

MODELACIÓN NUMERICA DE MAMPOSTERIA REFORZADA CON MATERIALES COMPUESTOS

Viviana C. Rougier^a, y Bibiana M. Luccioni^b

^aFacultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional
Ing. Pereira 676, E3264BTD, C. del Uruguay, Argentina, vrougier@herrera.unt.edu.ar,
<http://www.frcu.utn.edu.ar/>

^bInstituto de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán, CONICET, Av. Roca 1800,
T4000ACR, San Miguel de Tucumán, Argentina, bluccioni@herrera.unt.edu.ar,
<http://www.herrera.unt.edu.ar/iest/>

Palabras clave: Mampostería, materiales compuestos, refuerzo, anisotropía.

Resumen. La falla de las estructuras de mampostería va precedida generalmente por un desarrollo masivo de fisuración en las juntas de mortero, por lo que estas son limitantes de la capacidad resistente final. Dependiendo del grado de compresión existente, la falla puede ocurrir en las juntas solamente, o bien una rotura combinada mampuesto-junta de mortero.

La degradación de las propiedades mecánicas y la consiguiente pérdida de seguridad estructural, hacen necesarios la reparación y/o refuerzo. Se ha demostrado experimentalmente que la técnica de refuerzo y/o reparación con materiales de matriz polimérica reforzados con fibras resulta muy eficiente. Sin embargo, para mejorar las técnicas de intervención, es necesario lograr una mejor descripción del comportamiento mecánico de la mampostería y de la mampostería reforzada y/o reparada bajo distintas condiciones de carga. La capacidad actual para cuantificar analítica o numéricamente la eficiencia de este sistema de refuerzo es bastante limitada.

En este trabajo se presenta la modelación numérica del comportamiento de muros de mampostería reforzados con materiales compuestos. La mampostería se modela discretizando por separado los ladrillos y el mortero. Para ambos materiales se utilizan modelos ortótropos de daño combinados con plasticidad que permiten, además, tener en cuenta el despegue de la interfaz mortero/ladrillo. Los materiales compuestos se simulan mediante una generalización de la teoría de mezclas para materiales compuestos con fibras, donde cada componente presenta un comportamiento elastoplástico ortótropo.

En el trabajo se describen brevemente los modelos utilizados y su implementación numérica. Se presentan aplicaciones a la simulación de muros de mampostería de ladrillo común reforzados con materiales compuestos. La comparación de los resultados numéricos con resultados experimentales muestra que los modelos simulan adecuadamente el comportamiento de la mampostería reforzada. El trabajo se completa con sugerencias para diseño del refuerzo obtenidas del análisis numérico.

1 INTRODUCCIÓN

La mampostería reforzada y/o reparada con láminas de material de matriz polimérica reforzado con fibras (PRF) es una serie de materiales compuestos. Su comportamiento es complejo, y los mecanismos de degradación y falla dependen en particular de la configuración de refuerzo adoptada, de las propiedades elásticas de los materiales que lo componen y de las resistencias del mortero y del mampuesto.

Para cualquier condición de carga, el mortero es el primer componente que falla y cuando éste se ha degradado totalmente, se obtiene un compuesto formado por ladrillos vinculados por el laminado. Se produce, en consecuencia, una concentración de tensiones entre los mampuestos adyacentes. Como los mampuestos sólo soportan valores reducidos de tensiones de tracción, fallan y provocan el desprendimiento del laminado antes de que este último llegue a experimentar grandes deformaciones.

La simulación numérica de este comportamiento no es sencilla, y si bien en los años recientes se ha incrementado su estudio, la información existente es limitada y la mayor parte de las investigaciones realizadas están basadas en trabajos experimentales.

El objetivo del presente trabajo es reproducir el comportamiento bajo estados de sollicitación en el plano de la mampostería reforzada con PRF mediante un modelo de daño y plasticidad acoplado existente (Luccioni y Rougier, 2005).

Se presenta, en primer lugar, una breve descripción del comportamiento en el plano de la mampostería de unidades cerámicas macizas reforzada con materiales compuestos, luego se desarrollan las ecuaciones fundamentales del modelo de daño y plasticidad acoplado ortótropo utilizado (Luccioni y Rougier, 2005) y finalmente se muestran algunos ejemplos de aplicación. Los resultados numéricos se contrastan con ensayos experimentales realizados en el Instituto de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán (Rougier y Luccioni, 2006; Rougier et al. 2007) sobre pequeños muros de mampostería de unidades cerámicas de arcilla reforzados con polímeros reforzados con fibras de carbono (PRFC), sometidos a compresión perpendicular a las juntas horizontales de mortero, y compresión diagonal.

2 COMPORTAMIENTO EN EL PLANO DE LA MAMPOSTERÍA REFORZADA Y/O REFORZADA CON MATERIALES COMPUESTOS

Según el estado de sollicitación la mampostería presenta un comportamiento difícil de predecir, con rotura frágil y repentina. Una forma de prevenir este tipo de problemas es mediante el refuerzo con materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras (PRF). Dicho refuerzo generalmente se hace cubriendo toda la pared con láminas de compuesto consistentes en fibras de carbono o vidrio embebidas en resina epoxi, y aplicadas según proceso húmedo sobre la superficie previamente imprimada, o a través de bandas colocadas del mismo modo (Valluzzi et al. 2002; El-Dakhakhni et al. 2005; Gabor et al. 2006; Rougier y Luccioni, 2006). Si se elige una configuración adecuada, este tipo de refuerzo puede mejorar el comportamiento, aumentando la ductilidad, la resistencia última y, en algunos casos, la rigidez (Rougier y Luccioni, 2006).

2.1 Compresión uniaxial perpendicular a las juntas

Según investigaciones realizadas en muretes de mampostería de unidades macizas de arcilla sujetos a compresión uniaxial perpendicular a las juntas de mortero (Rougier y Luccioni, 2006), el refuerzo con laminados de polímeros reforzados con fibras de carbono (PRFC), según diferentes esquemas, no incrementa sustancialmente la resistencia y rigidez pero mejora la ductilidad y modifica el tipo de falla. Lo dicho precedentemente puede verse en la Figura 1 donde se representan las curvas tensión

deformación axial de dos paneles de unidades macizas de arcilla reforzados en ambas caras con tejido unidireccional de fibra de carbono impregnado en resina epoxi y aplicado húmedo sobre la superficie previamente imprimada, según dos configuraciones: a) refuerzo total de 1 mm de espesor y b) refuerzo con bandas de 70 mm de ancho y 1 mm de espesor, (Rougier y Luccioni, 2006). En la misma Figura también se muestra la comparación con un espécimen sin refuerzo.

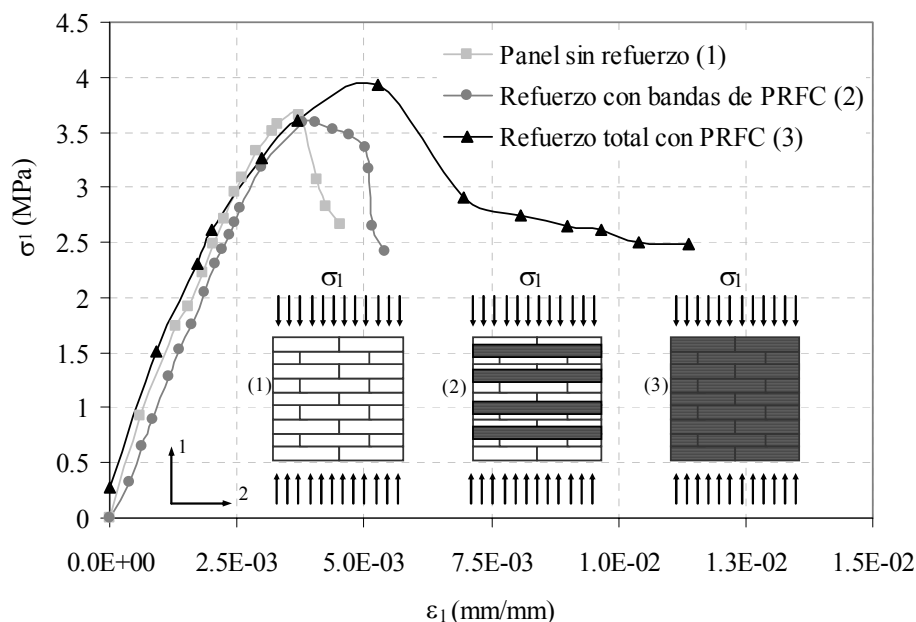


Figura 1. Ensayo de compresión uniaxial perpendicular a las juntas de paneles reforzados con PRFC. Curvas tensión-deformación axial. Comparación con espécimen no reforzado (Rougier y Luccioni, 2006).

