

Estudio de la transferencia del pretensado en elementos de hormigón con cordones de polímeros reforzados con fibras de carbono

Study of the prestress transfer in concrete elements with CFRP strands

María Serrano-Mesa^a, Eladio Alejandro Martínez-Pina^b, Mike Schlaich^c

^a Asistente de investigación. Technische Universität Berlin. m.serranomesa@tu-berlin.de

^b Ingeniero civil. Technische Universität Berlin. e.martinezpina@tu-berlin.de

^c Catedrático de universidad. Technische Universität Berlin. mike.schlaich@tu-berlin.de

RESUMEN

Este estudio sintetiza las investigaciones realizadas sobre la transferencia del pretensado de cordones de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) en hormigón mediante ensayos y un modelo analítico. Los resultados evidenciaron un mayor riesgo de fisuración respecto al acero y, en línea con el modelo, revelaron que las recomendaciones actuales son insuficientes para evitar fisuras, requiriendo adicionalmente una reducción del pretensado. Asimismo, se identificó que las fisuras superficiales se originan a partir de fisuras radiales que se propagan desde el tendón hacia la superficie, resaltando la necesidad de profundizar en el estudio del comportamiento de adherencia de tendones de CFRP.

ABSTRACT

This study summarises the investigations carried out on the prestress transfer of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) strands through experimental and analytical approaches. The results showed an increased risk of splitting cracking compared to steel and, in line with the analytical model, revealed that the current recommendations are insufficient to prevent cracks, requiring additionally the reduction of prestress. It was also found that surface cracks originate from radial cracks propagating from the tendon to the surface, highlighting the need for further investigation of the bond behaviour of CFRP strands.

PALABRAS CLAVE: hormigón pretensado, CFRP, adherencia, transferencia del pretensado, sensores de fibra óptica distribuidos

KEYWORDS: prestressed concrete, CFRP, bond, prestress transfer, distributed fibre optic sensors

1. Introducción

La producción de hormigón genera el 8 % de las emisiones globales de CO₂ y consume grandes cantidades de arena, lo que supone un impacto medioambiental y una probable extenuación de recursos [1]. Una solución para construir de manera más eficiente consiste en utilizar armaduras de polímeros reforzados con fibras de

carbono (CFRP, *Carbon Fibre-Reinforced Polymers*). Al sustituir el acero, vulnerable a la corrosión, por CFRP que no se oxidan, se puede reducir de manera considerable el grosor de los componentes estructurales y, por lo tanto, la cantidad de hormigón necesaria, optimizando el uso de materiales y minimizando el impacto ambiental.

Para potenciar aún más los beneficios de CFRP, el uso del pretensado tiene la capacidad de aumentar su eficiencia [2]. Con esta técnica se

maximiza su alta resistencia a la tracción, se reducen las deformaciones y se elimina la necesidad de anclajes complejos. Como resultado, se logra un ahorro de materiales de hasta el 70 %, creando componentes que no solo son más ligeros, sino también mucho más eficientes minimizando el uso de recursos [3,4]. Sin embargo, un aspecto crucial en su diseño y cálculo es la transferencia de la fuerza de pretensado en el hormigón sin que aparezcan fisuras superficiales [5], ya que este tipo de fisuras pueden comprometer el comportamiento estructural, además de obstaculizar la transferencia efectiva del pretensado.

Aunque se han desarrollado y adaptado recomendaciones para prevenir estas fisuras [6,7] se ha podido observar en investigaciones realizadas en la Technische Universität Berlin su aparición pese al cumplimiento de dichas indicaciones (Figura 1). Esto demuestra la necesidad de realizar un análisis más exhaustivo de este fenómeno.



Figura 1. Fisuración superficial en la zona de transferencia del pretensado [8].

Para ello, se investigó experimental y analíticamente la transferencia del pretensado de CFRP, cuyos principales resultados se presentan en este estudio. En primer lugar, se muestran los resultados experimentales, que incluyen una comparación directa de CFRP con acero [8] y un análisis de la influencia de los parámetros que afectan a la transferencia del pretensado por separado [9].

Por primera vez, este tipo de experimentos incorporó el uso de sensores de fibra óptica distribuidos (DFOS, *Distributed Fibre Optic Sensors*), capaces de monitorizar las deformaciones del hormigón de manera

prácticamente continua en el tiempo y a lo largo de la viga. Esto permite calcular la longitud de transferencia de manera precisa, que es la longitud necesaria para transferir el pretensado al hormigón.

Además, mediante los datos de los sensores y el seccionamiento de la viga se analizó el desarrollo de las tensiones durante el destensado [10]. Los datos también permitieron calibrar con alta precisión el modelo analítico empleado, con el que se realizó un estudio paramétrico sobre el comportamiento de fisuración [11]. En este estudio se muestran los resultados más importantes, que sirven de base para una mejor comprensión de la transferencia del pretensado de tendones de CFRP al hormigón.

