

# EVALUACION DE LA EFICIENCIA DEL SISTEMA DE REFUERZO O REPARACIÓN DE ELEMENTOS DE MAMPOSTERÍA CON MATERIALES COMPUESTOS

Viviana Carolina Rougier <sup>(1)</sup>; Bibiana María Luccioni <sup>(2)</sup>

(1) Profesor Doctor en Ing. Civil, Universidad Tecnológica Nacional / Facultad Regional Concepción del Uruguay

(2) Profesor Doctor en Ingeniería, Instituto de Estructuras / Universidad Nacional de Tucumán

## RESUMEN

Investigaciones recientes en el uso de materiales compuestos para el refuerzo de muros de mampostería han demostrado que tal sistema puede aumentar sustancialmente la resistencia y ductilidad de los mismos. Dicho sistema ha probado también ser eficiente en el refuerzo y/o reparación de estructuras antiguas deterioradas que, en su mayoría, son de mampostería.

La tendencia es establecer un sistema de reparación eficiente que elimine la necesidad de utilizar técnicas extensas en el tiempo, o en muchos casos, la demolición de la estructura. Para ello, resulta necesario evaluar diferentes aspectos del sistema de reparación y / o refuerzo con materiales compuestos, tales como formas de colocación, cantidad óptima de refuerzo a ser aplicado y modos de falla.

En este trabajo se presentan resultados experimentales y numéricos de un estudio paramétrico sobre pequeños muros de mampostería reforzados o reparados con materiales compuestos según diferentes configuraciones de reparación o refuerzo, ensayados a compresión diagonal y perpendicular a las juntas horizontales de mortero y sobre pequeñas probetas compuestas por tres mampuestos (triplets) reforzadas o reparadas y ensayadas a corte. Los resultados del estudio paramétrico permiten extraer conclusiones que contribuyen a definir la forma óptima de los refuerzos en cada caso analizado.

## ABSTRACT

*Research activities carried out recently concerning the use of fiber reinforced polymers as external reinforcement of masonry walls have shown that this system can considerably improve their strength and ductility. The use of polymeric fiber composites has also proved to be an efficient repairing technique for damaged historical buildings.*

*The tendency is to establish an efficient retrofitting system that eliminates the need of using techniques extensive in time or in some cases, the structure demolition. It is therefore necessary to analyze different aspects of this retrofitting system. This analysis involves placement techniques, amount and layout of the reinforcement and failure modes of the reinforced element.*

*Experimental and numerical parametric results of masonry panels retrofitted or repaired with composite materials and subjected to diagonal and perpendicular compression test and of small specimens consisting on three bricks (triplets) reinforced and repaired and subjected to shear load, are presented. Panels and triplets with different reinforcement schemes have been tested. Parametric study results show conclusions that define the best reinforcement in each case analyzed.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos han demostrado ser muy eficientes cuando se aplican como refuerzo externo de muros portantes de mampostería de ladrillos cerámicos macizos, huecos y bloques de hormigón, sometidos a diferentes solicitaciones en el plano. Dicho refuerzo se hace generalmente cubriendo toda la pared con láminas de compuesto y adhiriéndolas mediante un sistema epoxi, o mediante bandas aplicadas del mismo modo.

El refuerzo con materiales compuestos de pequeños especímenes de mampostería de bloques huecos de hormigón sujetos a compresión uniaxial perpendicular a las juntas de mortero ha demostrado ser muy eficiente en cuanto a que mejora la capacidad de deformación de la mampostería, incrementa su resistencia y evita la falla frágil fuera del plano, manteniendo la integridad del muro <sup>1</sup>.

Investigaciones recientes se han focalizado en mejorar la respuesta al corte de muros de mampostería mediante el refuerzo externo con compuestos de fibra de carbono y fibra de vidrio (PRFC y PRFV) dispuestos según diferentes configuraciones. Los resultados obtenidos sobre pequeños elementos de mampostería constituidos por tres ladrillos cerámicos macizos (triplets)<sup>2</sup> reforzados con PRFV según diferentes longitudes de anclaje, número de capas y orientación de las fibras, mostraron que, tanto la resistencia como la ductilidad de los elementos ensayados, mejoraron notablemente con esta técnica de refuerzo. Ensayos llevados a cabo por diferentes autores<sup>3, 4</sup> en paneles de mampostería de ladrillos cerámicos huecos y paneles de unidades macizas de arcilla, respectivamente, solicitados a corte y reforzados según diferentes configuraciones y PRF, revelaron en general, lo siguiente:

- a) El refuerzo con PRF, aumenta la capacidad resistente de la mampostería.
- b) En el caso de la mampostería de unidades cerámicas huecas<sup>3</sup> el incremento de resistencia y capacidad de deformación es mayor, que en paneles de ladrillos cerámicos macizos<sup>4</sup>.
- c) La capacidad de deformación en ambos tipos de mampostería es dependiente del esquema de refuerzo adoptado.
- d) Independientemente del tipo de PRF y de la configuración de refuerzo utilizada no se observa aumento de rigidez en los paneles de unidades cerámicas huecas<sup>3</sup>. En la mampostería de ladrillos macizos, el refuerzo con PRFV incrementa en forma importante la rigidez<sup>4</sup>.
- e) En ambos tipos de mampostería se produjo un tipo de falla frágil, excepto en los paneles reforzados totalmente en ambas caras con tejido unidireccional de PRFV<sup>3</sup>.

Otros investigadores<sup>5, 6</sup> estudiaron el comportamiento sísmico en el plano de muros de mampostería de unidades cerámicas huecas de dimensiones reales reforzados con diferentes tipos de compuestos y esquemas de refuerzo. Para ello llevaron a cabo ensayos dinámicos<sup>6</sup> y cuasi-estáticos cíclicos<sup>5, 6</sup>. Se observó en ambos casos que la técnica de refuerzo mejoró la estabilidad lateral de los muros, incrementó la resistencia al corte de las paredes y su capacidad de deformación, independientemente del tipo de material compuesto y configuración de refuerzo utilizada.

Los objetivos del presente trabajo, son analizar los aspectos más importantes del comportamiento a compresión uniaxial y corte en el plano de mampostería de unidades macizas de arcilla reforzada y/o reparada con PRFC y evaluar la eficiencia

de la técnica de refuerzo con PRFC, en lo que respecta al mejoramiento de la capacidad resistente de la mampostería. El trabajo se complementa con un estudio numérico-paramétrico el cual utiliza un modelo de plasticidad y daño existente<sup>7</sup> que permite estimar la forma óptima de los refuerzos.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 Introducción

Con el objeto de estudiar el comportamiento de la mampostería local reforzada y/o reparada con materiales de matriz polimérica reforzados con fibras de carbono (PRFC) bajo sollicitaciones en el plano y evaluar la eficiencia del sistema de refuerzo y/o reparación con dichos materiales, se desarrolló un programa de laboratorio consistente en: a) ensayos de compresión diagonal y perpendicular a las juntas horizontales de mortero sobre paneles individuales, sin reforzar y reforzados y/o reparados con los materiales antes mencionados y, b) ensayos de corte puro sobre pequeñas probetas constituidas por tres mampuestos y juntas de mortero, sin reforzar y reforzadas y/o reparadas con los mismos materiales<sup>8</sup>.

Todos los ensayos se hicieron en prensa Instron con sistema servohidráulico, control de desplazamientos y cargas cuasiestáticas monótonas crecientes. Se utilizaron comparadores analógicos y digitales y potenciómetros que fueron montados sobre los especímenes mediante dispositivos especialmente diseñados para tal fin. En la Figura 1 (a) y (b) se muestran el esquema de ensayo e instrumentación utilizada para los paneles y los especímenes de corte, respectivamente.



(a)



(b)



Figura 1 – Esquema de ensayo e instrumentación: (a) paneles; (b) especímenes de corte.

A continuación se presenta una breve descripción de los especímenes ensayados y de los materiales componentes y de refuerzo. Luego se muestran los resultados obtenidos del trabajo experiemetal y finalmente se presenta un estudio numérico paramétrico.