2.2 Corte

Bajo solicitaciones de corte y en ausencia de tensiones normales, la falla de paneles de mampostería de unidades macizas de arcilla no reforzados, se produce generalmente por deslizamiento de las juntas de mortero, resultando un tipo rotura muy frágil y repentina. El refuerzo con materiales compuestos, dependiendo de la configuración adoptada y de las dimensiones del mismo, mejora el comportamiento frágil antes mencionado, impidiendo el deslizamiento de juntas, y aumentando la resistencia última (Gabor et al.2006; Valluzzi et al. 2002; Rougier y Luccioni, 2006).

El refuerzo total de ambas caras de un murete aumenta significativamente la resistencia y la rigidez y modifica el tipo de falla. En este sentido al alcanzarse el valor de rotura, la mampostería conserva su monolitismo. La falla sobreviene al agotarse la capacidad resistente de los mampuestos (Rougier y Luccioni, 2006).

El refuerzo con bandas unidireccionales dispuestas ortogonalmente a la dirección de aplicación de la carga, mejora la resistencia a corte y conserva la integridad del espécimen luego de la falla. En este aspecto la longitud de anclaje de las láminas es una variable muy importante. A mayor dimensión de aquella mayor es la resistencia última alcanzada por el elemento de mampostería (Rougier y Luccioni, 2006; Gabor et al. 2006).

En la Figura 2 se muestra el diagrama carga-desplazamientos longitudinal y transversal ($P-\delta_l$ y δ_t) de tres paneles de mampostería de unidades macizas de arcilla reforzados en ambas caras con tejido unidireccional de fibra de carbono impregnado en

resina epoxi y aplicado húmedo sobre la superficie previamente imprimada según tres esquemas: a) refuerzo total con láminas de 1 mm de espesor, b) refuerzo con bandas dispuestas ortogonalmente a la dirección de la diagonal cargada de 70 mm de ancho y 1 mm de espesor y c) bandas de idénticas características a las anteriores colocadas a 45° respecto a la dirección de aplicación de la carga (Rougier y Luccioni, 2006).

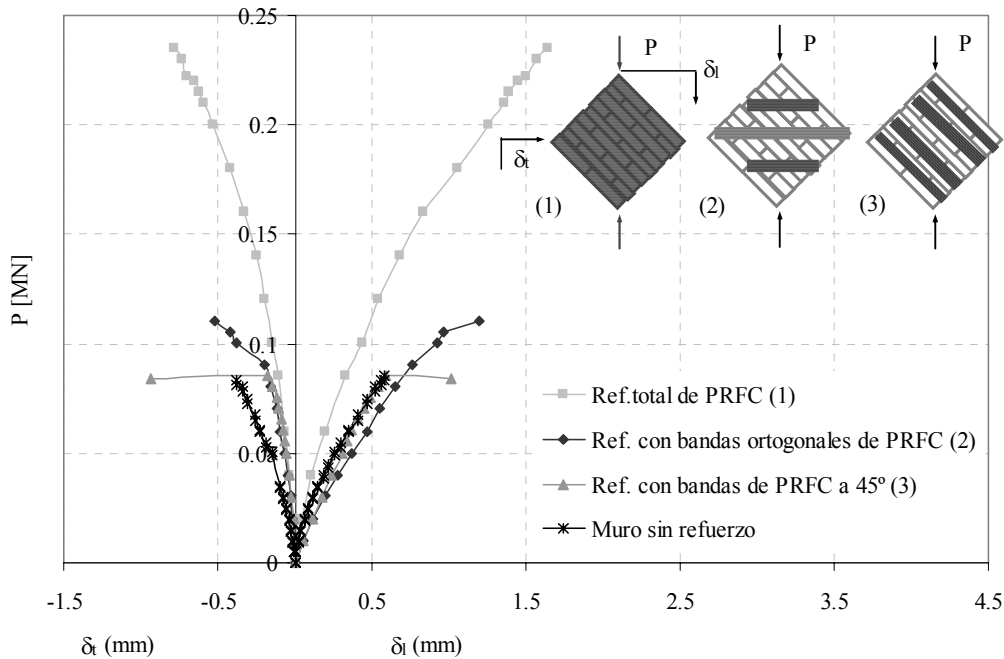


Figura 2. Ensayos de compresión diagonal de paneles reforzados con PRFC. Curvas carga-desplazamiento de las diagonales comprimida y traccionada. Comparación con espécimen no reforzado (Rougier y Luccioni, 2006).

3 MODELO PARA LADRILLOS CERÁMICOS MACIZOS Y MORTERO

Si bien se trata de materiales distintos con propiedades mecánicas diferentes, tanto los ladrillos cerámicos como el mortero son materiales friccionales, es decir que su comportamiento está influenciado por la presión hidrostática. Por otro lado, se trata de materiales aproximadamente isótropos, sin embargo, su disposición en la mampostería hace que si se quiere evitar tener en cuenta explícitamente la interfaz entre los mismos se deba considerar a los mismos como ortótropos. Esto permite, por ejemplo, tener en cuenta la menor resistencia a tracción del mortero en la dirección perpendicular a la junta que en la dirección paralela a la misma para simular la baja adherencia entre mortero y ladrillo.

El modelo que se describe a continuación es un modelo de elastoplástico con daño general, para materiales ortótropos y, de acuerdo a los parámetros que se le introduzcan, puede ser utilizado para los ladrillos o para el mortero, (Luccioni y Rougier, 2005).

3.1 Consideración de la anisotropía

El modelo parte de la hipótesis de que existen dos espacios (Betten, 1988; Luccioni et al. 1995): a) Un espacio anisótropo real y b) un espacio ficticio isótropo. El problema se resuelve en el espacio isótropo ficticio lo que permite utilizar modelos elastoplásticos y de daño desarrollados para materiales isótropos.

Los tensores de tensión en ambos espacios están relacionados mediante una transformación del tipo:

$$\tau_{ij} = A_{ijkl}(\sigma_{ij}, \kappa^p) \sigma_{kl} \quad (1)$$

Donde: τ_{ij} y σ_{kl} son los tensores de tensión en los espacios (a) y (b) respectivamente y A_{ij} es un tensor de transformación de cuarto orden, que contiene la información sobre la anisotropía de resistencia. En el caso más general, este tensor es función del tipo de estado tensional y de la evolución del proceso elastoplástico a través de la variable de daño plástico κ^p (Luccioni et al.1996), que hace las veces de variable de endurecimiento plástico isotrópico.

El umbral de comienzo de comportamiento plástico o de daño se define mediante una función de fluencia o de daño:

$$F(\sigma_{ij}, \alpha) = \bar{F}(\tau_{ij}, \bar{\alpha}) = 0 \quad (2)$$

Donde: F y \bar{F} designan las funciones de fluencia en los espacios anisótropo real e isotrópico ficticio, y α y $\bar{\alpha}$ son variables internas correspondientes a dichos espacios.

La transformación de espacios definida por la ecuación (1) permite utilizar funciones de fluencia \bar{F} definidas para materiales isotrópicos en el espacio isotrópico ficticio. Debe notarse, que dicho espacio es isotrópico en cuanto a umbrales de comportamiento plástico, pero no necesariamente respecto a otras propiedades, como la rigidez elástica, por ejemplo.

