

ESTUDIO DE LA INTERFAZ HORMIGÓN-EPOXI-FRP DE UN ENSAYO DE DOBLE CORTANTE POR MEDIO DE LA TEORÍA DE MEZCLAS SERIE/PARALELO

Maritzabel Molina^{a,b}, Juan José Cruz^a, Sergio Oller^a, Alex H. Barbat^a y Luis Gil^a

^a Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería (RMEE). Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Jordi Girona 1-3, Mòdul C1. Campus Nord. 08034 Barcelona (SPAIN)

^b Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Ciudad Universitaria IEI. Bogotá (COLOMBIA)

RESUMEN

El uso de los materiales compuestos para la rehabilitación y la reparación de estructuras de hormigón y de acero se ha ido incrementando en las últimas décadas. Frente a la necesidad de entender de una forma más apropiada el comportamiento de las estructuras reforzadas, la simulación numérica de los materiales compuestos ha surgido como una herramienta; sin embargo, es un campo que aun está en desarrollo. En este trabajo se desarrolla la teoría de mezclas serie/paralelo como una alternativa eficiente para el análisis de estructuras reforzadas con polímeros reforzados con fibras largas (FRP) y se estudia con detalle el comportamiento de la interfaz hormigón-adhesivo-FRP. Utilizando el programa de elementos finitos no lineal PLCDYN [iii], se hace una simulación tridimensional de un ensayo de doble cortante y se compara con los resultados obtenidos en el laboratorio. Se han podido evidenciar las ventajas de esta teoría como herramienta para el análisis numérico de los materiales compuestos.

ABSTRACT

The use of composite materials in the rehabilitation and repair of concrete and steel structures has increased in the last decades. However, the behaviour of the structures strengthened with composite materials is complex and still under study. Therefore, the numerical simulations of such structures appeared to be a necessary as tool, although it is still a developing field. This paper develops the serial/parallel mixing theory as an efficient alternative for the analysis and design of structures reinforced or rehabilitated with Fiber Reinforced Polymers (FRP) and studies in detail the behaviour of the FRP- concrete interface. The simulation of a double shear laboratory test was performed by using the non linear finite element code PLCDYN [iii], and the obtained results are compared whit experimental ones. The used theory and computer code proved to be excellent computational tools for the numerical analysis of composite materials.

1. INTRODUCCIÓN

Frente al incremento del uso de los materiales compuestos conformados por polímeros reforzados con fibras largas (FRP) como una alternativa de refuerzo de las estructuras, es importante buscar nuevas herramientas que permitan estudiar su comportamiento para optimizar su utilización diseño tanto en la reparación de los elementos estructurales con cierto nivel de daño como en la rehabilitación de los elementos que requieren tener un mejor comportamiento dentro de la estructura.

Los polímeros reforzados con fibras largas (FRP) más utilizados como refuerzo son los reforzados con fibra de vidrio (GFRP) y con fibra de carbono (CFRP); en menor medida han sido utilizados los polímeros reforzados con fibra de aramida (AFRP).

La interacción entre la experimentación y la simulación numérica con elementos finitos representan una estrategia eficiente para estudiar el comportamiento de las estructuras reforzadas con materiales compuestos. Dado que la simulación numérica de los materiales compuestos es un campo que está en desarrollo, y que su uso en obras civiles es relativamente nuevo, aún hay aspectos de los FRP que, por su complejidad, no han sido suficientemente estudiados para su utilización como refuerzo en estructuras de hormigón armado. Entre estos aspectos hay que destacar, la pérdida de adherencia entre el FRP y el hormigón.

Entre los resultados experimentales existentes se ha encontrado que los mecanismos de fallo de la adherencia del FRP son factores críticos para el comportamiento de los elementos reforzados solicitados a cortante o flexión. Además, dejan claro que existe la necesidad de nuevas herramientas que permitan predecir, de una forma más precisa la pérdida de adherencia por el deslizamiento entre el FRP y el hormigón o por la delaminación del FRP [i].

En este artículo, se comienza por hacer una revisión del estado del conocimiento de las investigaciones realizadas en el campo del comportamiento de la interfaz hormigón-adhesivo-FRP, analizando la influencia del comportamiento de los materiales y su interacción con la pérdida de adherencia de la interfaz. Luego se describe la teoría de mezclas serie/paralelo [ii], la cual es una nueva herramienta que permite la simulación numérica de los materiales compuesto. Por último, utilizando el programa de elementos finitos PLCDYN [iii], se simula un ensayo de doble cortante utilizando la teoría de mezclas serie/paralelo, en el que se analiza el comportamiento de la interfaz hormigón-epoxi-FRP; por último, se contrastan los resultados numéricos obtenidos con los resultados experimentales.

2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA INTERFAZ HORMIGÓN-EPOXI -REFUERZO CON FRP

La eficiencia del refuerzo para las estructuras de hormigón armado depende tanto de la apropiada selección de la configuración del refuerzo, como de la adherencia entre el FRP y el compuesto [iv].

Los estudios experimentales realizados demuestran que uno de los parámetros críticos para definir la resistencia del hormigón armado reforzado con FRP es la adherencia entre el hormigón y el FRP [v], de la que depende el mecanismo de transmisión de tensiones y por tanto del comportamiento del compuesto. Consecuentemente, el comportamiento de la interfaz hormigón-epoxi-laminado en FRP es uno de los aspectos que ha sido más estudiado; la mayoría de los estudios han sido enfocados en la parte experimental, para determinar la resistencia de la adherencia; sin embargo en muy pocas estudios se considera la simulación numérica como una herramienta para mejorar el análisis del comportamiento de la interfaz. Frente a la complejidad del comportamiento de la interfaz hormigón-epoxi-FRP es evidente que, además de la experimentación, se debe utilizar la simulación numérica para evaluar el comportamiento estructural de los elementos reforzados, para optimizar los diseños y para garantizar la eficiencia del FRP como refuerzo [vi].

En la década pasada, gran parte de las simulaciones se realizaron para la simulación de vigas reforzadas y alguna simulación los modos de fallo de la interfaz por deslizamiento, lo que por el grado de complejidad del problema, ha implicado un gran coste computacional [vii; viii]. En los primeros estudios, se realizaron excesivas simplificaciones; por ejemplo no se consideró el daño en el hormigón y se supuso la adherencia perfecta entre el hormigón y el FRP durante todo el proceso de carga; además, en algunos casos no se modeló la capa del adhesivo o se consideró como un material lineal y elástico. Por tanto, la precisión de los resultados obtenidos mediante estas simulaciones es limitada, pero dieron las bases para establecer la distribución de las tensiones normales y tangenciales en la zona interfacial hormigón-FRP. Posteriormente, los estudios han puesto énfasis en el análisis no lineal con elementos finitos de la interfaz, con el objetivo de simular el proceso de deslizamiento entre el FRP y el hormigón [ix].

El avance del uso de los elementos finitos en el análisis del comportamiento de la interfaz hormigón-epoxi-FRP ha sido relacionado con la simulación de la propagación de las fisuras en el hormigón y en la zona interfacial. En ese sentido se desarrollaron dos tipos de aproximación es la simulación de fisuras:

- **Modelos de fisura discreta.** En esta formulación se predeterminan la dirección y posición de las fisuras en el mallado donde, por cada incremento de carga, se requiere que la malla de elementos finitos se modifique de acuerdo con la propagación de cada una de las fisuras. Asegura una buena precisión de la simulación del proceso de formación y propagación de fisuras, pero tiene un elevado coste computacional por el remallado. Este modelo ha sido utilizado, entre otros, por Perera et al. [vii], Yang et al. [viii], Niu y Wu [x; xi] y Niu et al. [xii] quienes, a excepción Perera et al., han enfocado sus modelos hacia el comportamiento de la interfaz en vigas reforzadas con FRP.
- **Modelos de fisura distribuida.** La malla de elementos finitos no se modifica y el proceso de fisuración se determina a través de las ecuaciones constitutivas no lineales. Las fisuras son simuladas como discontinuidades locales que son distribuidas dentro del sólido aplicando la teoría de la mecánica del continuo. Entre los estudios que han utilizado este tipo de modelos para el análisis de la interfaz hormigón-epoxi-FRP están Wu y Yin [xiii], Lu et al. [ix; xiv], Ebead y Neale [xv], Coronado y López [xvi].

