

## INFLUENCIA DE LA FRACTURA DEL HORMIGÓN EN LA TENSIÓN TANGENCIAL DESARROLLADA EN LA INTERCARA DE PROBETAS DE HORMIGÓN CON ALAMBRE PRETESO.

J. M. Benítez<sup>1</sup>, J. C. Gálvez<sup>2</sup>, B. S. Tork<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Castilla La Mancha, Avda. Camilo José Cela s/n 13071 Ciudad Real, España.

E-mail: josemaria.benitez@uclm.es

Tfno: 926 29 53 00 Ext. 3296. Fax: 926 29 53 91

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Civil: Construcción. Materiales de Construcción, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Profesor Aranguren s/n,

28040 Madrid, España.

jcgalvez@caminos.upm.es

<sup>3</sup> Structural Department. Faculty of Engineering. Ain Shams University.

El Cairo. Egipto

### RESUMEN

La eficacia de la transmisión de la fuerza de pretensado, en elementos de hormigón, se puede ver mermada por la posible fisuración longitudinal del recubrimiento. En la actualidad no se disponen de datos experimentales que evidencien la influencia de la fractura del hormigón en la tensión de adherencia desarrollada en la intercara acero-hormigón durante el destesado. En este trabajo se propone un ensayo que permite evaluar dicha tensión de adherencia durante el proceso de destesado, poniéndose de manifiesto que ésta mejora ostensiblemente cuando el recubrimiento del hormigón permanece sin fisurar.

### ABSTRACT

The efficacy of prestressing force transmission, in precast prestressed concrete elements, is directly related with the cover split cracking. Nowadays, there are not experimental results available which show the concrete cracking influence in the bond stress developed at the concrete and steel interface during the release of the prestressing force. This paper proposes a new test for the bond stress evaluation during the prestressing force release. It shows that the bond improves when the concrete cover remains intact.

**ÁREAS TEMÁTICAS PROPUESTAS:** Aplicaciones Prácticas en Ingeniería.

**PALABRAS CLAVE:** Hormigón, Fractura, Adherencia

### 1. INTRODUCCIÓN

La relevancia de la prefabricación de elementos estructurales es cada vez mayor en el mundo de la construcción. El carácter industrial de la actividad de los prefabricados es capaz de hacer frente, por una parte, al creciente encarecimiento de la mano de obra, y por otra, a la necesidad de disminuir los plazos de ejecución de las obras. Valga como ejemplo el ámbito de la edificación, donde la mayoría de los forjados están contruidos con viguetas, semiviguetas y losas alveorales, todas ellas prefabricadas y pretensadas.

Estos elementos suelen ser rectos y fabricados en mesas de prefabricación, donde se disponen las armaduras, alambres o cordones, para que una vez tesadas sean hormigonadas, sometiendo posteriormente todo el conjunto a un proceso de curado acelerado de calor y

temperatura. Una vez realizadas las anteriores operaciones se procede al corte de las armaduras pretesas, para que transmitan al hormigón la fuerza de pretensado [1]. La adherencia hormigón-acero es la responsable de la transmisión de esas tensiones.

Durante la transferencia del pretensado, la adherencia se ve favorecida por un doble efecto: 1) al producirse el destesado se incrementa el diámetro de la armadura por efecto Poisson y 2) al intentar deslizar el alambre, las grafilas provocan una compresión en el hormigón, tal y como se observa en la Figura 1, la cual puede ser descompuesta según los ejes perpendicular y paralelo a la directriz de la armadura. De esa manera, la componente perpendicular al acero estará en equilibrio con el anillo de tracciones mostrado en la Figura 1, mientras que la componente paralela a la directriz, denominada *tensión tangencial o de adherencia*, se

opondrá al deslizamiento relativo entre el hormigón y el acero. Aunque este efecto de cuña provocado por las grafilas parece favorable, no lo es si el anillo de tracciones alcanza la resistencia a tracción del hormigón, ya que provocaría la fisuración longitudinal del mismo, como se muestra en la Figura 2, disminuyendo así la adherencia entre los dos materiales [4-6].

