13, 15, 16, 20 y 21), obteniéndose en promedio una fuerza máxima por unidad de ancho ($\tau_{\text{máx}}$) de 0.24kN/mm, con una desviación estándar de 0.02 kN/mm. La longitud de desarrollo promedio para estas probetas fue de 109.4mm, con una desviación estándar de 4.7mm, adoptando para el diseño un valor de L_d igual a 110mm.

TABLA 2. Resultados de ensayos de adherencia entre albañilería y telas de CFRP.

Probeta	Tratamiento superficial	L_{CFRP} (mm)	a (mm)	Modo de falla	$F_{\text{máx}}$ (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (kN/mm)	τ_{corte} (MPa)	L_d (mm)
1	ST	80	50	Falla adhesivo	10.98	0.11	1.05	210
2	DS	80	50	Falla anclaje	12.80	0.13	1.88	137
3	DS	80	30	Arrancamiento	12.19	0.20	4.47	91
4	DS	80	30	Falla adhesivo	11.53	0.19	5.08	76
5	DS	80	34	Arrancamiento	13.91	0.20	4.05	101
6	DS	80	34	Arrancamiento	14.46	0.21	5.43	78
7	DS	110	30	Falla adhesivo	12.46	0.21	3.54	117
8	DS	110	34	Arrancamiento	14.78	0.22	4.26	102
9	DS	110	34	Arrancamiento	12.12	0.18	3.84	93
10	DS	110	34	Arrancamiento	15.29	0.22	4.12	109
11	ST	80	50	Falla adhesivo	14.36	0.14	2.03	153
12	DS	80	50	Falla ladrillo	18.84	0.19	1.98	193
13	DS	140	30	Arrancamiento	15.46	0.26	4.56	113
14	DS	140	30	Falla adhesivo	11.51	0.19	2.69	142
15	DS	140	34	Arrancamiento	15.53	0.23	3.97	115
16	DS	140	34	Arrancamiento	16.46	0.24	4.44	109
17	ST	80	50	Falla adhesivo	16.51	0.17	2.46	137
18	ST	80	50	Falla adhesivo	16.85	0.17	1.17	297
19	DS	80	50	Falla ladrillo	23.31	0.23	2.50	187
20	DS	200	30	Arrancamiento	14.78	0.25	4.36	113
21	DS	200	30	Arrancamiento	16.42	0.27	5.19	105

3.3 Procedimiento de ensayo de corte cíclico

Los muros fueron sometidos a un ensayo de corte cíclico en su plano, realizado mediante deformación horizontal sinusoidal controlada, con carga vertical nominalmente constante. Para aplicar la carga se utilizó un marco de reacción y actuadores de origen japonés, mostrados en la Figura 7, con capacidad de carga horizontal de 490kN, capacidad de desplazamiento horizontal de ± 200 mm y capacidad de carga vertical de 980kN.

El programa de desplazamientos utilizado, que se muestra en la Figura 7, fue el mismo utilizado en otros programas experimentales para muros de albañilería [4] y consistió en 12 niveles crecientes de desplazamiento horizontal, con dos ciclos de desplazamiento por cada nivel, comenzando con un drift de entrepiso de 0.01% (equivalente a 0.2mm) hasta llegar a un drift de entrepiso de aproximadamente 1% (equivalente a 24mm) o hasta la falla del muro.

La carga vertical fue nominalmente de 98kN, equivalente a aproximadamente el promedio de la compresión que experimentaría un muro interior y uno exterior en un primer piso de un edificio de albañilería de tres pisos con losas de hormigón y un techo liviano, que es una estructuración típica de edificios de albañilería destinados a viviendas.

La condición de vinculación de los muros fue empotramiento en su base, lograda mediante catorce pernos de $\phi 25$ mm dispuestos verticalmente y dos gatos mecánicos de 245kN de capacidad dispuestos horizontalmente en la base para impedir el deslizamiento del muro. El extremo superior del muro se mantuvo libre de girar, pero con un momento aplicado igual

al 41% del momento en la base del muro. La altura a la que se aplicó la carga horizontal fue 1700mm medidos desde la parte superior de la viga de transferencia inferior, siendo esta altura la del punto de inflexión impuesto al muro, por lo que la razón de aspecto de los muros, M/Vd , fue de 0.86.

El desplazamiento horizontal fue medido mediante un transductor de deformaciones sujeto a un marco de acero rígido anclado a la viga de fundación del muro, es decir, el desplazamiento medido corresponde al desplazamiento de entrepiso del muro. La altura a la que se midieron las deformaciones horizontales del muro, fue 700mm por sobre el punto de inflexión del muro, que corresponde a la sección inferior de la viga superior de transmisión de esfuerzos.

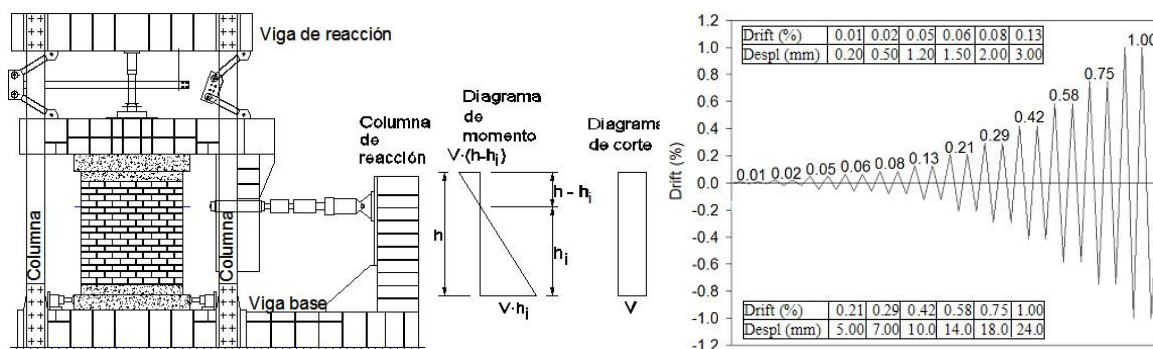


Figura 7 – Marco de reacción y programa de desplazamientos,

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Un resumen general de los resultados cualitativos se presenta en las Figuras 8 a 10 y en la Tabla 3, en donde se describe brevemente tanto el patrón de agrietamiento de los muros como su modo de falla. En las Figuras y la Tabla se puede observar que el uso de refuerzo externo de telas de CFRP produjo cambios importantes en el patrón de agrietamiento y en los modos de falla de los muros reforzados.