Algunos investigadores han estudiado el deslizamiento entre el FRP y el hormigón considerando que el fallo ocurre por el modo de fractura de deslizamiento en el hormigón, debido a que en la mayoría de los ensayos de adherencia, la superficie del hormigón fisura por cortante. Es por ello que simulan la interfaz tomando elementos de espesor nulo o simplemente no modelan el adhesivo [viii; x; xi; xii]. En otros casos, colocan una capa de elementos de interfaz entre el FRP y el hormigón, en la que el deslizamiento es simulado en función de la ley constitutiva de la zona interfacial como un fallo de estos elementos [xiii; xv]. Otra alternativa en la simulación numérica es modelizar el deslizamiento mediante un modelo de fractura en la interfaz del hormigón, en los elementos adyacentes a la capa del adhesivo, donde el proceso del deslizamiento depende del modelo constitutivo asignado al hormigón [ix; xvi].

A pesar que, desde el año 2002, Ueda et al. [xvii] Recomendaron estudiar con mayor detalle el deterioro de las propiedades de la interfaz de las zonas cercanas a las fisuras en el hormigón, en las simulaciones recientes sólo se ha considerado el daño en el hormigón y en pocos estudios se ha modelizado el adhesivo. Además, tampoco se ha tenido en cuenta que el epoxi puede tener un comportamiento no lineal en respuesta al daño del hormigón o presentar daño.

Es importante que el FRP y el hormigón armado se puedan modelizar considerando el estado de cada uno de los materiales que lo componen; una potente herramienta para ello es la teoría de mezclas de serie/paralelo [xviii]. Asimismo, es necesario que en las simulaciones se considere el daño, tanto en el hormigón como en el adhesivo y en la matriz polimérica del FRP, bajo el principio de que el daño en los materiales produce la reducción de las propiedades mecánicas de la interfaz, lo cual afecta la adherencia.

3. TEORÍA DE MEZCLAS SERIE/PARALELO PARA MATERIALES COMPUESTOS

La teoría de mezclas, como gestor del uso de los modelos constitutivos que describen el comportamiento de los materiales simples que componen los materiales compuestos, constituye una herramienta que puede ser utilizada dentro de una técnica de elementos finitos para simular apropiadamente el comportamiento de dichos materiales. No obstante, es necesario el desarrollo de nuevas herramientas que mejoren la simulación numérica a nivel global y local, de manera que se represente de una forma más precisa el comportamiento real de los compuestos, con la finalidad de obtener información que no se puede medir en los ensayos de los elementos reforzados con FRP. Una excelente alternativa para la simulación numérica es la teoría de mezclas serie/paralelo [i; xix], recientemente validada a través de diferentes pruebas experimentales. Esta teoría se fundamenta en la teoría de mezclas clásica,

propuesta por Trusdell y Topin (1960), la cual considera que el comportamiento de cada componente define el comportamiento global del compuesto.

La teoría de mezclas clásica surgió como una solución a la limitación que inicialmente presentaban los modelos constitutivos en el estudio de los materiales compuestos, por tratarlos desde un punto de vista macroscópico como un material homogéneo, sin tener en cuenta la contribución de sus materiales componentes [xx]. Esta teoría utiliza en la mecánica del continuo bajo el principio de interacción de las sustancias que componen el material, suponiendo que en el volumen infinitesimal del compuesto participan en paralelo todos sus componentes; asimismo, se considera que cada uno de ellos contribuye al comportamiento del compuesto en la misma proporción que su participación volumétrica [xxi]. La teoría de mezclas clásica presenta una restricción para su uso en los diferentes tipos de materiales compuestos, ya que parte de la hipótesis de que los componentes que coexisten en un punto, están en paralelo y tienen la misma deformación; por lo tanto, se puede utilizar en el campo lineal y, con algunas adaptaciones, en casos no lineales específicos, siempre que no se consideren significativos los movimientos relativos entre los componentes del compuesto [xxii].

Debido a las diferencias en el comportamiento de los componentes, a su interacción y a la forma en que están distribuidos en el compuesto, los materiales compuestos tienen una elevada anisotropía y un comportamiento no lineal incluso para bajas tensiones, lo que hace que su modelación numérica sea compleja. No obstante, a través de la teoría de mezclas serie/paralelo complementada con el modelo de mapeo de espacios [xxiii] y a su generalización para el campo de grandes deformaciones [xxii], se obtiene la no linealidad y la anisotropía del compuesto como resultado de la interacción de cada uno de los componentes con su correspondiente ecuación constitutiva.

3.1.1 Fundamentos de la teoría serie/paralelo [ii]

En la teoría serie/paralelo se considera que en una dirección particular los componentes se comportan en paralelo y en las otras direcciones en serie. Se utilizan las siguientes hipótesis:

- En cada volumen infinitesimal del compuesto participan en conjunto todos sus componentes, es decir, la distribución de los componentes es homogénea.
- Los componentes tienen la misma deformación en la dirección en paralelo (condición de isodeformación) y la misma tensión en la dirección en serie (condición de isotensión).
- La adherencia entre los componentes es perfecta.
- La contribución de los componentes en la respuesta del compuesto es proporcional a la participación volumétrica de cada material componente.
- El volumen ocupado de cada material componente es inferior al volumen total del compuesto.

3.1.2 Definición de los componentes en serie y en paralelo de los tensores de deformación y de tensión [xxiv]

El tensor deformación $\boldsymbol{\varepsilon}$ se descompone una parte en serie $\boldsymbol{\varepsilon}_S$ y otra en paralelo $\boldsymbol{\varepsilon}_P$ por medio de los tensores de proyección de cuarto orden ($\mathbf{P}_P, \mathbf{P}_S$) en paralelo y en serie, respectivamente

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_P + \boldsymbol{\varepsilon}_S \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_P = \mathbf{P}_P : \boldsymbol{\varepsilon} \quad \boldsymbol{\varepsilon}_S = \mathbf{P}_S : \boldsymbol{\varepsilon}$$

El tensor de tensiones $\boldsymbol{\sigma}$ también se separa en sus componentes en serie $\boldsymbol{\sigma}_S$ y en paralelo $\boldsymbol{\sigma}_P$.

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_P + \boldsymbol{\sigma}_S \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_P = \mathbf{P}_P : \boldsymbol{\sigma} \quad \boldsymbol{\sigma}_S = \mathbf{P}_S : \boldsymbol{\sigma}$$

donde los tensores de proyección de cuarto orden se hallan a través del tensor de proyección paralelo de segundo orden \mathbf{N}_p y del tensor identidad de cuarto orden \mathbf{I}

$$\mathbf{P}_p = \mathbf{N}_p \otimes \mathbf{N}_p \quad \mathbf{P}_s = \mathbf{I} - \mathbf{P}_p \quad \mathbf{N}_p = e_1 \otimes e_1 \quad (3)$$

siendo e_1 el vector unidad que indica la dirección del comportamiento en paralelo, es decir, la dirección de la fibra.

3.1.3 Ecuaciones de equilibrio y de compatibilidad en las capas del compuesto [xxv]

Con el fin de minimizar el costo computacional, la implementación numérica de la teoría fue desarrollada para descomponer el compuesto c en un determinado número de capas $ncap$, tal que cada capa j sea conformada por una matriz m y una fibra f . Consecuentemente, con las hipótesis enunciadas, en cada capa del compuesto j se plantean las siguientes ecuaciones de equilibrio y de compatibilidad de deformaciones:

- Comportamiento en paralelo

$${}^c_j \boldsymbol{\varepsilon}_p = {}^m_j \boldsymbol{\varepsilon}_p = {}^f_j \boldsymbol{\varepsilon}_p \quad {}^c_j \boldsymbol{\sigma}_p = {}^m_j k \cdot {}^m_j \boldsymbol{\sigma}_p + {}^f_j k \cdot {}^f_j \boldsymbol{\sigma}_p \quad (4)$$

- Comportamiento en serie

$${}^c_j \boldsymbol{\sigma}_s = {}^m_j \boldsymbol{\sigma}_s = {}^f_j \boldsymbol{\sigma}_s \quad {}^c_j \boldsymbol{\varepsilon}_s = {}^m_j k \cdot {}^m_j \boldsymbol{\varepsilon}_s + {}^f_j k \cdot {}^f_j \boldsymbol{\varepsilon}_s \quad (5)$$

3.1.4 Ecuación constitutiva de los materiales de las capas del compuesto

Como la implementación de la teoría serie/paralelo se realiza a nivel constitutivo a partir del estado de deformación en un punto de Gauss, una vez que se obtiene la deformación del compuesto ${}^c \boldsymbol{\varepsilon}$, se calcula el estado tenso-deformacional de cada componente cumpliendo con las ecuaciones de equilibrio y de compatibilidad, para luego hallar el estado de tensiones y de deformaciones del compuesto. Dicho estado se determina mediante la ecuación constitutiva que rige el comportamiento de cada componente

$${}^n_j \boldsymbol{\sigma} = {}^n_j \mathbf{C} : {}^n_j \boldsymbol{\varepsilon}^e = {}^n_j \mathbf{C} : {}^n_j (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p) \quad n = \{m, f\} \quad (6)$$

de tal forma que ${}^n_j \mathbf{C}$ es el tensor constitutivo de la matriz m o de la fibra f de la capa j .

