

# DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN TANGENCIAL DE LA INTERCARA ACERO-HORMIGÓN EN PROBETAS DE HORMIGÓN CON ALAMBRE PRETESO

J.M. Benítez, B.S. Tork y J.C. Gálvez

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Castilla La Mancha,  
Av. Camilo José Cela, s/n, 13071-Ciudad Real, España

**Resumen.** Durante el proceso de transferencia de la fuerza de pretensado en viguetas pretensadas con cuantía de armadura activa elevada, constituida por alambres grafilados, puede producirse la fisuración longitudinal del hormigón en la *zona de transmisión*. Como se ha mostrado en trabajos previos, una mayor profundidad de grafila mejora la adherencia pero puede fisurar longitudinalmente el recubrimiento. Actualmente no se dispone de curvas experimentales fiables para evaluar la tensión de adherencia entre el acero y el hormigón que contemplen la diferente profundidad de grafila y el recubrimiento del alambre. Este trabajo propone un ensayo para evaluar la tensión de adherencia entre el acero y el hormigón. Además presenta los resultados experimentales obtenidos con el ensayo combinando tres profundidades de grafila, dos recubrimientos del alambre y dos longitudes de probeta distintas.

**Abstract.** The process of the prestressing force transmission may split the precast prestressed beams with indented wires. Previous works showed that a deeper depth of indentation improves the bond between the steel wire and concrete, but may split this last one. There are not enough experimental data about the bond steel-concrete for different depths of indentations and concrete covers of the wires. This work shows a testing procedure to measure the tangential stress of the bond. The paper includes the experimental data for three depths of indentation, two concrete covers and two lengths of the specimens.

## 1. INTRODUCCIÓN

La adherencia entre la armadura activa y el hormigón es indispensable para transmitir la fuerza de pretensado al hormigón. Las viguetas se suelen fabricar en mesas sobre las que se pretensan los alambres, hormigonando a continuación. Con el hormigón endurecido, se procede a transferir la fuerza de pretensado mediante el corte de los alambres [1]. Se denomina *longitud de transmisión* a la distancia entre el extremo libre y la sección en la que la armadura ha transmitido completamente, por adherencia, la fuerza de pretensado al hormigón. La longitud de transmisión es difícil de evaluar: actualmente se calcula con fórmulas empíricas [1-3], basadas en ensayos realizados hace años [4-6]. No se dispone de expresiones precisas para evaluar la tensión de adherencia entre el acero y el hormigón en función de la profundidad de grafila, las propiedades mecánicas del hormigón y el recubrimiento del alambre.

Además, en piezas con cuantía de armadura activa elevada, son frecuentes los problemas de fisuración longitudinal debidos al efecto de cuña que provoca la armadura en el hormigón (Fig. 1). En trabajos previos [7-9] los autores han mostrado la dependencia de este fenómeno con la profundidad de grafila y el recubrimiento del alambre. La adherencia es favorecida por un doble fenómeno: 1) al transferir la fuerza de pretensado, el alambre aumenta su diámetro por efecto Poisson y 2) al intentar deslizar el alambre, la grafila provoca la compresión del hormigón en la dirección radial [10]. Este efecto combinado, beneficioso para la

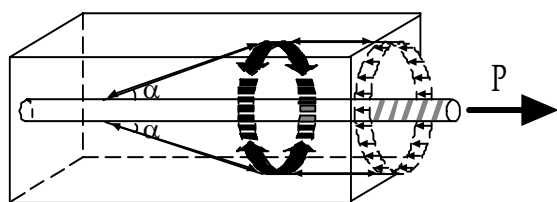
adherencia, provoca un anillo de tracciones circunferenciales en el hormigón que aumenta el efecto de cuña de la armadura, pudiendo rasgar el hormigón longitudinalmente, en la dirección de la armadura (Fig. 2 y 3).