En general, se observa que para los muros URM el patrón de agrietamiento pasa de tener una única grieta principal de gran espesor en cada diagonal a una red con dos o tres grietas principales de espesor intermedio en el caso de los muros reforzados diagonalmente y de espesor menor en el caso de los muros reforzados horizontalmente. Se observó también que la cantidad de grietas fue proporcional al número de franjas paralelas de refuerzo, mientras que su espesor disminuyó en la medida que el refuerzo se encontrara más distribuido.

En cambio, en el caso de los muros RM reforzados con telas de CFRP, el patrón de agrietamiento no tuvo un cambio tan notorio como en el caso de los muros URM reforzados. Esto debido a que la presencia del refuerzo al corte de acero (escalerillas) también contribuye a aumentar el número de grietas, disminuyendo también su espesor, por lo que la influencia del refuerzo adicional de CFRP resulta considerablemente menor que si se aplica en muros URM.

Los modos de falla de los muros URM no reforzados con telas de CFRP tuvieron característica de falla frágil, caracterizada por la presencia de una gran grieta en cada diagonal acompañada por una poco importante red de grietas muy menores alrededor de ella y por un fuerte daño en la zona de compresión del muro, quedando con una resistencia residual prácticamente nula. La falla en los muros URM no reforzados con telas de CFRP ocurrió aproximadamente para un drift de entrepiso de 0.21%, equivalente a 5.0mm de desplazamiento lateral del muro.

En los muros URM reforzados con telas de CFRP la falla comenzó con una delaminación progresiva del refuerzo de CFRP (en distintos grados, dependiendo principalmente de la configuración del refuerzo, ver Tabla 3), seguida de una pérdida de resistencia debido al arrancamiento o pull off del refuerzo en su zona de anclaje (ver Figura 9), generando una falla

relativamente frágil. En los muros reforzados con todo el CFRP concentrado en sólo una franja, la resistencia residual posterior al arrancamiento del refuerzo en su zona de anclaje, resultó ser muy pequeña (similar a la de los muros URM sin reforzar), con una pequeña capacidad de deformación adicional luego de alcanzada la resistencia máxima del muro. En cambio, los muros URM reforzados con la tela de CFRP distribuida en tres franjas paralelas, presentaron una falla menos frágil, con mayor resistencia residual debido a que no todas las franjas experimentaron arrancamiento, manteniendo la capacidad de los muros para resistir uno o más ciclos de carga, posterior a la primera falla por pull off, obteniéndose una capacidad de deformación luego de alcanzada la resistencia máxima del muro de aproximadamente un 50%.

TABLA 3. Patrón de agrietamiento y modo de falla de los muros ensayados.

Muro	b_{CFRP} (mm)	S_{CFRP} (m²)	Patrón de agrietamiento¹	Modo de falla²
URM-1	-	-	GP	FF-GP
URM-2	-	-	GP	FF-GP
D-URM-1x300-1	600	3.37	RGI	PO
D-URM-1x300-2	600	3.37	RGI	PO-RF
D-URM-1x200-1	400	2.25	RGI	PO
D-URM-1x200-2	400	2.25	RGI	PO
D-URM-3x100-1	600	2.25	RGM	S-PO-RF
H-URM-3x150-1	900	1.78	RGM	DP-PO
H-URM-3x150-2	900	1.78	RGM	DP-PO
H-URM-3x100-1	600	1.19	RGM	DP-PO
H-URM-3x100-2	600	1.19	RGM	DP-PO
H-URM-1x300-1	600	1.19	GP- RGM	PO
RM-1	-	-	GP- RGM	FF-GP-RA
D-RM-1x100-1	200	1.12	RGI	PO
D-RM-1x200-1	400	2.25	RGI	PO-RF
H-RM-3x100-1	600	1.19	RGM	DP-PO

¹ GP: grieta principal de gran espesor en cada diagonal; RGI: red de grietas diagonales de espesor intermedio; RGM: red de grietas diagonales de poco espesor (red de grietas menores).

² FF: falla frágil; GP: grieta principal de gran espesor en cada diagonal; PO: pull off o arrancamiento del refuerzo; RF: rotura de la fibra de CFRP; S: secuencial; DP: delaminación progresiva; RA: rotura del acero de horizontal (refuerzo al corte de acero).

La falla en los muros URM reforzados con telas de CFRP ocurrió para un drift de entrepiso de: entre 0.42 y 0.50% (entre 10 a 12mm de desplazamiento horizontal), para los muros reforzados diagonalmente; y entre 0.50 y 0.58% (entre 12 y 14mm de desplazamiento horizontal) para los muros reforzados horizontalmente.

La falla de los muros RM reforzados con CFRP cambió de forma similar a como cambió el modo de falla de los muros URM reforzados (ver Figuras 8 a 10).

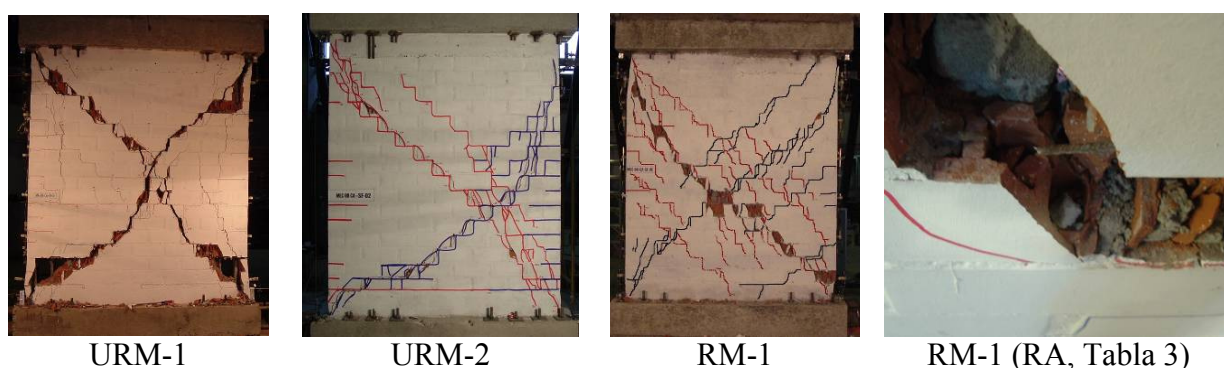


Figura 8 – Patrón de agrietamiento y modo de falla de muros sin reforzar.