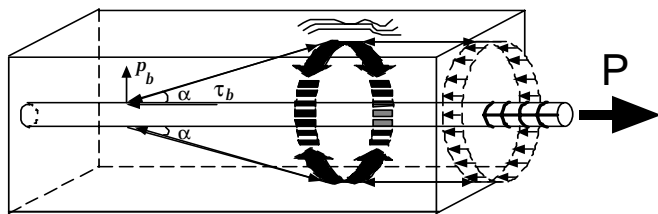


Figura 1. Esquema de compresiones en el hormigón propuesto por Teffers [7].

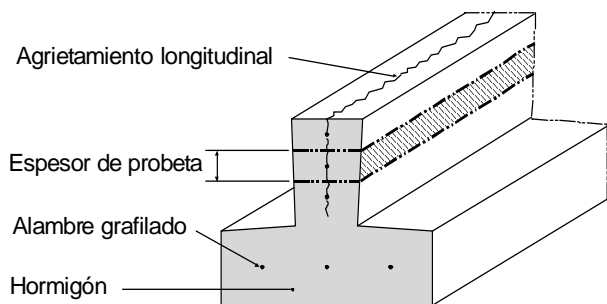


Figura 2. Esquema del agrietamiento longitudinal de una vigueta, en donde se muestra el espesor de la probeta adoptado.

Para poder evaluar esa capacidad adherente, combinadamente o no con la fisuración longitudinal del hormigón, es necesario disponer de datos experimentales que permitan determinar la tensión tangencial y estudiar su evolución durante el proceso de destesado.

En este trabajo se presenta un ensayo que permite evaluar la evolución de la adherencia, entre el hormigón y el alambre de pretensado, durante el destesado en función de la profundidad de la grafila, del recubrimiento del hormigón y de la posible fisuración por hendimiento del hormigón, proporcionando unos resultados novedosos al no existir en la actualidad ni experimentación ni expresiones precisas para evaluar la tensión de adherencia en función de las variables mencionadas.

## 2. MATERIALES EMPLEADOS Y FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

En total se fabricaron 36 probetas con las dimensiones especificadas en la Figura 3. La longitud adherente elegida en todas las probetas fue aquella que

garantizara que la tensión tangencial desarrollada en la intercara acero-hormigón fuera constante, eligiéndose para ello una longitud adherente de  $6\phi$ , siendo  $\phi$  el diámetro de la armadura.

A pesar de que las caras de la probeta y de la superficie sobre la que se apoyaba durante el ensayo estaban rectificadas, se dispusieron entre ambas unas bandas de teflón cuyo fin era disminuir el rozamiento entre las caras en contacto. Un leve defecto en la disposición del teflón podría provocar una flexión que fracturase el hormigón, por lo que se decidió fabricar 18 probetas con una altura de  $6\phi$ , y las otras 18 con una altura de  $20\text{mm}+6\phi+20\text{mm}$ , de tal manera que en ambos casos la longitud adherente fuera siempre  $6\phi$ . Mediante el incremento de la altura, a través de los dos tramos no adherentes de 20 mm, se pretendía reducir la capacidad de flexión del prisma de hormigón resultante.

El alambre que se utilizó fue Y1770 C con un diámetro de 4 mm y con tres profundidades de grafila, tal y como se muestra en la Tabla 1. Se fabricaron las probetas con una anchura constante de 60 mm, pero con dos tipos de recubrimiento, uno de  $3.25\phi$  y  $2.25\phi$ .

El procedimiento de fabricación consistió en la introducción, en un bastidor, de un alambre que posteriormente se traccionó, mediante una máquina servocontrolada, hasta alcanzar una carga de 17 kN. Una vez alcanzada la carga, el alambre quedó unido al bastidor por su parte inferior a través de un sistema de cuña y barrilete, materializándose el anclaje superior mediante una pieza roscada desplazable según la dirección de la armadura, tal y como aparece en la Figura 4. Seguidamente se transfirió toda la carga al bastidor a través de los anclajes descritos, controlándose en todo momento la tensión de la armadura a través de un extensómetro resistivo adosado a la zona central del alambre.

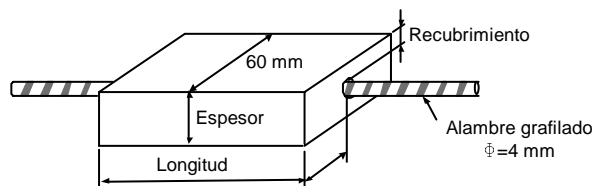


Figura 3. Dimensiones de las probetas.