## 2.2 Descripción de los especímenes ensayados

### 2.2.1 Paneles de unidades macizas de arcilla

Se construyeron dos grupos similares de paneles siguiendo el Reglamento INPRES- CIRSOC. Los especímenes de ambos grupos presentan dimensiones distintas debido a que fueron hechos con mampuestos de distinto tamaño: especímenes de 580 x 610 x 130 mm (grupo I) y especímenes de 560 x 550 x 125 [mm<sup>3</sup>] (grupo II). Se utilizaron unidades macizas de arcilla de 280 x 130 x 50 [mm<sup>3</sup>] (I) y de 260 x 125 x 55 [mm<sup>3</sup>] (II) y juntas de mortero de 15 mm. Se llevaron a cabo ensayos de compresión uniaxial perpendicular a las juntas horizontales de mortero y ensayos de compresión diagonal. Algunos paneles fueron reforzados con PRFC y otros ensayados hasta ciertos niveles de daño, reparados con PRFC y ensayados hasta rotura. Se adoptaron diferentes configuraciones de refuerzo y/o reparación. En la Tabla 1 se detalla la población de paneles, el tipo de ensayo a que fueron sometidos, la denominación de cada uno y el esquema de refuerzo y/o reparación. En las Tabla 2 se presentan las características mecánicas de mampuestos y morteros obtenidas según reglamentación vigente en el país y en la Tabla 3 se detallan las propiedades del material de refuerzo<sup>8</sup>.

TABLA 1: Especímenes ensayados.

| Tipo de Ensayo                                               | Espécimen                                                       | Esquema de refuerzo y/o reparación                                                       |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Compresión perpendicular a las juntas horizontales de motero | MP1, MP2 y MP3 (grupo I), MP6, MP7, MP8, MP10 y MP11 (grupo II) | Sin Refuerzo                                                                             |
|                                                              | MP4Ref (grupo I)                                                | Refuerzo total de ambas caras del panel                                                  |
|                                                              | MP5Ref (grupo I)                                                | Refuerzo con bandas de 75 x 580 [mm <sup>2</sup> ] paralelas a las hiladas de ladrillo   |
|                                                              | MP8Rep y MP11Rep (grupo II)                                     | Reparación con bandas de 75 x 560 [mm <sup>2</sup> ] paralelas a las hiladas de ladrillo |
|                                                              | MP9Ref (grupo II)                                               | Refuerzo con bandas de 75 x 560 [mm <sup>2</sup> ] paralelas a las hiladas de ladrillo   |
| Compresión diagonal                                          | MC1, MC2 y MC3 (grupo I), MC7, MC8 y MC12 (grupo II)            | Sin refuerzo                                                                             |
|                                                              | MC3Rep (grupo I)                                                | Reparación con bandas de 70 mm de ancho ortogonales a la dirección de la carga           |
|                                                              | MC4Ref (grupo I)                                                | Refuerzo total de ambas caras                                                            |

|  |                                                  |                                                                                   |
|--|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|  | MC5Ref (grupo I)                                 | Refuerzo con bandas de 50 mm de ancho ortogonales a la dirección de la carga      |
|  | MC6 Ref (grupo I)                                | Refuerzo con bandas de 50 mm y 65 mm de ancho paralelas a las hiladas de ladrillo |
|  | MC7Rep y MC8Rep (grupo II)                       | Reparación con bandas de 70 mm de ancho ortogonales a la dirección de la carga    |
|  | MC9Ref y MC10Ref y MC11 Ref y MC13Ref (grupo II) | Refuerzo con bandas de 70 mm de ancho ortogonales a la dirección de la carga      |
|  | MC12Rep (grupo II)                               | Reparación con bandas de 70 mm de ancho ortogonales a la dirección de la carga    |

TABLA 2 – Características mecánicas de los mampuestos y morteros.

| Mampuesto | Dimensiones (mm <sup>3</sup> ) | Módulo de Elasticidad E (MPa) | Resistencia última a compresión $\sigma_{uc}$ , (MPa) | Coefficiente de Poisson, $\nu$ |
|-----------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|
| I         | 280x130x50                     | 1662                          | 11.82                                                 | 0.16                           |
| II        | 260x125x55                     | 1400                          | 8.28                                                  | 0.15                           |
| Mortero   |                                |                               |                                                       |                                |
| Tipo I    |                                | 3380                          | 6.73                                                  | 0.21                           |
| Tipo II   |                                | 1520                          | 4                                                     | 0.21                           |

TABLA 3 – Características mecánicas del PRFC.

| Propiedades                                     | PRFC  |
|-------------------------------------------------|-------|
| Módulo de Elasticidad E (MPa)                   | 72500 |
| Resistencia última a tracción, $\sigma_t$ (MPa) | 960   |
| Coefficiente de Poisson, $\nu$                  | 0.2   |
| Alargamiento a la rotura (%)                    | 1.33  |
| Espesor (mm)                                    | 1     |

### 2.2.2 Especímenes de corte

Para estudiar el comportamiento a corte de la interfaz mortero-mampuesto de la mampostería sin reforzar y reforzada y/o reparada con PRFC se construyeron 10 elementos de mampostería de unidades macizas, constituidos por tres ladrillos de 260 x 125 x 55 [mm<sup>3</sup>] y juntas de mortero de 15 mm. Algunos especímenes fueron reforzados y otros dañados y luego reparados con bandas de PRFC de diferente longitud y ancho, con el propósito de analizar el efecto de la longitud de anclaje del compuesto. En la Tabla 4 se presentan la denominación adoptada para cada uno, el tipo de ensayo a que fueron sometidos y el esquema de refuerzo, en las Tablas 2 y 3 las características mecánicas de mampuestos y morteros y del material de refuerzo, respectivamente<sup>8</sup>.

TABLA 4 – Especímenes ensayados.

| TIPO DE ENSAYO   | Especimen   | Esquema de refuerzo y/o reparación                            |
|------------------|-------------|---------------------------------------------------------------|
| Ensayos de corte | C1-C2-C8-C9 | Sin refuerzo                                                  |
|                  | C1Rep       | Reparación de C1 con bandas de 120 x 90 [mm <sup>2</sup> ]    |
|                  | C2Rep       | Reparación de C2 con bandas de 100 x 54 [mm <sup>2</sup> ]    |
|                  | C8Rep-C9Rep | Reparación de C8-C9 con bandas de 140 x 80 [mm <sup>2</sup> ] |
|                  | C4Ref       | Refuerzo con bandas de 120 x 90 [mm <sup>2</sup> ]            |
|                  | C5Ref       | Refuerzo con bandas de 100 x 54 [mm <sup>2</sup> ]            |
|                  | C6Ref-C7Ref | Refuerzo con bandas de 140 x 80 [mm <sup>2</sup> ]            |

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 3.1 Ensayos de compresión perpendicular a las juntas.

A los efectos de estudiar la efectividad del refuerzo y/o reparación con PRFC se analizaron dos configuraciones: (a) refuerzo total y (b) bandas unidireccionales. En ambas configuraciones se reforzaron las dos caras de los paneles y se dispuso la fibra ortogonalmente a la dirección de aplicación de la carga, pues el compuesto trabaja eficientemente sólo bajo tensiones de tracción. En la Figura 2 se presentan los dos esquemas de refuerzo evaluados. En el caso de los muros dañados y luego reparados, MP8 y MP11, según el esquema (b), los dos especímenes se ensayaron hasta un valor de carga donde se detectaron las primeras fisuras. Dicho valor corresponde al 70 % de la carga máxima alcanzada por paneles de idénticas características geométricas y propiedades mecánicas de mampuestos y mortero, ensayados a rotura previamente.

##### 3.1.1 Muros Reforzados

En la Figura 2 pueden verse también el tipo de falla y las gráficas carga-desplazamiento axial y transversal totales ( $P-\delta_i$  y  $\delta_t$ ) respectivamente, de los muros MP4Ref (grupo I), totalmente reforzado MP5Ref (grupo I) y MP9Ref (grupo II), reforzados con bandas de 7.5 cm de ancho, así como también la comparación con muros de iguales características no reforzados pertenecientes a los grupos I y II, respectivamente. Los desplazamientos fueron medidos en una determinada longitud de base y en ambas caras de los especímenes y luego extrapolados a la longitud y ancho total de los paneles para su representación en la Figura 2.

En el caso del espécimen reforzado totalmente sólo se muestra la curva carga-desplazamiento axial pues, debido a problemas ocurridos en el sistema de medición de los desplazamientos horizontales, no se dispone de esos registros experimentales. En lo que hace al modo de falla, en el panel con refuerzo total se produjeron fisuras verticales en los laterales del espécimen, ver Fig. 2, sin ningún tipo de agrietamiento en las caras frontales, a diferencia del tipo de rotura registrado en los muros no reforzados.

Los muros reforzados con bandas presentaron pequeñas fisuras verticales en las caras frontales y laterales y la falla fue menos dúctil que la del panel con refuerzo

total, similar a los paneles no reforzados.

Se puede ver que, cualquiera sea el esquema de refuerzo adoptado, no se aprecia mejora sustancial de la resistencia última

En ningún espécimen reforzado, según las dos configuraciones de refuerzo adoptadas, se produjo la falla del laminado. En el caso de los paneles reforzados con bandas, el desprendimiento de las capas superficiales de mampuesto, provocó el arrancamiento de las mismas, según se puede ver en la Fig. 2.

