

Influencia de la relación tensión-deslizamiento en el comportamiento de la interfase FRP-Hormigón

J. López,

Departamento de Ingeniería Civil-Construcción, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España.

J. Fernández,

Departamento de Ingeniería Civil-Construcción, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España.

E. González

Departamento de Ingeniería Civil-Construcción, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España.

RESUMEN

En el presente trabajo se han analizado los modelos tensión-deslizamiento más divulgados para estudiar las tensiones en la interfase FRP-Hormigón y la carga máxima mediante su implementación en una de las principales técnicas de cálculo numérico fácilmente programable y aplicable para el caso en el que se tiene tracción en ambos extremos de la banda FRP. Los resultados se comparan con las soluciones analíticas encontradas en la literatura, las cuales están limitadas a los casos de una función tensión-deslizamiento lineal y bilineal. Finalmente, se contrasta la teoría con los resultados experimentales obtenidos de ensayos de tipología análoga al método *beam-test* empleado comúnmente para medir la adherencia de barras de acero.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de materiales compuestos para el refuerzo, reparación y rehabilitación de estructuras de hormigón se ha convertido en una técnica muy recurrente en la última década. Con independencia de la técnica del refuerzo, uno de los principales condicionantes del diseño es el fallo de la adherencia entre el hormigón y el material compuesto, atribuida generalmente a las tensiones en la interfase. Como resultado, existen varios modelos para la transferencia de las tensiones entre el material compuesto y el hormigón, así como diversos métodos de ensayo. En la mayoría de los casos, el análisis del comportamiento de la interfase se realiza definiendo su capacidad para adoptar tensiones en función del desplazamiento relativo de los adherentes (función tensión-deslizamiento) debido a que el espesor de la capa del adhesivo es tan pequeño y variable que no resulta adecuado modelizarlo como elemento independiente.

2. FUNCIÓN TENSIÓN-DESLIZAMIENTO

Existen numerosos modelos propuestos por la comunidad de investigadores, entre los que destacan los de Neubauer U., et al. (1999), Nakaba K., et al. (2001), Monti G., et al.

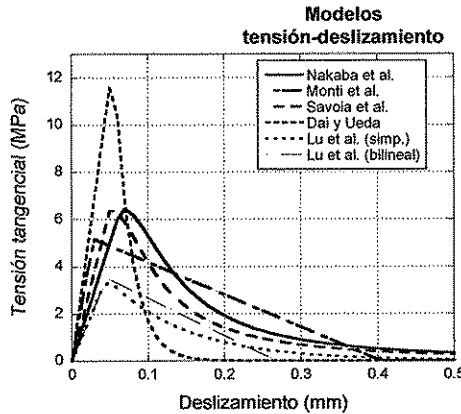


Figura 1 Funciones tensión-deslizamiento.

mayoría de las investigaciones indican que el fallo se produce en el hormigón, en una capa de 1 a 2 mm de espesor. En la Figura 1 están representadas las funciones tensión-deslizamiento analizadas en el presente trabajo con los datos de los ensayos beam-test.

3. TENSIONES EN LA INTERFASE FRP-HORMIGÓN

Las expresiones analíticas encontradas en la literatura que definen las tensiones en la interfase y que siguen el enfoque descrito anteriormente, están limitadas a relaciones tensión deslizamiento lineal o bilineal (Teng J. G., et al. (2006); Wang Jialai. (2006)). Además las soluciones presentadas por los investigadores necesariamente están separadas por etapas. El análisis está basado en asumir un comportamiento elástico lineal de los materiales y adoptar como ecuación constitutiva una función tensión-deslizamiento (lineal o bilineal) que caracteriza a la interfase, de esta manera, para una ley tensión-deslizamiento bilineal, se tiene que la interfase experimenta inicialmente una etapa elástica (E), posteriormente una etapa de ablandamiento (A) para finalizar con el despegue (D). A lo largo de la longitud adherida l_b la interfase puede experimentar una, dos o las tres etapas para un determinado valor de la carga T_p , dependiendo de la longitud adherida, los parámetros de la relación tensión-deslizamiento y el valor de la carga. Si ambos extremos del refuerzo están sometidos a tracción, se tendrán distribuciones en ambos lados del bloque de hormigón; sin embargo, en función de la relación β de las cargas sobre los extremos de la banda FRP y la

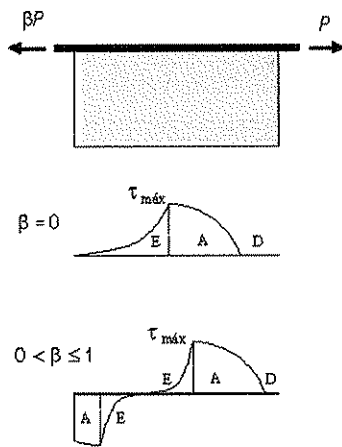


Figura 2 Etapas del proceso de despegue.