Finalmente se acoplaron al bastidor los moldes de caras rectificadas mediante un sistema de tornillos niveladores, los cuales garantizaban el paralelismo y perpendicularidad entre las caras del molde y la armadura. Para materializar las zonas no adherentes, en las probetas de mayor longitud, se dispusieron, antes del hormigonado, en los extremos de las probetas y alrededor del alambre, dos tubos, de 20 mm de longitud cada uno, de material elastómero con coeficiente de

dilatación lineal negativo, de tal forma que al calentarlos la armadura quedaba totalmente protegida por ellos, retirándolos posteriormente una vez hormigonada la pieza.

En la Tabla 2 se recogen las características mecánicas de los materiales empleados.

Denominación	Profundidad de la grafila (mm)
Grafila ligera	0.024-0.031
Grafila mediana	0.074-0.077
Grafila profunda	0.117-0.130

Tabla 1. Características geométricas de las grafilas.

Hormigón	Acero de pretensar
$E = 22 \text{ GPa}$	$E = 193 \text{ GPa}$
$f_{ck} = 32 \text{ MPa}$	$\sigma_{0.2} = 1755 \text{ MPa}$
$f_{ct} = 3.4 \text{ MPa}$	$\sigma_u = 1935 \text{ MPa}$
$G_F = 113 \text{ N/m}$	$\epsilon_u = 5.25 \%$

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los materiales.

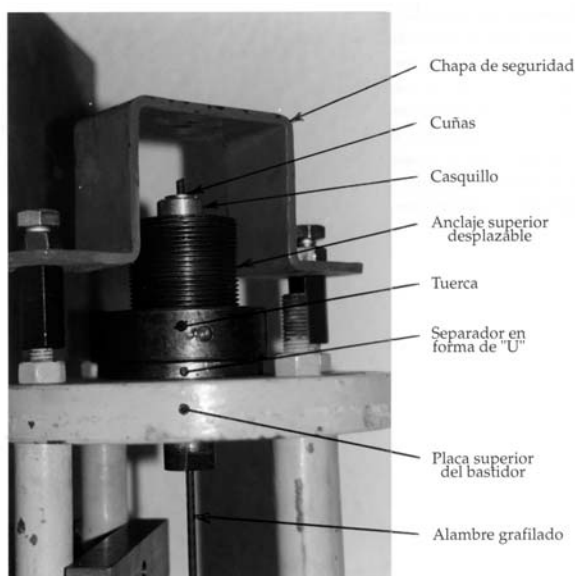


Figura. 4. Dispositivo de anclaje a la parte superior del bastidor.

### 3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

El ensayo se realizó en dos etapas sucesivas: en una primera se transmitió toda la fuerza de pretensado del bastidor a la máquina servocontrolada, mientras que en la segunda fase se transfirió la fuerza de pretensado de la máquina a la probeta de hormigón.

En la primera parte del ensayo, el bastidor se unió a la parte inferior de la máquina, mientras que la unión con la parte superior se realizó a través del atornillamiento de la rosca del anclaje superior del bastidor al pistón de la máquina. A continuación se desplazó hacia arriba el pistón a una velocidad de 0.1 mm/min hasta que se alcanzó una carga de 17 kN, momento en el que tanto el bastidor como la probeta quedaban libres de carga, quedando transferida en su totalidad a la máquina de ensayos. En ese momento se retiró el pasador en forma de "U" del anclaje superior del alambre.

En la segunda fase se desplazó hacia abajo el pistón, a una velocidad de 0.3 mm/min, para que se transmitiera la carga de pretensado de la máquina al hormigón a través del acero. A medida que descendía el pistón se iban liberando los extremos del acero, concluyéndose el ensayo al quedar descargados totalmente.

Durante el ensayo se midieron las siguientes variables:

- Carga  $P$  aplicada por la máquina de ensayos.
- Desplazamiento del pistón.
- Acortamiento longitudinal del hormigón. Se midió en dos puntos equidistantes de uno de los planos de simetría vertical de la probeta, obteniéndose el promedio.
- Deslizamiento relativo del alambre con respecto al hormigón.
- Acortamiento del alambre en dos secciones, una por encima de la probeta y otra por debajo. Mediante estos registros se pudieron obtener las fuerzas por encima y por debajo del hormigón, resultando de la diferencia de ambas la fuerza de rozamiento entre alambre y hormigón.
- Apertura de la fisura longitudinal que pudiera aparecer (COD).