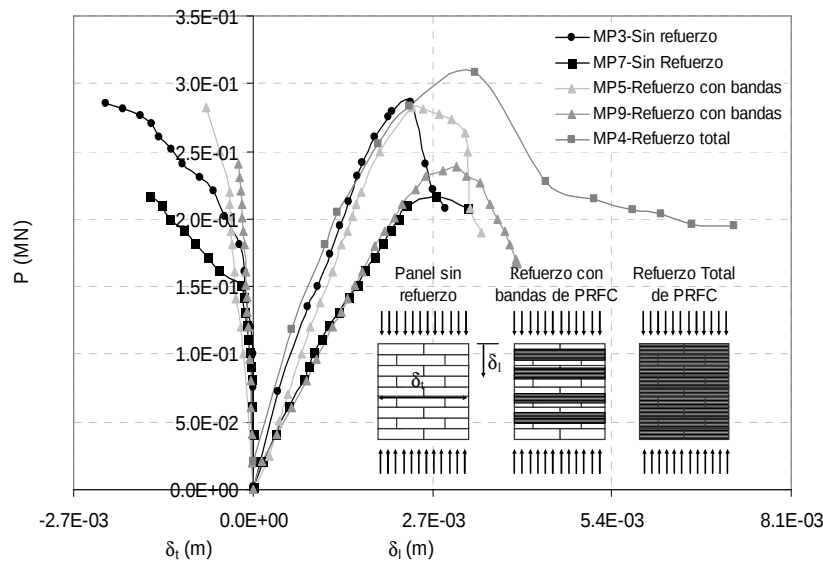


Figura 2 – Curvas carga-desplazamiento axial y transversal totales de paneles reforzados con PRFC. Comparación con especímenes no reforzados. Tipos de rotura.

### 3.1.2 Muros reparados

En la Figura 3 se muestran las curvas carga-desplazamientos axial y trasversal totales ( $P-\delta_i$  y  $\delta_t$ ) de los especímenes MP8 y MP11 y también los tipos de rotura. En este último caso se midieron también las curvas de carga y descarga del espécimen dañado y reparado. Se puede ver un incremento de la rigidez axial y transversal del espécimen MP11 debido a la reparación. Los valores de resistencia última a compresión uniaxial alcanzados por los paneles reparados son similares a los de un espécimen sin refuerzo y/o reparación, llevado a rotura.

La rotura de los especímenes reparados se produjo, en todos los casos, por aplastamiento en la zona del apoyo superior y ello provocó el arrancamiento de las bandas de PRFC como consecuencia de la rotura y desprendimiento de las capas superficiales del mampuesto, similar a los especímenes reforzados. No se observó fisuración adicional en las cargas frontales del muro.

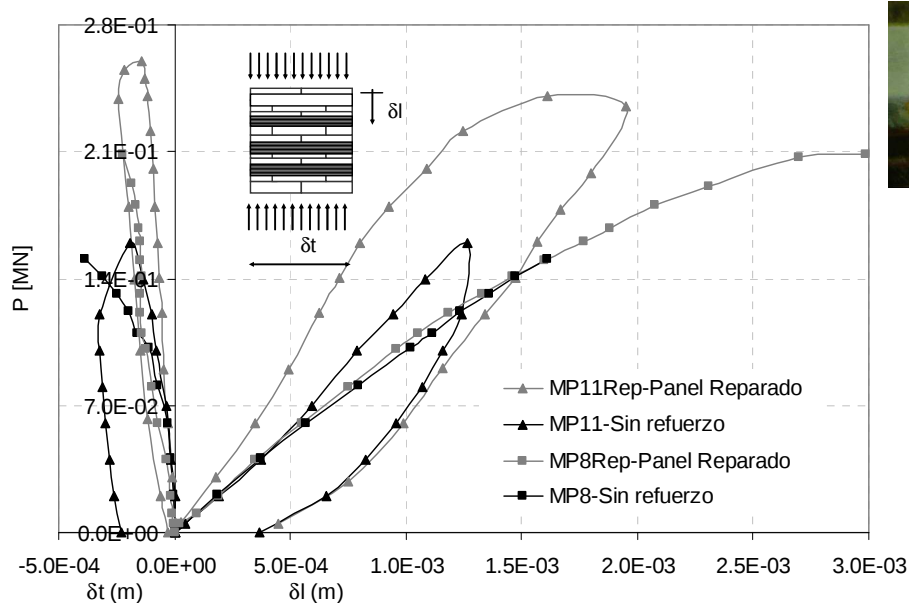


Figura 3 – Curvas carga-desplazamiento axial y transversal totales de paneles reparados con bandas de PRFC. Tipos de rotura.

### 3.2 Ensayos de compresión diagonal.

Habiendo obtenido y evaluado las resistencias a corte y los modos de roturas de especímenes sin reforzar, se estudiaron tres configuraciones posibles de refuerzo a saber: (a) refuerzo total con PRFC, (b) refuerzo con bandas dispuestas ortogonalmente a la dirección de aplicación de la carga y (c) refuerzo con bandas paralelas a las hiladas de ladrillos<sup>8</sup>. En todos los casos el refuerzo se aplicó en ambas caras de los paneles. Posteriormente, se realizó un estudio numérico paramétrico donde se analizaron diferentes longitudes de anclaje de la banda central de refuerzo para el caso del refuerzo con bandas ortogonales. El objetivo de dicho estudio fue encontrar la longitud de anclaje óptima, de tal manera de lograr la máxima resistencia con la cantidad mínima de PRFC. Como resultado de dicho estudio se ensayaron cuatro especímenes pertenecientes al grupo II, MC9Ref, MC10Ref, MC11Ref y MC13Ref, en los cuales se evaluaron tres longitudes de anclaje. En todos los casos, el ancho de banda se mantuvo constante. En el caso de los muros dañados y luego reparados, dos de ellos, MC3 y MC7, fueron llevados a rotura, mientras que los dos restantes MC8 y MC12 se ensayaron hasta un 50 % del valor estimado de la carga de rotura. La reparación se hizo con bandas ortogonales a la dirección de aplicación de la carga. En algunos especímenes los desplazamientos en la dirección de la diagonal comprimida fueron medidos hasta el final de los ensayos.

#### 3.2.1 Muros reforzados

En la Figura 4 se representan las curvas carga-desplazamientos axiales y transversales totales de los especímenes MC9Ref, MC10Ref, MC11Ref y MC13Ref.

Se observa mejora en la resistencia y en la capacidad de deformación axial a

mayor longitud de la banda central de refuerzo. El espécimen MC9Ref, falló repentinamente a un valor de carga muy inferior al esperado. En este caso, la falla se produjo por deslizamiento de la junta central de mortero, como resultado del despegue de la banda central de refuerzo, evidenciando una mala adherencia entre aquél y la mampostería. Los demás especímenes tuvieron un tipo de rotura menos frágil, dependiendo de la longitud de anclaje de la banda central, y todos conservaron su monolitismo luego de ocurrida la falla.

Para todas las longitudes de banda se produjo un aumento de rigidez, según se puede apreciar en la Figura 4, donde también se pueden ver los tipos de rotura. En general, la falla se produjo en forma localizada en la zona de apoyos, con rotura de mampuestos y juntas y en el caso de las bandas de menor longitud de anclaje se observó también rotura de las capas superficiales de mampuestos que provocaron el desprendimiento de las mismas.