Para abordar el estudio combinado de la fisuración y la

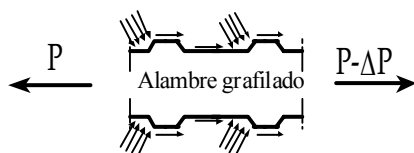


**Fig. 1.** Vigueta de hormigón pretensado agrietada en la zona de transmisión de la fuerza de pretensado.

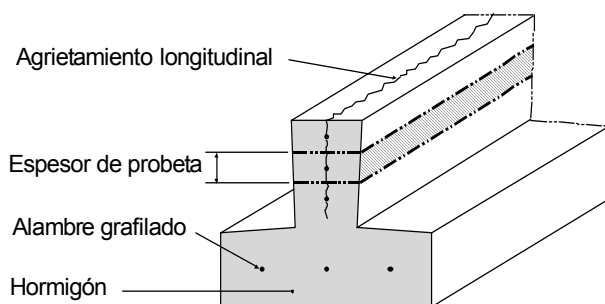
a)



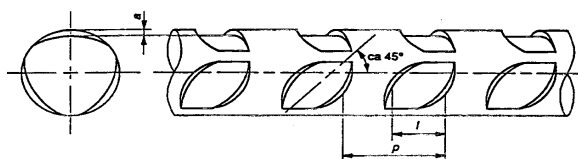
b)



**Fig. 2.** Anillo de tracciones generado en torno al alambre cuando desliza: a) esquema propuesto por Tepfers [10], b) esquema de las tensiones generadas.



**Fig. 3.** Agrietamiento longitudinal de la viga. Se indica el espesor representado en los ensayos.



**Fig. 4.** Geometría de la grafilación según UNE 36094 [11].

adherencia en elementos pretensados es necesario disponer de datos experimentales precisos que permitan evaluar la adherencia entre el acero y el hormigón.

En este trabajo se presenta un ensayo que permite medir la adherencia entre el hormigón y el alambre pretensado en función de la profundidad de grafilación y el recubrimiento de hormigón al realizar la transferencia de la fuerza de pretensado. Los ensayos se han realizado con tres profundidades de grafilación, dos recubrimientos y dos longitudes de probeta distintas. A nuestro entender, los resultados son novedosos y aportan datos experimentales inexistentes que permiten relacionar el

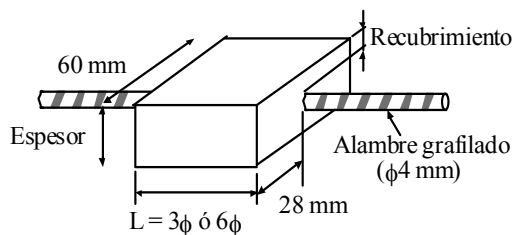
proceso de rotura del hormigón con la adherencia entre el alambre y el hormigón.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL Y DE LAS PROBETAS

Se confeccionaron 36 probetas prismáticas de hormigón con el alambre pretensado coincidente con el eje longitudinal de la probeta. Se adoptó una longitud de probeta corta con el fin de garantizar tensiones tangenciales uniformes [12]. La longitud de las probetas fue  $3\phi$  y  $6\phi$ , siendo  $\phi$  el diámetro del alambre. Se empleó alambre de pretensar de 4 mm de diámetro, con tres profundidades de grafilación (Tabla 1). La Fig. 4 muestra la geometría de la grafilación. La anchura de las probetas fue 60 mm, pero con dos recubrimientos distintos ( $2.25\phi$  y  $3.25\phi$ ). La geometría y las dimensiones de las probetas se detallan en la Fig. 5 y las propiedades mecánicas del acero y del hormigón en la Tabla 2.

El alambre fue pretensado con una carga de 17 kN en un bastidor de acero en posición vertical. Para pretensar el alambre se empleó una máquina de ensayos servocontrolada. El alambre se unió al bastidor mediante dos anclajes de casquillo y cuña. El anclaje inferior estaba fijado al bastidor, mientras que el superior quedaba anclado a una pieza roscada exteriormente desplazable paralelamente al eje del bastidor (Fig. 6). La fuerza de pretensado se aplicó de forma monótona creciente mediante el desplazamiento hacia arriba del pistón de la máquina. El control de la carga aplicada se hizo con la célula de carga. Una vez alcanzada la carga de pretensado se fijó el anclaje superior. A continuación se descargó la máquina, transfiriendo la fuerza de pretensado al bastidor, y se retiró el bastidor de la máquina de ensayos. La tensión final de pretensado en el alambre fue conocida y controlada mediante un extensómetro resistivo unido a la zona central del alambre pretensado.

Una vez pretensado el alambre se hormigonaron las probetas en moldes metálicos con las caras interiores rectificadas. Los moldes se unieron al bastidor mediante un dispositivo con tornillos que permitía alinear y centrar el alambre pretensado que permitía mantener el fondo del molde en posición horizontal durante todo el proceso de hormigonado, vibrado y curado de las probetas.