(2003), Savoia M., et al. (2003), Dai J. G. and Ueda T. (2003), Lu X. Z., et al. (2005). Todos los modelos se caracterizan por una rama ascendente hasta alcanzar la tensión máxima asociada a un deslizamiento δ_0 , seguida de un “ablandamiento” (atribuido a la microfisuración del hormigón) hasta que la tensión es nula para un deslizamiento δ_u .

El cálculo de los parámetros ha sido un tema de constante investigación, en la mayoría de los modelos las variables son la resistencia a compresión del hormigón, la geometría y propiedades mecánicas del refuerzo. Cabe señalar que la

mayoría de las investigaciones indican que el fallo se produce en el hormigón, en una capa de 1 a 2 mm de espesor. En la Figura 1 están representadas las funciones tensión-deslizamiento analizadas en el presente trabajo con los datos de los ensayos beam-test.

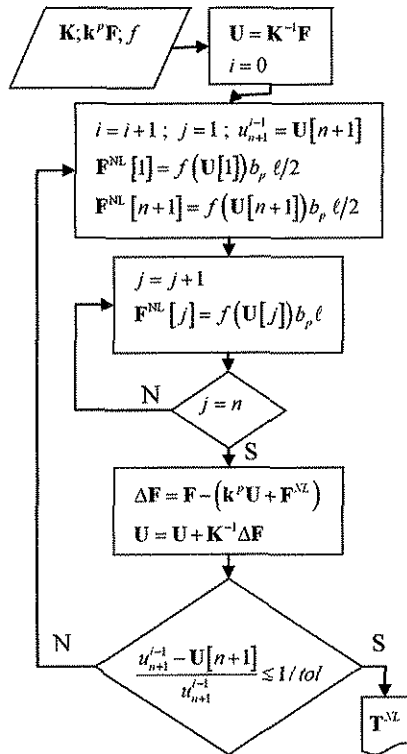


Figura 3 Diagrama de flujo para el análisis de las tensiones en la interfase.

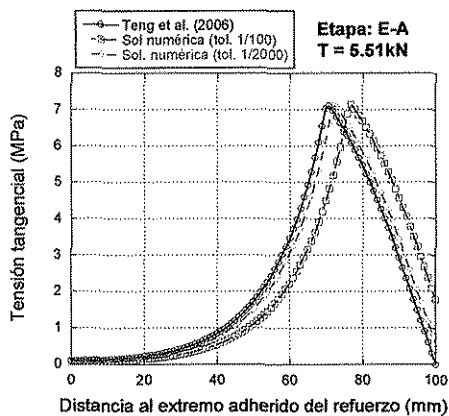


Figura 4 Solución analítica vs solución numérica.

longitud del bloque, se tendrán diferentes configuraciones de zonas tensionales. Nótese que cuando la ley tensión-deslizamiento es lineal (sólo rama descendente), la etapa (E) es omitida.

Una alternativa para analizar las tensiones en la interfase para un determinado modelo tensión-deslizamiento, sin necesidad de recurrir a un programa sofisticado de elementos finitos, es implantar dicha función en un método numérico de análisis no lineal, modelizando la interfase con elementos tipo muelle sustentados en un medio rígido (soporte de hormigón), el laminado FRP como elemento que sólo admite tensión axial y asumiendo que la función tensión-deslizamiento tiene un comportamiento lineal hasta alcanzar la tensión máxima τ_{max} . El diagrama de flujo se muestra en la Figura 3. K es la matriz de rigidez del sistema, k^p la matriz de rigidez del elemento FRP, U es el vector de desplazamientos, f es la función tensión-deslizamiento, b_p es el ancho del refuerzo, l es la separación entre nodos, F^{NL} y T^{NL} son respectivamente los vectores de fuerzas y tensiones de la aproximación no lineal.

En la Figura 4 se muestra una comparación entre la solución analítica de Teng J. G., et al. (2006) y la solución numérica de un ejemplo proporcionado por el mismo autor cuyos datos son: $E_p = 256$ GPa, $t_p = 0.165$ mm, $b_p = 25$ mm y $L = 100$ mm. Los parámetros de la ley tensión-deslizamiento bilineal son $\delta_u = 0.16$ mm, $\delta_o = 0.034$ mm, $\tau_{max} = 7.2$ MPa.