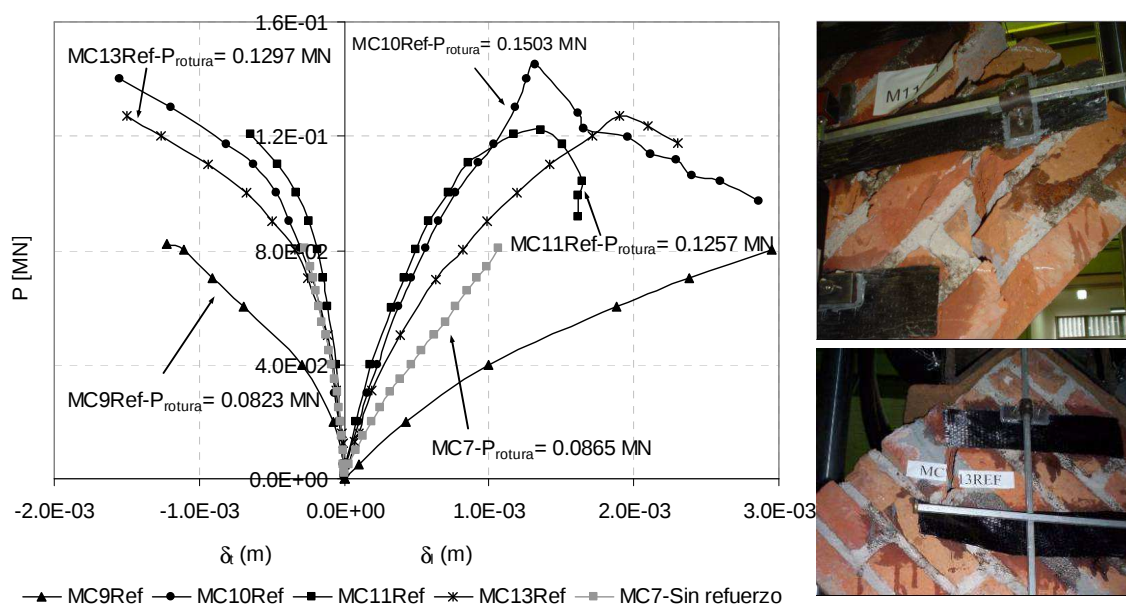


Figura 4 – Curvas carga-desplazamiento de las diagonales comprimida y traccionada de paneles reforzados con bandas de PRFC. Comparación con espécimen no reforzado. Tipos de rotura.

### 3.2.2 Muros reparados

En todos los especímenes la reparación se hizo con bandas unidireccionales de PRFC de 70 mm de ancho, dispuestas ortogonalmente a la dirección de la carga. Los muros reparados fueron denominados MC3Rep, MC7Rep, MC8Rep y MC12Rep. Los muros MC3 y MC7 fueron previamente inyectados con lechada de cemento a los efectos de devolverle el monolitismo. Se pretendió mínimamente recuperar la capacidad portante de la mampostería.

En el panel MC3 la falla se inició en el apoyo y se propagó a través de juntas y mampuestos. En el caso del muro MC7, la falla ocurrió a lo largo de la diagonal comprimida, observándose también deslizamiento de juntas horizontales de mortero. Los otros dos muros (MC8 y MC12), en los que sólo se alcanzó la mitad de la carga

estimada de rotura, no mostraron indicios de daño visible.

Aún cuando es necesaria la realización de un número mayor de ensayos, se puede concluir que la reparación con PRFC dio resultados muy satisfactorios: los paneles totalmente dañados y luego reparados no sólo recuperaron su resistencia inicial, sino que además la superaron en un 30 % aproximadamente. Se observó además una recuperación de la rigidez inicial. Mostraron un tipo de falla frágil que se inició en la zona del apoyo inferior, provocó la rotura de los mampuestos y, en consecuencia, el despegue de la lámina de compuesto aplicada allí. Con respecto a los muros cargados hasta un 50 % de su capacidad resistente, aumentaron la misma en un 70 %. Registraron un tipo de rotura similar al anterior.

En la Figura 5 se presentan las curvas carga-desplazamiento a lo largo de las diagonales comprimida y traccionada ( $\tilde{P}$ - $\delta_i$  y  $\delta_t$ ) de los muros dañados y luego reparados y los tipos de rotura.

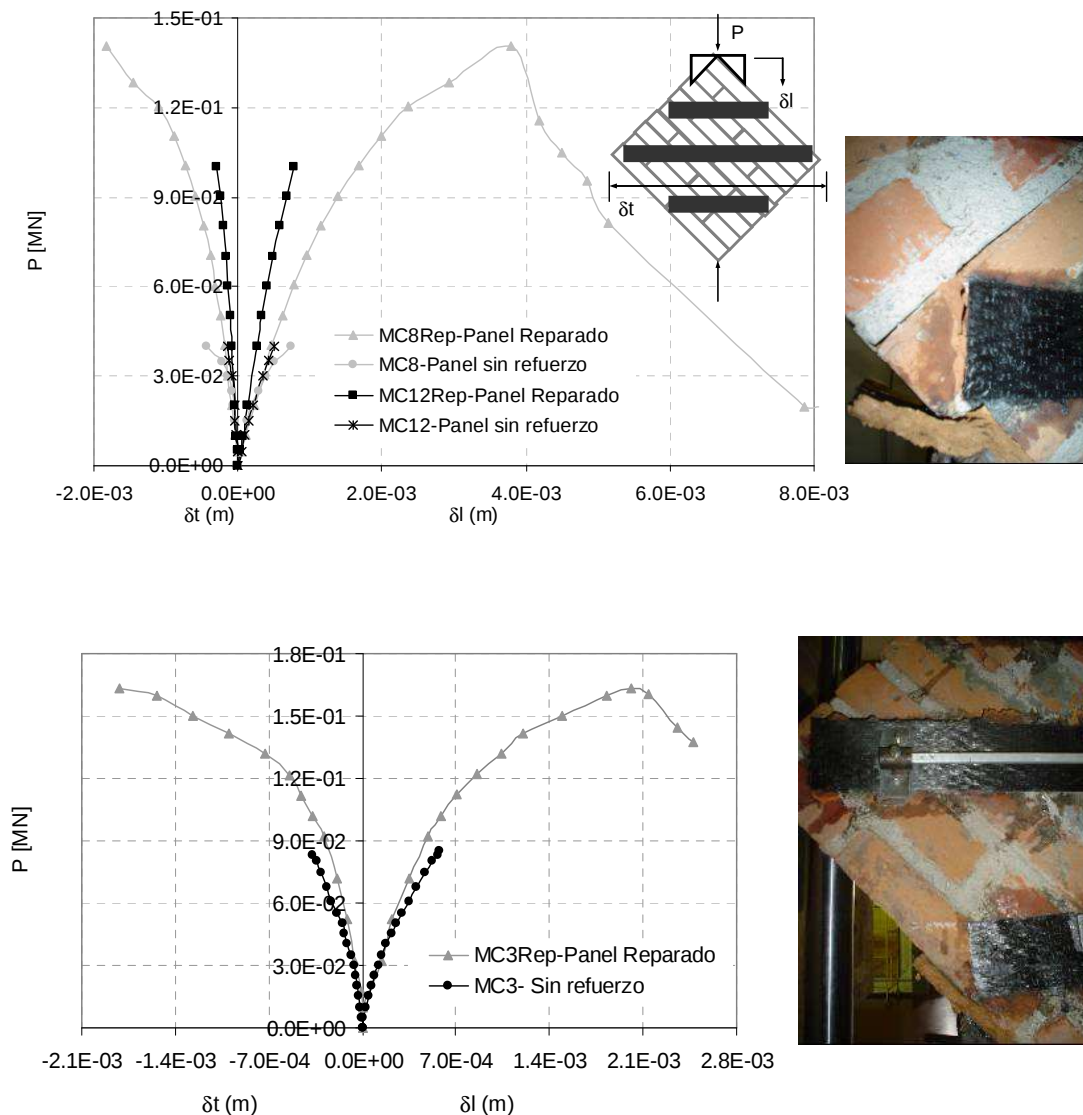


Figura 5. Curvas carga-desplazamiento de las diagonales comprimida y traccionada de paneles dañados y luego reparados con PRFC. Tipos de rotura.

### 3.3 Ensayos de corte sobre pequeños especímenes

En este punto se analiza el comportamiento de pequeños elementos de mampostería de unidades macizas de arcilla, constituidos por tres mampuestos y juntas de mortero, no reforzados, reforzados, dañados y reparados con bandas de PRFC. Los ensayos fueron realizados bajo carga de compresión monótona creciente con control de desplazamientos a una velocidad de 0.004 mm/seg. Para medir el desplazamiento relativo  $\delta$  del ladrillo central con respecto a los otros dos se utilizaron dos comparadores digitales de rango: 12 mm, y sensibilidad: 0.001 mm dispuestos en ambas caras del espécimen para eliminar de las lecturas posibles rotaciones del mismo.

