

Estudio numérico del efecto tenso-rigidez en tirantes de hormigón armado con Polímeros Reforzados con Fibras

Numerical study of tension stiffening in Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforced Concrete (RC) tensile members

Marta Baena^{*,a}, Lluís Torres^b, Albert Turon^c, Ricardo Perera^d

^a Profesora Agregada. Dpto. Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial, grupo AMADE. Universitat de Girona. España

^b Catedrático. Dpto. Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial, grupo AMADE. Universitat de Girona. España

^c Profesor Titular. Dpto. Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial, grupo AMADE. Universitat de Girona. España

^d Catedrático. Dpto. Ingeniería Mecánica. Universidad Politécnica de Madrid. España

RESUMEN

Se presenta un modelo numérico de análisis no lineal aplicado a elementos de hormigón armado sometidos a cargas de tracción. El modelo se alimenta de la relación tensión de adherencia-deslizamiento, siendo así versátil para simular cualquier tipo de refuerzo. Una vez validado, se utiliza el modelo para realizar un estudio paramétrico en el que se determina que el efecto tenso-rigidez es inversamente proporcional al producto $n\rho$, y que se muestra poco o nada afectado por la resistencia del hormigón, la tensión máxima de adherencia o el perímetro de la barra. Sin embargo, estos dos últimos parámetros sí que influyen en la transmisión de fuerzas y, por lo tanto, a la longitud de transferencia.

ABSTRACT

This paper presents a non-linear numerical model for the analysis of tensile reinforced concrete elements. The model is capable to assume an experimental bond-slip law, being therefore applicable to simulate any reinforcing material. Once validated, the model is used to conduct a parametric study whose results demonstrate that tension stiffening effect is inversely proportional to $n\rho$, and appears to be less sensitive to concrete compressive strength, maximum bond strength or reinforcement perimeter. Nonetheless, the combination of bond strength and reinforcement perimeter has an effect on transfer length.

PALABRAS CLAVE: adherencia, tenso-rigidez, modelo numérico, estudio paramétrico, tirante

KEYWORDS: bond, tension stiffening, numerical model, parametric study, tensile element

1. Introducción

En las últimas décadas, las barras de Polímeros Reforzados con Fibras (PRF) han sido presentadas como una alternativa al acero en su uso como refuerzo de elementos de hormigón armado. Los problemas de durabilidad y corrosión del acero, junto con la neutralidad magnética de las barras de PRF, son los

principales factores que están promoviendo este cambio. Sin embargo, las propiedades mecánicas de los PRF, y más concretamente sus menores módulos de elasticidad y diferentes prestaciones de adherencia, pueden ocasionar mayores aberturas de fisura y flechas. Como resultado, el diseño de elementos de hormigón armado

reforzados con PRF suele estar gobernado por los Estados Límites de Servicio (ELS) [1,2]. El análisis de la deformabilidad de elementos de hormigón armado no puede omitir la contribución del hormigón traccionado entre fisuras, más conocido como efecto tenso-rigidez. Este efecto tenso-rigidez ha demostrado ser crucial para una estimación adecuada de la respuesta carga-deformación de elementos de hormigón armados con acero, y se presenta como un parámetro clave para la correcta estimación en el caso de hormigón armado con PRF. Con todo ello, no parece adecuado hacer analogías directas del comportamiento de refuerzo de acero a refuerzo de PRF, y se requiere de herramientas que permitan analizar cómo las diferentes propiedades de estos nuevos materiales pueden afectar al comportamiento de elementos de hormigón armado.

En esta comunicación se presenta un modelo numérico de análisis no lineal, basado en diferencias finitas, que permite solucionar el sistema de ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento adherente entre armadura y hormigón. El modelo se puede alimentar de cualquier relación tensión de adherencia-deslizamiento, con lo que se muestra apto para analizar el comportamiento de hormigón armado con cualquier material de refuerzo (acero o PRF). La validación del modelo se realiza mediante comparación con resultados experimentales, así como con resultados obtenidos de un estudio mediante elementos finitos. Finalmente, dicho modelo se utiliza para realizar un estudio paramétrico que permita determinar las variables que tienen una mayor influencia en el fenómeno tenso-rigidez.