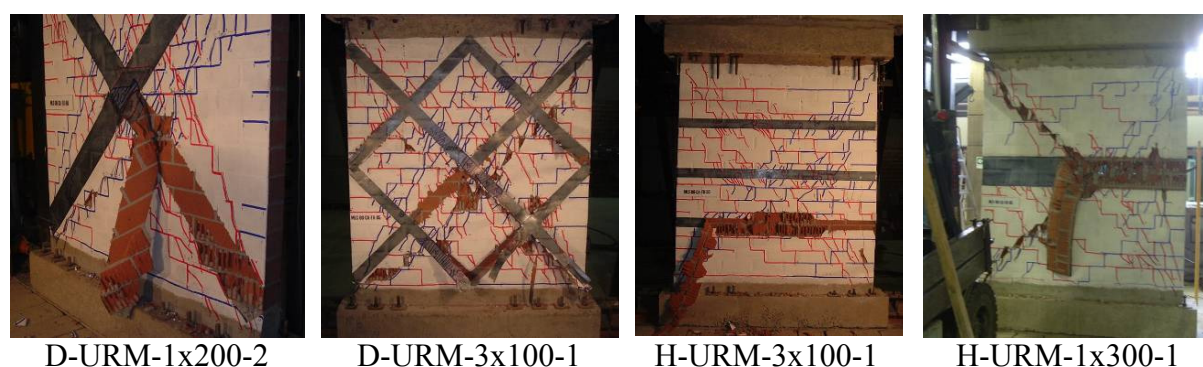


Figura 9 – Patrón de agrietamiento y modo de falla de muros URM reforzados con CFRP.

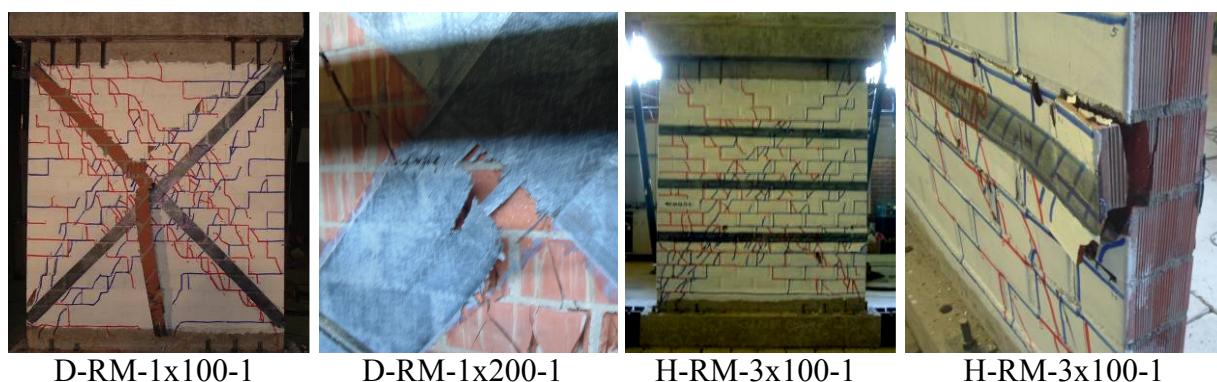


Figura 10 – Patrón de agrietamiento y modo de falla de muros RM reforzados con CFRP.

En todos los casos de muros reforzados con telas de CFRP, la falla por pull off se produjo debido al daño progresivo en los ladrillos, generando la ruptura transversal de estos. Lo anterior, junto con los residuos de ladrillo adheridos a la tela arrancada, como se muestra en las Figuras 9 y 10, indican que la resistencia del refuerzo de utilizado en esta investigación está controlada por la resistencia del ladrillo y que el tratamiento superficial aplicado resultó efectivo, reproduciendo el modo de falla de los ensayos de adherencia, validando el uso de la resistencia máxima por unidad de ancho del refuerzo y la longitud de desarrollo obtenidas previamente.

Los resultados cuantitativos referentes al desarrollo de la primera fisura diagonal importante definida por SEPÚLVEDA [4] y al desarrollo de la resistencia máxima al esfuerzo de corte se encuentran en la Tablas 4 y 5 respectivamente.

En la Tabla 4 se puede apreciar que la presencia de refuerzo de CFRP en los muros URM no disminuye en forma concluyente el espesor de la fisura, sin embargo, sí aumenta significativamente el valor del desplazamiento horizontal y esfuerzo de corte necesarios para generar esa grieta. Dada la escasa cantidad de ensayos realizados a muros RM reforzados con CFRP, no es posible concluir si el refuerzo contribuye a aumentar la resistencia al agrietamiento en este tipo de muros.

TABLA 4. Promedios de resultados en ambas direcciones de ensayo para primera fisura diagonal.

Muro	e (mm)	δ_{cr} (mm)	Δ_{cr} (%)	$R_{\delta_{cr}}$	V_{cr} (kN)	$R_{V_{cr}}$
URM-1	0.48	1.15	0.048	-	117.4	-
URM-2	0.21	1.29	0.054	-	125.5	-
Prom. URM	0.34	1.22	0.051	-	121.4	-
D-URM-1x300-1	0.33	2.98	0.124	2.44	192.4	1.58
D-URM-1x300-2	0.32	2.85	0.119	2.34	182.4	1.50
D-URM-1x200-1	0.18	2.96	0.123	2.43	169.3	1.39
D-URM-1x200-2	0.40	2.60	0.108	2.13	171.5	1.41
D-URM-3x100-1	0.37	2.35	0.098	1.93	165.2	1.36
H-URM-3x150-1	0.12	2.25	0.094	1.84	133.9	1.10
H-URM-3x150-2	0.35	2.75	0.115	2.25	179.7	1.48
H-URM-3x100-1	0.12	2.23	0.093	1.83	149.0	1.23
H-URM-3x100-2	0.45	3.28	0.137	2.69	171.7	1.41
H-URM-1x300-1	0.47	2.83	0.118	2.32	174.5	1.44
RM-1	0.63	2.43	0.101	-	163.0	-
D-RM-1x100-1	0.17	2.41	0.100	0.99	162.5	1.00
D-RM-1x200-1	0.19	2.24	0.093	0.92	174.0	1.07
H-RM-3x100-1	0.28	2.75	0.115	1.13	143.3	0.88

e: espesor promedio de la 1° fisura diagonal importante; δ_{cr} : desplazamiento horizontal promedio asociado a la 1° fisura diagonal; Δ_{cr} : drift promedio asociado a la 1° fisura diagonal; $R_{\delta_{cr}}$: razón entre δ_{cr} para muros reforzados y no reforzados; V_{cr} : esfuerzo de corte promedio de agrietamiento; $R_{V_{cr}}$: razón entre V_{cr} para muros reforzados y no reforzados.