2. Estado del arte

2.1 Comportamiento de adherencia de tendones de CFRP

La transferencia de la fuerza de pretensado al hormigón se basa en tres mecanismos principales: adhesión (vinculación química), fricción (efecto *Hoyer* [12]) y adhesión por corte. La adhesión, que es la conexión fisicoquímica entre el tendón y el hormigón, es relativamente débil en los tendones de CFRP debido a su superficie lisa. El efecto *Hoyer* se produce cuando el tendón se expande lateralmente durante el destensado, lo que aumenta las tensiones de adherencia. Según Jokūbaitis *et al.* [13], este efecto domina el comportamiento de adherencia en los cables de CFRP, debido a su alta capacidad de elongación axial. Y, por último, la adhesión por corte depende de la resistencia del hormigón frente a las fuerzas cortantes generadas por la interacción con la superficie de los cordones, siendo más significativas en el caso del CFRP.

Debido a estas diferencias con respecto al acero, el comportamiento de adherencia de CFRP ha sido objeto de investigación durante

más de tres décadas. Para una recopilación y análisis exhaustivo de los resultados experimentales existentes, pueden consultarse los estudios de Kueres [7] o de Jokūbaitis *et al.* [13].

De acuerdo con estos estudios y los modelos teóricos desarrollados hasta la fecha, la longitud de transferencia (l_t) depende principalmente de factores como la tensión en el acero (f_{pi}) y la resistencia a compresión del hormigón (f_c) en el momento del destensado, así como del diámetro de los tendones (d_p). De este modo, la fórmula más empleada queda como:

$$l_t = \frac{f_{pi} \cdot d_p}{\alpha_t \cdot f_c^{2/3}}, \quad (1)$$

con $\alpha_t = 4.8$, según [13] (destensado gradual).

Asimismo, para prevenir la aparición de fisuras superficiales, se establecieron basados en resultados experimentales valores mínimos para el recubrimiento de hormigón (c) y para la distancia entre tendones (s_p), siguiendo un enfoque análogo al diseño convencional con acero [14].

Con el propósito de investigar experimentalmente la influencia de todos estos parámetros en el comportamiento de adherencia, se presenta a continuación una descripción y discusión de los procedimientos y las instrumentaciones más relevantes utilizados en este ámbito.

2.2 Investigación experimental del comportamiento de adherencia

El procedimiento del ensayo más común para determinar la longitud de transferencia (*Beam Test*) tiene como objetivo replicar las condiciones reales de fabricación de hormigón pretensado. Para ello, se comienza con el pretensado de los tendones, seguido por el hormigonado. Cuando el hormigón alcanza la resistencia necesaria, se retira el encofrado. Tras (o durante) el destensado, se mide el acortamiento del hormigón a lo largo de la viga para determinar la longitud de transferencia. Para ello, existen

diversos equipos de instrumentación, siendo la galga extensiométrica mecánica desmontable (DEMEC, *Demountable Mechanical strain gauge*) la más utilizada.

Las investigaciones más recientes han analizado bases de datos experimentales sobre de longitud de transferencia con tendones de CFRP. Sin embargo, el método de ensayo, la geometría de la sección, el número de tendones y el proceso de destensado varía dependiendo de la normativa empleada y del enfoque de cada autor o autora, lo que dificulta la comparación directa de los resultados obtenidos. Además, estos resultados se obtuvieron con equipos de instrumentación convencionales, que presentan limitaciones en la resolución espacial, son costosos y requieren un tiempo significativo para su instalación. Y cabe señalar que, cuando aparecen fisuras superficiales en el hormigón, no es posible determinar la longitud de transferencia a partir de los datos obtenidos.

Por ello, primero se realizó un exhaustivo estudio bibliográfico sobre los procedimientos y equipos existentes, explicado con detalle en [9]. Basado en este análisis, se propuso un método para el ensayo usando DFOS, explicado en [8–10]. De esta manera, es posible determinar la longitud de transferencia con alta precisión incluso para elementos fisurados.

2.3 Modelización analítica del comportamiento de adherencia

Para el estudio analítico del comportamiento de adherencia, se ha utilizado en varios estudios el modelo de cilindro de pared gruesa (TWCM, *Thick-Walled Cylinder Model*). Este modelo fue inicialmente desarrollado por Tepfers [15] para su aplicación en acero sin pretensado. Hwan Oh *et al.* [16] lo ampliaron para calcular la presión de expansión de los tendones durante el proceso de destensado, aunque requirieron análisis numéricos complejos para representar la fisuración interna del hormigón.

Con el objetivo de simplificar el modelo, Han *et al.* [17] propusieron una versión

modificada del TWCM, asumiendo que el desplazamiento en el hormigón podía describirse mediante un modelo elástico lineal. Esta versión adaptada también se ha empleado para cordones de CFRP utilizando hormigón de alta resistencia de grano fino [7] y hormigón de alto rendimiento reforzado con fibras [18].

