

Materiales de Construcción  
Vol. 56, 284, 27-42  
octubre-diciembre 2006  
ISSN: 0465-2746

## Comportamiento adherente del hormigón autocompactante en transmisión y anclaje

### *Transfer and anchorage bond behaviour in self-compacting concrete*

J. R. Martí-Vargas<sup>(\*)</sup>, P. Serna-Ros<sup>(\*)</sup>, C. A. Arbeláez<sup>(\*)</sup> y J. W. Rigueira-Víctor<sup>(\*)</sup>

Recepción/Received: 1-II-06  
Aceptación/Accepted: 14-IV-06

#### RESUMEN

El desarrollo de los hormigones autocompactantes (SCC) ofrece muchas posibilidades a las construcciones con hormigón prefabricado, aumentando su competitividad, reduciendo los plazos de fabricación y ofreciendo mejoras en la calidad del producto final. El SCC se está convirtiendo en un producto clave para el futuro desarrollo de la industria de prefabricados de hormigón pretensado.

En este estudio se compara el comportamiento adherente de los SCC con el de los hormigones tradicionales (TC) actuales. Los resultados obtenidos confirman la viabilidad del uso de los SCC para la fabricación de elementos prefabricados con hormigón pretensado, en lo relativo a su comportamiento adherente, aunque con la necesidad de considerar unas pérdidas de pretensado ligeramente mayores. Asimismo, debe esperarse un ligero aumento de las longitudes de anclaje cuando se trabaje con SCC de baja relación agua/cemento. Sin embargo, no se han detectado diferencias de comportamiento entre ambos tipos de hormigón cuando la resistencia a compresión es alta en lo relativo a las longitudes de transmisión y anclaje. El método de ensayo ECADA muestra una buena adecuación para detectar las diferencias de comportamiento entre los hormigones analizados.

**Palabras clave:** hormigón, adherencia, prefabricación, autocompactante, pretensado.

#### SUMMARY

*Self-compacting concretes (SCC) provide solutions to the problems facing precast concrete construction, enhancing competitiveness, reducing turnaround times and improving final product quality. SCC is fast becoming a key product for the future development of the precast prestressed concrete industry.*

*The present paper compares the bond performance of SCC and traditional concrete (TC). The bond performance results confirm the viability of SCC in precast prestressed concrete manufacture, despite a slightly higher loss of prestressing force and slightly greater anchorage lengths in SCC with a low water/cement ratio. No differences in transfer or anchorage length were detected, however, when high strength TC and SCC were compared. The ECADA test method proved to be well suited to detecting the differences between the concretes analyzed.*

**Keywords:** concrete, bond, precast, self-compacting, prestressing.

<sup>(\*)</sup> Departamento de la Ingeniería de Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil.  
Universidad Politécnica de Valencia.

Persona de contacto/Corresponding author: [pserna@cst.upv.es](mailto:pserna@cst.upv.es)

## 1. INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos en la industria de elementos prefabricados de hormigón pretensado pretenden obtener mayor productividad y productos más avanzados. Es de vital importancia conseguir productos en el menor tiempo posible, y por ello el hormigón necesita alcanzar suficiente resistencia rápidamente para admitir la transmisión de las fuerzas de pretensado. La bibliografía sobre la materia admite normalmente que las propiedades adherentes del hormigón dependen fundamentalmente de su resistencia a compresión (1-3).

El hormigón autocompactante (SCC) se está haciendo popular día a día en la construcción gracias a su facilidad de colocación. La dosificación de un SCC no exige un contenido en cemento o una relación agua/cemento ( $w/c$ ) especial, pero sí requiere el uso de volúmenes importantes de finos (cemento y adiciones), un superplastificante energético y, a veces, un agente de viscosidad (4-5).

Estos cambios en la dosificación provocan variaciones en las propiedades del hormigón. Dado que el módulo de elasticidad de los áridos es normalmente mayor que el de la pasta de cemento, es lógico esperar una reducción del módulo de deformación en los SCC, ya que disponen de mayor contenido en pasta que el hormigón tradicional (TC). El árido controla la retracción de la pasta, y por ello cuanto mayor sea el contenido en árido menor, será la retracción por secado. Asimismo, puede esperarse un mayor coeficiente de fluencia en un SCC que en un TC de igual resistencia (6-7).

La adherencia de armaduras pasivas en el SCC ha sido analizada por diferentes investigadores, (8-9), detectando una menor dependencia de la posición y orientación de la armadura sobre las propiedades adherentes que en los TC.

La consideración de la adherencia de armaduras activas en SCC en los distintos códigos es escasa, y se limita a recomendar ensayos (10) para la verificación de las propiedades adherentes. Por esta razón se plantean dudas sobre si se puede esperar un comportamiento adherente idéntico para los SCC y TC. Algunos estudios experimentales (11-12) admiten que la aplicación de códigos como el ACI 318 (13) o el Eurocódigo 2 (14) es suficientemente conservadora.

## 2. OBJETIVO

El objetivo de este estudio es analizar, por medio del método de ensayo ECADA (15-16), el comportamiento adherente de cordones de pretensado de 7 alambres, en transmisión y anclaje, en SCC fabricados con distintos

## 1. INTRODUCTION

*Technological advances in the precast prestressed concrete industry aim to raise productivity and deliver more highly developed products. One vitally important objective, shortening turnaround times, can be achieved by using concrete that rapidly attains its transfer strength. According to the literature (1-3), concrete bond properties are generally regarded to depend primarily on compressive strength.*

*The popularity of self-compacting concrete (SCC) is growing on the back of the simplicity of its placement. SCC requires no special cement content or water/cement ( $w/c$ ) ratio, although it does call for large volumes of fines (cement and additions), a powerful superplasticizer and sometimes a viscosity modifying admixture (4-5).*