3.1.5 Algoritmo de la teoría serie/paralelo

En la figura 1 se muestra el algoritmo de esta teoría donde una vez que se determina el tensor deformación del compuesto en cada capa j , se descompone el tensor de deformación en sus partes en serie y en paralelo con el fin de calcular las correspondientes deformaciones en la matriz y en la fibra. Según la teoría serie/paralelo, la deformación en paralelo de los componentes es la misma, mientras que la deformación en serie es diferente para cada componente. Por ello, en el análisis de la parte en serie se requiere una primera aproximación de la deformación en serie de alguno de los componentes, por lo que se toma como predictor el tensor deformación en serie de la matriz del compuesto, para luego determinar el tensor de deformación en serie de la fibra mediante la ecuación (5) [xix].

La ecuación (5) de equilibrio de tensiones se verifica calculando la tensión residual de la capa ${}_j \Delta \boldsymbol{\sigma}_s$ y revisando que ésta sea menor que una tolerancia $Toler$, tal como se muestra en la ecuación (7). Cuando la tensión residual es mayor, la predicción de la deformación de la matriz se corrige en forma iterativa. Una vez se obtiene una tensión residual menor que la tolerancia, se hace la recomposición de los tensores de tensión y de deformación de la capa j .

$${}_j \Delta \boldsymbol{\sigma}_s = {}^m_j \boldsymbol{\sigma}_s - {}^f_j \boldsymbol{\sigma}_s \leq Toler \quad (7)$$

3.1.6 Ecuación de equilibrio en el compuesto

Una vez realizado el análisis de cada capa, el tensor de tensión obtenido para el compuesto ${}^c\sigma$ corresponde a la suma de los tensores de tensión de las capas del compuesto $ncap$ de acuerdo con el porcentaje de participación volumétrica de cada capa ${}_j k$.

$${}^c\sigma = \sum_{j=1}^{ncap} {}_j k {}^c\sigma = \sum_{j=1}^{ncap} {}_j k ({}_j^c\sigma_p + {}_j^c\sigma_s) \tag{8}$$

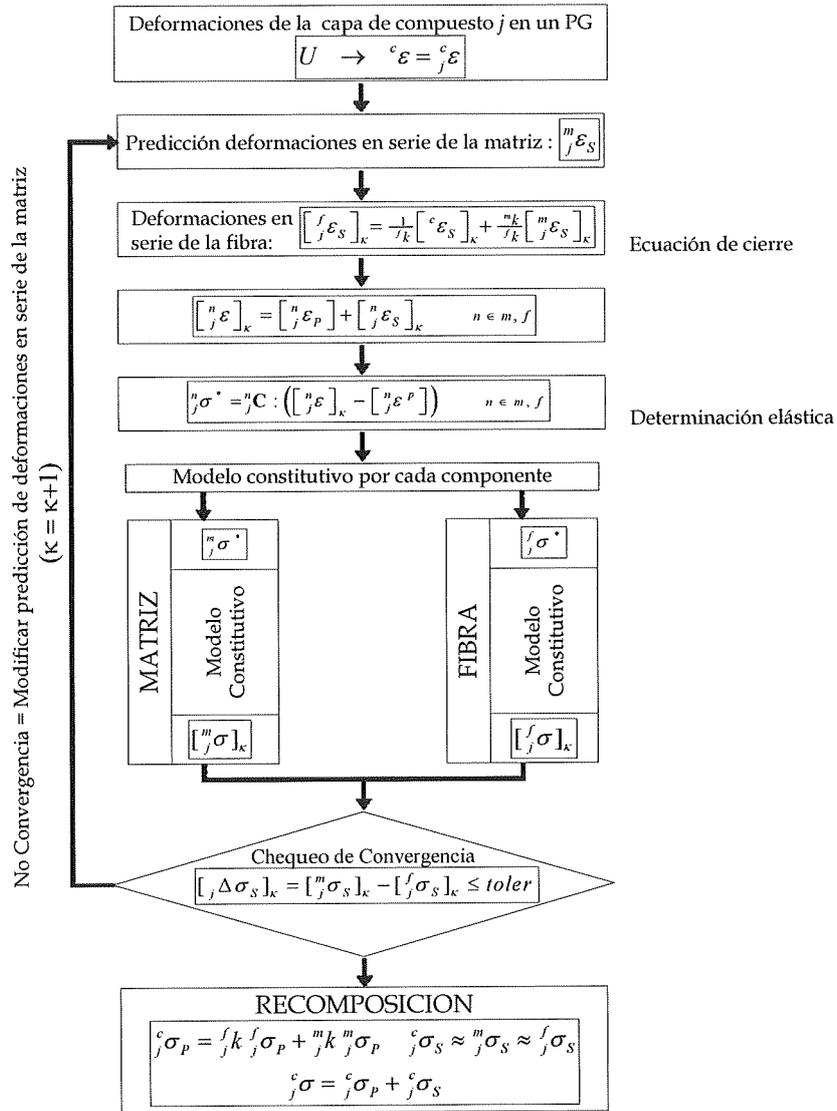


Figura 1 Esquema de solución de la teoría de mezclas serie/paralelo en pequeñas deformaciones para una capa de un compuesto en un punto de Gauss para un paso i+1 [xviii]

4.- ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA ZONA INTERFACIAL HORMIGÓN-EPOXI- FRP

En este apartado se comparan los resultados obtenidos utilizando la teoría serie/paralelo, con los resultados experimentales de un ensayo de doble cortante realizado en el Laboratorio de Resistencia de Materiales y Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Terrassa de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Son pocas las investigaciones que consideran los modelos tridimensionales, en el estudio del comportamiento de la interfaz hormigón-epoxi- FRP, pero en ellos realizan simplificaciones que no consideran el comportamiento no lineal la zona interfacial. Entre las más recientes se encuentran: Un modelo tridimensional de un ensayo de doble cortante con placas de GFRP [xxvi]. El hormigón y el GFRP fueron representados con elementos sólidos suponiendo un comportamiento elástico y lineal, mientras que la interface se simuló como dos sistemas de resortes de rigidez constante. Una simulación tridimensional de un ensayo de corte simple [xxvii]. Aunque se consideró el comportamiento elástico lineal en el hormigón, el epoxi y el FRP, se evidencia que la distribución de tensiones es diferente a la obtenida cuando se considera un estado plano de tensiones. Dicha diferencia que se debe tanto a la incidencia de la relación entre el ancho del FRP y el del bloque de hormigón (b_{FRP}/b_h), como a la influencia los coeficientes de Poisson de cada uno de los materiales que conforma la interface.

En este artículo se realiza una simulación numérica del test de doble cortante en tres dimensiones, mediante el programa de elementos finitos PLCDYN [iii], y se analiza el comportamiento no lineal de la zona interfacial hormigón-epoxi- FRP, aprovechando las ventajas que ofrece la teoría serie/paralelo en determinar el comportamiento tanto de los componentes como del compuesto.

4.1 Geometría del ensayo de doble cortante de la interfaz hormigón-epoxi-CFRP

La geometría del ensayo se indica en la figura 2, donde las bandas de CFRP se encuentran adheridas desde el extremo del bloque de hormigón. Una de las láminas tiene menor longitud con el propósito de inducir el fallo en ese sector y que, de esta forma, se garantizara que la instrumentación utilizada en el ensayo registrase todo el proceso de carga hasta el fallo.