Como se mencionó anteriormente, los medidores DEMEC poseen longitudes de galga relativamente largas, de aproximadamente 10 cm. En el caso de las longitudes de transferencia de cordones de CFRP, que pueden ser tan cortas como 13 cm, la cantidad de datos obtenidos es limitada y puede dar lugar a una calibración poco precisa. Además, la fisuración superficial del hormigón causado por el destensado no se ha estudiado en profundidad en este modelo, lo que representa una de las principales lagunas en la investigación sobre hormigón pretensado con tendones de CFRP.

3. Investigaciones experimentales

3.1. Programa de ensayos y materiales

Para investigar el comportamiento de adherencia de los cordones de CFRP, se desarrollaron dos programas experimentales, como se muestra en

la Tabla 1. En primer lugar, se analizaron elementos pretensados con los mismos parámetros, pero usando cordones de acero y CFRP, con el propósito de comparar el comportamiento y la longitud de transferencia de ambos materiales. Los parámetros del ensayo estándar DF (*default*) y del ensayo ST con acero (*steel*) se definieron para obtener resultados relevantes y económicos desde el punto de vista práctico, como se describe en [8,9]. También se incluyeron los resultados de un experimento realizado para la aprobación de un proyecto de construcción con 4 cordones de CFRP (test 4-C para CFRP y test 4-ST para acero) [19], también presentado en [8].

El segundo programa experimental se centró en analizar de manera independiente los parámetros críticos que influyen en el comportamiento de adherencia, mencionados en la sección anterior. Basado en el ensayo DF, se ajustaron individualmente para cada ensayo primero los parámetros que teóricamente afecta la longitud de transferencia. Estos incluyen el nivel de pretensado (FP), el diámetro del tendón (DP) y la resistencia del hormigón (FC). En cada ensayo, el parámetro que diverge respecto a la combinación de referencia (DF o 4-C) se resalta en azul en la Tabla 1 para facilitar su identificación.

Tabla 1. Programa de ensayos y resultados.

Test	Mat.	d_p	$f_{cm,cube}$	f_{pi}/f_{pu}	c/d_p	s/d_p	bxh	$f_{p,cr}$	F	$l_{t,cr}$ [mm]	
		[mm]	[MPa]	[%]	[-]	[-]	[mm]	[MPa]		$l_{t,cr,exp.}$	$l_{t,cr,teo.}$
DF	CFRP	12.5	42	60	2.8	7.6	190x82.5	919	Sí	191	222
ST	Acero	12.5	42	60	2.8	7.6	190x82.5	-	No	452	-
4-C	CFRP	12.5	70	47	3.0	3.0	156x132.5	974	No	257	171
4-ST	Acero	12.5	69	47	3.0	3.0	156x132.5	-	No	307	-
DP	CFRP	10.8	40	60	2.6	6.6	146x66.0	963	Sí	218	224
FC	CFRP	12.5	60	60	2.8	7.6	190x82.5	965	Sí	208	184
FP	CFRP	12.5	44	40	2.8	7.6	190x82.5	766	No	168	180
CC	CFRP	12.5	43	60	3.2	5.3	171x92.5	1186	Sí	351	282
FC-CC	CFRP	12.5	70	60	3.2	5.3	171x92.5	1199	Sí	266	211
FP-CC	CFRP	12.5	43	40	3.2	5.3	171x92.5	696	No	196	166
FP-SP	CFRP	12.5	43	40	2.8	2.6	127x82.5	796	Sí	237	193

d_p : diámetro de los tendones, $f_{cm,cube}$: resistencia a compresión del hormigón, f_{pi}/f_{pu} : nivel de pretensado, c : recubrimiento, s : separación entre tendones, bxh : ancho x altura de la sección de hormigón, $f_{p,cr}$: máximo pretensado introducido sin fisuración crítica, $l_{t,cr,exp.}$ y $l_{t,cr,teo.}$: longitud de transferencia experimental y teórica para $f_{p,cr}$.

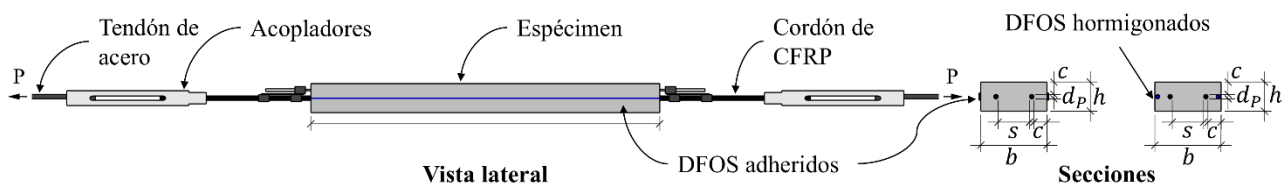


Figura 2. Configuración de ensayo.