Para este tipo de ensayo se analizó el refuerzo y/o reparación con bandas de 120 x 90 [mm<sup>2</sup>] y 100 x 54 [mm<sup>2</sup>], dispuestas ortogonalmente a la dirección de la carga. El refuerzo y/o reparación se hizo en ambas caras de las probetas y sólo se aplicó una capa de PRFC. Luego se llevó a cabo un estudio numérico paramétrico donde se analizaron diferentes dimensiones de bandas de reparación. El objetivo de dicho estudio fue encontrar las dimensiones óptimas de bandas que permitieran mejorar capacidad resistente alcanzada por los especímenes dañados y reparados que ya habían sido ensayados. En consecuencia 4 especímenes fueron reforzados y/o reparados con bandas de 140 x 80 [mm<sup>2</sup>] y ensayados a rotura. En la Tabla 4 se presentan la denominación adoptada para cada uno, el tipo de ensayo a que fueron sometidos y el esquema de refuerzo, en las Tablas 2 y 3 las características mecánicas de mampuestos y morteros y del material de refuerzo, respectivamente

#### 3.3.1 Especímenes reforzados

A los efectos de evaluar la mejora en la capacidad resistente y de deformación, así como también analizar el tipo de falla de especímenes reforzados, se ensayaron cuatro especímenes, C4Ref y C5Ref, reforzados con bandas de 120 x 90 [mm<sup>2</sup>] y de 100 x 54 [mm<sup>2</sup>], respectivamente y C6Ref y C7Ref reforzados con bandas de 140 x 80 [mm<sup>2</sup>]. En la Figura 6 se presentan las curvas carga-desplazamiento (P- $\delta$ ) de dichos especímenes reforzados, así como también la comparación con elementos ensayados sin refuerzo. Se puede observar que los dos esquemas de refuerzo resultaron efectivos, pues incrementaron significativamente la carga última con respecto a los especímenes sin refuerzo. La falla sobrevino al agotarse la capacidad resistente de los mampuestos en la zona de anclaje de la lámina de PRFC. Ello produjo el arrancamiento de las bandas de compuesto, que en general ocurrió en una de las caras. En uno de los elementos reforzados, C5Ref, se produjo, además, el deslizamiento de una de las juntas de mortero. La rotura de los especímenes sin reforzar fue frágil y repentina mientras que en los elementos reforzados se obtuvo un tipo de falla más dúctil. En la Figura 6 se pueden ver también los esquemas de refuerzo adoptados y los tipos de falla de los especímenes sin reforzar y reforzados.

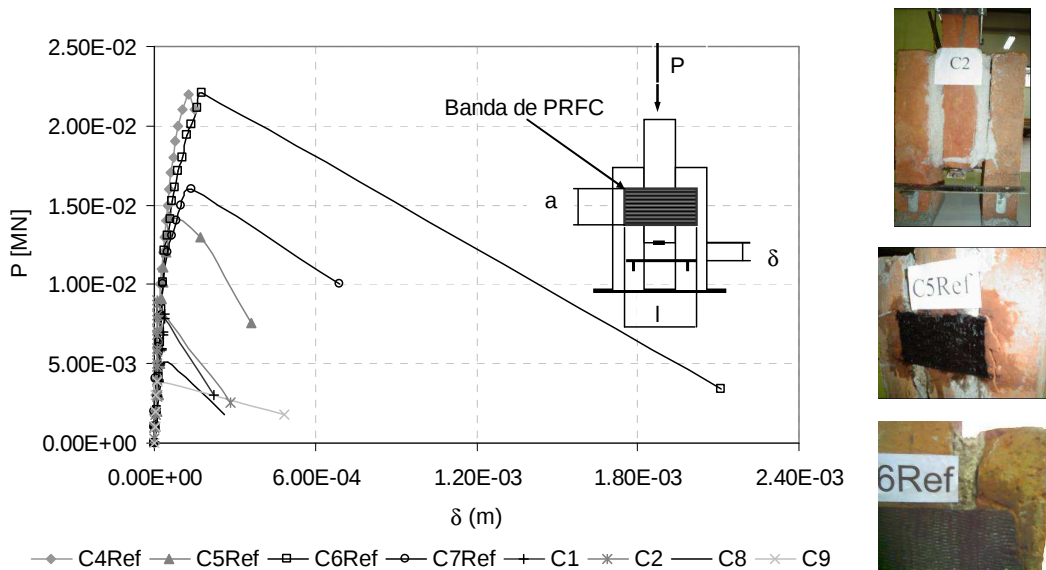


Figura 6 – Ensayos de carga cuasi- estática sobre especímenes de unidades macizas de arcilla, sin refuerzo y reforzados con bandas de PRFC. Tipos de rotura.

### 3.3.2 Especímenes dañados y reparados

Se ensayaron cuatro especímenes sin reforzar, C1, C2, C8 y C9. Luego, C1 y C2 fueron reparados con bandas de  $120 \times 90$  [mm<sup>2</sup>] y de  $100 \times 54$  [mm<sup>2</sup>] respectivamente y C8 y C9 con bandas de  $140 \times 80$  [mm<sup>2</sup>] y ensayados a rotura.

En la Figura 7 (a) se presentan las curvas carga-desplazamiento ( $P$ - $\delta$ ) de las probetas C1 y C2 sin reforzar y la comparación con los resultados de los mismos especímenes reparados. En el caso del espécimen reparado con la banda de mayor ancho y longitud se recuperó e incluso incrementó notablemente la capacidad resistente a corte. No ocurrió lo mismo con la probeta C2 reparada con bandas más pequeñas, en la que no se pudo ni siquiera recuperar la capacidad portante. En ambos casos, sin embargo, se observó un aumento significativo de la ductilidad, lo cual se traduce en el tipo de falla. En cuanto a la rigidez, con ninguno de los dos esquemas de reparación utilizados se logró recuperar la rigidez inicial. Se produjo un tipo de falla más dúctil que sobrevino al agotarse la capacidad resistente de los mampuestos en la zona de anclaje de la lámina de PRFC. Ello produjo el arrancamiento de las bandas de compuesto, que en general ocurrió en una de las caras.

En la Figura 7 (b) se pueden ver las curvas carga-desplazamiento de los especímenes C8 y C9 sin refuerzo y la comparación con los mismos elementos reparados. No se observa recuperación de la rigidez inicial, si una gran capacidad de deformación, especialmente en el espécimen C9Rep. En cuanto al tipo de rotura se observó nuevamente falla frágil y repentina con deslizamiento de una o ambas juntas de mortero, en los elementos sin refuerzo y falla por rotura de mampuestos en los especímenes reparados, al igual que en las probetas reforzadas, con aumento de la capacidad de deformación.

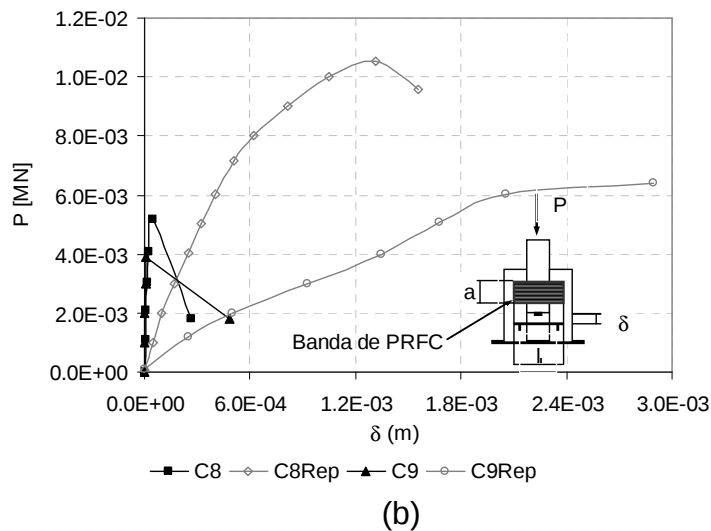
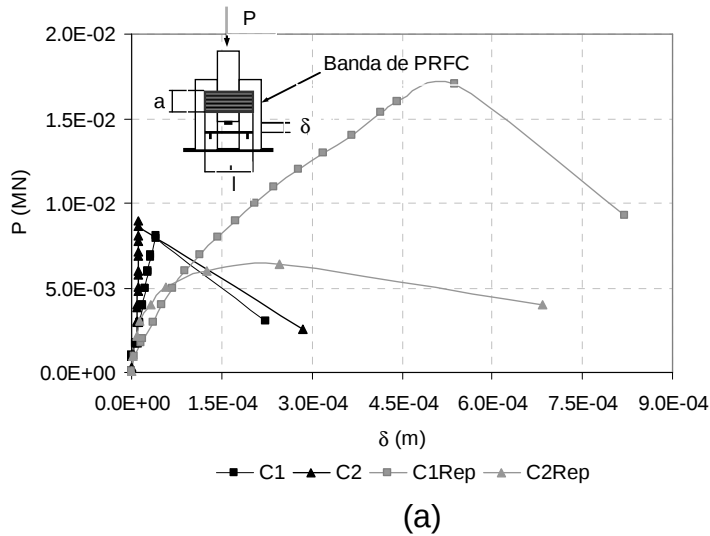


Figura 7 – Ensayos de carga cuasi- estática sobre especímenes de unidades macizas de arcilla, dañados y reparados con bandas de PRFC.