La deformación plástica en el espacio real, se calcula mediante la regla del flujo:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3)$$

Donde G es la función de potencial definida en el espacio de tensiones reales. En lugar de trabajar con esta función, que debe ser anisótropa, se puede trabajar con una función de potencial \bar{G} , definida en el espacio isotrópico ficticio tal que:

$$G(\sigma_{ij}, \alpha) = \bar{G}(\tau_{ij}, \bar{\alpha}) = 0 \quad (4)$$

La ecuación (3) se escribe entonces:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} = \dot{\lambda} \frac{\partial \bar{G}}{\partial \tau_{kl}} \frac{\partial \tau_{kl}}{\partial \sigma_{ij}} = \dot{\lambda} \frac{\partial \bar{G}}{\partial \tau_{kl}} H_{klij} \quad \text{con} \quad H_{klij} = \frac{\partial \tau_{kl}}{\partial \sigma_{ij}} \quad (5)$$

3.2. Forma general del modelo isotrópico

Para pequeñas deformaciones y problemas térmicamente estables, la parte elástica de la energía libre Ψ^e se escribe como una función cuadrática de la deformación elástica de manera que la ecuación constitutiva secante resulta:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \Psi^e}{\partial \varepsilon_{ij}^e} = (1-d) \frac{\partial \Psi^o}{\partial \varepsilon_{ij}^e} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e = (1-d) C_{ijkl}^o \varepsilon_{kl}^e \quad C_{ijkl} = (1-d) C_{ijkl}^o \quad (6)$$

Donde C_{ijkl} es el tensor constitutivo secante afectado por el daño y $0 \leq d \leq d_c$ es la variable de daño escalar y Ψ^o representa la energía libre elástica del material no dañado. La tensión resulta: El proceso plástico se describe a partir de una generalización de la teoría de la plasticidad clásica que permite tener en cuenta algunos aspectos del comportamiento de geomateriales.

El límite del comportamiento elástico se describe a través de una función de fluencia:

$$F^p(\sigma_{ij}; \alpha_k) = f^p(\sigma_{ij}) - K^p(\sigma_{ij}; \alpha_k) \leq 0 \quad (7)$$

donde $f^p(\sigma_{ij})$ es la tensión equivalente definida en el espacio de tensiones que puede tomar la forma de cualquiera de las funciones de fluencia de la plasticidad clásica (Tresca, Von Mises, Mohr Coulomb, Drucker Prager, etc.). Si se utiliza este modelo para morteros u mampuestos se debe adoptar un criterio adecuado para materiales friccionales del tipo Mohr Coulomb o Drucker Parger.

$K(\sigma_{ij}; \alpha_k)$ es el umbral de fluencia y κ^p es la variable de daño plástico o variable de endurecimiento isótropo.

Se definen las siguientes reglas de evolución para las deformaciones plásticas y la variable de daño plástico:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial G(\sigma_{mn}; \kappa^p)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (8)$$

donde $\dot{\lambda}$ es el factor de consistencia plástica y G la función de potencial

La variable de endurecimiento plástico κ^p se obtiene normalizando la energía disipada en el proceso plástico a la unidad y varía entre 0 para el material virgen y 1 cuando se ha disipado plásticamente la totalidad de la energía que el material es capaz de disipar de esta forma (Luccioni y Rougier, 2005, Rougier y Luccioni, 2007).

El umbral de daño se describe a través de una función de daño de la siguiente forma:

$$F^d = f^d(\sigma_{ij}) - K^d(\sigma_{ij}; \kappa^d) \leq 0 \quad (9)$$

donde $f^d(\sigma_{ij})$ es la tensión equivalente definida en el espacio de tensiones $K^d(\sigma_{ij}; \kappa^d)$ es el umbral de daño equivalente y κ^d es la variable de endurecimiento de daño.

La tensión equivalente $f^d(\sigma_{ij})$ puede ser evaluada utilizando funciones conocidas de la teoría de la plasticidad (Tresca, Von-Mises, Mohr-Coulomb o Drucker-Prager) o cualquier otra función especialmente desarrollada para daño (Luccioni et al 2005, Rougier et al 2007).

La evolución de las deformaciones plásticas y del daño se obtiene de la solución simultánea de las siguientes ecuaciones denominadas condiciones de consistencia de problema:

$$\begin{cases} \dot{F}^p = 0 \\ \dot{F}^d = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Las ecuaciones (10) son dos ecuaciones lineales en $\dot{\lambda}$ y \dot{d} que pueden ser fácilmente resueltas.

4 MODELACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Como en la mayoría de los modelos se trabaja en dos dimensiones, los materiales compuestos constituidos por fibras de carbono embebidas en resina epoxi y aplicados según proceso húmedo sobre ambas caras previamente imprimadas de los especímenes, no se modelan por separado sino en conjunto con el mampuesto o el mortero, según corresponda. Esto da lugar a un material compuesto formado por ladrillo o mortero y dos láminas de compuesto. Para modelar el comportamiento en el plano, en donde los materiales trabajan en paralelo, se usa la teoría de mezclas.

A su vez los materiales compuestos de matriz polimérica y fibras de carbono utilizados para el refuerzo son en sí materiales compuestos formados por una matriz y fibras largas. Para simplificar la modelación de los mismos, se utiliza un macro modelo elastoplástico ortótropo con las propiedades del conjunto. Para calibrar dicho modelo, teniendo en cuenta que las propiedades provistas por el fabricante no son suficientes, se utiliza una generalización de la teoría de mezclas (Toledo et al. 2005; Luccioni, 2006).

5 APLICACIONES

Con el modelo descrito en el apartado 3 e implementado en un programa plano de elementos finitos no lineal se reprodujeron ensayos de compresión perpendicular a las juntas horizontales de mortero y ensayos de compresión diagonal de paneles de mampostería de unidades macizas de arcilla no reforzados y reforzados con materiales compuestos de fibra de carbono según diferentes configuraciones.

Se presentan, a continuación, los resultados de estas simulaciones y su comparación con los resultados experimentales (Rougier y Luccioni, 2006).

5.1 Compresión uniaxial perpendicular a las juntas

En este punto se estudia el comportamiento de paneles de unidades macizas de arcilla sometidos a compresión perpendicular a las juntas de mortero. Los paneles son de 580 x 610 x 130 [mm³] y 560 x 550 x 125 [mm³]. Algunos no tienen refuerzo y otros están reforzados con láminas de polímeros reforzados con fibras de carbono (PRFC) según diferentes esquemas.

5.1.1 Paneles sin refuerzo

Se evalúa el comportamiento de dos grupos similares de paneles, que presentan dimensiones distintas debido a que están contruidos con mampuesto de distinto tamaño. La mampostería se modela discretizando por separado los ladrillos y el mortero. Para ambos materiales se utilizan modelos ortótropos de daño combinados con plasticidad. Las propiedades mecánicas de morteros y mampuestos, obtenidas mediante ensayos de compresión uniaxial según normativa vigente en el país (IRAM 1622, IRAM 12586), para los dos tipos de especímenes se resumen en la Tabla 1. En el caso del panel de 580 x 610 x 130 [mm³] se detallan dos tipos de mortero (a) y (b). El mortero tipo (a) corresponde a los especímenes sometidos a compresión perpendicular a las juntas, el (b) a los ensayados a compresión diagonal.

En la Figura 3 se presentan la malla de elementos finitos y las condiciones de carga para los ensayos de compresión perpendicular de los dos tipos de paneles. Aprovechando la simetría de los especímenes se modeló únicamente un cuarto de los mismos usando elementos finitos triangulares de tres nodos en estado plano de tensión. Se realizaron pruebas con mallas de elementos rectangulares de 4 nodos pero en ese caso los resultados mostraron una sobrestimación de la rigidez debido a que no se puede hacer un mallado fino manteniendo una adecuada relación de aspecto. En la

Figura 4 se presentan las curvas carga-desplazamientos axiales y transversales ($P-\delta_1$ y δ_1) de ambos tipos de muros. Se puede ver un mejor ajuste de los resultados experimentales en la dirección axial.