Para el estudio de los parámetros geométricos, considerados clave en la prevención de fisuración crítica, se siguieron las recomendaciones más recientes para cordones de CFRP [6,7]. Basándose en el recubrimiento mínimo recomendado c en relación con el diámetro de los tendones d_p ($c/d_p \geq 3.0$), se investigaron experimentalmente los valores 2.8 y 3.2. Este parámetro, identificado por autores como von der Heid [20] como el de mayor influencia, se analizó tanto por separado como en combinación con otros parámetros en los ensayos -CC. Además, se realizó el ensayo con una separación entre tendones significativamente inferior al límite recomendado ($s/d_p = 2.6 \ll 5.0$), disminuyendo el nivel de pretensado para mantener la tensión en el hormigón y sin modificar el recubrimiento de DF (ensayo FP-SP).

Desde una perspectiva tanto práctica como sostenible, se prefieren hormigones estándar con un contenido moderado de cemento. No obstante, la resistencia del hormigón debe ser suficiente en el momento del destensado para garantizar una transferencia efectiva del pretensado sin formación de fisuras críticas. Por ello y para conseguir un tiempo de fraguado económico, se emplearon hormigones de las clases C50/60 y C60/75.

En cuanto a los tendones, resulta preferible emplear diámetros mayores, por lo que se seleccionaron cordones de 7 hilos de 12.5 mm de diámetro (10.8 mm para el test DP) del fabricante *Tokyo Rope International INC* [21].

3.2. Configuración de ensayo

Los experimentos se realizaron siguiendo las directrices desarrolladas por el Instituto Alemán

de Ingeniería de la Construcción (DIBt) [22] para cordones de acero, y adaptadas para CFRP basándose en las recomendaciones de los estudios en [6,7] (Figura 2). Los especímenes tenían una longitud de 1 m, excepto los de acero, para los cuales se seleccionó una longitud de 1,9 m debido a sus mayores longitudes de adherencia. El pretensado se realizó en una banca de pretensado con tendones dispuestos simétricamente, utilizando tendones de acero y acopladores de *Tokyo Rope International INC*. Aproximadamente 1-2 horas antes de alcanzar la resistencia a compresión objetivo del hormigón, se prepararon los equipos de medición. La transferencia de la fuerza de pretensado se realizó de manera simultánea en todos los tendones, liberándola de forma gradual. Para medir el acortamiento del hormigón se usaron dos canales de DFOS a cada lado del espécimen con una precisión espacial de 1.3 mm y una frecuencia de 5 Hz.

Los DFOS no solo se colocaron en posición longitudinal, sino que también se realizó un ensayo con sensores dispuestos en dirección transversal, ubicados cada 50 mm, para detectar fisuras. Además, se seccionó un espécimen a la altura de los sensores para realizar una inspección visual de las fisuras.

4. Resultados experimentales

4.1 Consideraciones generales

Los DFOS generan más de 250,000 valores de deformación por minuto en un sensor de un metro. Para procesar este volumen de datos, se desarrolló un algoritmo semiautomático [9].

La longitud de transferencia es la distancia desde el extremo de la viga hasta el punto donde las deformaciones del hormigón alcanzan un valor máximo y constante, conocido como deformación máxima media (AMS, *Average Maximum Strain*) según Russel *et al.* [23] que se determina seleccionando manualmente los puntos correspondientes. Tradicionalmente, se determina manualmente, pero con DFOS calculamos el rango de deformación máxima (RMS, *Range of Maximum Strain*) a partir del parámetro amplitud de deformación ($\Delta\epsilon$). Este parámetro, dependiente de la tecnología DFOS, se usa para construir un histograma y determinar el intervalo con mayor densidad de puntos. Para excluir valores no representativos, se introduce la longitud de valores atípicos (l_{oi}). La longitud de transferencia se define como el primer punto de intersección entre los datos DFOS y el RMS. Una vez calibrados $\Delta\epsilon$ y l_{oi} , este método permite calcular automáticamente la longitud de adherencia, evitando juicios subjetivos.

4.1. Diferencias entre acero y CFRP

Los resultados muestran diferencias significativas en el comportamiento de adherencia entre los cordones de acero y los de CFRP. En particular, las longitudes de transferencia del CFRP son aproximadamente entre 5 a 25 cm más cortas que las del acero. Esto implica que la fuerza de pretensado se transfiere en una longitud más reducida, generando tensiones de adherencia más elevadas, de hasta 6 MPa.

Estas tensiones elevadas incrementan el riesgo de aparición de fisuras críticas, lo que explica la presencia de fisuras superficiales solo en el espécimen DF con CFRP, en contraste con el espécimen ST con acero, a pesar de que ambos fueron sometidos a los mismos parámetros de ensayo.