*These changes in dosage cause variations in concrete properties. Since the modulus of elasticity is normally higher in the aggregate than the cement paste, a lower modulus should be expected in SCC because their paste content is higher than in traditional concretes (TC). Inasmuch as the aggregate curbs paste shrinkage, the higher the aggregate content the less intense is drying shrinkage. A higher creep factor can also be expected in SCC than in TC of the same strength (6-7).*

*The bond of passive reinforcement in SCC has been analyzed by a number of authors (8-9), who found bond properties to depend less on rebar positioning and orientation than in TC.*

*The existing building codes make little mention of prestressed reinforcement bond in SCC, beyond recommending tests (10) to verify bond properties. Doubts have been raised for this reason about whether SCC and TC bond behaviour may be expected to be identical. Some experimental studies (11-12) have found codes such as ACI 318 (13) and Eurocode 2 (14) to be sufficiently conservative.*

## 2. OBJECTIVE

*This study aimed to analyze the transfer and anchorage bond behaviour of 7-wire prestressing strands in SCC made with different cement contents,  $w/c$  ratios and particle size distributions. The results were compared to the*

contenidos en cemento, diferentes relaciones w/c, y con diversas granulometrias, y compararlo con TC equivalentes en cantidad de cemento y relación agua/cemento.

### 3. MATERIALES UTILIZADOS

Para la fabricación de los hormigones analizados se ha empleado un cemento tipo CEM I 52.5R (17), árido grueso 7/12 calizo de machaqueo, y arena caliza 0/4 de río lavada. Se ha utilizado también como adiciones inertes *filler* y polvo de mármol. Se empleó un reductor de agua de alto rango a base de éteres policarboxílicos.

La armadura activa fue un cordón de pretensado de 7 alambres UNE 36094:97 Y 1860 S7 13.0 (18). Las características principales según el certificado de calidad del suministrador eran: sección 99,69 mm<sup>2</sup>, carga última 192,60 kN, límite elástico al 0,2% 177,50 kN, módulo de elasticidad 196,70 kN/mm<sup>2</sup>.

### 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 4.1. Selección de dosificaciones

Se analizaron tres familias de hormigones. Cada familia se caracterizó por su contenido en cemento (350, 400 y 500 kg/m<sup>3</sup>) y su relación w/c (0,5, 0,45 y 0,35 respectivamente). Cada familia estaba compuesta por un TC y varios SCC. En total se fabricaron seis SCC. Las dosificaciones se designaron con "TC" para los hormigones tradicionales seguido de su contenido en cemento. Para los hormigones autocompactantes se designaron con "SCC" seguido de contenido en cemento y del tipo de adición inerte incorporada ("F" *filler*, "M" Marmolina, "MF" una combinación de ambas).

La dosificación de los TC se realizó con una relación grava/arena de 1,14, constante en todos los casos y sin la utilización de adiciones inertes. El aditivo se dosificó con la finalidad de conseguir una consistencia adecuada para la fabricación de las probetas.

La dosificación de los SCC se seleccionó (19) con el fin de conseguir un escurrimiento en el cono y un tiempo en el embudo en V adecuados (7). Para ello la relación grava/arena se fijó en 0,89 y se utilizó adiciones inertes para garantizar el contenido en finos necesario. Se estudiaron tres combinaciones diferentes de adiciones inertes: *filler* calizo, polvo de mármol, o una mezcla de ambos al 50%.

La Tabla 1 muestra las dosificaciones analizadas. La Figura 1 presenta la distribución granulométrica de todos los hormigones (incluyendo el cemento y las adiciones inertes).

*performance of TC with the same cement contents and w/c ratios. All experiments were conducted with the ECADA (15-16) test method.*

### 3. MATERIALS USED

*The concretes analyzed were made with CEM I 52.5R (17) cement, 7/12 crushed limestone coarse aggregate and rolled and washed 0/4 limestone sand. Limestone filler and marble dust were also used as inert additions. A polycarboxylic ether-based high range water-reducing admixture was included in mixes.*

*The active reinforcement was a UNE 36094:97 Y 1860 S7 13.0-compliant 7-wire prestressing strand (18). According to the supplier's quality certificate, its main specifications were: section, 99.69 mm<sup>2</sup>; ultimate load, 192.60 kN; 0.2% elastic limit, 177.50 kN; modulus of elasticity, 196.70 kN/mm<sup>2</sup>.*

### 4. EXPERIMENTAL PROGRAMME

#### 4.1. Dose selection

*Three families of concrete were analyzed. Each family was characterized by its cement content (350, 400 and 500 kg/m<sup>3</sup>) and w/c ratio (0.5, 0.45 and 0.35, respectively). Each family comprised one TC and several SCC. A total of six SCC were manufactured. Doses were designated "TC" for the traditional concretes, followed by the cement content. The self-compacting concretes were designated "SCC" followed by the cement content and type of inert addition included ("F" *filler*; "M" marble dust; and "MF" a combination of the two).*

*The gravel/sand ratio in the TC was a constant 1.4, with no inert additions. The admixture was dosed so as to attain a workability suitable for making the specimens.*

*SCC dosage was selected (19) to attain suitable slump values and "V" funnel times. This entailed using a gravel/sand ratio of 0.89 and inert additions to guarantee the necessary fines content. Three combinations of inert additions were studied: limestone filler, marble dust and a 1:1 mix of the two.*

*Table 1 gives the doses analyzed. Figure 1 shows the particle size distribution for all the concretes (including cement and inert additions).*

Tabla 1 / Table 1  
Composición de los hormigones analizados  
Concrete composition

Tipo de hormigón Concrete type	Cemento Cement "C" (kg/m <sup>3</sup> )	Adición inerte Inert addition (kg/m <sup>3</sup> )		w/c	w/f (*)	Aditivo Additive % of C <sup>‡</sup>	Árido / Aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	
		Polvo de mármol marble dust	Filler				Grueso Coarse	Arena Sand
TC 350	350	-	-	0.50	1.04	0.75	1028.11	901.85
SCC 350MF	350	150	150	0.52	0.86	2	703.27	792.27
TC 400	400	-	-	0.45	0.98	0.5	998.26	875.67
SCC 400MF	400	130	130	0.46	0.84	2	704.32	792.32
SCC 400F	400	-	160	0.46	0.86	2	748.85	844.11
TC 500	500	-	-	0.36	0.85	0.5	952.54	892.30
SCC 500M	500	300	-	0.36	0.82	2	646.83	728.77
SCC 500MF	500	80	80	0.36	0.82	2	711.10	801.20
SCC 500F	500	-	100	0.36	0.83	2	742.30	836.07

(\*) Relación "agua / finos" en volumen (los finos incluyen todas las partículas sólidas que pasan por el tamiz de 125 µm).