2. Modelo numérico para el análisis de tirantes de hormigón armado

El estudio de la deformación de tirantes de hormigón armado se realiza mediante un análisis no lineal basado en la relación de tensión de adherencia- deslizamiento. Para ello, el tirante se

modela inicialmente como un bloque delimitado por dos fisuras, que representan las secciones de los extremos. En este bloque, se plantea el sistema de ecuaciones diferenciales que describen el proceso de fisuración y se analizan las distribuciones de deformaciones de los dos materiales (hormigón y refuerzo) a lo largo de la pieza, siendo para esto necesaria la definición de una relación tensión de adherencia-deslizamiento. Finalmente, se soluciona el sistema de ecuaciones de manera numérica, mediante diferencias finitas.

Para el desarrollo de este modelo se consideran las siguientes hipótesis: i) comportamiento elástico de los materiales (condiciones de servicio); ii) no se considera el reblandecimiento (*softening*) en tracción en el hormigón; iii) deformaciones unitarias constantes en la sección. Bajo estas hipótesis, e imponiendo la compatibilidad de deformaciones y el equilibrio de fuerzas en cada sección del bloque, el modelo proporciona el estado de tensiones y deformaciones, así como el deslizamiento en cada sección, para cada carga aplicada. Se genera una primera fisura en la sección media del elemento y a medida que se incrementa la carga, se generan nuevas fisuras que delimitan nuevos bloques de menor longitud. En [3] pueden encontrarse más detalles del modelo. Finalmente se obtienen las distribuciones de deformaciones unitarias, el deslizamiento y la tensión adherente entre ambos materiales y la curva carga-deformación del tirante. Del estudio de ésta última, se puede obtener el efecto tenso-rigidez del tirante.

3. Validación del modelo

Con el fin de validar el modelo, a continuación se presentan resultados de una campaña experimental sobre fisuración en elementos de hormigón armado bajo cargas de tracción y de un análisis por elementos finitos, asumiendo adherencia no perfecta.

3.1 Campaña experimental

Los resultados experimentales se obtuvieron de una campaña propia de ensayos de tirantes de hormigón armados con barras de GFRP (del inglés *Glass Fiber Reinforced Polymers*) [4] en la que se consideraron cuatro cuantías geométricas ($\rho=0.51, 0.71, 1.00$ y 1.69%). Se utilizó un hormigón con resistencia a compresión de 50MPa. El programa experimental (ver Tabla 1) incluyó un tirante con fisuras inducidas, con un refuerzo de GFRP instrumentado con galgas extensométricas para obtener el perfil de deformaciones a lo largo del ensayo. En [4] pueden encontrarse más detalles de la campaña experimental.

Tabla 1. Matriz de ensayos experimental [4].

Designación	Cuantía geométrica (%)
13-170	0.51
16-170	0.71
19-170	1.00
16-110	1.69
16-170-3N	1.00

3.2 Modelización numérica mediante elementos finitos

Los tirantes de hormigón armado de la campaña experimental referida se modelizan mediante el método de los elementos finitos con el programa Abaqus®. Para ello, se utiliza una metodología que permite incluir la ley de tensión de adherencia-deslizamiento experimental en el modelo de elementos finitos, distinguiendo las componentes de adherencia provenientes de la interacción mecánica y de la fricción, mediante análisis inverso. Se utilizan elementos conectores (CONN3D2) y contactos superficie-superficie para la modelización de dicha interacción mecánica y fricción, respectivamente [5].

3.3 Comparación de resultados

Tanto para los resultados experimentales como para los numéricos, primero se comprueba la capacidad del modelo numérico para predecir las distribuciones de deformaciones del refuerzo a diferentes niveles de carga (validación a nivel local), y a continuación se comparan las curvas carga-deformación unitaria de los diferentes tirantes (validación a nivel global).

Las curvas de adherencia utilizadas, tanto para el modelo de diferencias finitas (en adelante MDF) como para el modelo de elementos finitos (en adelante MEF), han sido obtenidas mediante ensayo de pull-out en el laboratorio (ver Figura 1)[6].

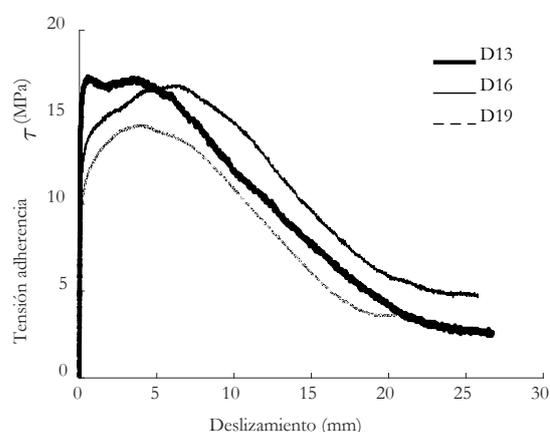


Figura 1. Curvas experimentales de tensión de adherencia-deslizamiento.