En la Tabla 5 se presenta el desplazamiento horizontal y drift de entrepiso asociados al desarrollo de la resistencia máxima al esfuerzo de corte ($V_{máx}$); la razón ($R_{\delta V_{máx}}$) entre el desplazamiento horizontal asociado a dicha carga para cada muro reforzado y para los muros no reforzados; la razón ($R_{V_{máx}}$) entre el esfuerzo de corte máximo para cada muro reforzado y para los muros no reforzados. Finalmente, se presenta también la razón de eficiencia para resistencia máxima ($\eta_{V_{máx}}$), que se obtiene como el cociente entre el porcentaje de aumento en de la resistencia máxima al esfuerzo de corte de un muro reforzado (comparado con el muro equivalente sin reforzar, es decir, el promedio de los muros URM-1 y URM-2 para los muros URM reforzados y con el muro RM-1 para los muros RM reforzados) y la superficie total cubierta por el refuerzo (cantidad total de refuerzo usado).

Respecto de los desplazamientos asociados a la resistencia máxima, se puede apreciar que este tuvo un aumento de entre 69 y 146% en el caso de los muros URM reforzados, y de entre un 51 y 70% para los muros RM reforzados.

En términos de resistencia, el refuerzo de CFRP fue más efectivo en los muros URM que en los muros RM, ya que se alcanzaron incrementos de resistencia de entre 49 y 84% en los primeros y de entre 13 y 34% en los segundos. También se observa que para una configuración establecida, la resistencia total aumentó en la medida que se aumentó la cantidad de CFRP; sin embargo, en el caso de los refuerzos horizontales, se puede apreciar que este aumento se hace menos significativo en la medida que la cantidad de refuerzo aumenta, lo cual se refleja en menores

valores de eficiencia para las cantidades mayores de refuerzo horizontal. Es importante notar que en el caso del muro H-RM-3x100-1, el efecto del refuerzo horizontal de acero y de CFRP se hacen perder eficiencia mutuamente [27, 28]. Por otro lado se observa también, que en el caso de los muros URM reforzados diagonalmente, dada una configuración, la eficiencia permanece aproximadamente constante. Un análisis y discusión más detallado puede ser encontrado en las publicaciones de ALCAÍNO [28] y SANTA MARÍA [29].

TABLA 5. Promedios de resultados en ambas direcciones de ensayo para resistencia máxima.

Muro	$\delta_{V_{m\acute{a}x}}$ (mm)	$\Delta_{V_{m\acute{a}x}}$ (%)	$R_{\delta_{V_{m\acute{a}x}}}$	$V_{m\acute{a}x}$ (kN)	$R_{V_{m\acute{a}x}}$	$\eta_{V_{m\acute{a}x}}$ (%/m ²)
URM-1	5.25	0.219	-	145.9	-	-
URM-2	3.03	0.126	-	135.3	-	-
Prom. URM	4.14	0.173	-	140.6	-	-
D-URM-1x300-1	10.18	0.424	2.46	259.4	1.84	25.0
D-URM-1x300-2	9.93	0.414	2.40	251.0	1.79	23.3
D-URM-1x200-1	9.90	0.413	2.39	229.6	1.63	28.1
D-URM-1x200-2	8.34	0.348	2.01	213.8	1.52	23.1
D-URM-3x100-1	9.68	0.403	2.34	258.8	1.84	37.4
H-URM-3x150-1	9.77	0.407	2.36	223.7	1.59	33.2
H-URM-3x150-2	8.23	0.343	1.99	226.7	1.61	34.5
H-URM-3x100-1	8.78	0.366	2.12	209.9	1.49	41.6
H-URM-3x100-2	9.42	0.393	2.28	220.1	1.57	47.7
H-URM-1x300-1	6.99	0.291	1.69	216.7	1.54	45.7
RM-1	5.80	0.242	-	193.1	-	-
D-RM-1x100-1	9.84	0.410	1.70	239.0	1.24	21.1
D-RM-1x200-1	9.70	0.404	1.67	259.6	1.34	15.3
H-RM-3x100-1	8.76	0.365	1.51	217.7	1.13	10.8

$\delta_{V_{m\acute{a}x}}$: desplazamiento horizontal promedio asociado a la resistencia máxima; $\Delta_{V_{m\acute{a}x}}$: drift promedio asociado a la resistencia máxima; $R_{\delta_{V_{m\acute{a}x}}}$ = razón entre $\delta_{V_{m\acute{a}x}}$ para muros reforzados y no reforzados; $V_{m\acute{a}x}$ = esfuerzo de corte máximo promedio; $R_{V_{m\acute{a}x}}$ = razón entre $V_{m\acute{a}x}$ para muros reforzados y no reforzados; $\eta_{V_{m\acute{a}x}} = (R_{V_{m\acute{a}x}} - 1)/A_{CFRP}$: razón de eficiencia asociada a resistencia máxima; A_{CFRP} de Tabla 1.

4.1 Respuesta histerética

En la Figura 11 se muestran las curvas de histéresis más representativas de las obtenidas en los ensayos realizados. En ellas se puede observar que los muros reforzados con CFRP presentaron un claro comportamiento lineal elástico hasta la ocurrencia de la primera fisura diagonal importante, la cual ocurrió aproximadamente para un drift de entrepiso de entre 0.1 y 0.125%. A partir de ese punto el comportamiento de los muros reforzados entró en rango inelástico, con ciclos de carga-descarga cuya forma general resultó similar a la de los muros no reforzados, pero, con menor degradación de rigidez. No se observaron diferencias significativas entre los primeros y segundos ciclos de carga para drift menores que 0.29%.

4.2 Rigidez lateral

Para cada muro fue obtenida la rigidez lateral secante en cada uno de los ciclos de carga y descarga, calculada como:

$$K_{sec} = \Delta V_{m\acute{a}x} / \Delta \delta_{m\acute{a}x} \quad (4)$$

donde para cada ciclo $\Delta V_{\text{máx}}$ y $\Delta \delta_{\text{máx}}$ son los indicados en la Figura 12. En dicha Figura se muestra además la pérdida de rigidez que experimentaron en los primeros ciclos de carga los muros URM (promedio entre la rigidez de ambos muros, en aquellos casos en que hubo más de un muro con la misma cantidad y configuración de refuerzo). Cabe señalar que la pérdida de rigidez de los muros RM reforzados mostró el mismo comportamiento que en los muros URM. Además, la pérdida de rigidez entre el primer y segundo ciclo de a un mismo nivel de desplazamiento, varió entre 6 y 11% en el caso de los muros reforzados y entre 12 y 15% en los no reforzados.