Especímenes	580 x 610 x 130 [mm ³]			560 x 550 x 125 [mm ³]	
	Mortero (a)	Mortero (b)	Ladrillo	Mortero	Ladrillo
Módulo de Elasticidad, E (MPa)	3380	4312	1662	1528	1400
Coefficiente de Poisson, ν	0.21	0.21	0.16	0.21	0.15
Resistencia última a tracción, σ_{ut} (MPa)	0.673	0.772	0.591	0.54	0.414
Resistencia última a compresión, σ_{uc} (MPa)	6.73	7.72	10.60	4	8.28
Tensión umbral de fluencia, σ_{fc} (MPa)	5.60	6.4	-	3.5	-
Relación de resistencias inicial, R_0^p	10	10	20	10	20
R_{bc}	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16
γ	3.	3.	3.	3.	3.
Variable de endurecimiento plástico para la tensión pico, κ_{comp}^p	0.20	0.20	-	0.20	-
Energía de fractura, G_f^p (MPa.m)	6.01-5	4.01-5	3.0E-5	1.01-5	3.0E-5
Energía de aplastamiento, G_c^p (MPa.m)	6.01-3	4.01-3	2.0E-3	1.01-3	2.0E-3
Criterio de Potencial	Asociado	Asociado	Asociado	Asociado	Asociado
Criterio de daño	Drucker-Prager	Drucker-Prager	Drucker-Prager	Drucker-Prager	Drucker-Prager
Angulo de fricción para la función de daño	7°	7°	7°	7°	7°
Tensión umbral inicio de daño, σ_c^d (MPa)	5.9	7.0	10	3.7	7.5
Energía de fractura de daño, G_d (MPa.m)	6.0E-3	6.0E-3	5.0E-2	6.0E-3	5.0E-2

Tabla 1: Propiedades mecánicas de morteros y mampuestos.

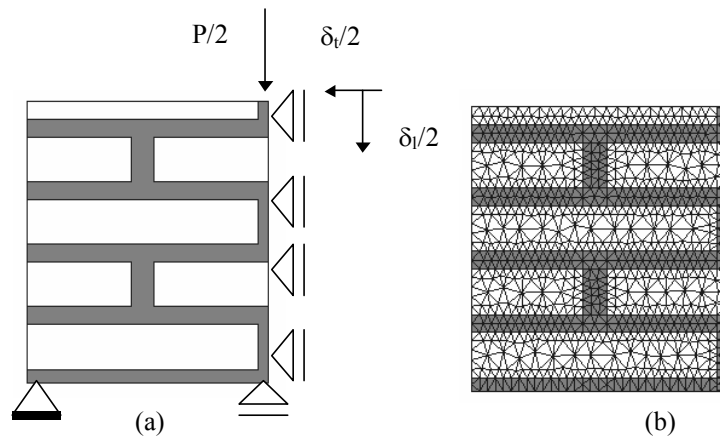


Figura 3. Panel sin refuerzo: (a) Condiciones de carga y (b) malla de elementos finitos.

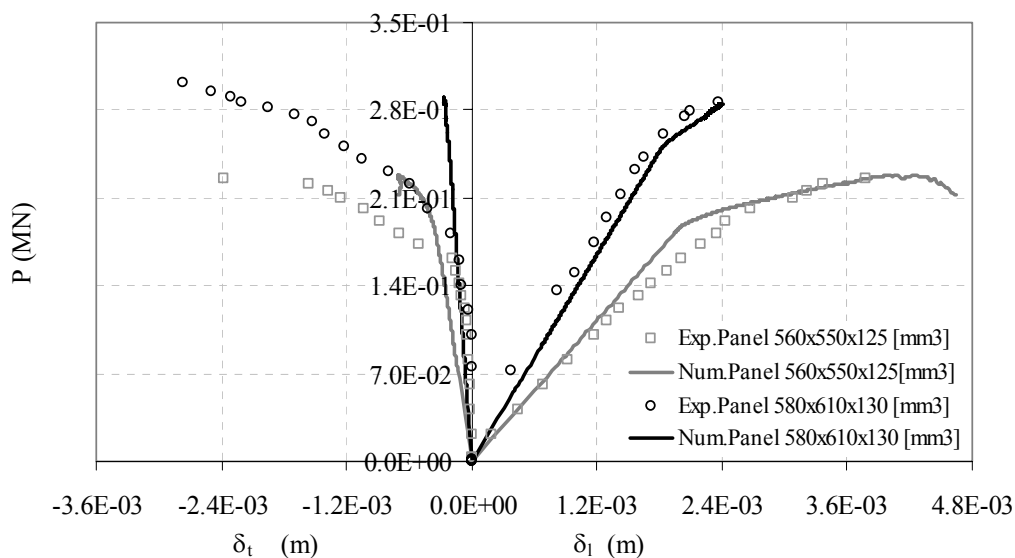


Figura 4. Curvas carga-desplazamientos axial y transversal de mampostería de unidades macizas de arcilla sin reforzar.

5.1.2 Paneles reforzados

Se simula, a continuación, el comportamiento de dos muretes de unidades macizas de arcilla de $580 \times 610 \times 130$ [mm³] reforzados con láminas de PRFC. Las propiedades mecánicas de mampuestos y mortero (tipo a) son las mismas que las resumidas en la Tabla 1. Los especímenes fueron reforzados externamente según dos esquemas de refuerzo: refuerzo total y refuerzo mediante bandas de 75 mm, en ambas caras, con las fibras orientadas en la dirección longitudinal de las mismas. En los dos casos se aplicó una sola capa de compuesto de 1 mm de espesor. En la Figura 5 se presentan la malla de elementos finitos y las condiciones de carga. Dada la simetría de los paneles también en este caso se modeló un cuarto de los mismos. Mortero y mampuestos se discretizaron por separado y se distinguieron, además, elementos de mortero con compuesto y ladrillo con compuesto. Estos últimos se simulaban mediante la teoría de mezclas, considerando dos componentes: mortero y material compuesto y ladrillo y material compuesto, con sus respectivas proporciones de volumen. Para el material compuesto se utilizó un modelo elastoplástico general para materiales anisótropos (Luccioni y Martín 1997). Como las propiedades dadas por el fabricante son insuficientes para definir el material,

los datos faltantes se obtuvieron con una generalización de la teoría de mezclas para materiales con fibras (Toledo et al, 2005; Luccioni, 2006). Dichas propiedades se presentan en la Tabla 2.

Las curvas carga-desplazamientos axiales y transversales obtenidas para el panel reforzado con bandas, se contrastan con los resultados experimentales en la Figura 6. En el caso del espécimen reforzado totalmente sólo se muestra la curva carga-desplazamientos axiales (Figura 7), pues debido a problemas en el sistema de medición de los desplazamientos horizontales no se dispone de esos registros experimentales. En general se observa una buena correlación con los valores obtenidos en los ensayos. El tipo de rotura de los paneles reforzados con PRFC se modifica totalmente con respecto a un espécimen sin refuerzo. Así mientras que en éste último se producen fisuras verticales en las caras frontales, que involucran juntas de mortero y mampuestos, en especímenes reforzados se observan fisuras verticales en los laterales de los mismos y un comportamiento más dúctil según el esquema de refuerzo adoptado. Dicho comportamiento puede ser reproducido por el modelo numérico utilizado con buena aproximación.

Relación de volumen de fibras, k_f	0.3
Módulo de Elasticidad longitudinal, E_l (MPa)	72500
Módulo de Elasticidad transversal, E_t (MPa)	6200
Coefficiente de Poisson longitudinal-transversal, ν_{lt}	0.08
Coefficiente de Poisson transversal-longitudinal, ν_{tl}	0.017
Coefficiente de Poisson transversal-transversal, ν_{tt}	0.20
Tensión última longitudinal, σ_{long}^u (MPa)	960
Tensión última transversal, σ_t^u (MPa)	51

Tabla 2: Características mecánicas del PRFC.

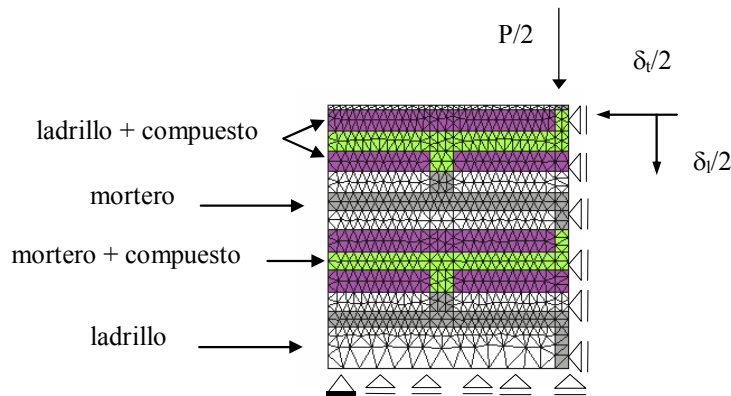


Figura 5. Panel reforzado con bandas de PRFC: Malla de elementos finitos y condiciones de carga.