(\*) "Water / fines" ratio in volume (fines include all solid particles passing through the 125-µm sieve).

(‡) Commercial product percentage based on cement quantity. Admixture dry material 36%.

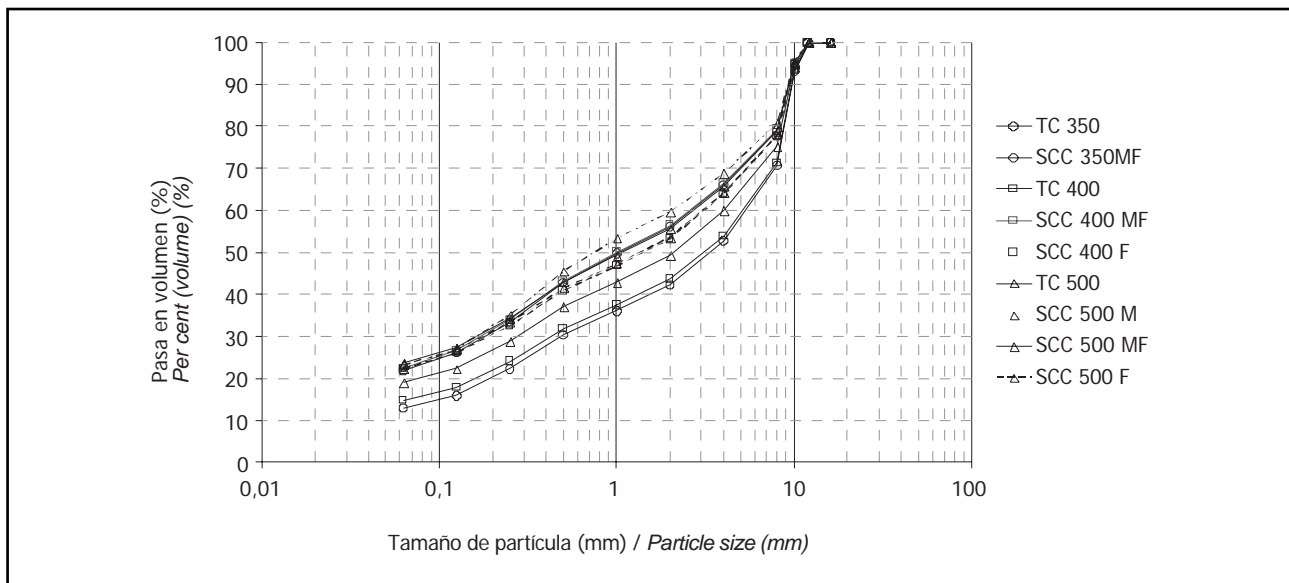


Figura 1. Granulometría de los hormigones (incluyendo cemento y adiciones inertes).  
Figure 1. Concrete particle size distribution (including cement and inert additions).

#### 4.2. Caracterización de los hormigones

La consistencia de los TC se determinó por medio del cono de Abrams (20). Para medir la fluidez de los SCC, se utilizó el ensayo de escurrimiento en el cono y el embudo en V (7). La resistencia a compresión se determinó ensayando 3 probetas cúbicas de 10 cm de lado, a 24 horas y 28 días. La resistencia a tracción indirecta se determinó a 7 días ensayando 3 probetas cilíndricas de 150 x 300 mm (21).

Las probetas utilizadas para los ensayos de caracterización procedían de la misma amasada que el hormigón

#### 4.2. Concrete characterization

TC workability was determined with the slump test (20). SCC consistency was found with the slump and V funnel tests (7). Compressive strength was established by testing three 10-cm cubic specimens at the ages of 24 h and 28 days. Indirect tensile strength was determined by testing three 150 x 300-mm cylindrical specimens at the age of seven days (21).

The specimens used for the characterization tests were made from the same batch as the concrete used for the

empleado para los ensayos de adherencia. Para los ensayos a 24 horas, las probetas se conservaron en ambiente de laboratorio. Para los ensayos a 7 y 28 días las probetas se conservaron en cámara con una temperatura de 20 °C y una humedad relativa superior al 95%.

#### **4.3. Ensayos de adherencia**

Las propiedades adherentes, longitud de transmisión y longitud de anclaje se analizaron por medio del ensayo ECADA. Para ello se fabricaron series de probetas con diferentes longitudes adherentes que fueron ensayadas con el método que se desarrolla en el siguiente apartado. La secuencia de longitudes adherentes se seleccionó con el fin de conseguir una resolución de 50 mm en la determinación de las longitudes de transmisión y anclaje. Las probetas para los ensayos de adherencia se conservaron en condiciones de laboratorio junto con las destinadas a la caracterización de las propiedades del hormigón a 24 horas. Los ensayos de adherencia se realizaron 24 horas después de la fabricación de las probetas.

### **5. MÉTODO DE ENSAYO DE ADHERENCIA 'ECADA'**

#### **5.1. Procedimiento de ensayo**

El método de ensayo ECADA consiste en analizar secuencialmente las situaciones de transmisión y anclaje de armaduras activas en un elemento de hormigón pretensado. En (15) y (16) puede encontrarse una descripción detallada del método, y en (22) su aplicación a probetas prismáticas.