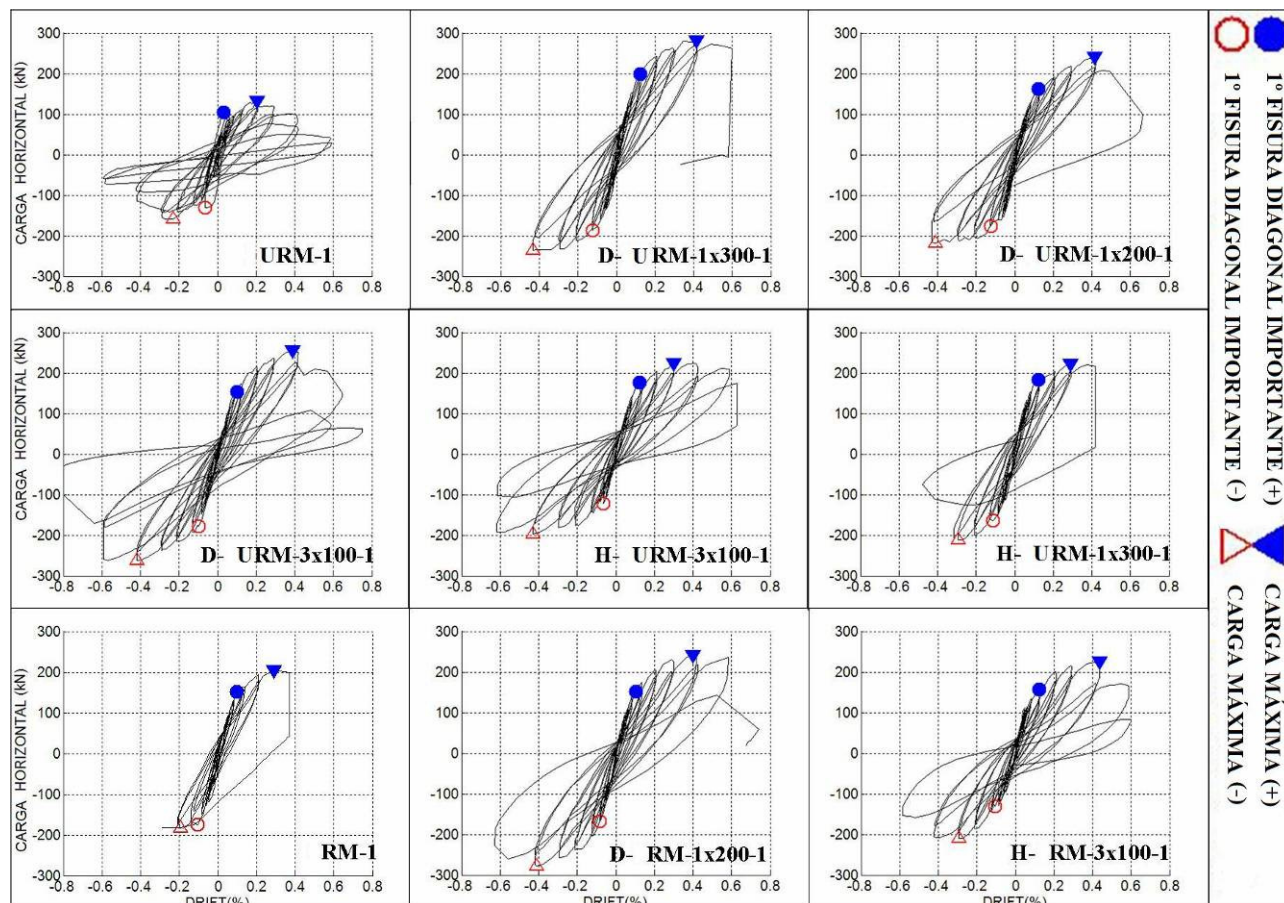


Figura 11 – Curvas de histéresis.

Se calculó la rigidez elástica teórica de los muros incluyendo la rigidez en flexión (K_f) y corte (K_v), obteniéndose la rigidez elástica total (K_e) de acuerdo a:

$$1/K_e = 1/K_f + 1/K_v \quad (5)$$

$$K_f = \left[h^3 / (3 \cdot E_m \cdot I) - (h - h_i) \cdot h^2 / (2 \cdot E_m \cdot I) \right]^{-1} = 297.3 \cdot \text{kN/mm} \quad (6)$$

$$K_v = G_m \cdot A_v / (1.2 \cdot h) = 246.8 \cdot \text{kN/mm} \quad (7)$$

donde E_m es el módulo de elasticidad promedio de la albañilería (ver sección 3.1); I es el momento de inercia de la sección del muro; h es la altura total del muro ($h=2400\text{mm}$); h_i es la altura del punto de inflexión ($h_i=1700\text{mm}$); G_m es el módulo de corte de la albañilería (ver sección 3.1) y A_v es el área de corte del muro ($A_v=276500\text{mm}^2$), llegando a una rigidez elástica, de 135kN/mm .

Los valores de rigidez elástica obtenidos calculados para los primeros ciclos de carga en cada muro usando la expresión (4), variaron entre 121 y 152kN/mm , con un promedio igual a

135kN/mm y desviación estándar de 8kN/mm, validando los valores experimentales medidos y confirmando que en rango elástico el refuerzo de CFRP no afecta las propiedades de rigidez del muro.

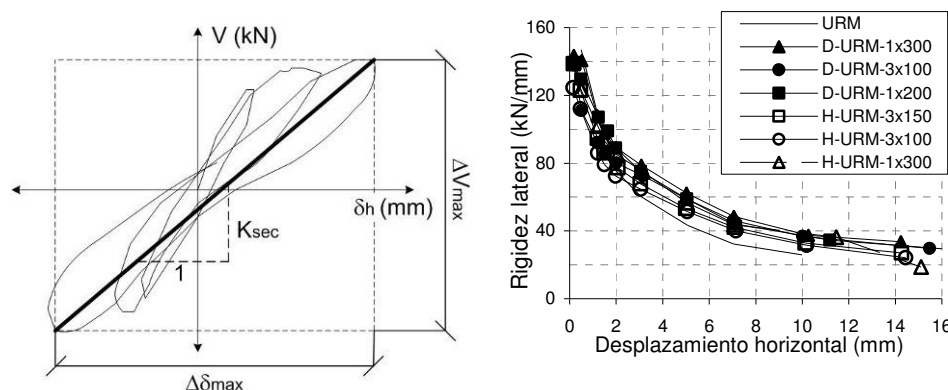


Figura 12 – Rigidez.

5. ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA AL ESFUERZO DE CORTE

Durante los ensayos de corte cíclico realizados a los muros se identificaron básicamente dos estados límite de importancia: cuando se produce la primera fisura diagonal importante y cuando se alcanza la resistencia máxima del muro. En los títulos siguientes se desarrollan expresiones para estimar los esfuerzos de corte asociados a estos dos estados límite. Cabe señalar, que el término CFRP será reemplazado por el término genérico FRP, ya que como se podrá visualizar a continuación, las expresiones desarrolladas se pueden aplicar a refuerzos externos de telas de cualquier material FRP.