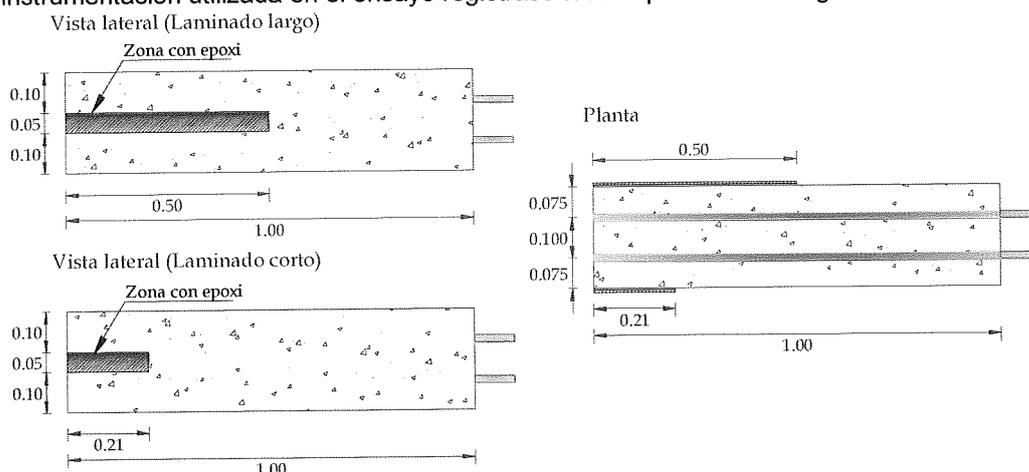


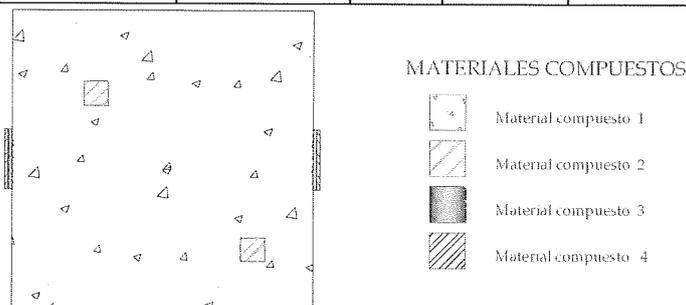
Figura 2 Geometría de la probeta del ensayo a doble cortante [xviii]

Sólo se modelizó el bloque al que se le aplica la fuerza de tracción, con una malla compuesto por hexaedros de 8 nodos. El modelo tiene cinco materiales simples y sus propiedades se muestran en la tabla 1.

De acuerdo con la teoría serie/ paralelo, en el hormigón armado y en el CFRP, las matrices de estos compuestos son el hormigón y la matriz polimérica, respectivamente, mientras que el acero y las fibras de carbono constituyen el refuerzo. Además, para considerar su correspondiente anisotropía, se tiene en cuenta que las barras de acero y las fibras de carbono están orientadas a 0 grados de la dirección en que se aplica la carga. En la figura 3 se indican los cuatro materiales compuestos asignados al modelo y en la tabla 2 se muestran los porcentajes volumétricos en los que participan los componentes en cada material compuesto.

Tabla 1 Propiedades mecánicas de los materiales componentes [xviii]

Material	Criterio de límite	$E_x=E_y=E_z$ [MPa]	ν	σ_c [MPa]	σ_t [MPa]	Gc [kPa·m]	Gt [kPa·m]
Hormigón	Mohr-Coulomb	$3.65 \cdot 10^4$	0.25	52.0	3.0	55.0	0.5
Acero	Von Mises	$2.00 \cdot 10^5$	0.00	270.0	270.0	2000.0	2000.0
Epoxi	Mohr-Coulomb	$1.25 \cdot 10^4$	0.20	80.2	22.9	36.0	3.0
Matriz polimérica	Mohr-Coulomb	$1.20 \cdot 10^4$	0.20	87.5	29.2	36.0	3.0
Fibra de carbono	Von Mises	$2.26 \cdot 10^5$	0.00	2200.0	2200.0	14500.0	14500.0

**Figura 3** Configuración de los materiales compuestos [xviii]**Tabla 2** Porcentajes de los componentes en los materiales compuestos [xviii]

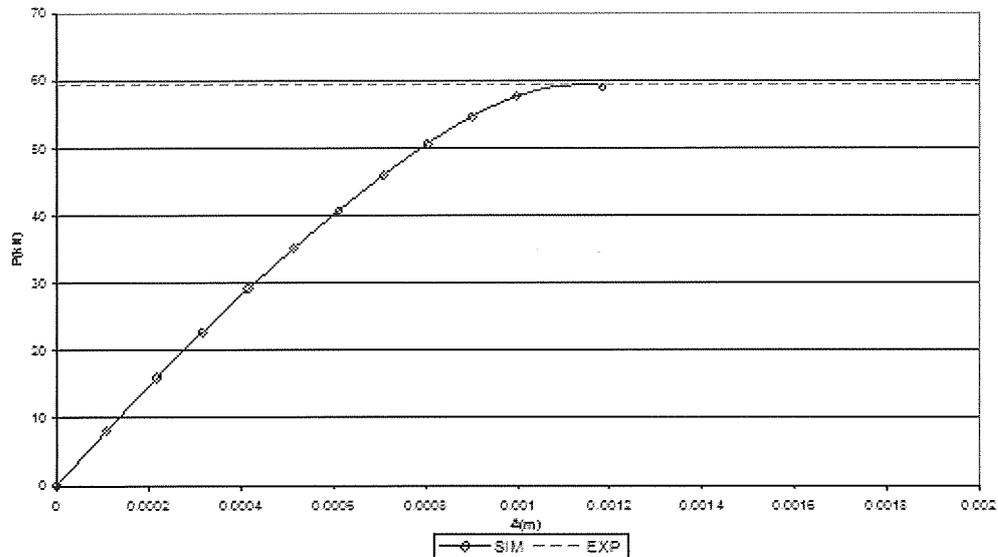
Material compuesto	Matriz de Hormigón	Acero a 0°	Matriz de Resina	Matriz Polimérica	Fibra de Carbono a 0°
1	100				
2	49.8	50.2			
3			100		
4				0.32	0.68

4.2 Descripción de los modelos constitutivos de los materiales

En las recientes investigaciones de la interfaz hormigón-epoxi-FRP, en las que se han modelizado ensayos de adherencia, se han considerado diferentes criterios de daño para el hormigón. Sin embargo, se observa que no se ha tenido en cuenta el daño en el adhesivo o en la matriz del FRP, efectos que evidentemente, reducen las propiedades mecánicas de los materiales que componen la interfaz y, por ende, afectan la adherencia [xviii]. Por ello, en este artículo para analizar el comportamiento de la interfaz de una forma integral, se aplicó el modelo de daño de Kachanov en el hormigón, el epoxi y la matriz polimérica del compuesto, mientras que para el acero se consideró un modelo elasto-plástico y para la fibra de carbono se utilizó como un modelo elástico y lineal. En todos los casos se ha considerado la hipótesis, que no hay daño inicial en los materiales. Además se supuso un estado inicial de adherencia perfecta en la interfaces hormigón-epoxi, epoxi-CFRP y hormigón-acero.

4.3 Rigidez y resistencia

En la figura 4 se observa la curva de carga - desplazamiento de la simulación numérica (SIM). En la prueba experimental (EXP), la carga máxima obtenida fue de 59.30kN y, en la simulación, fue de 59.26kN. Por otra parte, tanto en el ensayo como en el modelo numérico, el fallo se produjo con poca ductilidad.



Sim: simulación numérica exp: experimental
Figura 4 P- Δ con el ensayo de doble cortante

4.4 Daño

Una de las ventajas del uso de la teoría serie/paralelo consiste en que, al asignar un modelo constitutivo a cada componente de los compuestos, se puede observar la evolución de las variables internas, tales como el daño o el endurecimiento plástico en el compuesto y en los componentes. Por ello, en la simulación se puede estudiar el daño en el hormigón y en el epoxi, lo que permite analizar el mecanismo de fallo de la interfaz de una forma integral. El fallo se produjo deslizando el laminado y desprendiéndose una sección del extremo del bloque de hormigón, tal como se aprecia en la figura 5 (a). Al compararla con la figura 5 (b), se observa que la parte desprendida del hormigón en la probeta tiene una forma similar a la sección que se deforma en el modelo numérico.

El mayor daño en el hormigón se produce hacia los bordes superior e inferior de la zona con refuerzo, con un máximo del 75% hacia donde termina el FRP, como se puede ver en la figura 5 (b). Este daño se extiende hasta 0.28m desde el extremo del bloque, es decir, a 0.07m más allá del laminado. Asimismo, en la figura 5 (c) se ve que el epoxi tiene mayor nivel de daño en el extremo donde se desprende el hormigón y se va reduciendo hacia el centro de la zona con refuerzo. Además, en la interfaz con el hormigón el máximo daño es del 22%, mientras que en la interfaz con el laminado es del 45%.