Para ello se fabrican probetas en bastidores de pretensado como el mostrado en la Figura 2. El bastidor incluye un sistema de anclaje, medida y acceso (sistema AMA) (Figura 3) en uno de sus extremos (extremo tensionado).

En el extremo opuesto (extremo libre) del bastidor se conecta un anclaje con mecanismo de aproximación para controlar las operaciones de tesado y destesado de la armadura. El equipamiento del ensayo se completa con un gato hidráulico. La fuerza soportada por la armadura se controla y registra continuamente durante todo el ensayo por medio de un transductor de fuerza situado en el sistema AMA.

Los desplazamientos relativos entre armadura y hormigón (deslizamiento de la armadura) se miden y registran asimismo de forma continua por medio de transductores de desplazamiento (LVDT) tanto en el extremo libre como en el extremo tensionado.

Con el equipamiento montado tal como se indica en la Figura 4, con el gato hidráulico conectado al bastidor en

*bond tests. The 24-h tests were run on specimens stored in the laboratory conditions. For the seven- and 28-day tests specimens were stored in a wet cabinet at 20 °C and over 95% relative humidity.*

#### **4.3. Bond tests**

*Transmission and anchorage length were analyzed with the ECADA test. To this end, series of specimens were made with different embedment lengths and tested with the method described in the following item. The embedment length sequence was chosen to obtain transfer and anchorage lengths with a resolution of 50 mm. The bond test specimens were stored in the laboratory conditions together with the samples used to characterize 24-h concrete properties. Bond tests were performed on the specimens 24 hours after casting.*

### **5. 'ECADA' BONDING TEST METHOD**

#### **5.1. Test procedure**

*The ECADA test method consists in sequentially analyzing prestressed reinforcement transfer and anchorage conditions in a prestressed concrete member. A detailed description of the method can be found in (15) and (16) and in (22) and application of prismatic specimens.*

*Specimens are made in prestressing frames such as depicted in Figure 2, which is fitted with an anchorage, measurement and access (AMA) system (Figure 3) on one end (stressed end).*

*The other end (free end) of the frame is connected to an adjustable tendon anchorage for reinforcement tensioning and release. Finally, the apparatus is equipped with a hydraulic jack. The stress applied to the reinforcement is continually monitored and recorded throughout the test by a force transducer built into the AMA system.*

*The relative displacement between reinforcement and concrete (reinforcement slip) is likewise continually measured and recorded by LVDT displacement transducers on both the free and stressed ends of the frame.*

*Once the apparatus was assembled as shown in Figure 4 and the hydraulic jack attached to the free end of the*

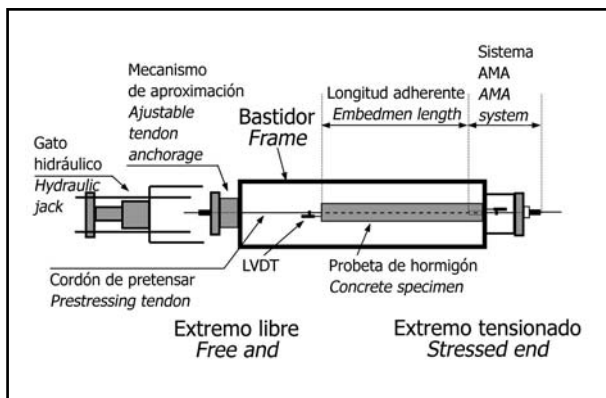


Figura 2. Esquema del equipo de ensayo.  
Figure 2. Test apparatus.

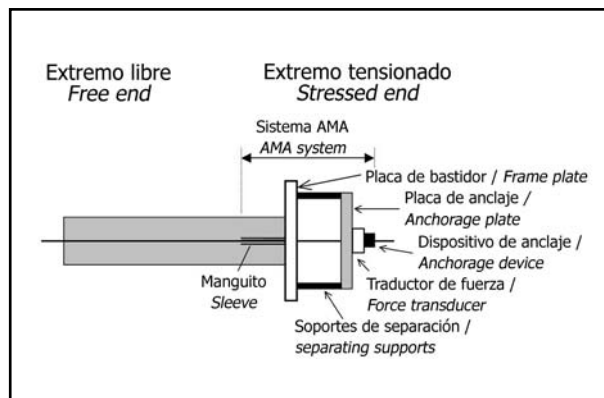


Figura 3. Esquema del sistema AMA.  
Figure 3. AMA system.

el extremo libre, las diferentes fases del procedimiento de ensayo son:

- a) **Enfilado** de la armadura en el bastidor, Figura 4(a).
- b) **Tesado de la armadura**: el gato hidráulico, apoyándose en el extremo libre, tira de los dispositivos de anclaje y los separa del mecanismo de aproximación. La fuerza soportada por la armadura alcanza un valor  $P_1$ , Figura 4(b).
- c) **Anclaje de la armadura**: se actúa sobre el mecanismo de aproximación hasta que contacte con la placa de anclaje del extremo libre y recoja la fuerza soportada por la armadura. El gato hidráulico se descarga, Figura 4(c).
- d) **Fabricación de la probeta**: las probetas de TC se compactaron con vibradores de superficie con la suficiente energía para garantizar su correcta puesta en obra. Las probetas de SCC se pusieron en molde por simple vertido. Las probetas permanecieron en ambiente de laboratorio hasta el momento del ensayo. Antes del ensayo las probetas fueron desmoldadas, Figura 4(d).
- e) **Destesado**: antes del inicio del destesado se mide la fuerza soportada por la armadura ( $P_0$ ). El gato hidráulico, colocado en el extremo libre recupera la fuerza soportada por el mecanismo de aproximación. Éste se retira. La descarga del gato hidráulico produce la transmisión del pretensado al hormigón. La fuerza soportada por la armadura decrece y tras un periodo de estabilización (2 h en este caso) alcanza un valor  $P_t$ . Con ella se calculan las pérdidas en la fuerza soportada por la armadura ( $\Delta P_S = P_0 - P_t$ ), Figura 4(e).
- f) **Operación de arrancamiento**: el gato hidráulico se coloca en el extremo tensionado, se procede a incrementar la fuerza soportada por la armadura tirando del anclaje (que se separa del bastidor) hasta que se produzca el deslizamiento de la armadura, su rotura, o la de la probeta de hormigón, Figura 4(f). La fuerza máxima alcanzada durante la operación de arrancamiento

frame, the test was conducted as per the following steps:

- a) **Alignment** of the reinforcement in the frame, Figure 4(a).
- b) **Reinforcement tensioning**: the hydraulic jack, attached to the free end of the frame, was used to pull the anchorage plate away from the adjustable anchorage. The force induced in the reinforcement was denominated  $P_1$ , Figure 4(b).
- c) **Anchoring the reinforcement**: the adjustable anchorage was engaged until it touched the anchorage plate on the free end and received the force sustained by the reinforcement from the hydraulic jack, which was dismantled, Figure 4(c).
- d) **Casting the specimen**: the TC specimens were consolidated with surface vibrators powerful enough to guarantee satisfactory concrete placement. For the SCC specimens the concrete was simply poured into the mould. The specimens were stored under laboratory conditions until tested. They were demoulded prior to testing. Figure 4(d).
- e) **Release**: the force sustained by the reinforcement ( $P_0$ ) was measured before proceeding to release. The hydraulic jack was remounted on the free end to absorb the force sustained by the adjustable tendon anchorage, which was removed. The hydraulic jack was unloaded, triggering the transfer of the prestressing force to the concrete. After stabilization (two hours in this case), the force sustained by the reinforcement declined to  $P_t$ . This value was used to calculate reinforcement force loss ( $\Delta P_S = P_0 - P_t$ ), Figure 4(e).
- f) **Pull-out operation**: The hydraulic jack was positioned on the stressed end; the force sustained by the reinforcement was increased by pulling the anchorage away from the frame until the strand slipped or the reinforcement or concrete failed, Figure 4(f). The maximum force reached during the pull-out operation ( $P_A$ ) was recorded. The maximum force prior to the

( $P_A$ ) queda registrada. Asimismo, se registra la fuerza máxima alcanzada antes del inicio de los deslizamientos ( $P_W$ ). En este estudio se considera que se produce el inicio de los deslizamientos en el instante en que el deslizamiento de la armadura en el extremo libre de la probeta alcanza 0,1 mm en la operación de arrancamiento.

## 5.2. Interpretación del ensayo

Con la técnica utilizada se pueden determinar las longitudes de transmisión y anclaje ensayando series de probetas con diferentes longitudes adherentes, ordenando los resultados individuales de cada ensayo ( $\Delta P_S$ ,  $P_A$  y  $P_W$ ) en función de la longitud adherente.

Si la longitud adherente de una probeta es superior a la longitud de transmisión, la pérdida de fuerza  $\Delta P_S$  es sensiblemente constante, y la fuerza transmitida ( $P_t$ ) coincide con la fuerza efectiva de pretensado. En probetas de menor longitud adherente la pérdida de fuerza es mayor. La longitud de transmisión se calcula como la longitud adherente de la probeta más corta que alcanza el mínimo valor de  $\Delta P_S$  de la serie.

Para el análisis de la longitud de anclaje se ha establecido una fuerza de anclaje de referencia ( $P_R$ ) de 158 kN que corresponde con el límite elástico al 0,1% (18). La longitud de anclaje será la longitud adherente de la probeta más corta en la que la armadura alcance la fuerza ( $P_R$ ) durante la operación de arrancamiento.

La longitud de anclaje, tal como se ha definido en este apartado, puede ser analizada admitiendo deslizamientos

initiation of slip ( $P_W$ ) was also recorded. In this study, slip was defined to begin when the reinforcement slipped by 0.1 mm on the free end of the specimen during the pull-out operation.

## 5.2. Interpretation of procedure

The foregoing technique can be used to determine transmission and anchorage length by testing several series of specimens with different embedment lengths and classifying the individual results of each test ( $\Delta P_S$ ,  $P_A$  y  $P_W$ ) by embedment length.

If the embedment length of a specimen is greater than the transmission length, the force loss  $\Delta P_S$  is perceptibly constant and the force transferred ( $P_t$ ) concurs with the effective prestressing force. In specimens with smaller embedment lengths the force loss is greater. The transfer length is defined to be the shortest embedment length in the series for which the minimum  $\Delta P_S$  value is attained.

A reference pull-out force ( $P_R$ ) of 158 kN, corresponding to a 0.1% elastic limit, was established to analyze anchorage length (18). The anchorage length is the shortest embedment length at which the reinforcement reaches the  $P_R$  value during the pull-out operation.

As defined in this section, anchorage length relative to reinforcement slip (anchorage length with slip,  $L_A$ ) can