5.1 Resistencia al agrietamiento

Según se indicó en la sección 4, la resistencia al agrietamiento por corte en los muros RM reforzado no varió en forma significativa al ser reforzados, por lo que el siguiente desarrollo sólo es aplicable a muros URM reforzados con telas de FRP.

El mecanismo observado mediante el cual se genera la primera fisura diagonal importante, comienza con una pequeña fisura asociada a un esfuerzo de corte y deformación que no depende del refuerzo sino que de las características del muro original (ver sección 4.2), extendiéndose casi instantáneamente en el caso de los muros sin reforzar; en cambio, en los muros reforzados con FRP, este crecimiento instantáneo de la grieta se ve detenido por la presencia del refuerzo, que sólo comienza a trabajar en forma significativa a partir de ese instante cuando el tamaño de la grieta crece.

Luego, asumiendo que el esfuerzo de corte para el cual se produce la primera fisura diagonal importante en los muros reforzados, es igual al corte que produce el inicio de la fisuración en muros URM sin reforzar más la fuerza desarrollada en el refuerzo del FRP debido al incremento de desplazamiento horizontal necesario para extender la fisura inicial hasta abarcar el 70% de las hiladas, se tiene:

$$V_{cr} = V_{m,cr} + E_{FRP} \cdot \varepsilon \cdot A_{FRP} \cdot \cos(\theta) \quad (8)$$

donde, $V_{m,cr}$ es asumido igual al corte de agrietamiento promedio de los muros URM no reforzados; E_{FRP} es el módulo de elasticidad del refuerzo de FRP; ε es la deformación unitaria en el refuerzo de FRP debido al desplazamiento de corte adicional requerido; A_{FRP} es el área total de refuerzo de FRP que cruza la fisura diagonal; y θ es el ángulo entre el refuerzo y las hiladas de ladrillos.

Si δ_{cr} es el desplazamiento de corte total que produce la primera fisura diagonal importante en los muros reforzados y δ_{cr-1} , el desplazamiento de corte para el cual comienza a desarrollarse la primera fisura diagonal, entonces, δ_{cr-2} , el desplazamiento adicional requerido para alcanzar δ_{cr} , se obtiene simplemente como la diferencia entre δ_{cr} y δ_{cr-1} , tal como se indica en la Figura 13.

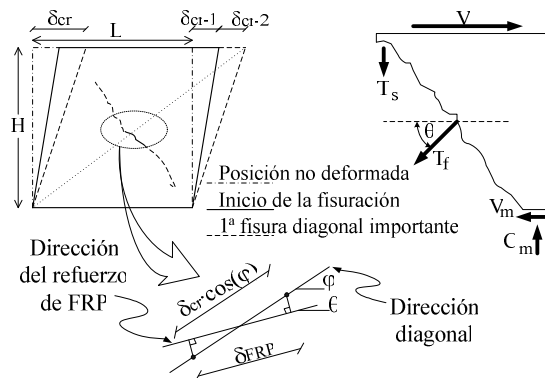


Figura 13 – Desarrollo de la 1ª fisura diagonal importante y equilibrio de fuerzas en condición última.

Ya que el desplazamiento de corte, δ_{cr-2} , es aquel que en definitiva produce la elongación del refuerzo de FRP, haciendo un análisis simple de la compatibilidad geométrica en la posición deformada por corte, la elongación de la diagonal principal del muro es igual a $\delta_{cr-2} \cdot \cos \varphi$, donde φ es el ángulo entre la diagonal y las hiladas de ladrillos. Repitiendo el análisis para una diagonal paralela a la principal (más corta que la principal), la elongación de dicha diagonal varía linealmente entre cero para la diagonal de longitud nula ubicada en el vértice del muro, hasta $\delta_{cr-2} \cdot \cos \varphi$ en la diagonal principal.

De la Figura 13, se tiene que la elongación de una franja horizontal de FRP, δ_{FRP} , se puede obtener mediante la proyección de la elongación de la diagonal que cruza la tela, es decir:

$$\delta_{FRP} = \delta_{cr-2} \cdot \cos(\varphi) \cos(\varphi - \theta) \quad (9)$$

Asumiendo también que la elongación obtenida mediante la expresión (9), se distribuye en dos veces la longitud efectiva de anclaje o desarrollo (una vez L_d a cada lado de la fisura) y que en esta longitud la distribución de esfuerzos tensiones en la fibra es lineal, la máxima deformación unitaria en el FRP debido al incremento de desplazamiento por corte, es:

$$\varepsilon = \delta_{cr-2} \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\varphi - \theta) / L_d \quad (10)$$

Los desplazamientos medidos en los ensayos e informados en la Tabla 4, fueron usados para estimar la resistencia al agrietamiento de los muros URM reforzados. A partir de un análisis elástico, utilizando los resultados de la sección 4.2, la razón entre los desplazamientos por corte y desplazamiento total, se puede obtener como la razón entre las rigideces respectivas, es decir, K_e/K_v , la que resulta igual a 0.55. Así, el desplazamiento total debido al esfuerzo de corte (δ_{cr}), mientras se mantiene el rango elástico, se puede obtener como 0.55 veces el desplazamiento total medido en cada ensayo, mientras que el incremento necesario para generar la primera fisura diagonal en los muros reforzados (δ_{cr-2}) fue obtenido como la diferencia entre los desplazamientos totales de corte del muro en análisis no reforzado y el desplazamiento de agrietamiento promedio de los muros URM sin reforzar.

En la Tabla 6 se muestra la comparación entre las resistencias al agrietamiento medidas y las calculadas. Los valores del ángulo θ utilizados en los cálculos fueron 45.4° en el caso de los muros con refuerzos diagonales y 0° en el caso de los reforzados horizontalmente. El ángulo φ , en este caso particular correspondió a 45.4° en todos los muros. En la Tabla 6 se puede ver que la

metodología propuesta sobreestima la resistencia al agrietamiento, con un promedio de la razón entre la resistencia medida/calculada igual a 0.94.