En la Figura 5 se puede apreciar la instrumentación de la probeta con todos los extensómetros que recogen las medidas de las variables antes mencionadas.

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido a la gran cantidad de resultados, se han representado sólo aquellos correspondientes a las grafilas más y menos profundas, distinguiendo en trazo grueso aquellas probetas cuyos registros del COD han sido nulos y por consiguiente no han experimentado fisuración longitudinal.

En las Figuras 6 y 7 se muestran los resultados de los ensayos correspondientes a probetas de recubrimiento  $2.25\phi$  y 24 mm de longitud. En ellas se aprecia que el fallo de la adherencia se produce para valores de la tensión tangencial mayores en el caso de utilizar la

grafila profunda, lo que se traduce en un mayor acortamiento de la probeta. Si se compara la evolución de la adherencia después de su deterioro, se observa la tendencia creciente de la misma en el caso de que no se produzca fisuración longitudinal, mientras que al existir este tipo de fallo, el descenso de la tensión de adherencia es evidente. La explicación se basa en el hecho de que el hormigón, al no fisurarse mantiene su capacidad de confinamiento, con lo que unido al aumento de diámetro por efecto Poisson, se desarrolla en la intercara un rozamiento que favorece el crecimiento de la tensión tangencial.

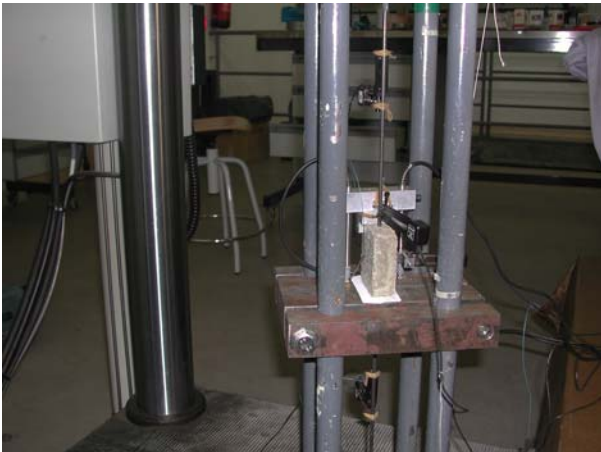


Figura. 5. Dispositivo de ensayo.

En las Figuras 8 y 9, se muestran los registros correspondientes a probetas de recubrimiento  $2.25\phi$  y altura 64 mm. Cabe ser destacado que aunque en el caso de las grafilas profundas se produzca un fallo por hendimiento, previamente se ha producido un agotamiento de la adherencia. Los resultados una vez más ponen de manifiesto la tendencia al crecimiento de la tensión tangencial, incluso en el caso de las probetas fabricadas con grafilas profundas. En estos casos, la fisuración longitudinal se produjo en la etapa final del destesado, por lo que al ser sensiblemente menor el tamaño de la fisura, la capacidad de confinamiento se habrá visto muy poco mermada. Si a esto le unimos el hecho de la profundidad de la grafila, parece lógico que el rozamiento entre el acero y el hormigón sea aún más efectivo y por consiguiente aumente la tensión de adherencia.

En las Figuras 10 y 11 se representan los resultados de las probetas con recubrimiento  $3.25\phi$  y longitud de 24 mm. En este caso parece un hecho anómalo que una de las probetas correspondientes a la grafila ligera alcance un valor de la tensión de adherencia similar a la correspondiente a grafila profunda, y además en ambos casos se produzca un fallo por hendimiento. Sin embargo, al observar la parte lineal de la figura 10, se ve que en el caso de grafila ligera la pendiente va disminuyendo más rápidamente hasta alcanzar el máximo, lo que nos lleva a deducir que al producirse la

flexión se está induciendo un confinamiento local en la zona de compresiones, lo que conlleva la transmisión del destesado al hormigón. En cuanto a la evolución de la adherencia después del fallo, en el caso de producirse fisuración longitudinal se aprecia claramente como disminuye los valores de la tensión tangencial, mientras que si no se produce, el valor de ésta aumenta considerablemente.