#### 4. ESTUDIO PARAMÉTRICO

El estudio numérico paramétrico se hizo utilizando un programa de elementos finitos dinámico no lineal en dos dimensiones y pequeñas deformaciones. Se utilizaron elementos finitos triangulares de tres nodos en estado plano de tensión. Mortero y mampuestos se discretizaron por separado y se distinguieron, además, elementos de mortero con compuesto y ladrillo con compuesto<sup>8</sup>.

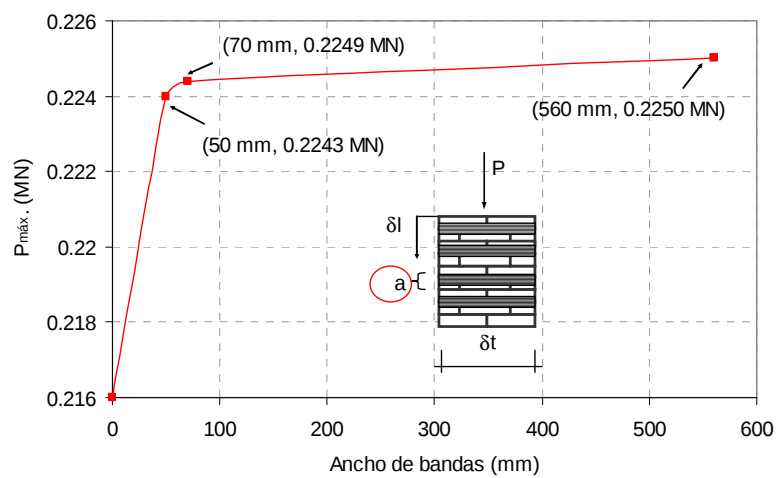
Las propiedades mecánicas utilizadas para morteros y mampuestos en los diferentes tipos de especímenes se resumen en la Tabla 2. En la Tabla 3 se consignan las propiedades del material de refuerzo.

##### 4.1 Ensayos de compresión perpendicular a las juntas de mortero

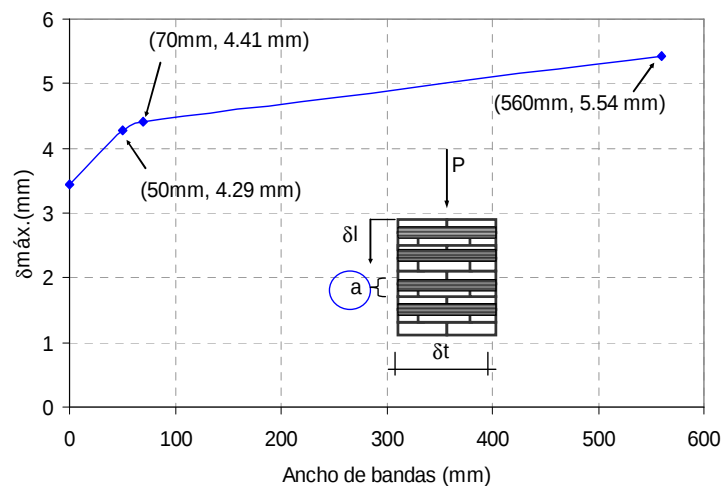
En este apartado se muestran los resultados de un estudio paramétrico realizado sobre paneles de mampostería de unidades macizas de arcilla de  $560 \times 550 \times 125$

[mm<sup>3</sup>] reforzados en ambas caras con PRFC utilizando distintas configuraciones de refuerzo y sometidos a compresión uniaxial perpendicular a las juntas de mortero. Las variables de estudio fueron el ancho de las bandas de refuerzo y el tipo de tejido, uni y bidireccional.

Primeramente, se analizó el refuerzo con bandas de PRFC de longitud constante, fibras unidireccionales, ancho variable (50, 70 y 560 mm) y espesor de 1 mm. En las Figuras 8 a) y b) se representan respectivamente la carga máxima ( $P_{\text{máx}}$ ) y el desplazamiento axial máximo ( $\delta_l$ ) en función del ancho de banda. Se puede observar que, cualquiera sea el ancho de banda, aún en el caso de refuerzo total, la resistencia no resulta incrementada. En cambio, la capacidad de deformación en la dirección axial se incrementa notablemente cuando aumenta el ancho de banda.



(a)



(b)

Figura 8 – a) Variación de la carga máxima con el ancho de bandas, b) Variación del desplazamiento axial máximo con el ancho de bandas

Finalmente, se compara el refuerzo total con tejido uni y bidireccional ( $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ) de fibras de carbono. El espesor del compuesto resultante se mantiene constante e igual a 1 mm. En la Figura 9 se muestra la evolución de los desplazamientos en la dirección axial y transversal. Se puede ver que no hay incremento en la carga máxima ni en la rigidez con ninguno de los dos tejidos, y la capacidad de deformación axial aumenta respecto a la mampostería sin reforzar pero es igual en ambos casos.

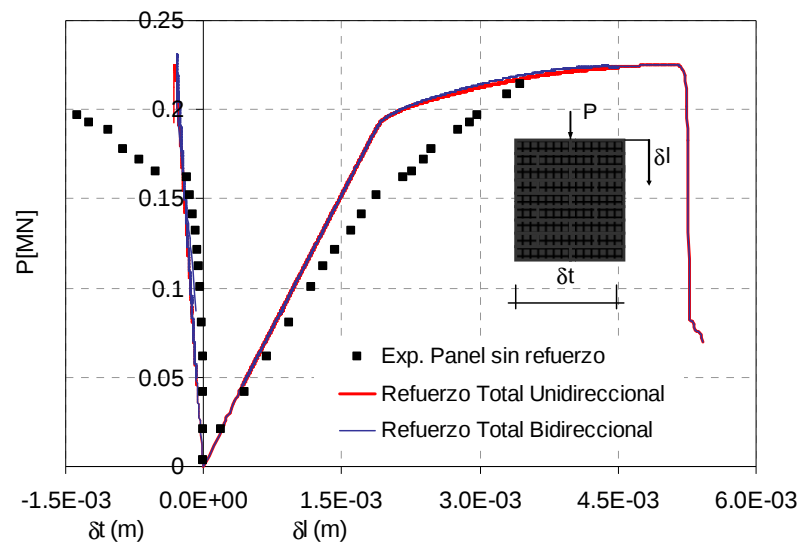


Figura 9 – Ensayo de compresión perpendicular a las juntas. Tejido uni-y bidireccional de fibra de carbono.

#### 4.2 Ensayos de compresión diagonal

A continuación, se estudia el comportamiento de paneles de mampostería de unidades macizas de arcilla de  $580 \times 610 \times 130$  [mm<sup>3</sup>] reforzados con bandas unidireccionales de PRFC, dispuestas ortogonalmente a la dirección de aplicación de la carga.

En este ejemplo la variable de estudio es la longitud de anclaje de la banda central. Se intenta determinar de qué manera influye dicha variable en la resistencia última de la mampostería, para poder determinar la longitud óptima y obtener una menor relación costo-beneficio. Se analizan tres longitudes de banda a saber: 420 mm (mínima longitud), 640 mm y 840 mm (longitud total de la diagonal traccionada). En todos los casos se mantiene el largo de las otras dos bandas constante.

En la Figura 10 se representa la carga máxima ( $P_{m\acute{a}x.}$ ) alcanzada por los especímenes en función de la longitud de las bandas de refuerzo. De los resultados del análisis realizado, se puede concluir que, a mayor longitud de la banda central, mayor es la carga alcanzada. Sin embargo entre las bandas de 420 mm y 640 mm no se ve una gran diferencia de valores de carga máxima.

Finalmente, se presenta otro análisis numérico comparativo sobre paneles de  $580 \times 610 \times 130$  [mm<sup>3</sup>] reforzados totalmente con tejido uni y bidireccional de fibras de carbono y sometidos a sollicitaciones de corte en el plano. En ambos casos el espesor de la capa de refuerzo dispuesto en ambas caras es de 1mm. En la Figura 11 se muestran las curvas carga-desplazamiento axial y transversal de los

especímenes reforzados con ambos tipos de tejido y la comparación con valores experimentales de un panel de mampostería no reforzado, y otro reforzado totalmente con PRFC unidireccional. Se puede ver que el tejido bidireccional incrementa, más que el compuesto unidireccional, la rigidez, ductilidad y resistencia de la mampostería. Así, mientras que para el compuesto unidireccional se obtiene una mejora de resistencia del 297 % e incrementos en la capacidad de deformación axial y transversal de 3.9 y 3.3 veces con respecto a la mampostería sin reforzar, con el tejido bidireccional esos valores ascienden a 322 %, 5.3 y 6.54 veces, respectivamente.