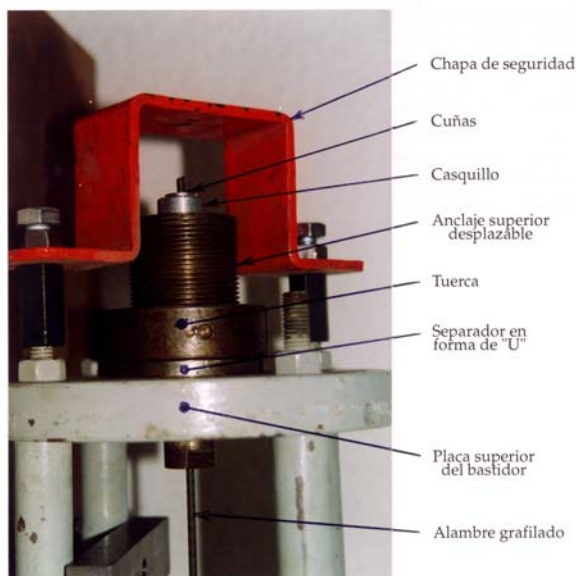
**Fig. 5.** Geometría y dimensiones de las probetas.

**Tabla 1.** Profundidad de la grafila.

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 2.** Propiedades mecánicas de los materiales.

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



**Fig. 6.** Detalle del dispositivo de anclaje del alambre de pretensado en la placa superior del bastidor.

### 3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

El ensayo de las probetas se realizó en dos fases consecutivas. La primera consistió en transmitir la fuerza de pretensado del bastidor a la máquina de ensayos. La segunda en transferir, de forma controlada, la fuerza de pretensado de la máquina de ensayos al hormigón.

Al iniciarse la primera fase el alambre estaba pretensado, el bastidor comprimido y el prisma de hormigón sin tensiones. Se colocó el bastidor en la máquina de ensayos, se atornilló la placa inferior del bastidor al pistón de la máquina y el anclaje superior del mismo modo que al tesar el alambre. La Fig. 7 muestra una foto de la probeta en el bastidor antes del ensayo. Se desplazó el pistón de la máquina de ensayos a razón

de 0.1 mm/min hasta alcanzar la carga de pretensado (17 kN). En este instante toda la carga había sido transferida a la máquina de ensayos, y la tensión en el prisma de hormigón y en el bastidor era nula. Se aflojó la tuerca de la pieza roscada superior y se retiró el pasador en forma de “U”.

A partir de ese momento se inició la transferencia de la fuerza de pretensado al prisma de hormigón. Para ello se desplazó el pistón de la máquina de ensayos hacia abajo, a una velocidad de 0.3 mm/min. A medida que el pistón bajaba se descargaban los extremos del alambre pretensado, transmitiendo su fuerza al prisma de hormigón. El ensayo finalizó una vez que los extremos libres del alambre quedaron descargados.

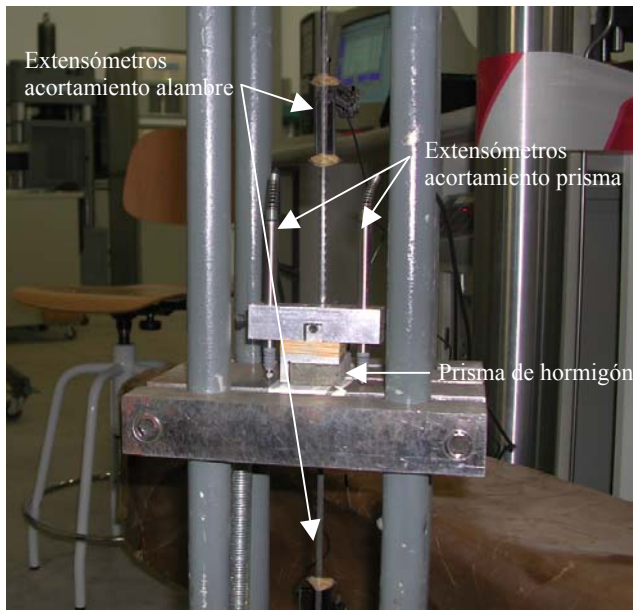
Las variables registradas durante el ensayo fueron:

- Carga  $P$  aplicada por la máquina de ensayos.
- Desplazamiento del pistón de la máquina.
- Acortamiento longitudinal del prisma de hormigón. Se midió en dos puntos diametralmente opuestos al alambre, obteniéndose el promedio.
- Deslizamiento relativo del alambre pretensado respecto a las caras superior e inferior del prisma de hormigón.
- Acortamiento del alambre en dos secciones, una por encima del prisma de hormigón y otra por debajo. Con estas medidas se obtenía la fuerza en el alambre, y por diferencia entre ambas la fuerza de rozamiento entre el alambre y el hormigón en el prisma.