3.3.1. Validación mediante comparación de la distribución de deformaciones en el refuerzo

Para esta validación se utilizan los resultados correspondientes al tirante con fisuras inducidas (referencia 16-170-3N de la Tabla 1).

Con la finalidad de obtener resultados comparables a los experimentales, en las dos modelizaciones numéricas se impone el orden cronológico experimental de aparición de fisuras así como los valores experimentales de cargas de fisuración.

La comparación de los perfiles de deformaciones experimentales y los obtenidos mediante MDF y MEF, presentada en la Figura 2a, muestra como el MDF predice eficazmente

la distribución de deformaciones a lo largo el refuerzo durante el proceso de fisuración de un tirante de hormigón armado. La existencia de fisuras se refleja en los picos existentes en los perfiles de deformaciones del refuerzo.

3.3.2. Validación mediante comparación de la curva carga-deformación unitaria ($P-\epsilon$)

Para esta segunda validación se utilizan los resultados correspondientes a los tirantes sin fisuras inducidas (referencias 13-170, 16-170, 19-

170 y 16-110 de la Tabla 1). Las curvas de tensión de adherencia-deslizamiento consideradas tanto en las modelizaciones con MDF como en las modelizaciones con MEF se muestran en la Figura 1.

En los casos estudiados en este apartado, y a diferencia del apartado anterior, no existe la necesidad de replicar un patrón de fisuración. Es por ello que el MDF sigue su simplificación de aparición de fisuras en la sección media de cada bloque.

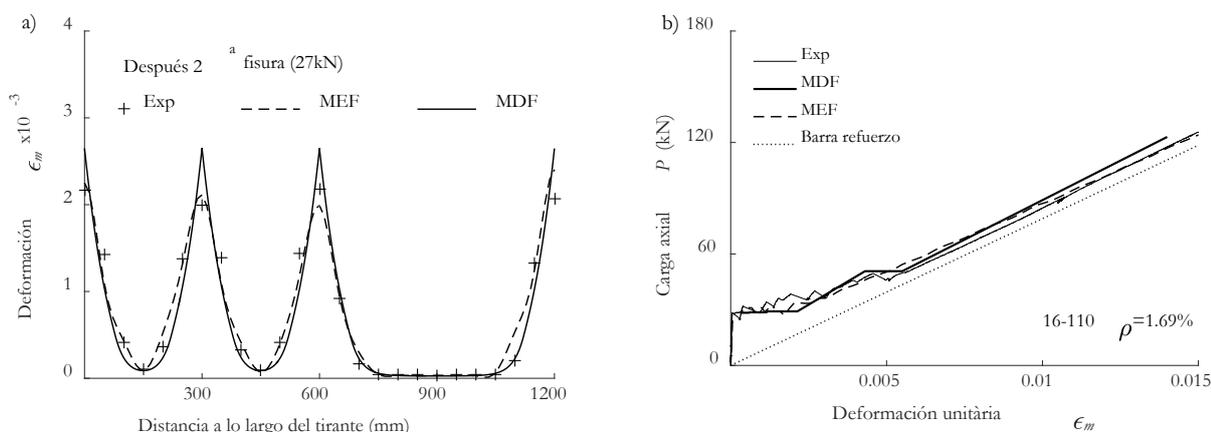


Figura 2. Comparativa de resultados del MDF con resultados experimentales y resultados del MEF: a) distribución de deformaciones del refuerzo después de la aparición de la segunda fisura y b) respuesta $P-\epsilon_m$.

En la Figura 2b se muestra la comparación de las respuestas carga-deformación unitaria experimentales y las obtenidas mediante los dos métodos numéricos (MDF y MEF). Nuevamente se confirma que los resultados obtenidos con el MDF se ajustan a los resultados experimentales. La aparición de nuevas fisuras se corresponde con el incremento en la deformación unitaria con carga constante.

Las validaciones realizadas confirman que el modelo basado en el MDF es una herramienta efectiva para el estudio del proceso de fisuración de estos elementos de hormigón armados. Cabe remarcar que, aunque la modelización mediante el MEF también ofrece resultados muy cercanos a los experimentales, tiene una complejidad y coste computacional mucho mayores. Con todo ello, se confirma que la modelización numérica con MDF es una herramienta efectiva y práctica

para la realización del análisis de elementos de hormigón considerando el efecto de la ley de adherencia entre los materiales. Asimismo, se muestra idóneo para el estudio del efecto de las variables que puedan influir en el fenómeno tenso-rigidez de elementos de hormigón armados a tracción.