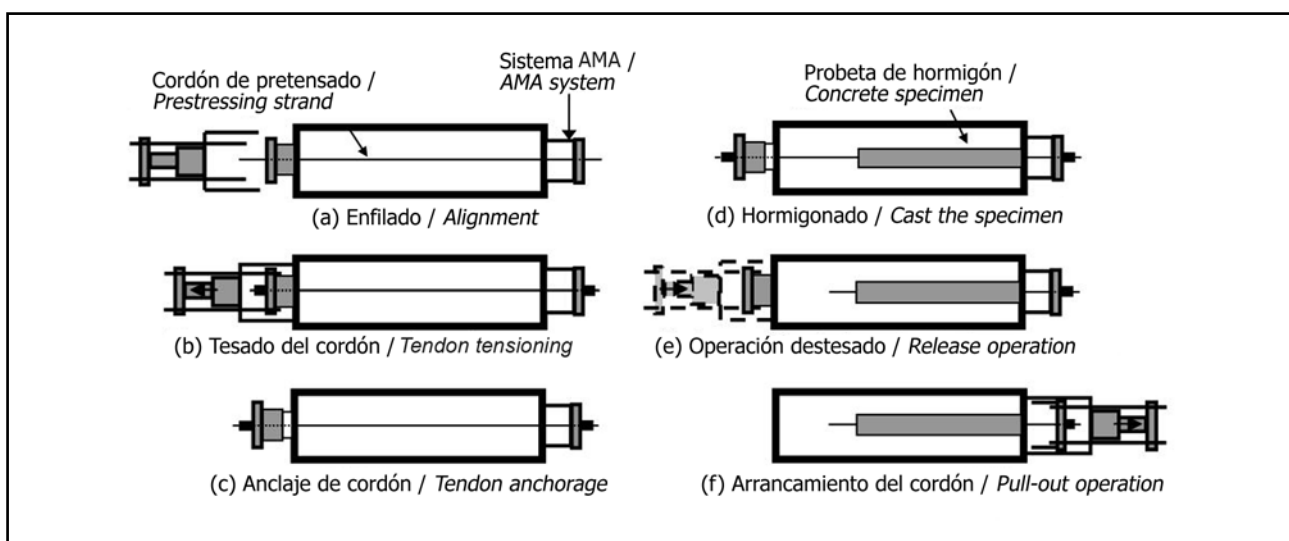


Figura 4. Fases del método de ensayo ECADA.  
Figure 4. Steps in the ECADA test method.

de la armadura (longitud de anclaje con deslizamiento  $L_A$ ) a través de los valores  $P_A$  obtenidos como resultado del ensayo. Analizando los valores  $P_W$  se puede realizar un estudio paralelo obteniendo así la longitud de anclaje sin deslizamiento  $L_W$ .

## 6. RESULTADOS DE ENSAYOS Y ANÁLISIS

### 6.1. Resultados de los ensayos de caracterización de los hormigones

La Tabla 2 muestra las propiedades de los hormigones analizados tanto en estado fresco como en estado endurecido. La resistencia a compresión de los SCC y sus equivalentes TC es similar tanto a 24 h como a 28 días. Sin embargo, la resistencia a tracción obtenida es un 40% superior en los SCC.

### 6.2. Análisis de la longitud de transmisión

La Figura 5 muestra la pérdida de fuerza registrada en la operación de destesado en función de la longitud adherente de cada probeta, para los hormigones analizados. De estos resultados puede obtenerse la longitud de transmisión aplicando los criterios del método ECADA. En la Tabla 3 se presenta la longitud de transmisión ( $L_t$ ) obtenida. Se incluye también la fuerza transmitida ( $P_t$ ), la pérdida de fuerza registrada durante el proceso de transmisión ( $\Delta P_S$ ) y el deslizamiento registrado tanto en el extremo libre ( $\delta_f$ ), como en el extremo tensionado ( $\delta_s$ ). Estos resultados han sido calculados como la media de los valores correspondientes obtenidos en las probetas de longitud adherente igual o superior a la longitud de transmisión. Los deslizamientos han sido corregidos para eliminar los efectos de la deformación elástica en el tramo de medida.

be analyzed with the  $P_A$  values obtained in the test. The  $P_W$  values, in turn, can be used to conduct a parallel study to obtain the anchorage length without slip  $L_W$ .

## 6. TEST RESULTS AND ANALYSIS

### 6.1. Results of concrete characterization tests

Table 2 gives both the fresh and hardened concrete properties. Compressive strength was found to be similar in SCC and equivalent TC after both 24 h and 28 days. Tensile strength, however, was 40% greater in the SCC.

### 6.2. Transmission length analysis

Figure 5 shows the force loss recorded in the release operation versus embedment length for the concretes analyzed. The transmission length ( $L_t$ ) found with these results by applying the ECADA method criteria is shown in Table 3. The table also gives transferred force ( $P_t$ ), force loss recorded during the transfer process ( $\Delta P_S$ ) and the slip recorded on both the free ( $\delta_f$ ) and stressed ( $\delta_s$ ) ends. These results represent the mean of the values for the specimens with an embedment length greater than or equal to the transfer length. Slip was corrected to cancel the effect of elastic deformation in the section measured.

Tabla 2 / Table 2  
Ensayos de caracterización de los hormigones  
Concrete characterization test

Tipo de hormigón Concrete type	Consistencia Consistency (cm)	Flujo en cono Slump flow $T_{50}$ (s) - $\Phi_{max}$ (mm)	Tiempo embudo V Funnel test T (s)	$f_c$ - 24 h (MPa)	$f_c$ - 28 d (MPa)	$f_{ti}$ - 7 d (MPa)
TC 350	11	-	-	35	60	2.2
SCC 350MF	-	4 - 640	9	35	59	3.8
TC 400	5	-	-	35	60	3.5
SCC 400MF	-	5 - 690	13	42	65	4.3
SCC 400F	-	4 - 740	8	45	60	4.8
TC 500	2	-	-	58	76	4.0
SCC 500M	-	4 - 830	8	59	78	5.2
SCC 500MF	-	4 - 750	13	62	86	5.9
SCC 500F	-	4 - 770	12	60	91	-