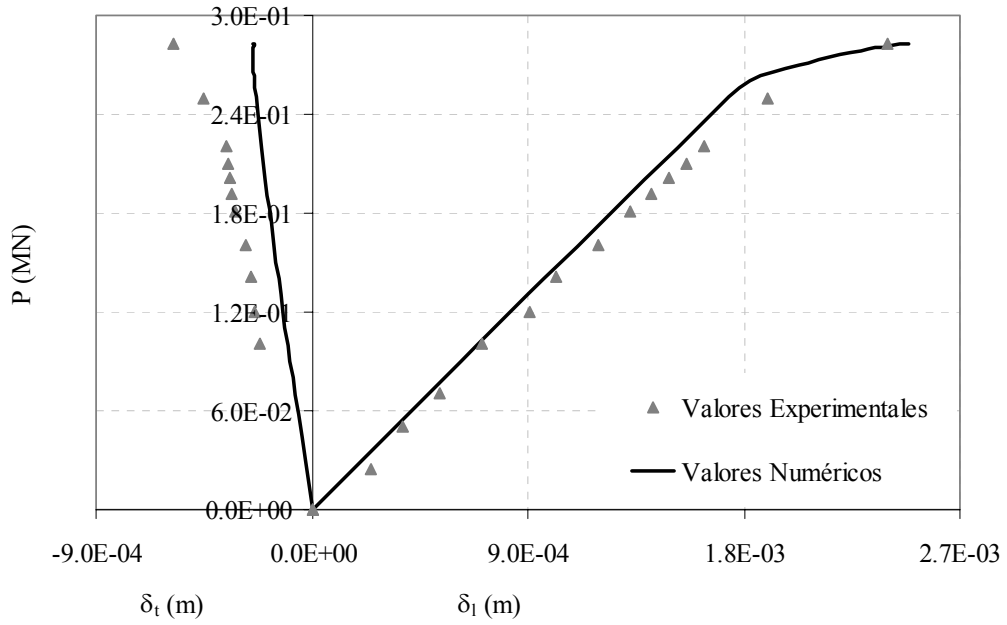


Figura 6. Curvas carga-desplazamientos axial y transversal de panel reforzado con bandas unidireccionales de PRFC.

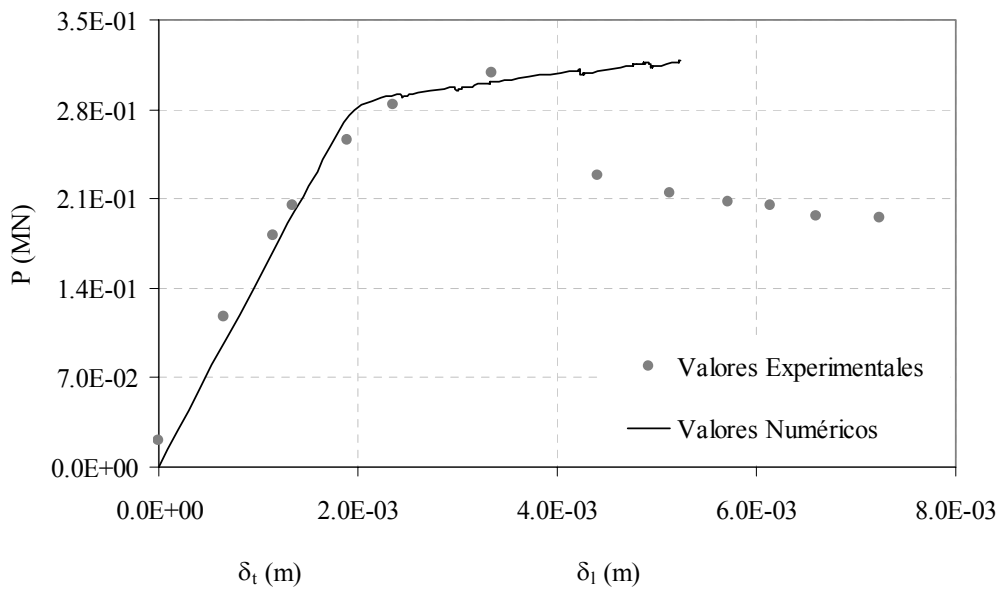


Figura 7. Curvas carga-desplazamientos axial de panel reforzado totalmente en ambas caras con láminas de PRFC.

5.2 Compresión Diagonal

En este ejemplo se simula el comportamiento a corte en el plano de paneles de mampostería de unidades macizas de arcilla de 580 X 610 X 130 [mm³] sin reforzar y reforzados con láminas de PRFC, ensayados a compresión diagonal. Los resultados obtenidos con el modelo se contrastan luego con los valores experimentales.

En primer lugar, se comienza por reproducir el comportamiento del modelo de muretes sin reforzar y luego se prosigue con los reforzados según diferentes configuraciones de refuerzo.

5.2.1 Paneles sin refuerzo

A continuación se reproduce el comportamiento de un panel sin refuerzo cuyos componentes, mortero (tipo b) y ladrillo tienen las propiedades mecánicas que se presentan en la Tabla 1. La mampostería se modela de igual manera que en los ejemplos anteriores, esto es discretizando por separado los ladrillos y el mortero y para ambos materiales se utilizan modelos ortótropos de daño combinados con plasticidad. La malla de elementos finitos y las condiciones de carga para este tipo de ensayo se muestran en la Figura 8. Se modeló el panel completo y se utilizaron elementos finitos triangulares en estado plano de tensión. En la Figura 9 se presenta la evolución de los desplazamientos transversales y longitudinales (δ_t y δ_l) en función de la carga aplicada. Se puede ver un ajuste bastante bueno de los resultados numéricos con los experimentales, no sólo en la dirección axial, sino también en la transversal.

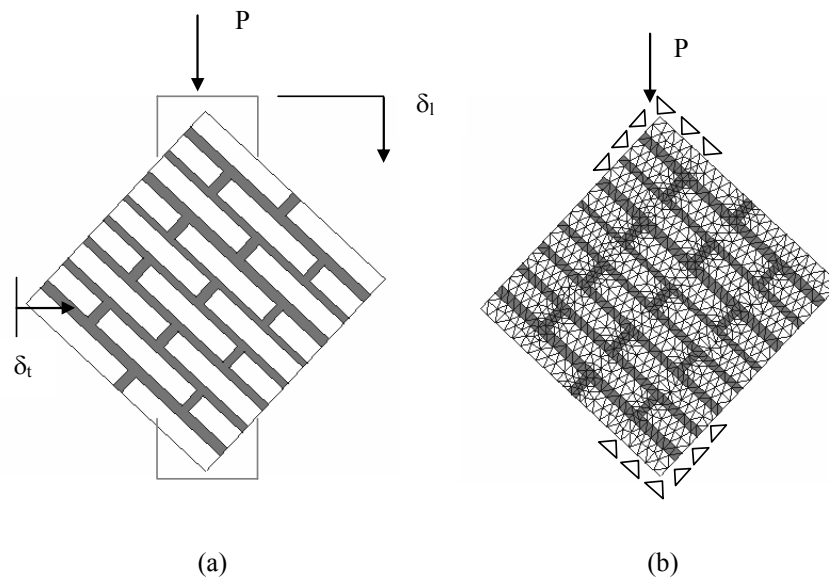


Figura 8. Panel sin refuerzo: (a) Condiciones de carga y (b) malla de elementos finitos.