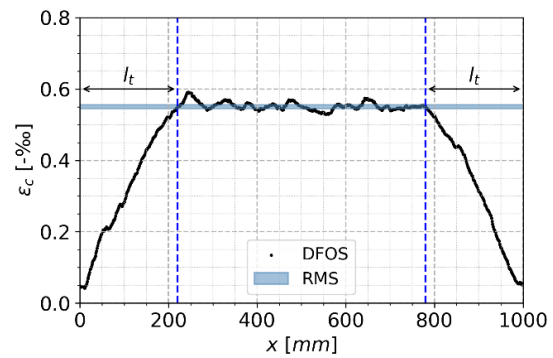


Figura 3. Longitud de transferencia (l_t) del espécimen DP, basado los datos DFOS (ϵ_c) a lo largo de la viga (x).

4.2. Comparación de parámetros influyentes

4.2.1. Aparición de fisuras críticas durante transferencia del pretensado

Como se observa en la Tabla 1, la mayoría de las combinaciones de parámetros presentaron fisuras superficiales. Únicamente la reducción del pretensado ($f_{pi}/f_{pu} = 40\%$) en los ensayos FP y FP-CC garantizó una transferencia del pretensado adecuada. Sin embargo, cabe señalar que el ensayo con una separación entre tendones muy reducida (FP-SP), con un valor correspondiente a casi la mitad del valor recomendado ($s/d_p = 2.6 \ll 5.0$), también presentó fisuras. En contraste, en el ensayo 4-C, con una separación de $s/d_p = 3.0$ y un pretensado del 7 % superior a FP-SP, no se observaron fisuras, seguramente debido a su considerablemente mayor resistencia al hormigón (70 MPa $\gg$ 43 MPa).

Cabe destacar que, aunque el recubrimiento de los ensayos CC y FC-CC superaba las recomendaciones actuales ($c/d_p = 3.2 > 3.0$) este aumento no fue suficiente para evitar la aparición de fisuras.

4.2.2. Longitud de transferencia

Dado que no es posible calcular la longitud de transferencia de elementos fisurados, se seleccionaron los datos correspondientes al estado previo a la fisuración usando el algoritmo en [9]. A partir de estos datos, se determinaron

las longitudes de transferencia de cada espécimen, para cada canal de DFOS y extremo de la viga, como se muestra en la Figura 3 para DP, canal 2. De este modo se obtienen por ensayo cuatro resultados de longitud de transferencia. Además, el valor medio experimental para cada espécimen ($l_{t,cr,exp.}$) se comparó con el valor teórico ($l_{t,cr,teo.}$), obtenido usando la fórmula (1), en la Tabla 1 ($l_{t,cr}$).

Como resultado, la fórmula teórica ofrece una estimación fiable, con una correlación promedia cercana al 10 %. Sin embargo, no ofrece valores conservadores, ya que los resultados teóricos son inferiores a los obtenidos experimentalmente. Además, es importante destacar que los ensayos con un recubrimiento mayor (-CC) mostraron una subestimación media del 23 %, lo que sugiere que el recubrimiento podría influir la longitud de transferencia, un factor que los modelos actuales no consideran.

4.3. Comportamiento en dirección transversal

El espécimen del ensayo DP presentó fisuras críticas al final del experimento, detectadas tanto en los datos obtenidos con los DFOS como visualmente (Figura 4, sección a 50 mm del extremo de la viga).

En la Figura 4a se muestra formación de las fisuras siguieron el desarrollo descrito por autores tales como [15–17], originándose en la zona de contacto entre el tendón y el hormigón y propagándose hacia la superficie. Asimismo, se confirmó visualmente la distribución esperada de tensiones en el hormigón, con valores máximos en los extremos de la viga y una disminución progresiva hacia el centro.

La Figura 4b presenta los datos DFOS en dirección transversal (ϵ_c) en función del pretensado transferido al hormigón (f_{pt}), permitiendo la identificación de la propagación de las fisuras. A medida que avanza la transferencia, la deformación aumenta y las curvas reflejan el patrón característico del

hormigón fisurado (zona ampliada en la parte inferior de la gráfica). Tras alcanzar P_{cr} (línea roja discontinua) ocurre un cambio brusco en la deformación, señalando la aparición de grietas radiales. Así, la deformación transversal alcanza valores asociados a la formación de fisuras, claramente superiores a la deformación de rotura por tracción del hormigón (aproximadamente 150 $\mu\text{m/m}$), evidenciando la fase crítica de fisuración.