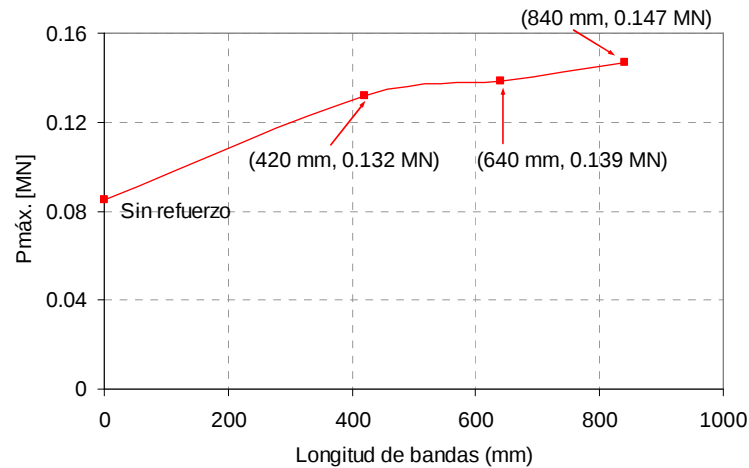


Figura 10 – Ensayo de compresión diagonal de mampostería reforzada con bandas de PRFC. Variación de la carga máxima con la longitud de bandas.

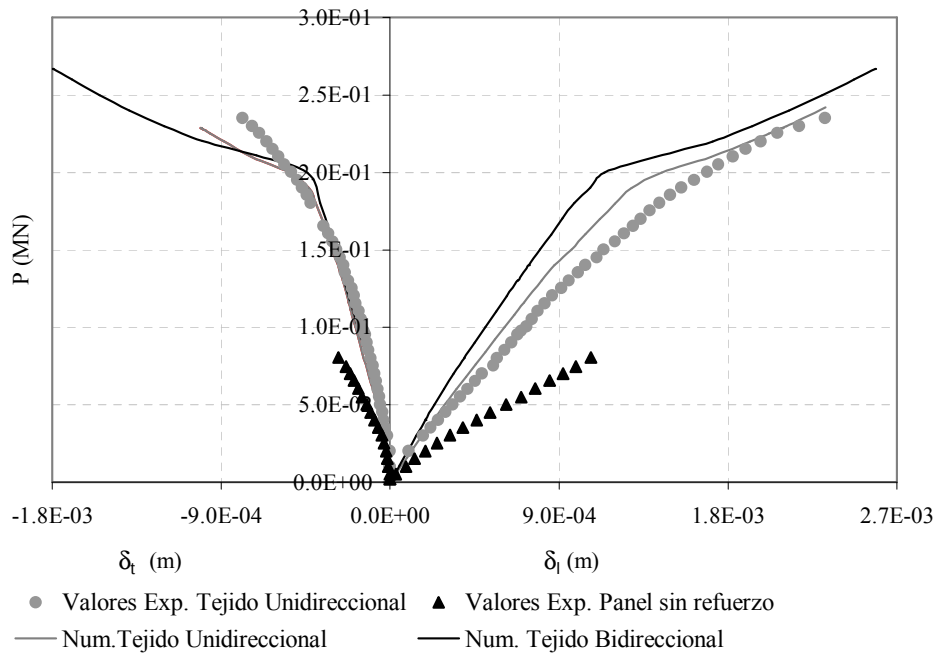
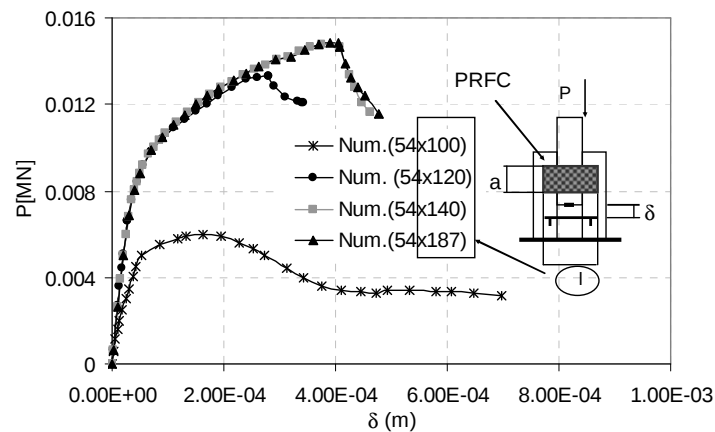


Figura 11– Ensayo de compresión diagonal. Curvas carga-desplazamientos axial y transversal de mampostería reforzada totalmente con tejido uni y bidireccional de fibras de carbono.

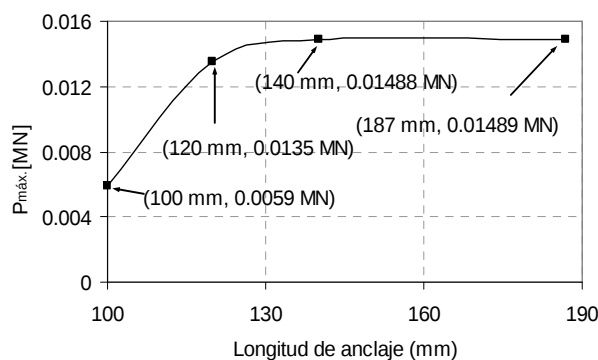
### 4.3 Especímenes de corte

A continuación, se presenta un estudio paramétrico realizado sobre un elemento de idénticas características geométricas y propiedades mecánicas que el presentado en el apartado 3.3.2 (C2) reparado con bandas de PRFC según diferentes longitudes, anchos y orientaciones de las bandas de reparación.

En primer lugar, se analiza la extensión de la banda de reparación. Se estudian 4 longitudes de anclaje, 100, 120, 140 y 187 mm, en tanto el ancho se mantiene constante. En la Figura 12 (a) se representan las curvas carga desplazamiento ( $P-\delta$ ) del ladrillo central. Se puede ver que, a mayor extensión de la banda, se obtiene mayor capacidad resistente. Sin embargo, a partir de cierta longitud, ya no se ven mejoras en la carga máxima que tiende a un mismo valor. Esto último se puede apreciar en la Figura 12 (b) donde se presenta la carga máxima en función de la longitud de anclaje.



(a)



(b)

Figura 12 – (a) Curva  $P-\delta$  de espécimen reparado con diferentes extensiones de bandas de PRFC. (b) Variación de la carga máxima con la extensión de la banda de reparación.

En el ejemplo que sigue se mantiene constante la extensión del parche y se varía el ancho. Según puede verse en la curva carga-desplazamiento del ladrillo central que se presenta en la Figura 13 (a), no se produce un aumento significativo de la carga máxima. En la Figura 13 (b) se analizan los valores de carga máxima en función del ancho del parche, para dos extensiones de la banda de PRFC, 100 y 140

mm. Se ve que la longitud de anclaje es fundamental en la resistencia máxima alcanzada, pues cualquiera sea el ancho de banda, si la extensión es mínima (100 mm) la carga es prácticamente invariable. En cambio, para una longitud de anclaje de 140 mm un mayor ancho de banda mejora la resistencia. De acuerdo a ello, es posible encontrar una dimensión óptima de banda de reparación, que con una buena relación costo-beneficio permita mejorar el comportamiento de elementos dañados.

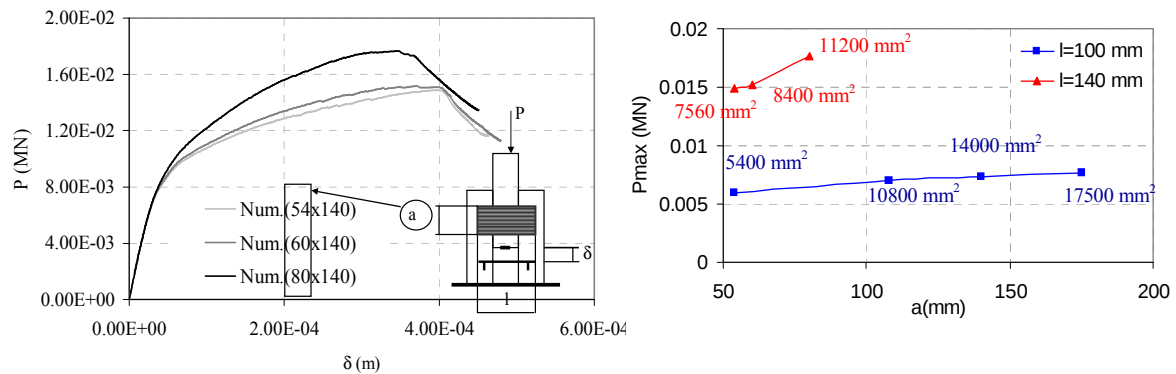


Figura – 13 (a) Curva  $P-\delta$  de espécimen reparado con diferentes anchos de bandas de PRFC. (b) Variación de la carga máxima con el ancho de la banda de refuerzo para dos longitudes de anclaje.