4. Estudio paramétrico del efecto tenso-rigidez

En este apartado se presentan los resultados de un estudio paramétrico sobre las variables que puedan afectar al fenómeno tenso-rigidez de elementos de hormigón armado bajo cargas de tracción.

La adherencia-deslizamiento entre armadura y hormigón queda descrita a partir de la ecuación:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{\tau(x)p_r}{A_r E_r} (1 + n\rho) \quad (1)$$

donde $s(x)$ =deslizamiento a una distancia x del origen de coordenadas del modelo; $\tau(x)$ =tensión de adherencia entre hormigón y refuerzo a una distancia x del origen de coordenadas del modelo; p_r =perímetro de la barra de refuerzo; A_r =área de la sección transversal del refuerzo; E_r =módulo de elasticidad del refuerzo; n =ratio entre el módulo de elasticidad del refuerzo (E_r) y el del hormigón (E_h) y ρ =cuantía geométrica del tirante (es decir, $\rho=A_r/A_h$, siendo A_h el área de la sección transversal de hormigón).

En base a la Ecuación 1, las variables seleccionadas para el estudio paramétrico son: la relación entre módulos de elasticidad de refuerzo y hormigón (n), la resistencia del hormigón (f_h), la cuantía geométrica (ρ), el área de la sección transversal (A_h), el diámetro de la barra de refuerzo (d_r), la tensión de adherencia máxima (τ_m) y el perímetro de la barra de refuerzo (p_r).

Para el estudio paramétrico se considera la siguiente configuración inicial: sección cuadrada de lado 170mm, con una barra de refuerzo centrada de diámetro $d_r=19$ mm y módulo de elasticidad $E_r=40$ GPa. Se considera un hormigón con resistencia característica a compresión $f_{ck}=25$ MPa. Los valores de resistencia media a compresión (f_{cm}), resistencia media a tracción (f_{ctm}) y módulo de elasticidad del hormigón (E_{cm}) se calculan de acuerdo con Model Code 2010 [7]. Se considera una ley de tensión de adherencia-deslizamiento según Ecuación 2, asumiendo los valores $\alpha=0.4$, $s_r=1$ mm y τ_m según la Ecuación 3.

$$\tau = \tau_m \left(\frac{s}{s_1} \right)^\alpha \quad (2)$$

$$\tau_m = 2.5(f_{cm})^{0.5} \quad (3)$$

4.1 Efecto de la relación entre módulos de elasticidad de refuerzo y hormigón, n

Teniendo en cuenta que una de las principales diferencias entre refuerzo de acero y refuerzo de FRP es que estos últimos presentan una amplia franja de valores de módulos de elasticidad, se analiza su influencia sobre el fenómeno de tenso-rigidez. Nótese que el parámetro n aparece como una de las variables de la Ecuación 1.

Se realizan seis simulaciones con diferentes valores de n , en las que se mantiene constante el módulo de elasticidad del hormigón (calculado a partir de f_{ck}). Como resultado de estas combinaciones, se obtienen los valores: $n=1, 2, 3, 4, 5$ y 6 , que se corresponden a las modelizaciones RM1, RM2, RM3, RM4, RM5 y RM6, respectivamente.

Los resultados numéricos de estas seis simulaciones se presentan en la Figura 3a, usando valores normalizados de la tensión del hormigón y de su deformación media con respecto a la resistencia a tracción (f_{ct}) y al deformación unitaria correspondiente (ϵ_{ct}).

Se puede apreciar la influencia de n , siendo la tenso-rigidez mayor para valores menores de n y viceversa.

4.2 Efecto de la resistencia del hormigón, f_h

Para este estudio se realizan tres simulaciones con diferentes resistencias características a compresión: $f_{ck}=25, 40$ y 50 MPa, que se corresponden a las modelizaciones H25, H40 y 50, respectivamente. Para cada caso, las propiedades del hormigón y de la ley de adherencia (f_{ctm} , E_{cm} y τ_m) se calculan de acuerdo con [7], obteniendo así valores de $f_{ctm}=2.56, 3.51$ y 4.07 MPa, $E_{cm}=32.01, 36.27$ y 38.63 GPa y $\tau_m=14.36, 17.32$ y 19.04 MPa para el hormigón de resistencia a compresión de 25, 40 y 50MPa, respectivamente.