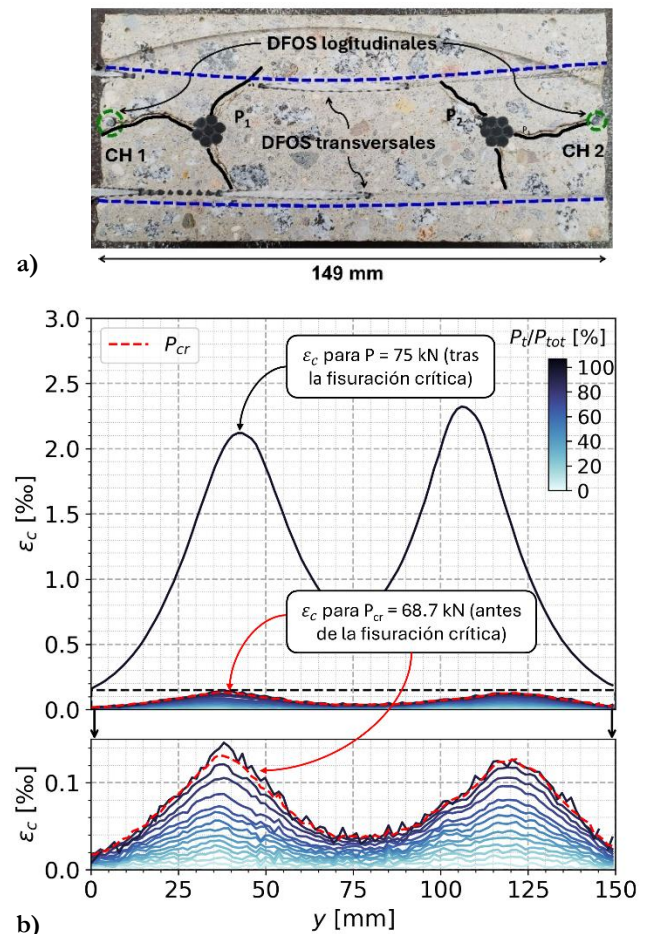


Figura 4. Ensayo DP a 50 mm del extremo de la viga: a) Sección fisurada tras el ensayo; b) Deformación transversal (ϵ_c) en función del pretensado transferido (f_{pt}).

5. Estudio analítico usando el TWCM modificado

5.1. Implementación del modelo

Este modelo fue implementado siguiendo la metodología explicada por autores y autoras

como [7,17,18]. La diferencia principal radica en que, mientras en estos estudios el coeficiente de fricción se calibró comparando únicamente las longitudes de transferencia teóricas y experimentales, nuestro equipo adoptó un enfoque distinto, gracias a la gran cantidad de datos ofrecidos por los DFOS [11]. En nuestro caso, se compararon todos los puntos de deformación del hormigón medidos y calculados, y se sumaron las diferencias obtenidas para cada espécimen. El coeficiente de fricción óptimo se determinó como aquel que resultó en la menor diferencia total.

5.1. Cálculo de las deformaciones tangenciales

Empleando el TWCM, se determinaron las deformaciones elásticas tangenciales ($\varepsilon_{c,\theta}$) en función del radio (r), el cual representa la distancia radial al centro del tendón. La Figura 5 ilustra los resultados correspondientes al pretensado transferido previo a la fisuración crítica de la viga para diferentes distancias al extremo de la viga. Asimismo, se marcó la deformación teórica de fisuración del hormigón (ε_{cr}), indicada con una línea roja discontinua.

Como se observa en la gráfica, las deformaciones alcanzan su valor máximo en la superficie de contacto con el tendón, donde se generan las fisuras, y disminuyen en progresivamente hacia la superficie. En este estado, solo una pequeña región permanece sin fisurar, con valores de deformación ligeramente inferiores a ε_{cr} , evidenciando que el sistema se encuentra en el umbral de la fisuración completa de la sección.

Mediante el seccionamiento de viga, se midió la longitud de fisura, permitiendo determinar la distancia r y realizar una comparación de las deformaciones teóricas con las deformaciones medidas experimentalmente, representadas por los puntos azules (DFOS) en la gráfica. La diferencia media resultó en un 0.02 ‰, que se encuentra en un rango aceptable

teniendo en cuenta que una variación en el radio de 1 mm puede producir dicha diferencia.

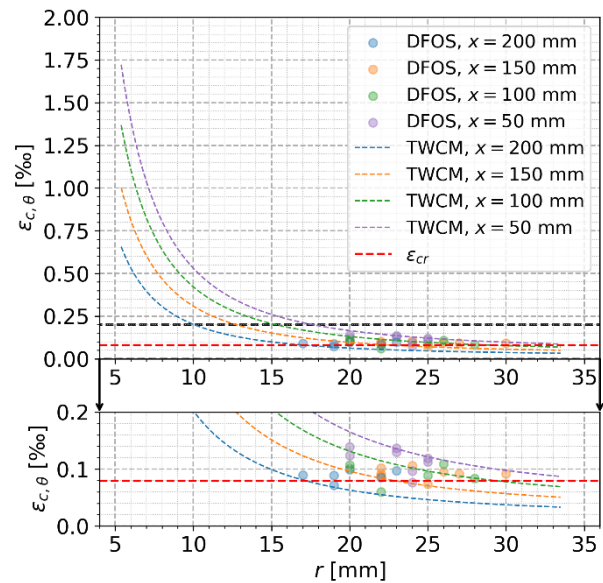


Figura 5. Deformación tangencial del hormigón ($\varepsilon_{c,\theta}$) en función del radio (r): valores calculados usando el TWCM y datos medidos con DFOS previo al crítico.