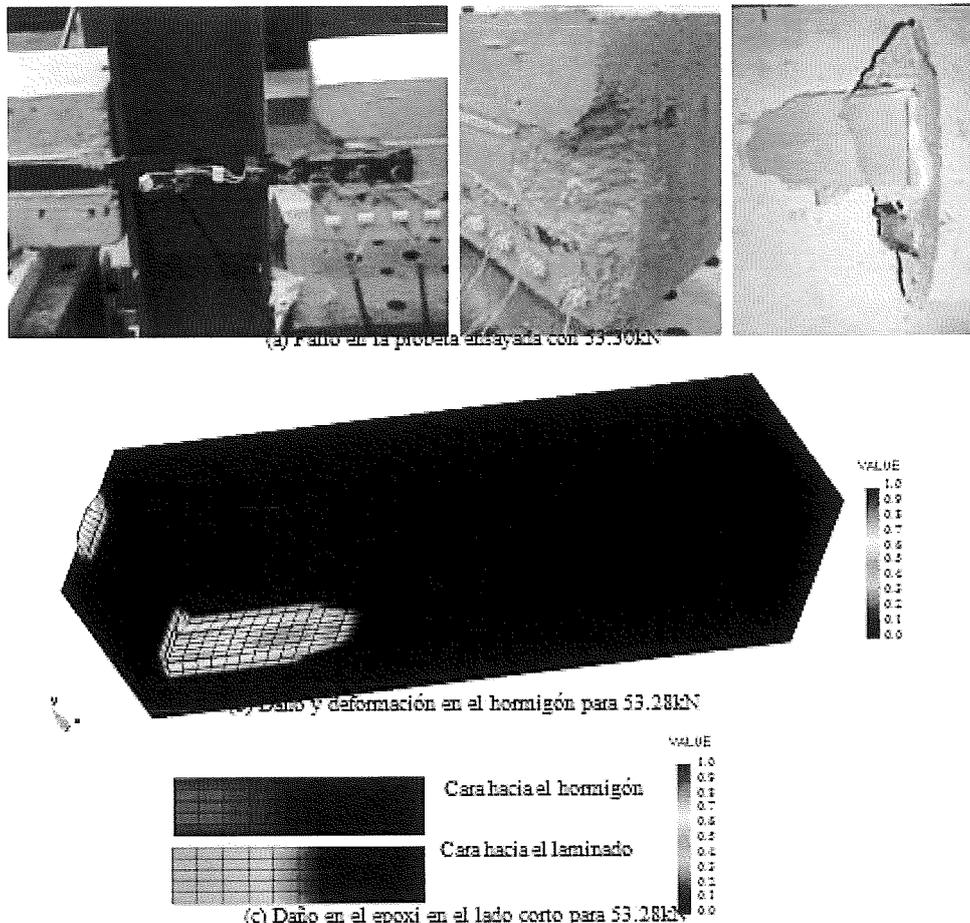


Figura 5 Daño en el bloque de hormigón y en el adhesivo

Como la zona reforzada con mayor daño es la de los bordes superior e inferior, en la figura 6 se muestra la evolución del daño el hormigón y en el epoxy a lo largo del borde superior. En lo referente al daño en el hormigón, en la figura 6 (a) se observa que hay una distribución de daño uniforme con un 67% y que el máximo daño ocurre en el extremo donde termina el laminado dentro del bloque, con un 75% correspondiente al momento del fallo.

En lo que respecta al daño en el epoxy mostrado en la figura 6 (b) para una longitud de anclaje de 0.21m la distribución de daño no es uniforme; asimismo, el máximo daño en el epoxy ocurre en el extremo del bloque donde se adhiere el refuerzo. La poca uniformidad de la distribución de daño en el adhesivo y su concentración en el extremo se debe a que, por la corta longitud del laminado, hay una mayor concentración de tensiones.

Con lo visto en la prueba y en la simulación se ve la importancia de tener en cuenta el daño en el epoxy, lo que muestra que su comportamiento no es elástico lineal como se ha supuesto en algunas investigaciones [vii; ix; viii; xxvii].

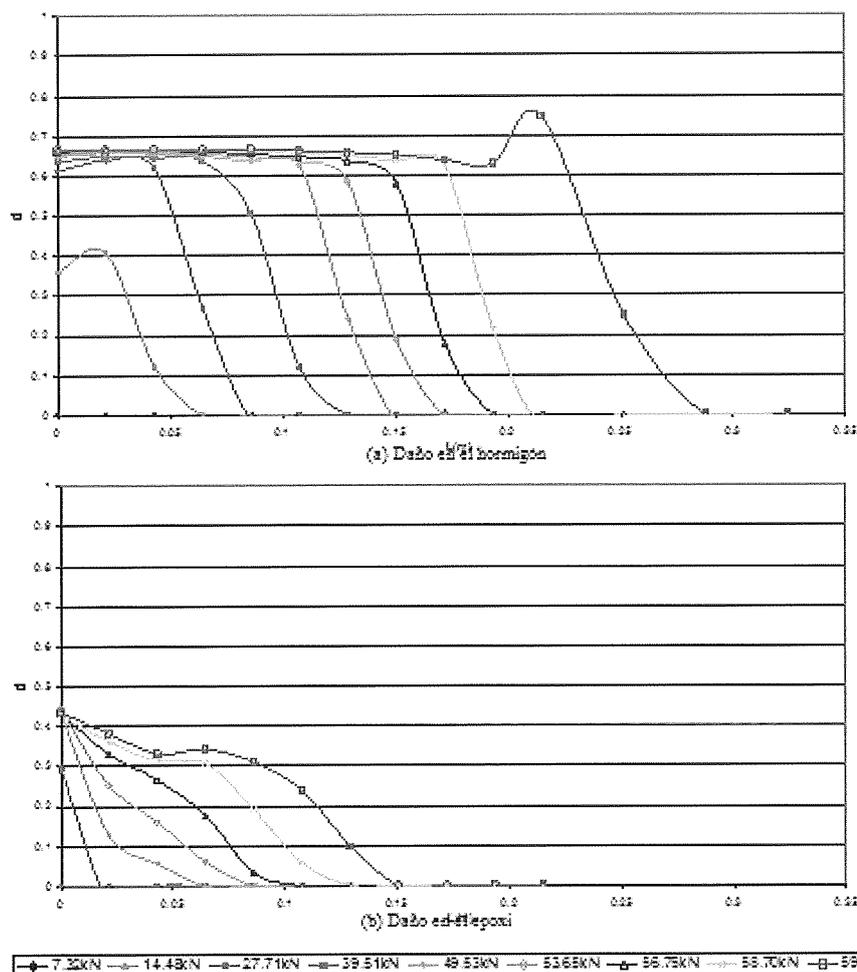


Figura 6 Daño en hormigón y en el adhesivo en el lado del laminado corto para diferentes cargas

4.5 Tensiones normales y tangenciales en la interfaz

Otra de las ventajas que tiene la teoría serie/paralelo es que durante todo el proceso de carga, permite identificar el estado de tensiones y de deformaciones, tanto en el compuesto, como en sus componentes. Debido a que el fallo se produce en la zona reforzada con el laminado corto, en este sector se analiza el comportamiento de las tensiones axiales y tangenciales del hormigón, del epoxi y del FRP en el borde superior de la zona reforzada, es decir, a una altura de 0.15m de la base del bloque.

En la figura 7 se muestran las tensiones axiales y tangenciales en el hormigón. En lo que respecta a las tensiones axiales, en la figura 7 (a) se observa que, hasta una carga aplicada de 14.48kN, la mayor tensión se presenta en el extremo donde se adhiere el CFRP. Luego, como señal del deslizamiento, para los otros niveles de carga, la máxima tensión, con valores entre 1.85MPa y 2.0MPa, se produce a lo largo de la zona reforzada hacia el extremo donde termina el FRP. Finalmente para la carga de fallo, hay una tensión de 2.31MPa a 0.04m del refuerzo, lo que muestra la pérdida de capacidad de la zona reforzada.