5.2 Resistencia máxima

Se propone un modelo simple para estimar la resistencia máxima de un muro reforzado externamente con telas de FRP es propuesto. A partir de equilibrio de cuerpo rígido presentado en la Figura 13 se obtiene que:

$$V_{\max} = V_m + \alpha \cdot T_f \cdot \cos(\theta) \quad (11)$$

donde V_m es la resistencia máxima al corte del muro no reforzado, la cual fue asumida igual a la resistencia de corte máxima promedio de los muros RM o URM no reforzados ensayados, según corresponda; $\alpha T_f \cdot \cos(\theta)$ es la contribución a la resistencia que provee el refuerzo de FRP; T_f es la fuerza en la tela de FRP; θ es el ángulo entre el refuerzo de FRP y las hiladas de ladrillo; y α es un coeficiente de eficiencia o aprovechamiento del refuerzo.: en el caso de muros con refuerzo horizontal de FRP, sólo la franja inferior sufrió pull off, lo cual justifica el hecho de usar un factor (α) que considere que las distintas franjas de refuerzo horizontales no experimentan un mismo nivel de esfuerzos tensionales. Algunos estudios anteriores, como los de TOMAZEVIC [30], AGUILAR [31] y LÜDERS [32], también notaron este efecto en el refuerzo horizontal de acero, proponiendo reconociendo que este aprovechamiento es inversamente proporcional a la cantidad de refuerzo horizontal utilizado, proponiendo valores de 0.55 [32] para muros moderadamente armados (equivalentes a los muros URM reforzados) y de 0.34 [33] para muros armados con cantidades elevadas (equivalentes a los muros RM reforzados). Estos valores fueron adoptados inicialmente para estimar la resistencia de los muros. Finalmente se propone utilizar α igual a 1.0 para muros reforzados diagonalmente.

Para estimar T_f , basándose en el modo de falla observado, que reproduce satisfactoriamente la falla registrada en los ensayos de adherencia, se asume una resistencia del refuerzo de FRP igual a 0.24kN/mm veces por el ancho total de cada franja. En la Tabla 6 se resume la resistencia máxima medida en los ensayos, la resistencia máxima estimada usando la expresión (11) y la razón entre la resistencia medida y la calculada.

En dicha Tabla, es posible observar que la expresión (11) es conservadora en la estimación de la resistencia máxima al esfuerzo de corte de todos los muros reforzados diagonalmente, en cambio es levemente no conservadora en el caso de los muros reforzados horizontalmente, lo que sugiere la necesidad de mejorar la estimación del factor de aprovechamiento (α).

6. CONCLUSIONES

Se estudió la influencia en la respuesta de corte de muros de albañilería con y sin escalerillas, reforzados con dos configuraciones de refuerzo externo de telas de CFRP fue estudiada. Las principales conclusiones se resumen a continuación.

Los muros reforzados externamente al corte con telas de CFRP experimentaron importantes aumentos en su resistencia máxima y en su capacidad de desplazamiento horizontal. Los aumentos de resistencia variaron entre 49 y 84% en el caso de los muros URM reforzados y entre 13 y 34% en el caso de los muros RM reforzados. Los aumentos observados en la capacidad de desplazamiento, variaron entre 51 y 146%.

El refuerzo externo de FRP no cambia la rigidez elástica del muro, al menos para drift menores que 0.125%.

El espesor máximo promedio de la primera fisura diagonal importante disminuye cuando un muro URM es reforzado externamente con telas de FRP, aumentando tanto el esfuerzo de corte

como el desplazamiento necesarios para producir el agrietamiento. Esto no ocurre tan claramente en los muro RM reforzados externamente con FRP.

La presencia de refuerzo externo de telas de FRP en los muros de albañilería cambió su patrón de agrietamiento, aumentando la cantidad de fisuras y disminuyendo su espesor, en diferentes medidas dependiendo de la cantidad y disposición del refuerzo. En este aspecto la influencia del refuerzo resultó ser mayor en el caso de los muros URM.

Los muros sin reforzar experimentaron una falla frágil. El uso de refuerzos externos de telas de FRP disminuye la fragilidad de la falla y aumenta en mayor o menor grado la resistencia residual de los muros, dependiendo principalmente de su configuración. Los muros reforzados con una sola franja de tela, ya sea diagonal u horizontal, mostraron una falla más frágil que aquellos muros que fueron reforzados con varias franjas paralelas de tela.

TABLA 6. Comparación entre resistencias medidas y calculadas.

Muro	Primera fisura diagonal importante			Resistencia máxima		
	V_{cr}^m (kN)	V_{cr}^c (kN)	V_{cr}^m / V_{cr}^c	$V_{máx}^m$ (kN)	$V_{máx}^c$ (kN)	$V_{máx}^m / V_{máx}^c$
URM-1	117.4	-	-	145.9	-	-
URM-2	125.5	-	-	135.3	-	-
Prom. URM	121.4	-	-	140.6	-	-
D-URM-1x300-1	192.4	205.6	0.94	259.4	241.8	1.07
D-URM-1x300-2	182.4	199.4	0.91	251.0	241.8	1.04
D-URM-1x200-1	169.3	176.9	0.96	229.6	208.1	1.10
D-URM-1x200-2	171.5	165.5	1.04	213.8	208.1	1.03
D-URM-3x100-1	165.2	157.5	1.05	258.8	241.8	1.07
H-URM-3x150-1	133.9	170.7	0.78	223.7	259.4	0.86
H-URM-3x150-2	179.7	194.6	0.92	226.7	259.4	0.87
H-URM-3x100-1	149.0	153.7	0.97	209.9	219.8	0.95
H-URM-3x100-2	171.7	187.2	0.92	220.1	219.8	1.00
H-URM-1x300-1	174.5	198.5	0.88	216.7	219.8	0.99
RM-1	163.0	-	-	193.1	-	-
D-RM-1x100-1	162.5	-	-	239.0	226.8	1.05
D-RM-1x200-2	174.0	-	-	259.6	260.6	1.00
H-RM-3x100-1	143.3	-	-	217.7	242.1	0.90
Promedio	-	-	0.94	-	-	0.99
Desv. Estándar	-	-	0.08	-	-	0.08

V_{cr}^m = corte de agrietamiento promedio (medido); V_{cr}^c = corte de agrietamiento calculado; $V_{máx}^m$ = corte máximo promedio (medido) ; $V_{máx}^c$ = corte máximo calculado.

Los muros reforzados diagonalmente desarrollaron mayores resistencias totales y mayores factores de aprovechamiento (α) que los muros con refuerzo equivalente horizontal; sin embargo, el aumento por cada m² de refuerzo utilizado fue mayor en el caso de los muros reforzados horizontalmente, ya que el refuerzo horizontal trabaja en ambas direcciones y además requiere de menor longitud que el refuerzo diagonal, lo cual se ve fuertemente reflejado en el valor de η , resultando ser más económico utilizar refuerzo horizontal.

Fue propuesta y validada una sencilla expresión sencilla para predecir la resistencia máxima al esfuerzo de corte en muros de albañilería fue propuesta y validada, obteniendo aproximaciones razonablemente conservadoras de los resultados experimentales. También una expresión fue propuesta una expresión para estimar la resistencia al agrietamiento de muros de albañilería reforzados externamente con FRP, la cual entregó resultados satisfactorios para los

muros reforzados diagonalmente, pero, sobreestimó las resistencias de los muros reforzados horizontalmente.