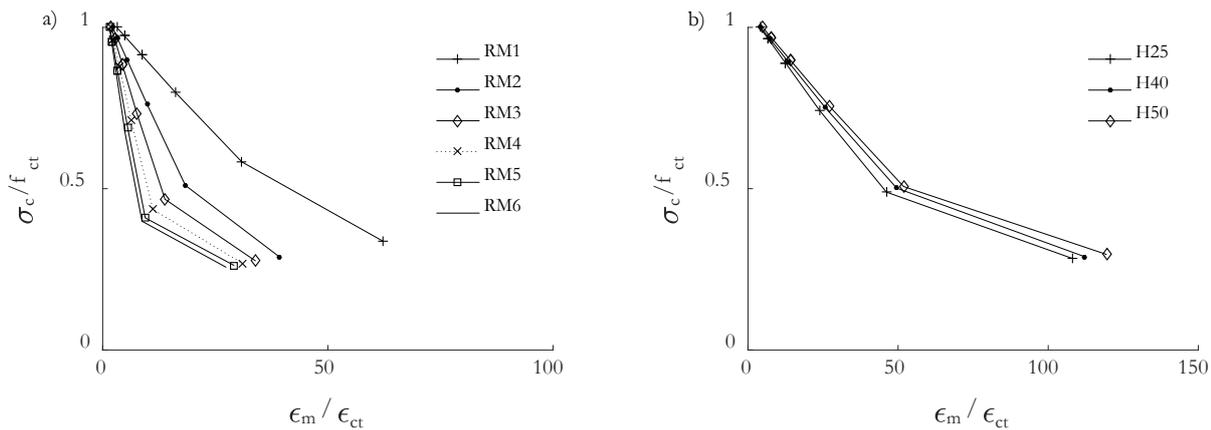


Figura 3. a) Efecto de la ratio entre módulos de elasticidad sobre el efecto tenso-rigidez y b) Efecto de la resistencia del hormigón sobre el efecto tenso-rigidez.

Los resultados numéricos de estas tres simulaciones se presentan en la Figura 3b, donde se observa que la resistencia del hormigón tiene poca influencia en el fenómeno del efecto tenso-rigidez.

4.3 Efecto de la cuantía geométrica, ρ

Este estudio se divide en tres partes. En la primera se mantiene constante el diámetro de la barra de refuerzo, pero se varía la dimensión de la sección transversal cuadrada de hormigón. En la segunda se mantiene constante la sección transversal de hormigón y se varía el diámetro de la barra de refuerzo. Finalmente, en la tercera se varían tanto la sección transversal de hormigón como el diámetro de la barra de refuerzo, generando así combinaciones en las que la cuantía geométrica se mantiene constante.

4.3.1. Efecto del área de hormigón, A_b

Se realizan cuatro simulaciones con diferentes valores de área de sección transversal de hormigón, en las que se mantiene constante el diámetro de la barra de refuerzo (d_r). Las cuantías geométricas obtenidas son $\rho=0.9, 1.5, 3$ y 4% , y se corresponden con las modelizaciones SH1, SH2, SH3 y SH4, respectivamente. Debe remarcarse que el primero de los casos (SH1) se corresponde con el caso H25 del apartado 4.2.

Se mantiene constante el área transversal de hormigón y se varía el diámetro de la barra de refuerzo.

Al igual que en el apartado anterior, las cuantías geométricas obtenidas son $\rho=0.9, 1.5, 3$ y 4% , y se corresponden con las modelizaciones DR1, DR2, DR3 y DR4, respectivamente. Nuevamente debe remarcarse que el primero de los casos (DR1) se corresponde con los casos H25 i SH1 de los apartados 4.2 y 4.3.1, respectivamente.

Los resultados numéricos, presentados en la Figura 4b, confirman la tendencia observada en el apartado 4.3.1., pudiéndose apreciar un claro efecto de ρ , siendo nuevamente la tenso-rigidez mayor para valores menores de ρ y viceversa.

4.3.3. Efecto del área de hormigón y diámetro de la barra de refuerzo, manteniendo ρ constante

Los resultados presentados en las Figuras 4a y 4b muestran que las diferencias en el fenómeno tenso-rigidez cuando se considera la

misma cuantía geométrica son mínimas (comparar los casos SH1 con DR1, SH2 con DR2, SH3 con DR3 y SH4 con DR4). Para corroborar esta observación, se realiza un tercer sub-estudio en el que se modifican tanto las dimensiones de la sección de hormigón como el diámetro de la barra de refuerzo, de tal manera que sus combinaciones representen la misma cuantía geométrica, igual a 1.5%. En la Tabla 2 se muestran las combinaciones consideradas, así como el nombre asignado a la modelización de

cada tirante. Los resultados numéricos se presentan en la Figura 4c.