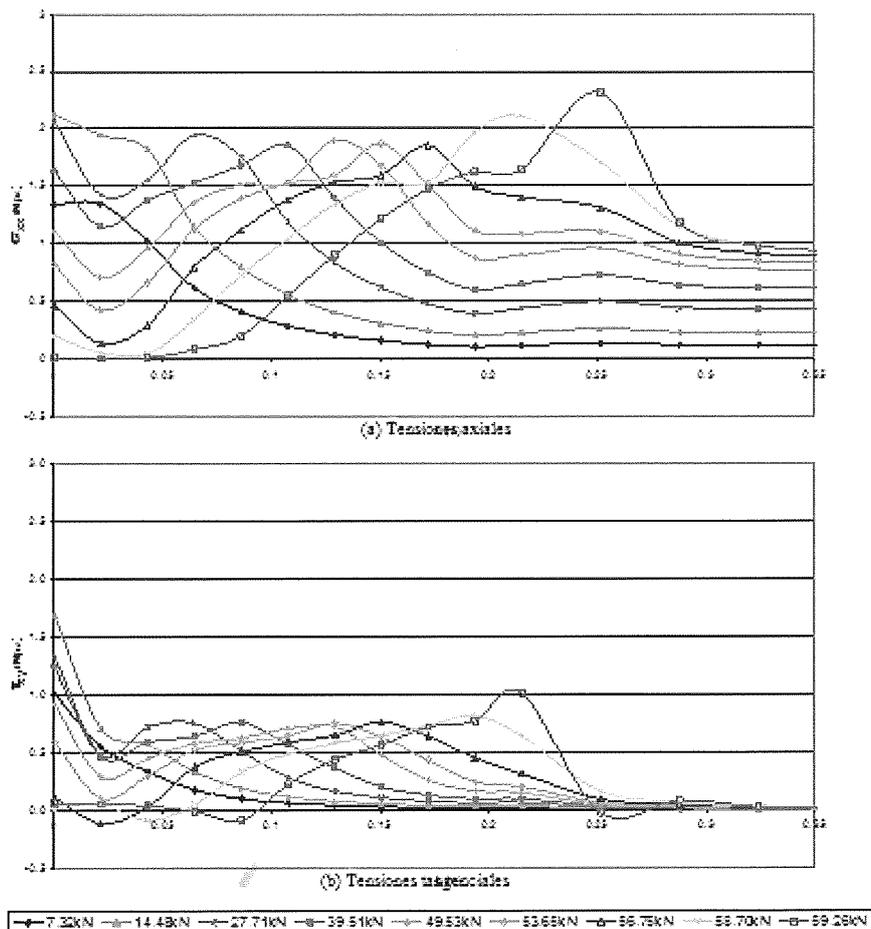


Figura 7 Distribución de las tensiones en el Hormigón en el lado del laminado corto

Referente a las tensiones tangenciales indicadas en la figura 7 (b), se observa que para los diferentes niveles de carga hasta 49.53kN, las mayores tensiones ocurren en el extremo donde se adhiere el FRP, donde se alcanza la máxima tensión de 1.68MPa con una carga de 14.48kN. Luego, para niveles de carga superiores a 49.53kN, las mayores tensiones están entre 0.75MPa y 0.80MPa, y se producen a lo largo de la zona con refuerzo hacia el otro extremo laminado. Finalmente, con la carga última, donde finaliza el refuerzo, la tensión se incrementa a 1.0MPa.

Al analizar las gráficas de la figura 7 se deduce que el comportamiento del hormigón en la interfaz corresponde a la acción conjunta de las tensiones tangenciales y axiales. Para los primeros niveles de carga (hasta 39.66kN), las tensiones tangenciales alcanzan valores entre un 67% y un 89% de las tensiones axiales y luego, para los otros niveles, equivalen entre un 38% y un 48%. Además, se aprecia que las tensiones tangenciales tienen mayor incidencia en el daño que ocurre en el extremo del bloque de hormigón que en el lado donde termina el CFRP.

En la figura 8 se observan las tensiones axiales y tangenciales en el epoxi, en la interfaz con el FRP donde se produce un mayor índice de daño. En la figura 8 (a) se ve que las mayores tensiones axiales ocurren a 0.025m de donde se adhiere el CFRP, hasta una carga de 49.53kN. Luego las mayores tensiones se dan a 0.05m, donde se alcanza la tensión máxima de 23.3MPa para la carga última de 59.26kN. Por otro lado, al incrementarse el nivel de carga en el epoxi, se amplía el área de desarrollo de las tensiones.

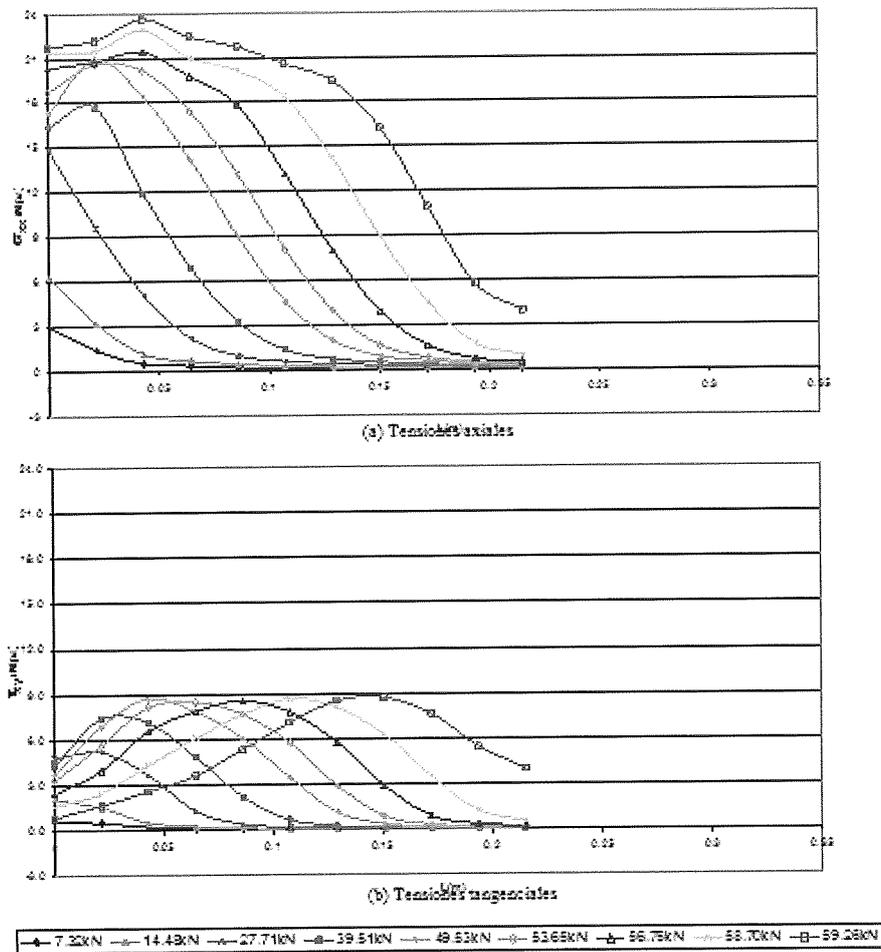


Figura 8 Distribución de las tensiones en el epoxi en el lado del laminado corto

La evolución de las tensiones tangenciales en el epoxi es aproximadamente parabólico, tal y como puede verse en la figura 8 (b). Inicialmente hasta una carga de 27.71kN, las mayores tensiones se presentan en el extremo del bloque. Luego, a medida que se incrementa la carga, el sector en el que se desarrollan las mayores tensiones (entre 8.50MPa y 8.80MPa), va cambiando hacia el otro extremo donde termina el laminado.

Las tensiones tangenciales alcanzan valores entre un 34% y un 42% de las tensiones axiales, por lo que el comportamiento del epoxi depende de la acción conjunta de las tensiones tangenciales y axiales. Sin embargo, el porcentaje de participación de las tensiones tangenciales en el epoxi es menor que en el hormigón. Al comparar la evolución de las tensiones con el daño en el epoxi, se observa que la longitud de adherencia de 0.21m es insuficiente para que se desarrolle toda la capacidad del CFRP, ya que el daño se concentra en el inicio de la zona.

En la figura 9 se muestran las tensiones axiales y tangenciales en el CFRP. Las tensiones axiales en el laminado observadas en la figura 9 (a), tienen una tendencia casi lineal hasta una fuerza de 53.65kN y, después tienen una distribución semi-parabólica. Para los diferentes niveles de carga, la mayor tensión ocurre en el extremo donde se adhiere el laminado y la menor se produce donde finaliza el refuerzo.

Las tensiones tangenciales en el laminado tienen una distribución de tensiones parabólica, tal y como se muestra en la figura 9 (b). Para cargas menores o iguales a 14.48kN, la mayor tensión se presenta en el extremo donde se adhiere el laminado; luego

ocurre a 0.05m hasta una carga de 39.66kN. Para los otros niveles, el sector con la mayor tensión cambia y la longitud de distribución aumenta, manteniendo un valor de máxima tensión tangencial entre 12.0MPa y 12.5MPa.