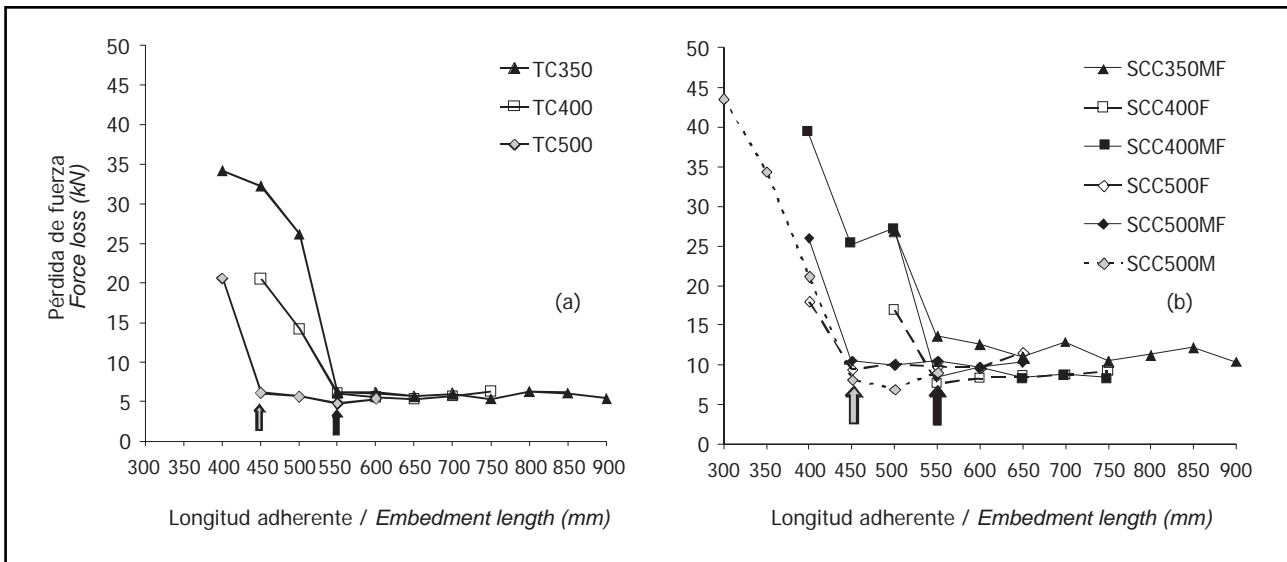


Figura 5. Secuencias de pérdida de fuerza en función de las longitudes adherentes para TC (a) y SCC (b).  
*Figure 5. Stress loss versus embedment length for TC (a) and SCC (b).*

Tabla 3 / Table 3  
 Resultados del proceso de transmisión  
*Transfer process results*

Tipo de hormigón <i>Concrete type</i>	$f_c$ - 28 d (MPa)	Pérdida de fuerza <i>Force loss</i> $\Delta P_s$ (kN)	Fuerza transmitida <i>Transmitted force</i> $P_t$ (kN)	Longitud de transmisión <i>Transmission length</i> (mm)	Deslizamiento / <i>Slip</i> (mm)	
					$\delta_f$	$\delta_s$
TC 350	60	5.92	132.58	550	1.38	0.14
SCC 350MF	59	11.76	127.04	550	1.53	0.28
TC 400	60	5.82	133.94	550	1.41	0.12
SCC 400MF	65	8.67	128.81	550	1.20	0.20
SCC 400F	60	8.49	131.66	550	1.52	0.16
TC 500	76	5.51	132.20	450	1.20	0.10
SCC 500M	78	8.06	128.58	450	1.13	0.18
SCC 500MF	86	10.16	127.40	450	1.03	0.23
SCC 500F	91	10.10	129.24	450	1.10	0.23

No se observan diferencias importantes entre SCC y TC ni en lo relativo a la longitud de transmisión ni en los deslizamientos en el extremo libre. Sin embargo, los SCC muestran mayores pérdidas de fuerza y mayores deslizamientos en el extremo tensionado que los TC equivalentes. La retracción del hormigón provoca una pequeña separación entre la probeta y la placa del bastidor en el extremo tensionado. Este fenómeno se detectó en todas las probetas fabricadas con SCC, durante el desmoldeo. Para confirmar esta teoría se analizó la evolución del deslizamiento en el extremo tensionado. La Figura 6 muestra la fuerza transmitida en función del deslizamiento registrado durante el proceso de destesado para una probeta de cada tipo de hormigón. A partir de estos resultados se ha propuesto un modelo simplificado de comportamiento (Figura 7).

*No material differences were observed between SCC and TC in terms of either transfer length or free end slip. Nonetheless, the SCC exhibited greater force loss and stressed end slip than the equivalent TC. Concrete shrinkage induced a tiny gap between the sample and the stressed end of the frame. This development was observed in all the SCC specimens during demoulding. To confirm this theory, stressed end slip was tracked. Figure 6 shows the force transferred against the slip recorded during the release process for one specimen of each type of concrete. These results were used to propose a simplified behaviour model (Figure 7).*

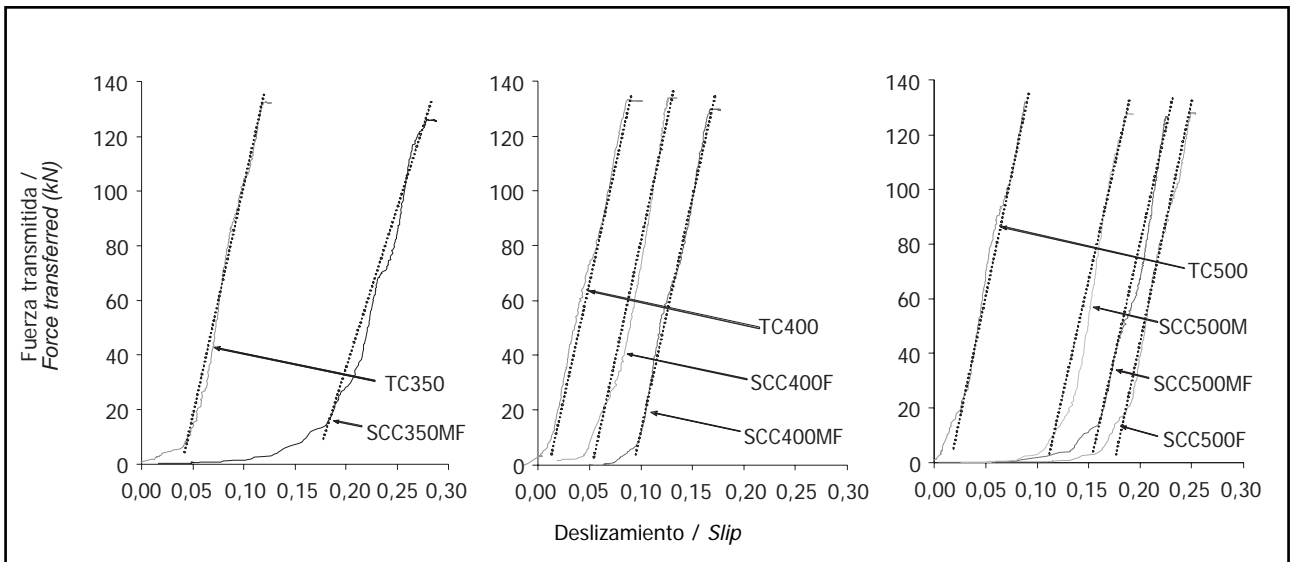


Figura 6. Deslizamiento en el extremo tensionado para hormigones con longitud adherente mayor que la longitud de transmisión.  
 Figure 6. Stressed end slippage for concrete specimens with an embedment length greater than the transmission length.