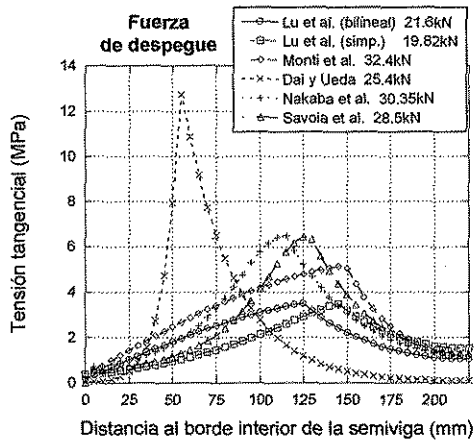


Figura 5 Tensiones tangenciales dadas por las diferentes funciones tensión-deslizamiento.

debido a que se alcanza la tensión máxima en un deslizamiento muy pequeño en comparación con el deslizamiento que da inicio al despegue. La Figura 5 muestra la distribución de las tensión tangenciales dada por cada una de las funciones tensión-deslizamiento al inicio del despegue.

4. COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL

Se realizaron 5 beam-test para obtener la carga de despegue. La geometría de las piezas está recogida en la Norma UNE-EN 10080 (viga de ensayo tipo A). El refuerzo se

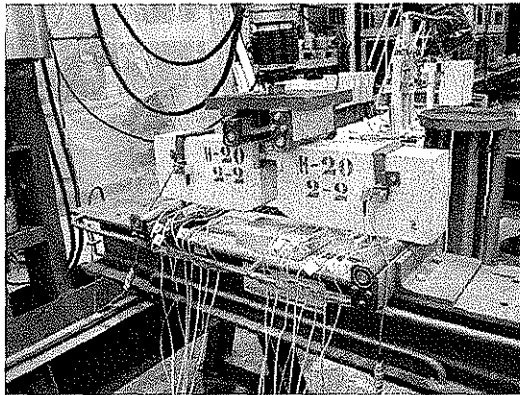


Figura 6 Pieza H20-2-2.

A partir del análisis anterior, la solución numérica se considera lo suficientemente precisa a fin de evaluar diferentes formas del ablandamiento (*softening*) de la ley tensión-deslizamiento. En el presente trabajo no se analiza el modelo de Neubauer U., et al. (1999) debido a que sólo toma en cuenta la rama ascendente, tampoco se ha analizado el modelo preciso de Lu X. Z., et al. (2005) debido a que la única diferencia con el modelo simplificado es la rama ascendente (en el análisis numérico se asume un comportamiento lineal en todos los casos), además, los autores consideran que la forma no lineal de la rama ascendente no es importante

adhirió una longitud de 220 mm en cada semiviga. Para estudiar las tensiones en la intertase en cada semiviga se dispusieron ocho bandas extensométricas. Los escalones de carga se establecieron para incrementos de la tensión media de adherencia de 0.15 MPa. La resistencia a compresión del hormigón el día del ensayo fue de 25.9 MPa y la de tracción de 2.35 MPa. En la Figura 5 se muestra el ensayo de la pieza H20-2-2.

La Tabla 1 recoge los valores de la carga de despegue P_d y la correspondiente tracción sobre la banda FRP T_{pd} , tanto de los ensayos como los obtenidos del análisis del apartado anterior. La tensión tangencial que se transmite al hormigón se calcula

indirectamente a partir de la deformación de la banda FRP en dos puntos de medida consecutivos, la diferencia de dichas deformaciones da una aproximación de la fuerza que se transmite al hormigón a lo largo de su separación. En la Figura 7 se muestran las distribuciones de las tensiones tangenciales para el escalón de carga 11 dadas por cada uno de los modelos tensión-deslizamiento y las obtenidas de los ensayos, en la semiviga en la que se produjo el despegue.

Tabla 1. Carga de despegue.

	H20 2-1	H20 2-2	H20 2-3	H20 2-4	H20 2-5	Nakaba et al. (2001)	Dai et al. (2003)	Savoia et al. (2003)	Monti et al. (2003)	Lu et al. (2005) (bilineal)	Lu et al. (2005) (simp.)
P_d (kN)	30.29	30.29	34.08	30.29	30.29	36.98	30.90	34.79	39.42	26.28	24.94
T_{pd} (kN)	24.89	24.89	28.01	24.89	24.89	30.35	25.40	28.50	32.40	21.60	19.82