Tabla 2. Combinaciones para el estudio de cuantía geométrica constante.

Tirante	Diámetro de barra (mm)	Sección de hormigón (mm)
CC1	12	7530
CC2	16	13404
CC3	19	18902

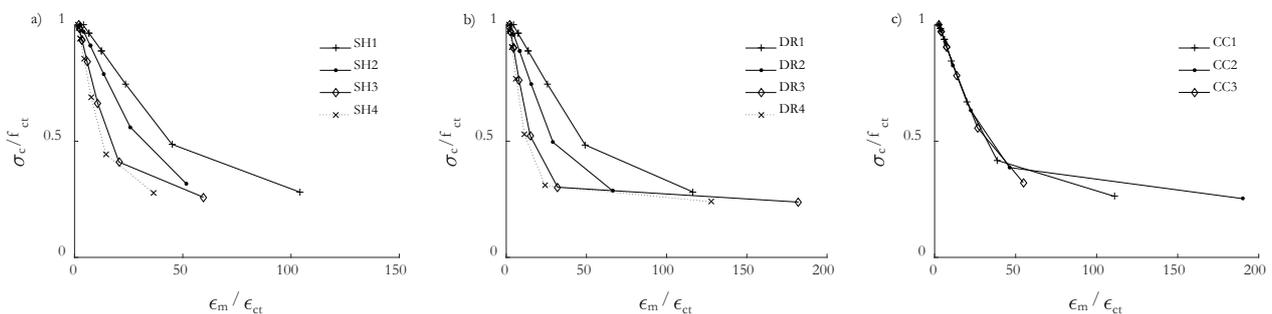


Figura 4. Efecto de la cuantía geométrica sobre el efecto tenso-rigidez: a) efecto del área de hormigón, b) efecto del área de refuerzo y c) combinaciones de diferentes áreas con ρ constante.

De los resultados presentados en las Figura 4 se confirma que el efecto tenso-rigidez claramente depende de la cuantía geométrica del tirante, mostrándose menos afectado por como las variables de área transversal de hormigón y diámetro de refuerzo de la barra (es decir, área transversal de refuerzo) se combinan para obtener una cuantía geométrica fijada.

4.4 Efecto de la tensión de adherencia máxima, τ_m

De acuerdo con la Ecuación 3, la máxima tensión de adherencia en hormigón armado con acero depende únicamente de la resistencia del hormigón. Sin embargo, resultados experimentales propios [6] indican que esta afirmación no puede ser extendida al hormigón armado con PRF.

En este apartado se realizan cuatro simulaciones con diferentes valores de tensión

de adherencia máxima. Basándose en la amplia franja de valores de máxima tensión de adherencia obtenidos en [6], para este estudio paramétrico se consideran tres valores intermedios de resistencia adherente: 5, 15 y 30MPa y un cuarto caso en el que se supone una tensión máxima de adherencia de 100MPa (valor inasumible en la realidad). Estas tensiones de adherencia máximas se corresponden con las simulaciones T5, T15, T30 y T100, respectivamente.

Los resultados numéricos, presentados en la Figura 5a, indican una contribución similar del fenómeno tenso-rigidez, independientemente de la máxima resistencia adherente considerada. Estos resultados coinciden con los encontrados en [8].

En la Figura 6a se presentan las distribuciones de deformaciones unitarias en el refuerzo de las cuatro simulaciones. Se puede observar que, a mayores valores de tensión de

adherencia máxima, menores longitudes de transferencia son necesarias.

4.5 Efecto del perímetro de la barra, p_r

La transmisión de fuerzas entre refuerzo y hormigón tiene lugar en la interficie entre estos dos materiales, es decir, tiene lugar en el perímetro del refuerzo.

Tradicionalmente siempre se han utilizado barras de refuerzo de sección circular, suponiendo esto un perímetro de $p_r = \pi d_r$. En este apartado se aplica el modelo numérico para estudiar diferentes formas de la sección transversal de refuerzo, y con ello diferentes perímetros, manteniendo siempre un valor de área de refuerzo constante e igual al que se obtendría con una sección circular de diámetro 19mm (ver Tabla 3). Cabe remarcar que algunos de los casos estudiados son físicamente imposibles de replicar en la realidad, pero son útiles para un mayor énfasis en el efecto individual y la tendencia de la variación del perímetro de barra (aislando el efecto de área de refuerzo).