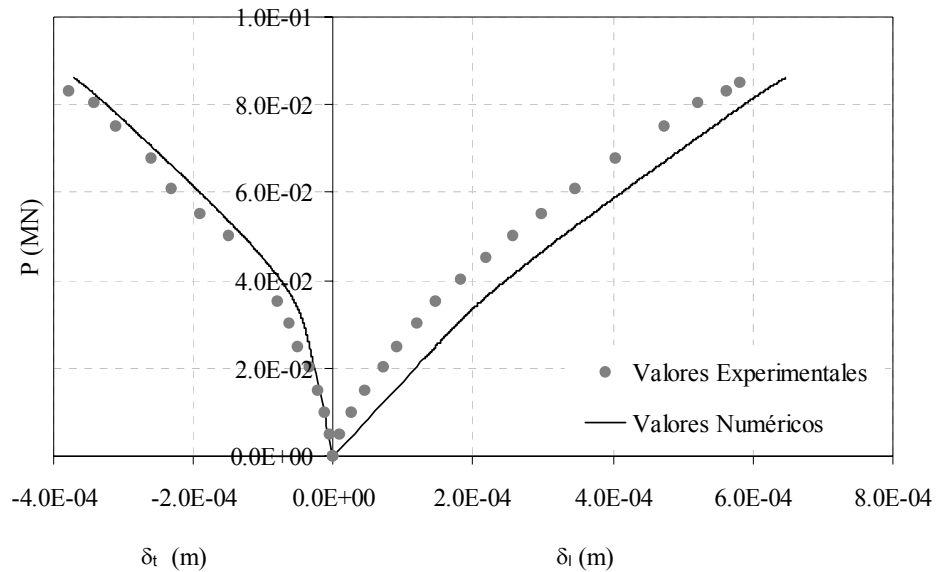


Figura 9. Evolución de los desplazamientos transversales y longitudinales de panel no reforzado sometido a compresión diagonal.

5.2.2 Paneles reforzados

En los siguientes ejemplos se simula el comportamiento de paneles reforzados en ambas caras con materiales compuestos según diferentes esquemas: a) refuerzo total con láminas de tejido unidireccional de PRFC de 1 mm de espesor; b) refuerzo con bandas de 50 mm de ancho, idéntico espesor y las fibras orientadas en la dirección longitudinal de las mismas, dispuestas ortogonalmente a la dirección de la carga y c) refuerzo con bandas de las mismas características colocadas paralelas a las hiladas de ladrillos. Las propiedades del compuesto son las que se presentan en la Tabla 2. Las propiedades mecánicas de mampuestos y mortero (tipo b) son las mismas que las resumidas en la Tabla 1. En la [Figura 10](#) se muestran las mallas de elementos finitos de los especímenes reforzados con bandas ortogonales y paralelas. Se utilizaron elementos finitos triangulares de tres nodos en estado plano de tensión. Como en el ejemplo 5.1.2 mortero y mampuestos se discretizaron por separado y se distinguieron, además, elementos de mortero con compuesto y ladrillo con compuesto. Las curvas carga-desplazamiento a través de la diagonal comprimida y traccionada de los paneles con refuerzo total, refuerzo con bandas ortogonales y bandas paralelas se presentan en las [Figuras 11, 12 y 13](#), respectivamente.

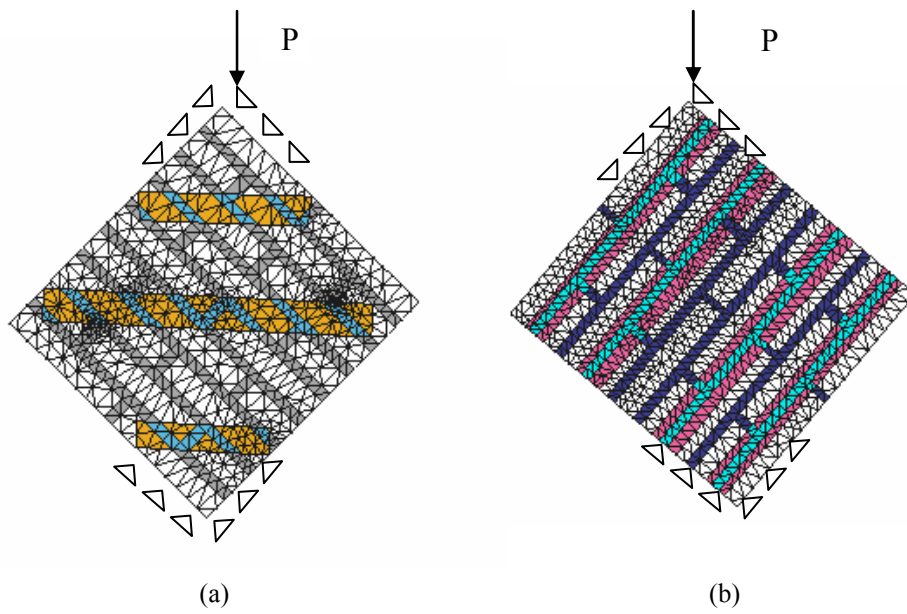


Figura 10. Paneles reforzados con PRFC -Malla de elementos finitos: (a) Refuerzo con bandas ortogonales a la dirección de la carga; (b) Refuerzo con bandas paralelas a las hiladas.

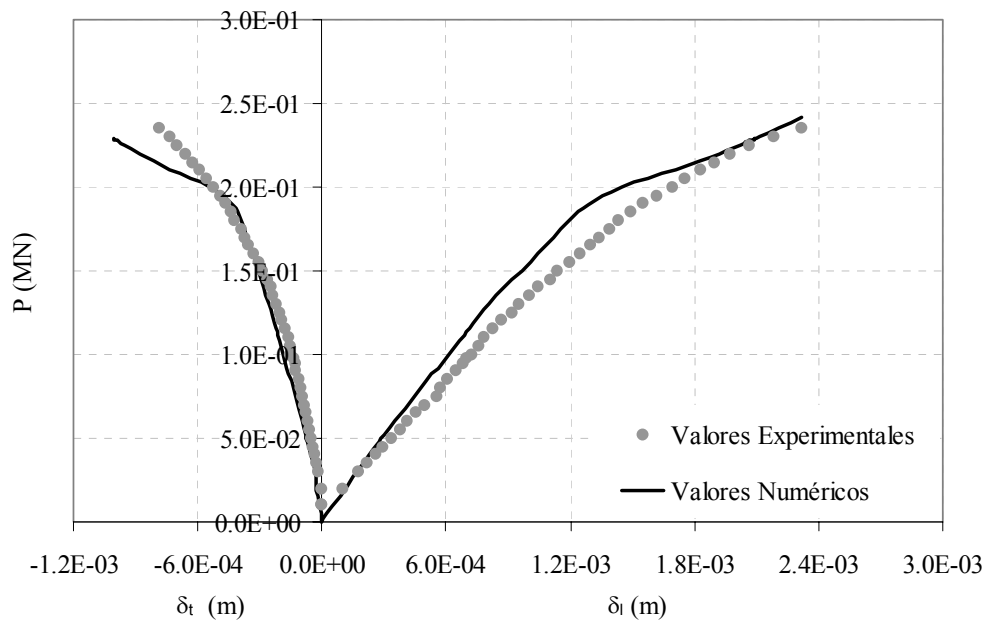


Figura 11. Evolución de los desplazamientos transversales y longitudinales de panel reforzado totalmente con láminas de PRFC.

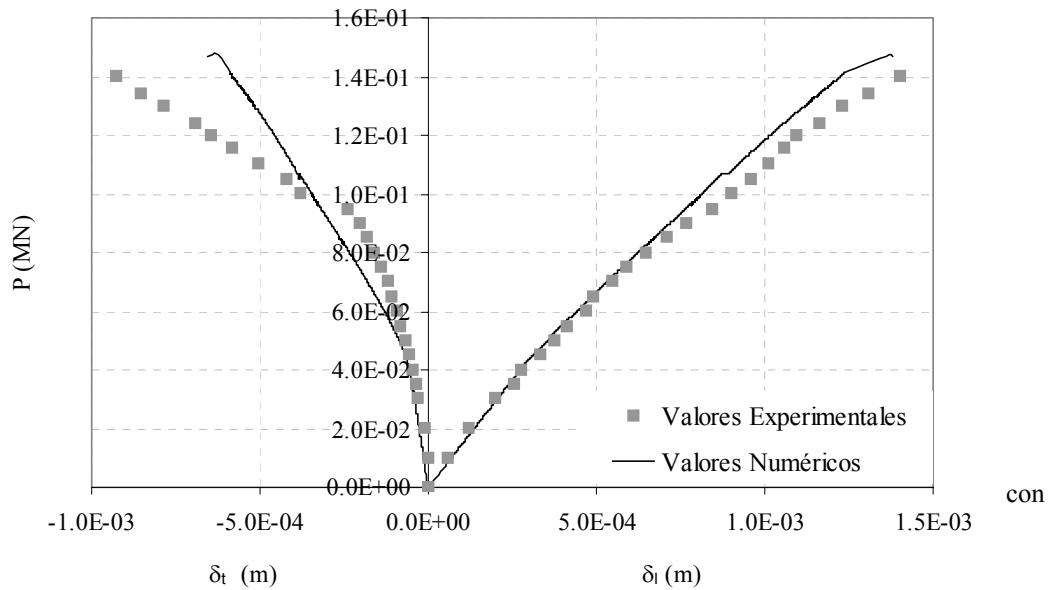


Figura 12. Evolución de los desplazamientos transversales y longitudinales de panel reforzado con bandas de PRFC dispuestas ortogonalmente a la dirección de la carga.