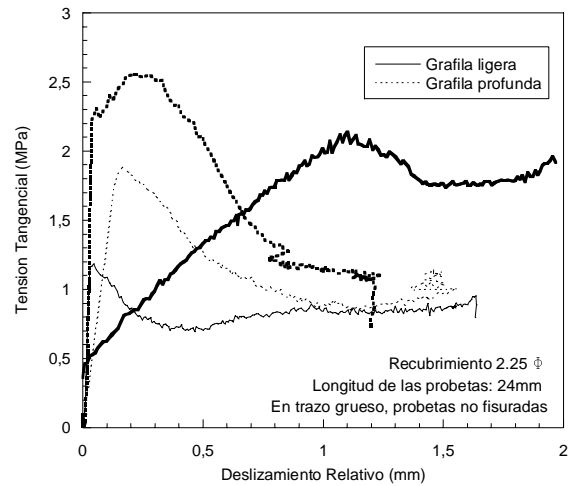


Figura. 6. Resultados experimentales de la tensión tangencial frente al deslizamiento relativo acero-hormigón, de las probetas con recubrimiento  $2.25\phi$  y longitud de probeta 24 mm.

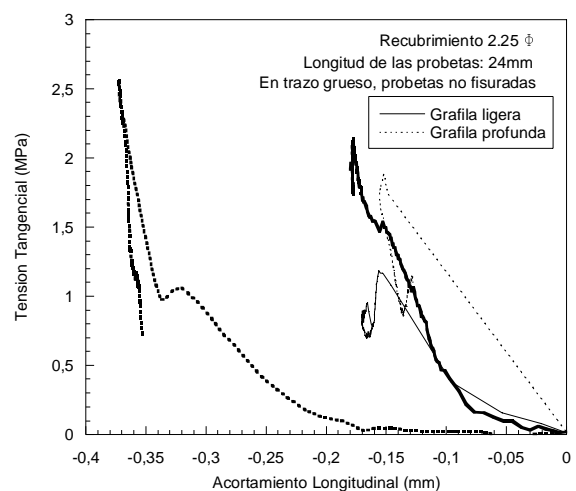


Figura. 7. Resultados experimentales de la tensión tangencial frente al acortamiento longitudinal del hormigón, de las probetas con recubrimiento  $2.25\phi$  y longitud de probeta 24 mm.

Por último en las Figuras 12 y 13 se recogen los resultados de las probetas con recubrimiento  $3.25\phi$  y longitud 64 mm. En este caso ninguna probeta experimentó fisuración por hendimiento según el eje de la probeta. Una vez más se pone de manifiesto la

capacidad de la intercara para seguir transmitiendo la carga de desestado una vez comenzado el deterioro de la misma. Las tensiones tangenciales de fallo son mayores en el caso de las grafilas profundas, aumentando en este caso más a medida que se produce el deterioro de la intercara. En cuanto a los valores del acortamiento, éstos arrojan valores similares con ambas profundidades de grafila.

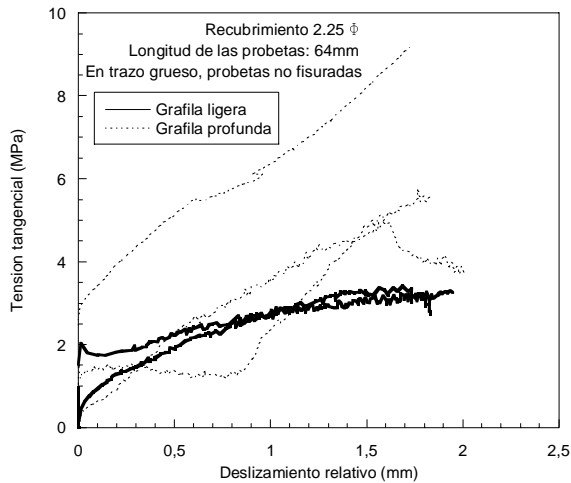


Figura 8. Resultados experimentales de la tensión tangencial frente al deslizamiento relativo acero-hormigón, de las probetas con recubrimiento  $2.25\phi$  y longitud de probeta 64 mm.