Tabla 3. Combinaciones para el estudio del perímetro de barra de refuerzo.

Tirante	Perímetro (mm)	Forma de la sección
PER1	30	Indefinida
PER2	59.7	Circular
PER3	84.3	Rectangular, $b=4a$
PER4	100	Indefinida
PER5	150	Indefinida

Los resultados numéricos de este estudio se muestran en la Figura 5b. Al igual que pasa en el apartado anterior, el cambio del perímetro en el que tiene lugar la interacción refuerzo-hormigón no tiene efectos visibles en la tenso-rigidez. Sin embargo, y al igual que pasa en el

caso anterior, las diferencias sí son visibles cuando se analizan las distribuciones de deformaciones del refuerzo a lo largo del eje longitudinal del tirante (ver Figura 6b).

Así, según los resultados presentados en las Figuras 5a y 5b, el fenómeno tenso-rigidez no se encuentra afectado por cambios de la tensión de adherencia máxima o del perímetro de contacto entre refuerzo y hormigón. Sin embargo, la transmisión de fuerzas entre los dos materiales se encuentra gobernada por ambas variables, obteniéndose así diferentes valores de longitudes de transferencia (ver Figuras 6a y 6b).

Esto lleva a un último estudio en el que se modifican los valores de tensión de adherencia máxima y perímetro de contacto entre hormigón y refuerzo de manera que su producto se mantenga constante e igual a un factor de transmisión de fuerza de 750N/mm (ver Tabla 4). Se debe recordar que en estas simulaciones se mantiene constante la cuantía geométrica, ya que no se modifican las áreas transversales de ninguno de los dos materiales.

Tabla 4. Combinaciones para un factor de transmisión de fuerza constante de 750N/mm.

Tirante	Tensión de adherencia máxima (MPa)	Perímetro de contacto (mm)
RAT1	5	150
RAT2	25	30
RAT3	50	15

Las Figuras 5c y 6c muestran los resultados numéricos en términos de fenómeno tenso-rigidez y distribuciones de deformaciones en el refuerzo, respectivamente. Se confirma que todos los casos muestran tener el mismo efecto tenso-rigidez, así como la misma transmisión de fuerzas y, por lo tanto, se obtienen iguales longitudes de transferencia.

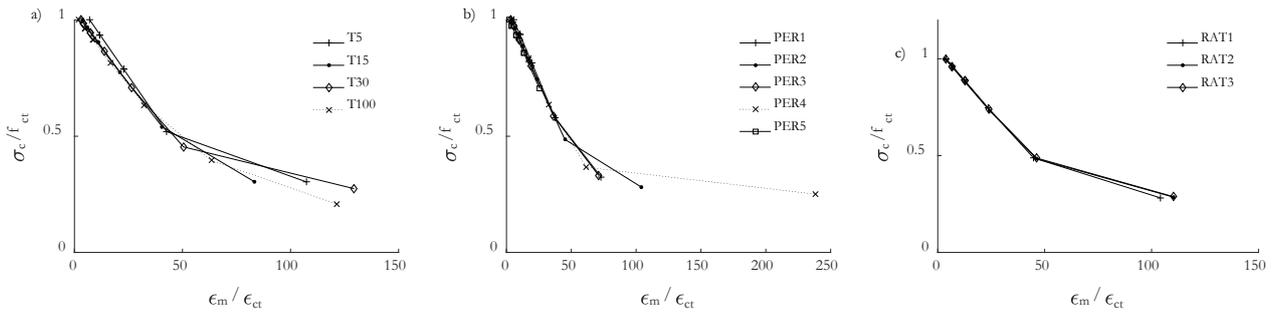


Figura 5. Efecto tenso-rigidez para diferentes propiedades de la interface de adherencia: a) efecto de la tensión de adherencia máxima, b) efecto del perímetro de la barra de refuerzo y c) combinaciones de diferentes tensiones y perímetros con factor de transmisión de fuerzas constante.