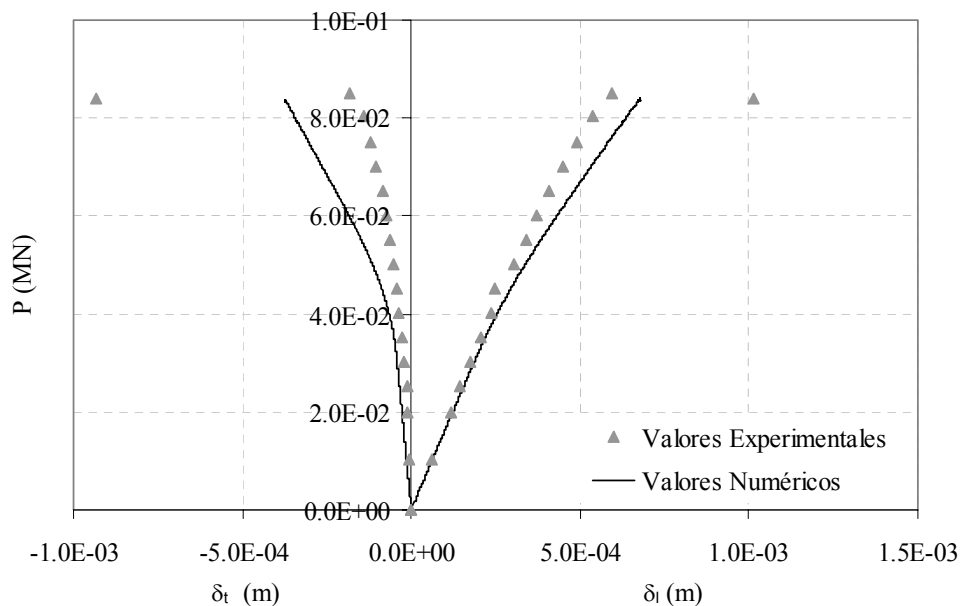


Figura 13. Evolución de los desplazamientos transversales y longitudinales del panel reforzado con bandas de PRFC paralelas a las hiladas de mampuestos.

Se puede ver que el refuerzo con bandas dispuestas a 45° con respecto al punto de aplicación de la carga no mejora en ningún aspecto el comportamiento del elemento de mampostería. Por lo general en este tipo de ensayo se produce un efecto localizado en el apoyo superior que provoca el desprendimiento de las capas superficiales del mampuesto y ello a su vez causa el arrancamiento de la banda de compuesto aplicada en dicha zona. En consecuencia si la junta central de mortero no está reforzada, el espécimen falla por deslizamiento. Este tipo de rotura es repentina y se produce para

bajos valores de carga.

6 ESTUDIO PARAMÉTRICO

En este apartado se muestran los resultados de un estudio paramétrico realizado a los efectos de evaluar la capacidad del modelo numérico para predecir el comportamiento de paneles de mampostería de unidades macizas de arcilla reforzados con polímeros reforzados con fibras de carbono según diferentes esquemas. Se simularon ensayos de compresión uniaxial perpendicular a las juntas de mortero y ensayos de compresión diagonal. Las dimensiones y características de los especímenes en cuanto a propiedades mecánicas de los materiales componentes, ladrillo y mortero, y del material de refuerzo son las presentadas en el punto 4.

6.1 Compresión uniaxial perpendicular a las juntas

En el siguiente ejemplo se evalúa la eficiencia del sistema de refuerzo con materiales compuestos analizando diferentes configuraciones a saber: refuerzo total con láminas de polímeros reforzados con fibras unidireccionales de carbono de 1 mm de espesor, refuerzo con bandas de idéntico espesor, de longitud fija y ancho variable. En la [Figuras 14](#) se muestran las curvas carga-desplazamientos axial y transversal de un espécimen de 560x 550x125 [mm³] reforzado con bandas de 50, 70 y 560 (refuerzo total) mm de ancho y 1 mm de espesor. Se puede observar que cualquiera sea el ancho de banda, aún en el caso máximo de refuerzo total, la resistencia y la rigidez del panel no resultan incrementadas, no así la capacidad de deformación que se incrementa con el mayor ancho de banda.

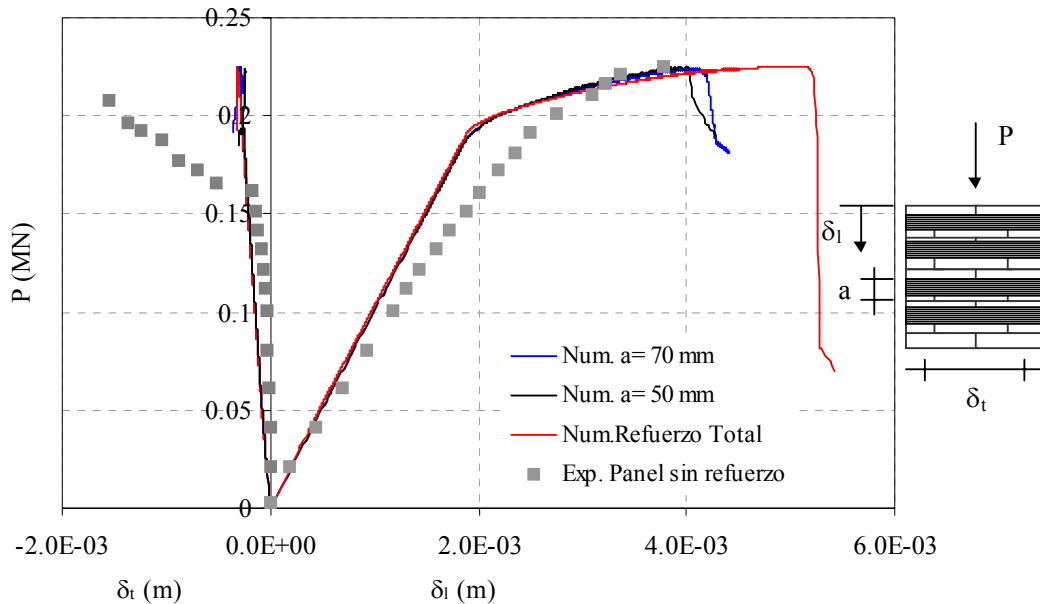


Figura 14. Ensayo de compresión uniaxial perpendicular a las juntas. Curvas carga-desplazamientos axial y transversal de panel de mampostería reforzado con bandas de 1 mm de espesor y ancho variable.

6.2 Compresión diagonal

A continuación se estudia el comportamiento de paneles de mampostería reforzados con bandas unidireccionales de polímeros reforzados con fibras de carbono, dispuestas ortogonales 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 puede observar, que a mayor longitud de aquélla mayor es la carga alcanzada. Así mismo cualquiera sea el largo de la banda, la rigidez no se modifica. Lo dicho puede verse en la [Figura 15](#) donde se representa la evolución de los desplazamientos de las diagonales comprimida y traccionada.