La Fig. 8 muestra la foto de una probeta durante el ensayo. En ella se aprecia el prisma de hormigón sobre la placa de apoyo unida al bastidor durante el ensayo,



**Fig. 7.** Probeta en el bastidor con el alambre pretensado antes del ensayo.



**Fig. 8.** Detalle del dispositivo de ensayo con los extensómetros de medida. Prisma de hormigón sobre la placa de apoyo unida al bastidor durante el ensayo.

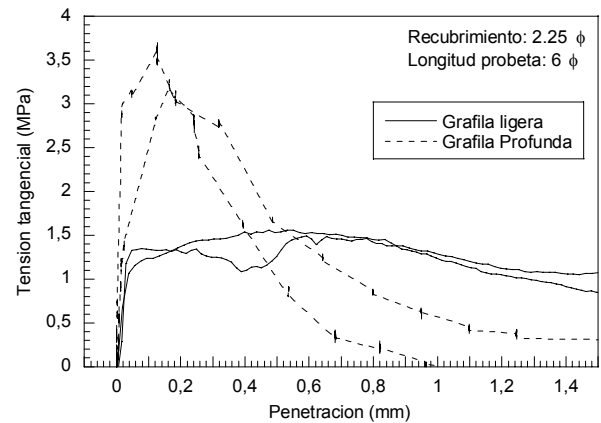
con los extensómetros para la medida del acortamiento del alambre y el acortamiento del prisma de hormigón.

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

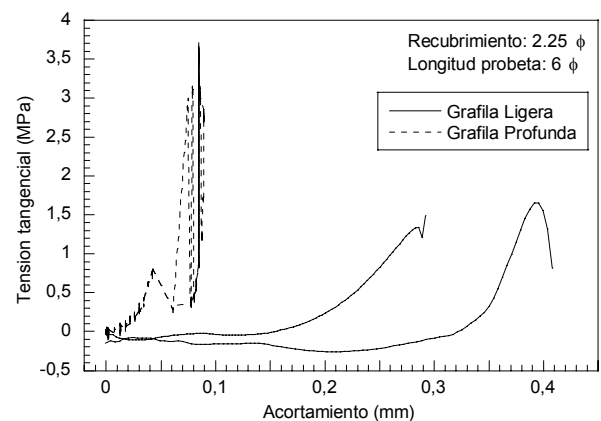
La Fig. 9 muestra los registros experimentales de la tensión tangencial frente a la penetración del alambre en la cara superior del prisma de hormigón, para las probetas con recubrimiento pequeño ( $2.25\phi$ ) y longitud de probeta larga ( $6\phi$ ), y las profundidades de grafila ligera y profunda. Se observa que las probetas con grafila ligera alcanzan una tensión tangencial máxima de aproximadamente 1.5 MPa, mientras que con la grafila profunda se supera el valor de 3 MPa. Además, en el caso de las probetas con grafila profunda el mecanismo de fallo de la adherencia es más frágil, alcanzándose la tensión tangencial máxima con un deslizamiento inferior a 0.2 mm, mientras que con la grafila ligera se alcanza para un valor de aproximadamente 0.5 mm.

La Fig. 10 muestra los registros experimentales de la tensión tangencial frente al acortamiento del prisma de hormigón, para las probetas con recubrimiento pequeño ( $2.25\phi$ ) y longitud de probeta larga ( $6\phi$ ), y las profundidades de grafila ligera y profunda. La Fig. 10 complementa a la Fig. 9 y pone de manifiesto que, si bien la grafila profunda conduce a mayores tensiones tangenciales, su mecanismo de agotamiento es mucho más frágil.

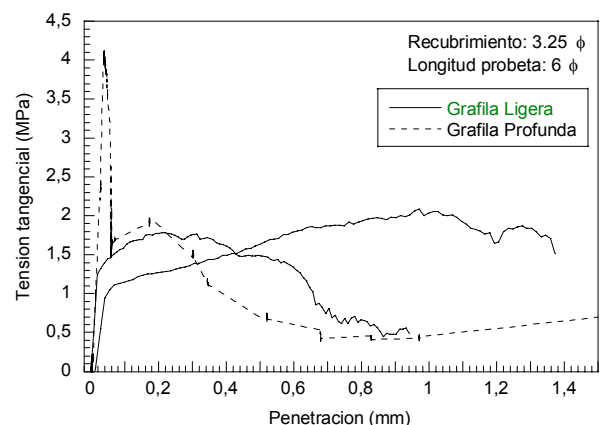
La Fig. 11 muestra los registros experimentales de la tensión tangencial frente a la penetración del alambre en



**Fig. 9.** Curvas experimentales de tensión tangencial frente a la penetración del alambre de las probetas con recubrimiento pequeño ( $2.25\phi$ ) y longitud de probeta grande ( $6\phi$ ).