Otra variable a analizar es el ángulo de inclinación de las fibras del material de reparación con respecto a la dirección de aplicación de la carga. En este caso, se simuló el espécimen completo. En la Figura 14 (a) se muestran la malla de elementos finitos utilizada y las curvas carga-desplazamiento del ladrillo central para diferentes inclinaciones del ángulo de la fibra respecto a la dirección de la carga, a saber: 0,15, 30, 45, 60, 75 y 90°. En la Figura 14 (b) se representa la carga máxima en función del ángulo de inclinación de las fibras. Se puede ver que a mayor ángulo de las, el comportamiento se aproxima más a un comportamiento lineal. La máxima resistencia se logra para un ángulo de 60°.

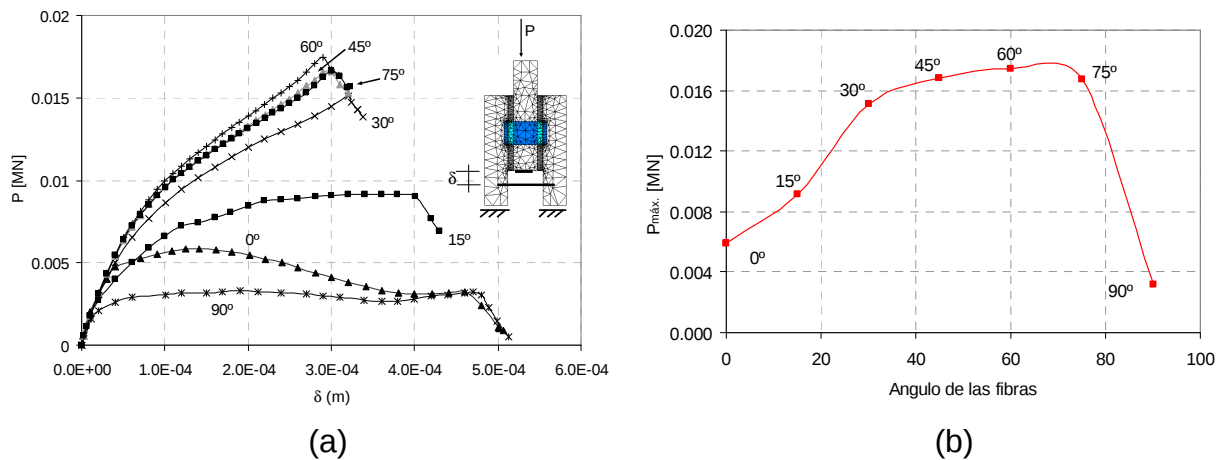


Figura 14 – (a) Curva  $P-\delta$  de espécimen reparado con diferentes ángulos de inclinación de las fibras. (b) Variación de la carga máxima con el ángulo de inclinación de las fibras.

## 5. CONCLUSIONES

Del análisis y comparación de los resultados experimentales así como de los estudios paramétricos realizados numéricamente, se pueden extraer las siguientes conclusiones, respecto al comportamiento en el plano de la mampostería de ladrillos cerámicos macizos reforzada o reparada con PRFC y sobre la eficiencia de dicho sistema de refuerzo y/o reparación:

- Si bien el refuerzo con láminas de material compuesto no incrementa significativamente la resistencia bajo estados de compresión uniaxial perpendicular a las juntas horizontales de mortero, mejora la ductilidad y modifica el modo de falla.
- Bajo compresión uniaxial, perpendicular a la junta, se puede determinar un ancho de banda de refuerzo óptimo en lo que hace a la relación costo/beneficio. Este ancho depende de los materiales utilizados y de las dimensiones de los mampuestos y las juntas, ya que la banda debe cubrir, por lo menos, el ancho de la junta y parte del mampuesto superior e inferior.
- Bajo tensiones de corte en el plano, el refuerzo con materiales compuestos, dependiendo de las dimensiones y orientación del mismo, aumenta la ductilidad en el comportamiento, impidiendo el deslizamiento de juntas y, a su vez, aumenta la resistencia última. El refuerzo total con fibra dispuesta ortogonalmente a la carga de compresión diagonal aumenta significativamente la resistencia (aproximadamente 300 %) y la rigidez y modifica el tipo de falla.
- Cuando se adopta el refuerzo con bandas en paneles sometidos a corte, la longitud de anclaje de las láminas es una variable muy importante. A mayor dimensión de aquella, mayor es la resistencia a compresión diagonal última alcanzada por el elemento de mampostería. El aumento de la resistencia oscila aproximadamente entre el 50% (longitud mínima) y el 75% (longitud máxima).
- El refuerzo de los especímenes formados por tres mampuestos con bandas unidireccionales de PRFC mejora notablemente el comportamiento de la junta, modificando el tipo de falla y aumentando significativamente la resistencia final, hasta 4 veces dependiendo de las dimensiones del refuerzo. En general, la falla se produce por desprendimiento de las capas superficiales de los mampuestos pero siempre es de tipo dúctil. La mayor resistencia se obtiene cuando la longitud de anclaje del refuerzo es mayor.
- La reparación con bandas de PRFC dispuestas paralelamente a las juntas de mortero permite recuperar la capacidad portante inicial de la mampostería con cierto nivel de daño y luego reparada, bajo compresión normal a las juntas.
- En el caso de mampostería dañada y luego reparada con bandas unidireccionales de PRFC dispuestas ortogonalmente a la dirección de la carga, bajo compresión diagonal, se destaca que no sólo se logra recuperar la capacidad portante, aún en caso de daño severo, sino que, además, se supera la carga de rotura de la mampostería original en porcentajes que oscilan alrededor del 50%. La falla continúa siendo frágil pero se observa una mayor capacidad de deformación.
- La carga última de los especímenes dañados y luego reparados, sometidos a corte de las juntas depende fuertemente de la extensión de las bandas de reparación, no así el ancho de las mismas. También influye la orientación de las bandas unidireccionales. A mayor inclinación de las fibras respecto a la dirección de la carga, se obtiene mayor resistencia y el comportamiento se vuelve prácticamente lineal.

- Como conclusión general, la disposición del material de refuerzo y/o reparación debe hacerse teniendo en cuenta el tipo de sollicitación a la que va a estar sometido el elemento a reforzar. Por ser el material de refuerzo un material marcadamente ortótropo con valores mucho mayores de resistencia en la dirección de axial de las fibras que en la dirección transversal, si se elige una configuración inadecuada podría resultar en un perjuicio para la estructura.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET, al Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Tucumán y a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional C. del Uruguay, por el apoyo económico brindado para la concreción del trabajo, y a los Ings. Jorge Rendón y Paulino Maldonado, de Sika Colombia y Sika Argentina, respectivamente, por la donación del material de refuerzo necesario para la realización de los ensayos.

## 7. REFERENCIAS

- [1] W. El-Dakhakhni, A. Hamid, Z. Hakam y M. Elgaaly, M., "Hazard mitigation and strengthening of unreinforced masonry walls using composites", *Composites Structures*, 73, pp. 458-477, 2005.
- [2] M. Ehsani, H. Saadatmanesh y A. Al-Saidy, "Shear behavior of URM retrofitted with FRP overlays", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 1 (1), pp.17-25, 1997.
- [3] A. Gabor, A. Benani, E. Jacquelin, y F. Lebon, "Modelling approaches of the in-plane shear behaviour of unreinforced and FRP strengthened masonry panels", *Composites Structures*, 74, pp.277–288, 2006.
- [4] M.R.Valluzzi, D. Tinazzi y C. Modena, "Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates", *Construction and Building Materials*, 16, pp.409-416, 2002.
- [5] M. Elgwady, "Seismic Retrofit of URM walls with fiber composites", Ph.D thesis, Switzerland, 2004.
- [6] H. Santa María, P. Alcaíno y C. Luders, "Experimental response of masonry walls externally reinforced with carbon fiber fabrics", *Proceedings of the 8<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, 2006.
- [7] B. Luccioni y V. Rougier, "A plastic damage approach for confined concrete", *Computers & Structures*, 83, pp.2238-2256, 2005.
- [8] V. Rougier, "Refuerzo de muros de mampostería con materiales compuestos", Tesis Doctoral, Instituto de Estructuras "Ing. A. Guzmán", Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, 2007.