5.2. Comportamiento de fisuración del hormigón en la transferencia del pretensado

Además de poder calcular la longitud de transferencia con este modelo, se realizó un estudio paramétrico para analizar el comportamiento de fisuración del hormigón pretensado. Para ello, el análisis consideró la relación R_c/R_0 del modelo, donde R_c representa el radio del hormigón fisurado y R_0 el radio del cilindro de hormigón (recubrimiento mínimo más el radio del tendón). Cuando esta relación es mayor o igual que 1 ($R_c/R_0 \geq 1$), significa que el cilindro de hormigón se encuentra completamente fisurado, derivando en la formación de fisuras superficiales.

El estudio abarcó diferentes niveles de pretensado ($0.4 \leq f_{pi}/f_{pu} \leq 0.7$) y recubrimientos ($2.8 \leq c/d_p \leq 4.2$), como se ilustra en la Figura 6. Los resultados mostraron claramente el efecto beneficioso de un mayor recubrimiento (R_c/R_0 disminuye). Sin embargo, según el modelo, las recomendaciones actuales (línea roja) son

insuficientes para evitar la fisuración, salvo para niveles de pretensado del 45 % y 40 %, lo que subraya la necesidad de limitar el nivel de pretensado, si no se toman más medidas.

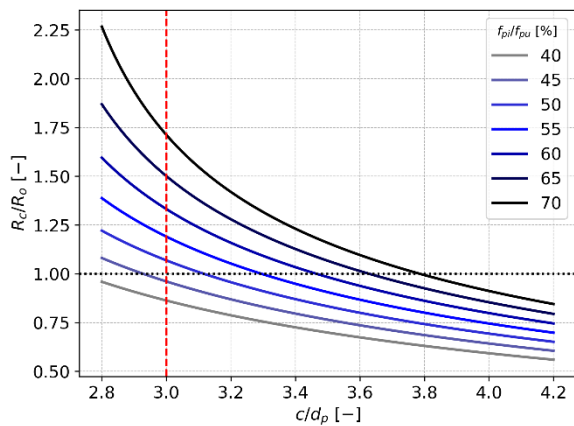


Figura 6. Estudio paramétrico del como función de c/d_p para diferentes f_{pi}/f_{pu} , con $d_p = 10.8$ mm y $f_{cm,cube} = 40$ MPa.

6. Conclusiones

Esta publicación presenta un resumen de las investigaciones realizadas sobre la transferencia del pretensado de cordones de CFRP en hormigón mediante estudios experimentales y analíticos [8–11], para las que, por primera vez, se emplearon sensores de fibra óptica distribuidos (DFOS).

Los experimentos mostraron que, bajo las mismas condiciones, las fisuras se formaron solo en elementos con CFRP, debido a sus menores longitudes de transferencia y, por tanto, mayores tensiones de adherencia. Además, las recomendaciones actuales basadas en un límite para el recubrimiento $c/d_p \geq 3.0$ resultaron insuficientes, ya que se observaron fisuras incluso con valores superiores. Solo un nivel de pretensado reducido al 40 % evitó la formación de fisuras superficiales en nuestros experimentos.

Las longitudes de transferencia obtenidas se compararon con el modelo teórico vigente, revelando una aceptable subestimación cercana al 10 %, pero de 23 % para los ensayos con un recubrimiento mayor ($c/d_p \geq 3.2$). Los datos de los DFOS y la inspección visual, facilitada por el

seccionamiento de la viga, validaron los supuestos del modelo TWCM (*Thick-Walled Cylinder Model*), que describe la formación de fisuras radiales desde el tendón hacia la superficie, con tensiones máximas concentradas en los extremos de la viga. Las fisuras superficiales críticas fueron identificadas como extensiones de estas fisuras internas hacia la superficie.

La aplicación del modelo TWCM modificado permitió calcular las tensiones tangenciales, que mostraron una diferencia media del 0.02 % respecto a las medidas obtenidas con DFOS. Además, un estudio paramétrico confirmó que el límite de recubrimiento para el hormigón estudiado C50/60 es sólo válido bajo una reducción del pretensado, en concordancia con los resultados experimentales, si no se toman otras medidas.

Finalmente, se han planificado investigaciones numéricas que, calibradas con los datos de alta precisión proporcionados por los DFOS, permitirán estudiar en profundidad la transferencia del pretensado de cordones de CFRP.