Resulta necesario seguir estudiando el comportamiento mecánico de muros de albañilería reforzados externamente con telas de FRP, sobre todo, aquellos reforzados con las fibras dispuestas horizontalmente, con el fin de determinar con mayor precisión la variación de la eficiencia y los factores de aprovechamiento

7. AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen al fondo de desarrollo científico y tecnológico, FONDECYT, el cual contribuyó a financiar esta investigación a través del proyecto 1030403. Incluyen también en este agradecimiento a SIKA Chile, quienes donaron gran parte de los materiales, a la empresa constructora BROTEC por la fabricación de los muros y al laboratorio de Ingeniería Estructural y Geotécnica de la Pontificia Universidad Católica de Chile, por su contribución a esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CRUZ, E. et al. Lecciones del sismo del 3 de marzo de 1985. *Instituto Chileno del Cemento y el Hormigón*. Santiago, Chile. 1988.
- [2] KLINGNER, R. Behavior of masonry in the Northridge (US) and Tecoman-Colima (Mexico) earthquakes: Lessons learned, and changes in design provisions. *6° Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sismica*. Guimarães, Portugal. 2004.
- [3] FALLAHI, A. et al. Microtremor Measurements and Building Damage during the Changureh-Avaj, Iran Earthquake of June 2002. *Journal of Natural Disaster Science*. 2003, 25(3), pp 37-46.
- [4] SEPULVEDA M. Influencia del refuerzo horizontal en el comportamiento sísmico de muros de albañilería armada. *Memoria para optar el título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile*. Santiago, Chile, 2003.
- [5] TRIANTAFILLOU, T. C. Strengthening of masonry structures using epoxy bonded FRP laminates. *Journal of Composites for Construction*. 1998, 2(2), pp 96-103.
- [6] EHSANI, M. R. et al. Behavior of retrofitted URM walls under simulated earthquake loading. *Journal of Composites for Construction*. 1999, 3(3), pp 134-142.
- [7] ALBERT, M. L. et al. Strengthening of unreinforced masonry walls using FRPs. *Journal of Composites for Construction*. 2001 5(2), pp 76-84.
- [8] HAMILTON, H. R., AND DOLAN, C. W. Flexural capacity of glass FRP strengthened concrete masonry walls. *Journal of Composites for Construction*. . 2001, 5(3), pp 170-178.
- [9] HAMOUSH, S. A. et al. Out-of-plane strengthening of masonry walls with reinforced composites. *Journal of Composites for Construction*. 2001, 5(3), pp 139-145.
- [10] KUZIK, M. et al. Cyclic flexure tests of masonry walls reinforced with glass fiber reinforced polymer sheets. *Journal of Composites for Construction*. 2003, 7(1), pp 20-30.
- [11] SCHWEGLER, G. Masonry construction strengthened with fiber composites in seismically endangered zones. *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, 10th ECEE*. Viena, Austria, Volume I, pp 467-476.
- [12] VALLUZI, M. R. et al. Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates. *Construction and Building Materials*. 2002, 16(7), pp 409-416.
- [13] STRATFORD T. et al. Shear strengthening masonry panels with sheet glass-fiber reinforced polymer. *Journal of Composites for Construction*. 2004, 8(5), pp 434-443.
- [14] ELGAWADY, M. A. et al. In-plane seismic response of URM walls upgraded with FRP. *Journal of Composites for Construction*. 2005, 9(6), pp 524-535.
- [15] ELGAWADY, M. A. Static Cyclic Response of Masonry Walls Retrofitted Fiber-Reinforced Polymers. *Journal of Composites for Construction*. 2007, 11(1), pp 50-61.
- [16] HAROUN, M. A. et al. Cyclic in-plane shear of concrete masonry walls strengthened by FRP laminates. *ACI Special publication SP-230*, pp 327-340.
- [17] TUREK, M. et al. In-Plane Shake-Table Testing of GFRP-Strengthened Concrete Masonry Walls. *Earthquake Spectra*. 2007, 23(1), pp 223-237.
- [18] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. "NCh 1928Of.1993. Albañilería Armada – Requisitos para el diseño y cálculo". Santiago, Chile, 1993.

- [19] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. “NCh 2123 Of. 1997. Albañilería Confinada – Requisitos de diseño y cálculo”. Santiago, Chile, 1997.
- [20] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. “NCh 158Of.1967. Cementos – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento”. Santiago, Chile, 1967.
- [21] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. “NCh 1037Of.1977. Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas”. Santiago, Chile, 1977.
- [22] DUARTE, G. Análisis experimental de muretes de albañilería reforzados con CFRP. *Memoria para optar el título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile*. Santiago, Chile. 2003
- [23] HAMOUSH S. A. et al. Out-of-plane strengthening of masonry walls with reinforced composites. *Journal of Composites for Construction*. 2001, 5, pp 139-145.
- [24] SANTA MARÍA, H. et al. Experimental investigation of masonry panels externally strengthened with CFRP laminates and fabric subjected to in-plane shear load. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C. Canada. 2004, Paper 1627.
- [25] TOUTANJI, H. et al. The Effect of Surface Preparation on the Bond Interface Between FRP Sheets and Concrete Members. *John Wiley & Sons, Ltd*. Inglaterra, 2002.
- [26] ZHAO, M. y ANSARI, F. Bond Properties of FRP Fabrics and Concrete Joints. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Canada. 2004, Paper 35.
- [27] ADRIAZOLA, H. Reparación y rehabilitación sísmica de muros de albañilería reforzados al corte con fibras de carbono, análisis de costos. *Memoria para optar el título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad Diego Portales*. Santiago, Chile, 2007.
- [28] ALCAINO, P. Respuesta sísmica de muros de albañilería reforzados externamente con fibras de carbono: análisis experimental. MSc. tesis, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. 2007.
- [29] SANTA MARIA, H. et al. Experimental response of masonry walls externally reinforced with carbon fiber fabrics. 8th U.S National Conference on Earthquake Engineering, 8NCEE, San Francisco, California, USA. 2006. Paper 1402.
- [30] TOMAZEVIC, M. Masonry structures in seismic areas a state of the art report. *9th European Conference on Earthquake Engineering, 9th ECEE*, Moscow, Russia. 1990.
- [31] LÜDERS, C., HIDALGO P. Influencia del refuerzo horizontal en el comportamiento sísmico de muros de albañilería armada. *IV Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, ACHISINA*, Viña del Mar, Chile. 1986.
- [32] AGUILAR, G. Efectos del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de albañilería confinada sujeta a cargas laterales. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, UNAM*, D.F., México, 1997.
- [33] DIEZ, J. Estudio experimental de muros de albañilería sometidos a carga alternada. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile*, Santiago, Chile. 1987.