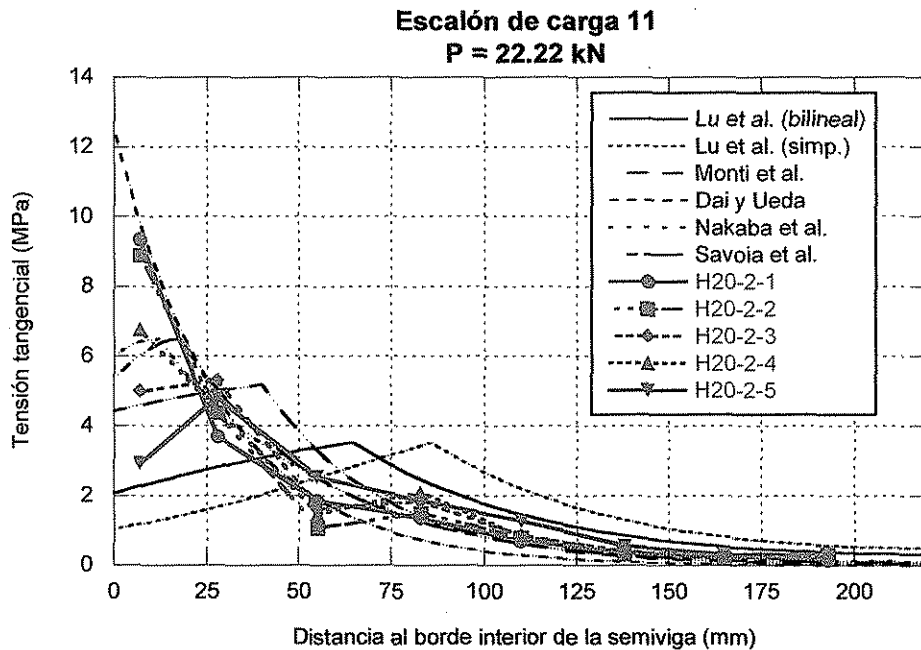


Figura 7 Tensiones tangenciales.

5. CONCLUSIONES

A partir del análisis realizado y aun teniendo en cuenta el número de ensayos pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- Los modelos que incluyen las propiedades mecánicas del adhesivo, pueden alejarse de la realidad cuando el espesor es muy pequeño debido a que no se tiene certeza de su verdadero valor ni de su uniformidad, como sucede en el modelo de Dai J. G., et al. (2003) del que se obtiene una tensión máxima muy por encima de los valores comunes; no obstante, debido a la forma de la función tensión-deslizamiento, este hecho no se traslada a la fuerza de despegue.
- De los modelos que se obtuvieron valores de la fuerza de despegue cercana a los valores experimentales (Dai J. G., et al. (2003), Savoia et al. (2003) y Lu X. Z., et al. (2005)), la distribución de las tensiones tangenciales difiere significativamente. Esta diferencia se observa aun entre los propios resultados experimentales de las piezas que fallaron a la misma carga, debido en gran parte a la incertidumbre que encierra el proceso de fisuración en el hormigón, pues el fallo se produjo en todos los casos en una capa de 1 a 2mm de espesor del sustrato de hormigón.
- En vista de los resultados obtenidos, los autores consideran oportuno avanzar en la experimentación aumentando el abanico de resistencias del hormigón y analizando diferentes espesores del adhesivo.

REFERENCIAS

- DAI J. G. and UEDA T. 2003. Local bond stress slip relations for FRP sheets-concrete interfaces. *Fibre-reinforcement polymer: Reinforcement for concrete structures, vols 1 and 2, proceedings*. pp. 143-152.
- LU X. Z., TENG J. G., YE L. P. and JIANG J. J. 2005. Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Engineering structures*. Vol. 27, No. 6, pp. 920-937.
- MONTI G., RENZELLI M. and LUCIANI P. 2003. FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones. *Fibre-reinforcement polymer: Reinforcement for concrete structures, vols 1 and 2, proceedings*. pp. 183-192.
- NAKABA K., KANAKUBO T., FURUTA T. and YOSHIZAWA H. 2001. Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete. *ACI structural journal*. Vol. 98, No. 3, pp. 359-367.
- NEUBAUER U. and ROSTASY F. S. 1999. Bond failure of concrete fiber reinforced polymer plates at inclined cracks—experiments and fracture mechanics model. *Special publication*. Vol. 188, pp. 369-382.
- SAVOIA M., FERRACUTI B. and MAZZOTTI C. 2003. Non linear bond-slip law for FRP-concrete interface. *Fibre-reinforcement polymer: Reinforcement for concrete structures, vols 1 and 2, proceedings*. pp. 163-172.
- TENG J. G., YUAN H. and CHEN J. F. 2006. FRP-to-concrete interfaces between two adjacent cracks: Theoretical model for debonding failure. *International journal of solids and structures*. Vol. 43, No. 18-19, pp. 5750-5778.
- WANG JIALAI. 2007. Cohesive-bridging zone model of FRP-concrete interface debonding. *Engineering fracture mechanics*. Vol. 74, No. 17, pp. 2643-2658.