Referencias

- [1] F. Preston, J. Lehne, Making concrete change innovation in low-carbon cement and concrete, Chatham House- R. Inst. Int. Aff. (2018).
- [2] M. Schlaich, A. Apitz, F. Jesse, Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton, *Beton-Stahlbetonbau* 115 (2020) 684–696. <https://doi.org/10.1002/best.202000018>.
- [3] M. Serrano-Mesa, J.P. Osman-Letelier, A. Hückler, M. Schlaich, Experimental Investigation on Prestressed Thin-Walled Concrete Folded Slabs with CFRP Textiles, *Proc. IASS Annu. Symp.*, (IASS), Surrey, 2021.
- [4] J. Loutfi, M. Dombrowski, P. Merz, A.E. Eddin, M. Schlaich, Interdisciplinary optimisation tool for doubly curved beam-like shell floors made of CFRP prestressed concrete, *Proc. IASS Annu. Symp.*, (IASS), Zürich, 2024.

- [5] A. Stark, J. Hegger, Verbundverhalten von CFK-Spannbewehrungen in UHPFRC, *Beton- Stahlbetonbau* 108 (2013) 701–710. <https://doi.org/10.1002/best.201300038>.
- [6] A. Stark, Analysis of Prestressed Sandwich Panels with Ultra-High Performance Concrete Facings, Ph.D. thesis, RWTH Aachen, 2017. <https://doi.org/10.18154/RWTH-2017-08279>.
- [7] S. Kueres, Analysis and design of concrete beams with pre-tensioned CFRP reinforcement, RWTH Aachen, 2019. <https://doi.org/10.18154/RWTH-2020-03335>.
- [8] M. Serrano-Mesa, F. Jesse, A. Hückler, M. Schlaich, Untersuchung des Verbundverhaltens von CFK-Spannlitzen in Beton mit faseroptischen Sensoren, *Beton- Stahlbetonbau* 118 (2023) 744–756. <https://doi.org/10.1002/best.202300051>.
- [9] M. Serrano-Mesa, O. Disse, P. Merz, A. Hückler, M. Schlaich, Experimental Analysis of the Transfer Lengths of Prestressed CFRP Strands with Distributed Fiber Optic Sensors (bajo revisión), *Constr. Build. Mater.* (2025).
- [10] M. Serrano-Mesa, F. Jesse, M. Schlaich, New Insights into Splitting Crack Behaviour in Concrete Beams with Pre-tensioned CFRP Strands using Distributed Fibre Optic Sensors (en preparación), *LABSE*, Ghent, 2025.
- [11] M. Serrano-Mesa, E.A. Martínez-Pina, A. Hückler, M. Schlaich, Analytical Assessment of the Bond Behaviour of Prestressed Carbon Fiber Reinforced Polymer Strands in Concrete, *fib*, Budapest, 2024.
- [12] E. Hoyer, Der stahlsaitenbeton, Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Berlin Wien Leipzig, 1939.
- [13] A. Jokūbaitis, J. Valivonis, An Analysis of the Transfer Lengths of Different Types of Prestressed Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement, *Polymers* 14 (2022) 3931. <https://doi.org/10.3390/polym14193931>.
- [14] DIN EN 1992-1-1 (2020-05), Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures, 2020.
- [15] R. Tepfers, Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars, *Mag. Concr. Res.* 31 (1979) 3–12.
- [16] B. Hwan Oh, E. Sung Kim, Y. Cheol Choi, Theoretical Analysis of Transfer Lengths in Pretensioned Prestressed Concrete Members, *J. Eng. Mech.* 132 (2006) 1057–1066. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2006\)132:10\(1057\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2006)132:10(1057)).
- [17] S.-J. Han, D.H. Lee, S.-H. Cho, S.-B. Ka, K.S. Kim, Estimation of transfer lengths in precast pretensioned concrete members based on a modified thick-walled cylinder model, *Struct. Concr.* 17 (2016) 52–62. <https://doi.org/10.1002/suco.201500049>.
- [18] A. Stark, M. Classen, J. Hegger, Bond behaviour of CFRP tendons in UHPFRC, *Eng. Struct.* 178 (2019) 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.002>.
- [19] C3 Carbon Concrete Composite, Sporthalle aus Carbonbeton, (2023). <https://carbon-concrete.org/sporthalle-aus-carbonbeton/>
- [20] A. von der Heid, Zum Tragverhalten von Sandwichelementen aus Textilbeton mit schlaffer und vorgespannter Bewehrung, Ph.D. thesis, RWTH Aachen, 2021. <https://doi.org/10.18154/RWTH-2021-04249>.
- [21] Tokyo Rope International, General information of CFCC, (2024). <https://tokyorope-intl.co.jp/cfcc/cfcc.html>
- [22] Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt: Richtlinien für die Prüfung von Spannstählen auf ihre Eignung zur Verankerung durch sofortigen Verbund, Mitteilungen IfBt, Heft 6/1980, 1980.
- [23] B.W. Russell, N.H. Burns, Measurement of Transfer Lengths on Pretensioned Concrete Elements, *J. Struct. Eng.* 123 (1997) 541–549. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:5\(541\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:5(541)).