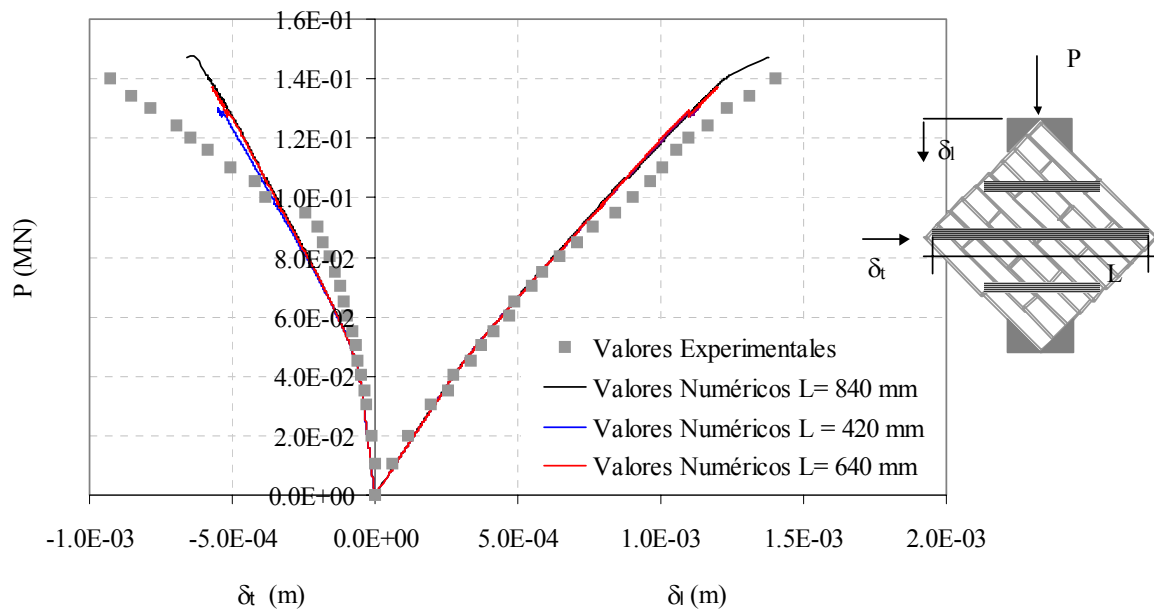


Figura 15. Ensayo de compresión diagonal. Curvas carga-desplazamientos axial y transversal de panel de mampostería reforzado con bandas de 1 mm de espesor y longitud variable.

7 CONCLUSIONES

Siendo la mampostería un material compuesto, no homogéneo y anisótropo con un marcado comportamiento no lineal causado por las juntas de mortero, es importante contar con un modelo constitutivo que tenga en cuenta esa no linealidad del mortero y la anisotropía.

La mampostería reforzada con materiales compuestos es un material compuesto constituido a su vez por compuestos. El comportamiento del conjunto es complejo y difícil de reproducir numéricamente mediante elementos finitos, aún con discretizaciones muy finas, pues depende de varios factores, a saber: a) propiedades mecánicas de los materiales componentes (ladrillos, mortero y PRFs), b) geometría del conjunto, c) condiciones de borde y d) mano de obra. Sin embargo y a pesar de ello, el modelo numérico utilizado reproduce razonablemente los resultados experimentales de los ensayos de compresión normal a la junta y compresión diagonal de la mampostería simple y reforzada.

En general, el modelo numérico utilizado logra reproducir con buena aproximación los valores de carga máxima y rigidez de la mampostería no reforzada y reforzada con materiales compuestos. En el caso de especímenes no reforzados sometidos a compresión uniaxial perpendicular a las juntas, es posible ajustar con buena aproximación la evolución de los desplazamientos axiales, no así los transversales. Ello se debe que en los ensayos se forman fisuras discretas que se localizan en una longitud determinada, mientras que el modelo de continuo utilizado considera la fisuración distribuida en todo el ancho del panel.

La consideración de ortotropía en cada uno de los componentes, aún cuando se trata de materiales isotropos, permite evitar la discretización explícita de la interfaz mampuesto-mortero.

Los polímeros reforzados con fibras pueden llegar a experimentar grandes deformaciones que los conduzcan a un alineamiento de las fibras en la dirección de la carga. Sin embargo, cuando se usan como material de reparación y/o refuerzo de mampostería de ladrillos cerámicos, son fundamentalmente los ladrillos los encargados de transmitirle la carga y, antes de que el material compuesto pueda experimentar grandes deformaciones, se despega de la mampostería no pudiendo soportar más carga. Es por ello que el problema puede ser modelado en pequeñas deformaciones con resultados satisfactorios.

En caso de producirse la falla de la interfaz, ladrillo-compuesto el problema debe ser modelado en 3D. La consideración de la anisotropía de los mampuestos permite reproducir adecuadamente este tipo de falla.

Dado el costo, la extensión y la complejidad que pueden tener los programas experimentales es importante disponer de una herramienta numérica que posibilite reproducir satisfactoriamente el comportamiento de la mampostería reforzada bajo diferentes estados de sollicitación en el plano. Una vez que la herramienta numérica ha sido calibrada, el estudio paramétrico permite analizar diferentes estados de sollicitación y configuraciones de refuerzo y/o reparación, lo cual se traduce en una reducción del número de ensayos de laboratorio.

Del estudio paramétrico se puede concluir que bajo sollicitaciones de compresión perpendicular a las juntas de mortero, el refuerzo con bandas de material compuesto, cualquiera sea el ancho de las mismas, incluso el refuerzo total, no incrementa la resistencia ni la rigidez de la mampostería. Sin embargo un mayor ancho de banda aumenta la capacidad de deformación. En el caso de especímenes ensayados a compresión diagonal una mayor longitud de anclaje de la banda central de refuerzo, mejora la capacidad resistente del elemento.

8 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 realización 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.

REFERENCIAS

- Betten, J., Application of tensor functions to the formulation of yield criteria for anisotropic materials. *International Journal of Plasticity*, 4:29-46, 1988.
- El-Dakhakhni, W., Hamid, A., Hakam, Z. Y Elgaaly, M., Hazard mitigation and strengthening of unreinforced masonry walls using composites. *Composites*

- Structures*, 73:458-477, 2006.
- Gabor, A., Bennani, A., Jacquelin, E., y Lebon, F., Modelling approaches of the in-plane shear behaviour of unreinforced and FRP strengthened masonry panels. *Composite Structures*, 74:277-288, 2006.
- IRAM 1622, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Determinación de la resistencia a la compresión y a la flexión del cemento Pórtland, 1962.
- IRAM 12586, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Ladrillos y bloques cerámicos para la construcción de muros. Método de ensayo de resistencia a la compresión, 2004.
- Luccioni B.M., Constitutive model for fiber reinforced composite laminates. *Journal of Applied Mechanics*, 73:901-910, 2006.
- Luccioni, B.M., y Martín, P.E., Modelo Elastoplástico para Materiales Ortótropos, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Diseño y Cálculo en Ingeniería*, 13:603-614, 1997.
- Luccioni, B.M., Oller, S., y Danesi, R., Plastic Damaged Model for Anisotropic Materials. *Applied Mechanics in the Americas*, I:124-129, 1995.
- Luccioni, B.M., Oller, S., y Danesi, R., Coupled Plastic-Damaged Model”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 129: 81-89, 1996.
- Luccioni, B.M., y Rougier, V.C., A plastic damage approach for confined concrete. *Computer & Structures*, 83:2238–2256, 2005.
- Rougier, V.C., y Luccioni, B. M., en prensa, 2007.
- Rougier, V.C., y Luccioni, B. M., Análisis experimental del comportamiento de muros de mampostería reforzados con materiales de matriz polimérica reforzados con fibras de carbono. *XIX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Mar del Plata, Argentina*, 2006.
- Rougier, V.C., Pascual, A., y Contino, S.R., Refuerzo y reparación de muros de mampostería. *VII EIPAC, Salta, Argentina*, 2007.
- Toledo M.W., Nallim L.G., y Luccioni B.M., Análisis micromecánico de compuestos laminados, *Mecánica Computacional*, volumen XXIV, 2005.
- Valluzzi, M.R., Tinazzi, D., y Modena, C., Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates. *Construction and Building Materials*, 16:409-416, 2002.