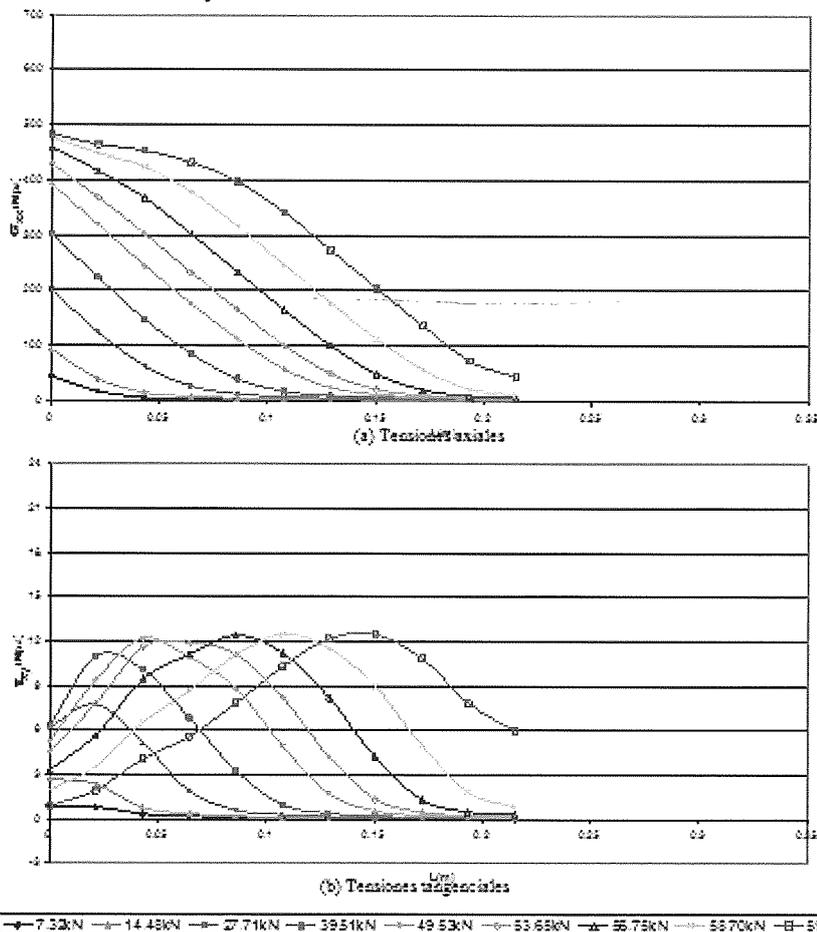


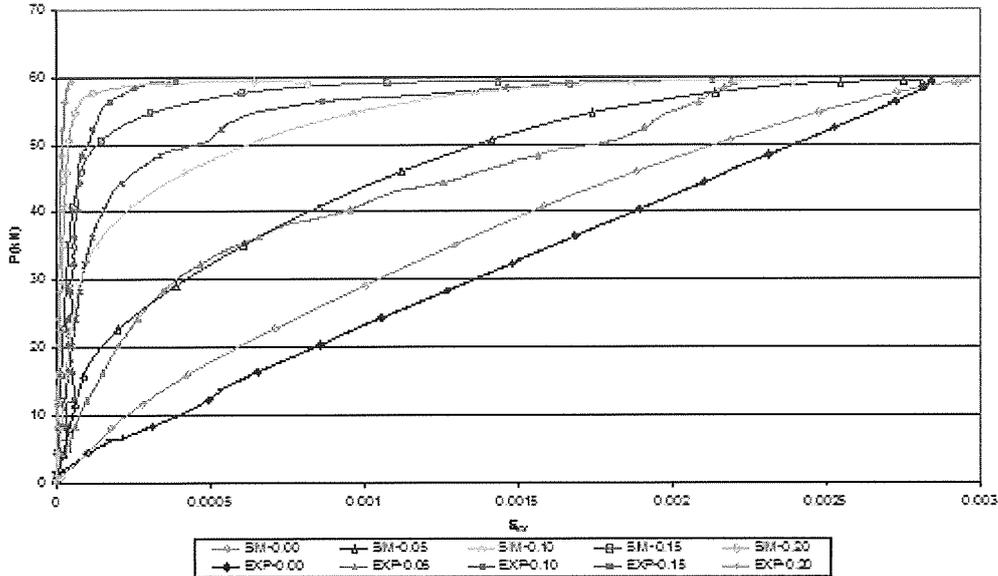
Figura 9 Distribución de las tensiones en el laminado del lado del laminado corto

Al comparar las dos gráficas de la figura 9 se puede ver como en la zona donde termina el laminado, las tensiones axiales y tangenciales son bajas en el CFRP incluso para la carga de fallo, lo que indica que no se alcanza a desarrollar la capacidad del FRP. Por otra parte, ya que las tensiones tangenciales son desde un 2% hasta un 4% de las tensiones axiales, se evidencia que el CFRP está solicitado básicamente por acciones axiales.

Al comparar la distribución de tensiones y su magnitud, se observa que las tensiones tangenciales máximas en el hormigón para cargas mayores a 39.51kN están entre un 6% y un 8% de las tensiones en el laminado, mientras que con respecto a las tensiones axiales la relación es menor a un 0.1%. Por lo tanto, el epoxi, al no ser tan resistente como el laminado y al tener mayor resistencia que el hormigón, debe tener la capacidad suficiente para garantizar que las tensiones se transmitan y distribuyan en forma adecuada desde el laminado al hormigón.

Coincidiendo con lo encontrado por Chen y Pan [xxvii], en la simulación realizada en este artículo, al observar el comportamiento del hormigón, del adhesivo y del FRP, se concluye que en la simulación tridimensional, la contribución de las tensiones axiales y tangenciales es diferente a lo indicado en los estudios en los que se ha considerado el estado plano de tensiones. En lo que respecta al comportamiento de la interfaz, en el hormigón y en el epoxi, tanto las tensiones tangenciales como las tensiones axiales tienen un porcentaje de participación significativo, mientras que en el FRP predominan las tensiones axiales.

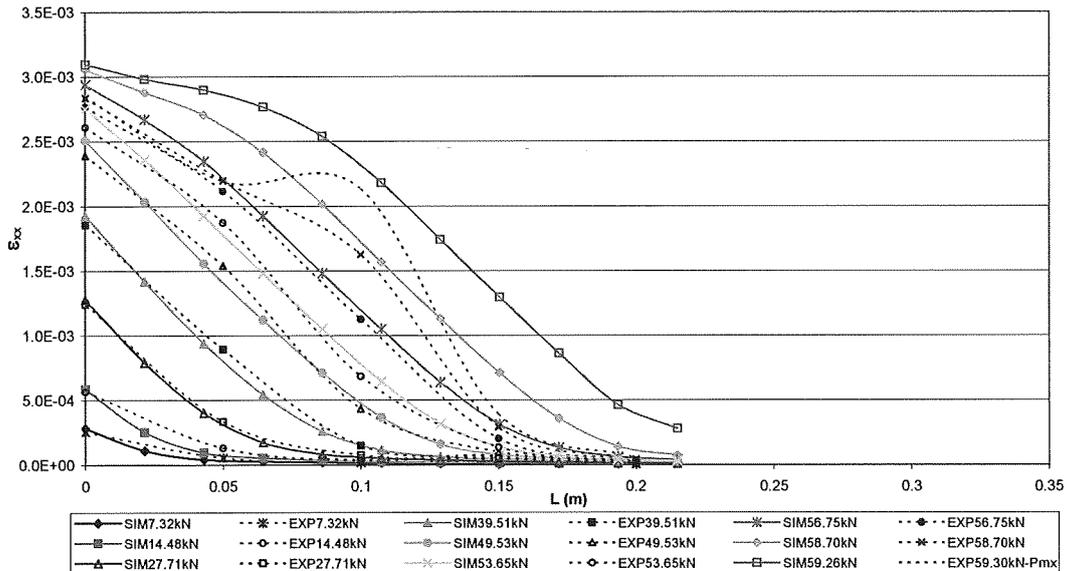
4.6 Deformaciones



Sim: simulación numérica exp: experimental

Figura 10 Evolución de las deformaciones E_{xx} en el compuesto [xviii]

En la figura 10 se presentan las deformaciones en el compuesto de acuerdo con la ubicación de las galgas en la probeta. Se observa la similitud que existe entre la evolución de las deformaciones medidas en el ensayo y la obtenida en la simulación a 0.05m, 0.10m, 0.15m y 0.20m del extremo donde se adhiere el refuerzo. No obstante para 0.0m, con la galga se obtuvo una respuesta lineal diferente a lo calculado mediante el modelo numérico, pero la pendiente es parecida. Esto probablemente se debe al hecho de que la galga se encuentra en la frontera de la zona de adherencia del laminado, mientras que el punto de Gauss analizado está dentro del laminado adherido al hormigón. En este caso, en general, se puede decir que en la simulación y en la prueba experimental, el compuesto tiene una relación de carga deformación similar.



Sim: simulación numérica exp: experimental

Figura 11 Distribución de las deformaciones en el compuesto E_{xx} [xviii]

En la figura 11 se muestra la distribución de deformaciones obtenida mediante la simulación numérica y el ensayo de laboratorio a lo largo del centro del laminado para los diferentes niveles de carga. Se observa que hasta la carga de 56.75kN el comportamiento es similar; a partir de este valor, el modelo no simula el aumento excesivo de deformación que ocurre a 0.10m del extremo. Dicho incremento experimentalmente indica la flexión local del laminado a causa de una fisuración localizada. Sin embargo, esta pequeña discrepancia no es relevante frente a todas las ventajas que tiene el uso de la teoría serie/paralelo en el análisis de materiales compuestos.