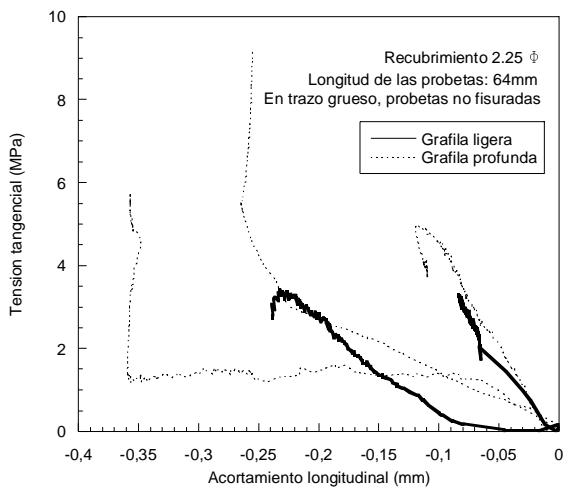


Figura 9. Resultados experimentales de la tensión tangencial frente al acortamiento longitudinal del hormigón, de las probetas con recubrimiento  $2.25\phi$  y longitud de probeta 64 mm.

### 5. CONCLUSIONES

Se ha presentado un ensayo que permite medir la tensión de adherencia entre el hormigón y el acero durante el proceso de desestado.

De los ensayos realizados se puede concluir que la tensión de adherencia en elementos de hormigón pretensados con alambre grafilado se ve favorecida por el efecto Poisson, que aumenta el rozamiento entre el acero y el hormigón, y por la capacidad de confinamiento del hormigón sin fisurar. Además, se produce una mejora de la adherencia a medida que se aumenta la profundidad de la grafila, aunque tiene el inconveniente de elevar el riesgo de fisuración del hormigón a medida que el recubrimiento disminuye.

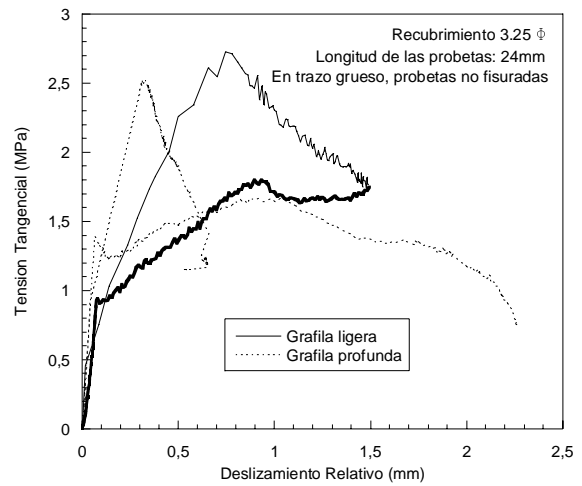


Figura 10. Resultados experimentales de la tensión tangencial frente al deslizamiento relativo acero-hormigón, de las probetas con recubrimiento  $3.25\phi$  y longitud de probeta 24 mm.

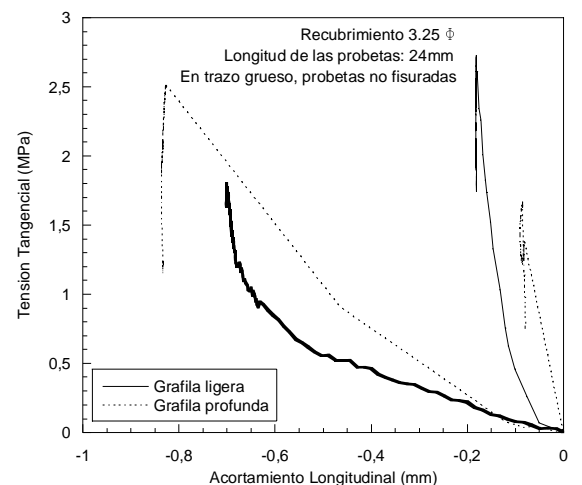


Figura 11. Resultados experimentales de la tensión tangencial frente al acortamiento longitudinal del hormigón, de las probetas con recubrimiento  $3.25\phi$  y longitud de probeta 24 mm.

**AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a la empresa EMESA-TREFILERÍA S.A. el suministro de los alambres de pretensado, y en especial a su Director de Calidad, D. Luis del Pozo, las acertadas indicaciones y comentarios realizadas durante el desarrollo de este trabajo. También agradecen a la empresa HORSISA el suministro del cemento y los áridos. Además agradecen al Ministerio de Ciencia y Tecnología la ayuda BIA2005-9250-C03-02. Agradecen al Prof. Jaime Planas, de la Universidad Politécnica de Madrid, su asesoramiento durante el desarrollo del trabajo.

**REFERENCIAS**

- [1] Calavera J. *Cálculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificación*, 5ª Ed., INTEMAC, 2002.
- [2] Páez A. *El hormigón pretensado*, Ed. Bellisco (1989).
- [3] A.C.I. Committee 318 *Building code requirements for reinforced concrete* (ACI 318/89) and *Commentary* (ACI 318R-89), American Concrete Institute, Detroit, 1989.
- [4] Gálvez, J.C., Tork, B. y Planas, J., *Concrete splitting during the release of prestressing force in indented wires*, Bond in Concrete: from Research to Standards, pp. 95-102, Hungary, 2002.
- [5] Tork B., Gálvez J.C., Planas J. y Elices M. *Fisuración longitudinal de elementos pretensados durante la transferencia de la fuerza de pretensado: I. Parte experimental*, Hormigón y Acero, 212, pp. 61-71, 1999.
- [6] Tork B., Cendón, D.A., Gálvez J.C. y Planas J., *Fisuración longitudinal de elementos pretensados durante la transferencia de la fuerza de pretensado: I Modelización numérica*, Hormigón y Acero, 216, pp. 87-101, 2000.
- [7] Tepfers R. *A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars*, Chalmers University of Technology, Division of Concrete Structures 73:2, Goteborg, Sweden, 1973.
- [8] UNE 36094 *Alambres y cordones para armaduras de hormigón pretensado*, AENOR, 1997.
- [9] Tork, B.S, *Estudio de los mecanismos combinados de fisuración y adherencia en elementos de hormigón armado y pretensado*, Tesis Doctoral dirigida por J.C. Gálvez, Universidad Politécnica de Madrid, 1999.

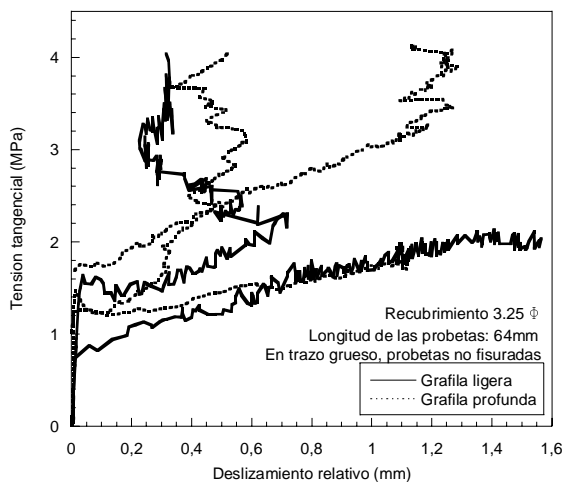


Figura. 12. Resultados experimentales de la tensión tangencial frente al deslizamiento relativo acero-hormigón, de las probetas con recubrimiento 3.25φ y longitud de probeta 64 mm.

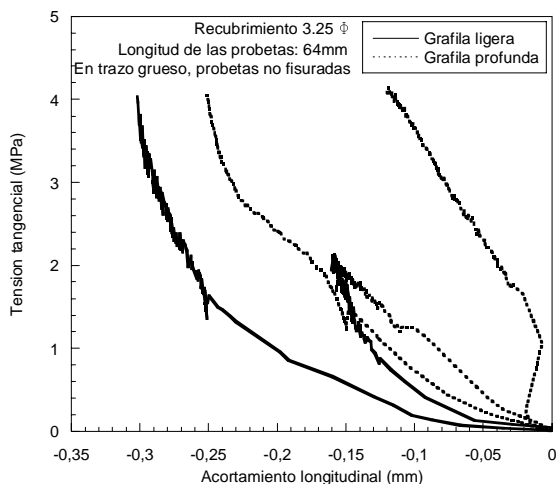


Figura. 13. Resultados experimentales de la tensión tangencial frente al acortamiento longitudinal del hormigón, de las probetas con recubrimiento 3.25φ y longitud de probeta 64 mm.