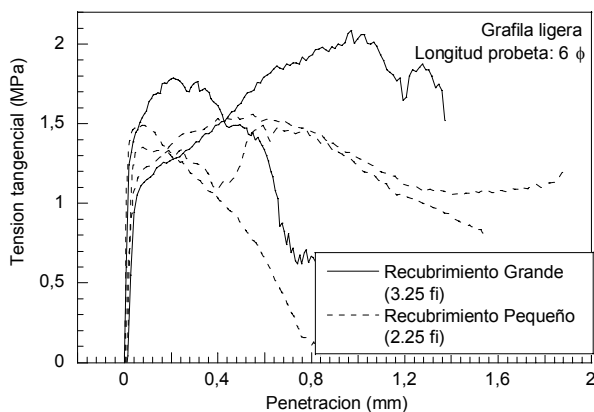


**Fig. 10.** Curvas experimentales de tensión tangencial frente al acortamiento del prisma de hormigón de las probetas con recubrimiento pequeño ( $2.25\phi$ ) y longitud de probeta grande ( $6\phi$ ).



**Fig. 11.** Curvas experimentales de tensión tangencial frente a la penetración del alambre de las probetas con recubrimiento grande ( $3.25\phi$ ) y longitud de probeta grande ( $6\phi$ ).





**Fig. 12.** Curvas experimentales de tensión tangencial frente a la penetración del alambre de las probetas con grafilia ligera y longitud de probeta grande ( $6\phi$ ), para los dos recubrimientos.

la cara superior del prisma de hormigón, para las probetas con recubrimiento grande ( $3.25\phi$ ) y longitud de probeta larga ( $6\phi$ ), y las profundidades de grafilia ligera y profunda. Se observa que las probetas con grafilia ligera alcanzan una tensión tangencial máxima de aproximadamente 1.9 MPa, mientras que con la grafilia profunda se supera el valor de 4 MPa. Como ocurría en la Fig. 9 las probetas con grafilia profunda muestran un mecanismo de fallo de la adherencia más frágil.

La Fig. 12 compara las curvas experimentales de la tensión tangencial frente a la penetración del alambre en la cara superior del prisma de hormigón, para las probetas con grafilia ligera y longitud de probeta larga ( $6\phi$ ), y los dos recubrimientos del alambre: pequeño ( $2.25\phi$ ) y grande ( $3.25\phi$ ). Se observa que las probetas con mayor recubrimiento alcanzan una tensión tangencial máxima mayor que las de menor recubrimiento.

#### 4. COMENTARIOS FINALES

Se ha presentado un tipo de ensayo que permite obtener la tensión de adherencia entre el acero y el hormigón al realizar la transferencia de la fuerza de pretensado. De los ensayos realizados se concluye que las probetas con mayor profundidad de grafilia proporcionan mayores tensiones tangenciales, pero con un mecanismo de fallo de la adherencia más frágil. Además un mayor recubrimiento del alambre proporciona una mayor tensión de adherencia, lo que es causado por el mayor confinamiento que proporciona el hormigón al alambre.

#### 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 HORCISA el suministro del cemento y los áridos. Además agradecen al Ministerio de Ciencia y Tecnología y a la Junta de Comunidades de Castilla La Mancha las ayudas MAT2001-3863-C03-02 y PBI-02-006 respectivamente. 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] Holmberg A. y Lindgren S. "Anchorage and prestress in pretensioned concrete", National Swedish Building Research. Document D1/1970 (1970).
- [5] Base G.D. "An investigation of transmission length in pretensioned concrete", Research Report 5, Cement and Concrete Association (1958).
- [6] Hanson H. y Kaar P.H. "Flexural bond tests of pretensioned prestressed concrete". ACI Journal 55, 783-803 (1959).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] UNE 36094 "Alambres y cordones para armaduras de hormigón pretensado", AENOR, (1997).
- [12] 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).