5. CONCLUSIONES

- Debido a que el deslizamiento entre el FRP y el hormigón se produce porque sobrepasa la resistencia de la interfaz o del hormigón y, que en ningún caso, se supera la resistencia del laminado, el FRP no se está aprovechando eficientemente como refuerzo en elementos de hormigón. La mayoría de las investigaciones están enfocadas a resultados experimentales, que si bien han mostrado aportes importantes, no han resuelto incertidumbres esenciales del comportamiento de la interfaz y de la pérdida de la adherencia. Consecuentemente, es necesario utilizar la simulación numérica como una herramienta complementaria a la experimentación, para darle al proyectista estructural un instrumento que le permita mejorar el cálculo de los elementos de hormigón armado reforzados con FRP.
- En este trabajo a través de la teoría serie/paralelo se estudia el comportamiento de la interfaz hormigón-epoxi-CFRP y se comparan los resultados con los obtenidos en un ensayo. Igualmente, se modeliza el adhesivo que es susceptible al daño y se considera su comportamiento no lineal. Además, es importante utilizar modelos tridimensionales, ya que permiten calcular el proceso de fallo de una forma integral. No obstante, se requiere de una formulación que permita simular de una forma mas adecuada el deslizamiento localizado que puede existir en algunos sectores de la interfaz.
- La teoría serie/paralelo es una herramienta versátil para analizar el comportamiento de materiales compuestos y de sus componentes dentro de una estructura. Por una parte permite que cada componente del compuesto se analice mediante la ecuación constitutiva que sea mas conveniente para predecir su comportamiento (elasticidad, plasticidad, daño etc.), y por otra, al calcular el comportamiento del material compuesto en cada punto de Gauss, lo acopla al resto del mallado, definiendo a su vez, el comportamiento global de la estructura. Por tanto, esta herramienta numérica conlleva un mejor análisis de estructuras con materiales compuestos sin ocasionar excesivos costos computacionales, ya que permite el uso de diferentes tipos de no linealidades y utiliza un único mallado para el análisis de la estructura, de los materiales compuestos y de sus componentes.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través de los proyectos "RECOMP", Ref. BIA2005-06952, "DECOMAR", Ref. MAT2003-08700-C03-02 y "DELCOM", Ref. MAT2008-02232/MAT; por el Ministerio de Fomento de España a través del proyecto "Reparación y Refuerzo de Estructuras de Hormigón Armado con Materiales Compuestos"; por "AIRBUS" (España), por el Contrato Nro. PBSO-13-06 "FEMCOM", por "ACCIONA Infraestructuras" (España) a través de los proyectos "CETIC", "Sphera" y "Prometeo"; por Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), Ref. A/012257/07; por programa Alβan, Programa de Becas de Alto Nivel de la Unión Europea para América Latina, beca Nº E06D101053CO; por el Centro Internacional para los Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), España y por el laboratorio CER-LITEM del Departamento de Resistencia de Materiales de la Universidad Politécnica de Catalunya, Terrassa, España.

BIBLIOGRAFÍA

- [i] A. Nanni. *North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP: Principles, applications and unresolved issues*. Construction and Building Materials 17(6-7)(2003) 439-446.
- [ii] F. Rastellini. *Modelización numérica de la no-linealidad constitutiva de laminados compuestos*. Ph.D. thesis. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España (2006).
- [iii] CIMNE. *PLCDYN Manual: Código termomecánico no lineal de elementos finitos dirigido a estudiantes de Ph.D.* Universidad Politecnica de Cataluña-UPC. Barcelona, España (1991-2008).
- [iv] L.C. Hollaway. *The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure*. Construction and Building Materials 17 (6-7) (2003) 365-378.
- [v] S.S. Pendhari, T. Kant, M.Y. Desai. *Application of polymer composites in civil construction: A general review*. Composite Structures 84 (2) (2007) 114-124.
- [vi] V.M. Karbhari. *Materials considerations in FRP rehabilitation of concrete structures*. Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE 13 (2) (2001) 90-97.
- [vii] R. Perera, A. Recuero, A.D. Diego, C. López. *Adherence analysis of fiber reinforced polymer strengthened RC beams*. Computers and Structures 82 (23-26) (2004) 1865-1873.
- [viii] Z.J. Yang, J.F. Chen, D. Proverbs. *Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated RC beams*. Construction and Building Materials 17 (1) (2003) 3-13.
- [ix] X. Z. Lu, L. P. Ye, J. G. Teng, J. J. Jiang. *Meso-scale finite element model for FRP sheets/plates bonded to concrete*. Engineering Structures 27 (4) (2005) 564-575.
- [x] H. Niu, Z. Wu. *Numerical analysis of debonding mechanisms in FRP-strengthened RC beams*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 20 (5) (2005) 354-368.
- [xi] H. Niu, Z. Wu. *Effects of FRP-concrete interface bond properties on the performance of RC beams strengthened in flexure with externally bonded FRP sheets*. Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE 18 (5) (2006) 723-731.
- [xii] H. Niu, V. M. Karbhari, Z. Wu. *Diagonal macro-crack induced debonding mechanisms in FRP rehabilitated concrete*. Composites Part B: Engineering 35 (7-8) (2006) 627-641.
- [xiii] Z. Wu, J. Yin. *Fracturing behaviors of FRP-strengthened concrete structures*. Engineering Fracture Mechanics 70 (10) (2003) 1339-1355.
- [xiv] X.Z. Lu, J.J. Jiang, J.G. Teng, L.P. Ye. *Finite element simulation of debonding in FRP-to-concrete bonded joints*. Construction and Building Materials 20 (6) (2006) 412-424.
- [xv] U. A. Ebead, K.W. Neale. *Mechanics of fibre-reinforced polymer-concrete interfaces*. Canadian Journal of Civil Engineering 34 (3) (2007) 367-377.
- [xvi] C. A. Coronado, M. M. López. *Damage approach for the prediction of debonding failure on concrete elements strengthened with FRP*. Journal of Composites for Construction ASCE 11 (4) (2007) 391-400.
- [xvii] T. Ueda, R. Yamaguchi, K. Shoji, Y. Sato. *Study on behaviour in tension of reinforced concrete members strengthened by carbon fiber sheet*. Journal of Composites for Construction ASCE 6 (3) (2002) 168-174.

-
- [xviii] M. Molina. *Estudio numérico de la adherencia de los materiales compuestos como refuerzo en estructuras de hormigón armado*. Master en Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España (2009).
- [xix] X. Martínez. *Micro-mechanical simulation of composite materials using the serial/parallel mixing theory*. Ph.D. thesis. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España (2008).
- [xx] S. Oller. *Simulación Numérica del Comportamiento Mecánico de los Materiales Compuestos*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería-CIMNE, Barcelona, España (2003).
- [xxi] E. Car, F. Zalamea, S. Oller, J. Miquel, E. Oñate. *Numerical simulation of fiber reinforced composites-Two procedures*. International Journal of Solids and Structures 39 (7) (2002) 1967–1986.
- [xxii] E. Car, S. Oller, E. Oñate. *Tratamiento Numérico de Materiales Compuestos Monografía CIMNE No.57*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería – CIMNE, Barcelona, España (2000).
- [xxiii] S. Oller, S. Botello, J. Miquel, E. Oñate. *An anisotropic elastoplastic model based on an isotropic formulation*. Engineering Computations 12 (3) (1995) 245–262.
- [xxiv] F. Rastellini, S. Oller, O. Salomon, E. Oñate. *Composite materials non-linear modelling for long fibre-reinforced laminates: Continuum basis, computational aspects and validations*. International Journal of Computers & Structures 86 (9) (2008) 879–896.
- [xxv] X. Martínez, S. Oller, F. Rastellini, A. Barbat. *A numerical procedure simulating RC structures reinforced with FRP using the serial/parallel mixing theory*. Computers and Structures 86 (15–16) (2008) 1604–1618.
- [xxvi] M. Nehdi, A.E. Damatty, R. Rahimi. *Investigation on lap-joint behaviour of GFRP plates bonded to silica fume and rice husk ash concrete*. International Journal of Adhesion & Adhesives 23(4)(2003) 323–333.
- [xxvii] J.F. Chen, W. Pan. *Three dimensional stress distribution in FRP-to-concrete bond test specimens*. Construction and Building Materials 20 (1–2) (2006) 46–58.