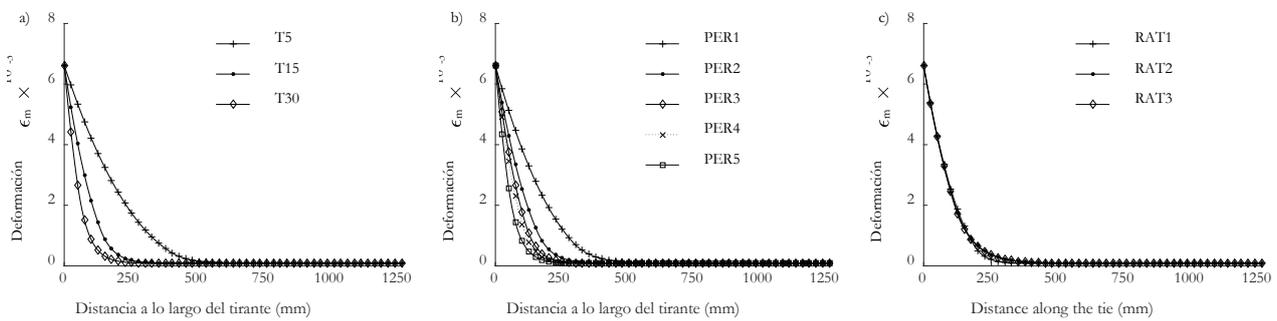


Figura 6. Distribución de deformaciones del refuerzo para diferentes valores de: a) tensión de adherencia máxima, b) perímetro de barra de refuerzo y c) combinaciones de diferentes tensiones y perímetros con factor de transmisión de fuerzas constante.

5. Conclusiones

En esta comunicación se presenta un modelo numérico de diferencias finitas (MDF) para la simulación de elementos de hormigón armados sometidos a cargas de tracción. El modelo se obtiene a partir de un análisis no lineal del proceso de fisuración de tirantes, basado en la ley de adherencia entre los dos materiales (hormigón y refuerzo), pudiéndose así aplicar a cualquier tipo de refuerzo (acero o PRF).

La validación del modelo se realiza mediante comparación con resultados experimentales propios, así como con resultados obtenidos de la simulación numérica mediante el método de los elementos finitos (MEF), obteniéndose un buen ajuste tanto a nivel local (predicción de la distribución de deformaciones

en el refuerzo) como a nivel global (predicción de la curva carga-deformación del tirante).

El modelo presentado se utiliza para realizar un estudio paramétrico sobre el efecto tenso-rigidez en elementos de hormigón armado sometidos a tracción, que permita conocer cuáles son las variables que lo afectan. De este estudio se concluye que el efecto tenso-rigidez es básicamente inversamente proporcional al producto $n\rho$, obteniéndose un mayor efecto tenso-rigidez para menores valores de $n\rho$ y viceversa. Así mismo, se observa que el efecto tenso-rigidez se muestra menos afectado por cambios en variables como la resistencia del hormigón, la tensión de adherencia máxima o el perímetro de barra. Sin embargo, la combinación

de tensión de adherencia máxima y perímetro de la barra de refuerzo, definido en esta comunicación como el factor de transmisión de fuerzas, tiene un claro efecto sobre la longitud de transferencia y, en consecuencia, sobre la distancia entre fisuras del tirante.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación obtenida del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través de los proyectos BIA2017-84975-C2-2-P y BIA2017-84975-C2-1-P.

Referencias

- [1] Fédération International du Béton. FRP reinforcement in RC structures. Lausanne, Switzerland: 2007.
- [2] C. Barris, L. Torres, M. Bena, K. Pilakoutas, M. Guadagnini, Serviceability limit state of FRP RC beams, *Advances in Structural Engineering*. 15(4) (2012) 653-664.
- [3] M. Baena, L. Torres, A. Turon, C. Miàs, Analysis of cracking behaviour and tension stiffening in FRP reinforced concrete tensile elements, *Composites: Part B - Engineering*. 45(1) (2013) 1360-1367.
- [4] M. Baena, L. Torres, A. Turon, C. Miàs, Experimental study and code predictions of fibre reinforced polymer reinforced concrete (FRP RC) tensile members, *Composite Structures*. 93(10) (2011) 2511-2520.
- [5] I. Vilanova, L. Torres, M. Baena, M. Llorens, Numerical simulation of bond-slip interface and tension stiffening in GFRP RC tensile elements, *Composite Structures*. 153 (2016) 504-513.
- [6] M. Baena, L. Torres, A. Turon, C. Barris, Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test, *Composites: Part B - Engineering*. 40(8) (2009) 784-797.
- [7] FIB. Model Code 2010. *Fib Bulletin* 65. Lausanne, Switzerland: 2012.
- [8] J. Pedziwiat, The influence of bond between concrete and reinforcement on tension stiffening effect, *Magazine of Concrete Research*. 61(6) (2009) 437-443.