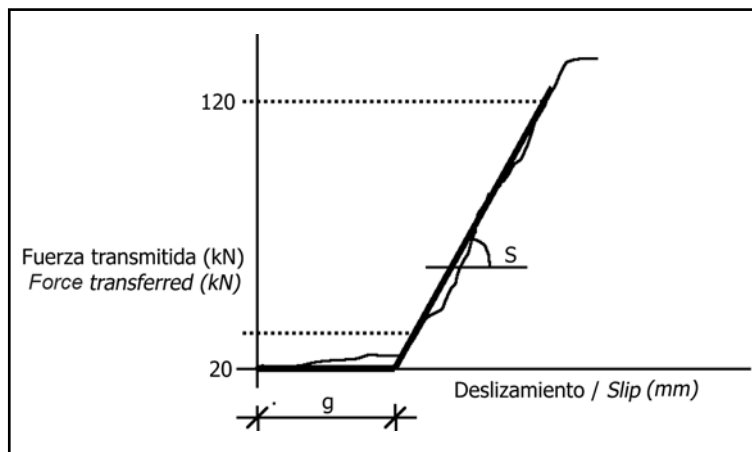


Figura 7. Modelo bilineal de comportamiento adherente.  
 Figure 7. Simplified bilinear behaviour model.

El modelo incluye un primer tramo horizontal con fuerza transmitida nula, que corresponde al proceso de aproximación que compensa la separación ( $g$ ) entre la probeta y la placa del bastidor. En este momento no puede hablarse con propiedad de deslizamiento, ya que se produce un movimiento de aproximación de la probeta hasta contactar con la placa del bastidor.

*The first horizontal branch in the model, where no force is transmitted, corresponds to specimen displacement to close the gap ( $g$ ) with the frame. No slip can be said to take place at this point, since although the specimen moves to abut with the frame, no differential displacement of the reinforcement is involved.*

El segundo tramo, caracterizado por una recta de pendiente " $s$ ", mide el deslizamiento real armadura - hormigón debido a las redistribuciones de esfuerzos entre bastidor y probeta y a la compatibilidad de deformaciones durante el proceso de transmisión del pretensado.

*The second branch, characterized by a " $s$ " slope, measures actual reinforcement-concrete slip due both to the redistribution of forces between the frame and the specimen and to strain compatibility during the force transfer process.*

La separación probeta/bastidor de cada probeta fue analizada a través de las curvas fuerza transmitida - deslizamiento

*The specimen/frame gap was analyzed for each specimen from the transferred force - stressed end slip curves. This*

en el extremo tensionado. Para ello se ajustó una recta a la rama con valores de fuerza transmitida entre 20 y 120 kN, y se determinó la distancia al origen del punto de corte de esta recta con el eje de abscisas. El proceso de aproximación que se produce al inicio del destesado y que compensa la separación entre probeta y la placa del bastidor provoca una pérdida de fuerza inducida ( $\Delta P_{ind}$ ) en la armadura que puede ser calculada con la ecuación:

$$\Delta P_{ind} = E_p \times A_p \times g / l_0 \quad [1]$$

donde  $A_p$  es la sección de la armadura,  $E_p$  es su módulo de elasticidad y  $l_0$  es la longitud afectada. Para la configuración del ensayo  $l_0 = 550$  mm (longitud del sistema AMA).

La Tabla 4 muestra la separación y la pérdida de fuerza inducida para cada hormigón. Estos resultados corresponden al valor medio de todas las probetas de longitud adherente igual o superior a la longitud de transmisión. Restando la pérdida de fuerza inducida a la pérdida de fuerza total registrada durante el ensayo se determina la pérdida de fuerza del sistema ( $\Delta P_{sis}$ ). El valor así obtenido se presenta en la Tabla 4.

$$\Delta P_{sis} = \Delta P_S - \Delta P_{ind} \quad [2]$$

Los resultados muestran, como es lógico, que la pérdida de fuerza del sistema es independiente del tipo de hormigón y del contenido en cemento dentro de los límites de este estudio. Además, el valor obtenido coincide con el valor teórico calculado a partir de los parámetros del ensayo (15). Estos resultados confirman que la mayor pérdida de fuerza registrada en los SCC puede justificarse a partir de la mayor separación entre la probeta y el bastidor.

*was done by fitting a straight line to the branch with transferred force values of between 20 and 120 kN and calculating the x-intercept for this line. The displacement to close the gap between specimen and frame at the beginning of the release process caused an induced force loss ( $\Delta P_{ind}$ ) in the reinforcement that can be calculated from the following expression:*

*where  $A_p$  is the section of the reinforcement,  $E_p$  is the modulus of elasticity and  $l_0$  is the distance involved. For this test configuration,  $l_0 = 550$  mm (length of AMA system).*

*Table 4 shows the gap and induced force loss for each type of concrete. These results represent the mean value of all the specimens whose embedment length was greater than or equal to the transfer length. Subtracting the induced force loss from the total force loss recorded during the test yields the system loss ( $\Delta P_{sis}$ ). The value obtained is given in Table 4.*

*The results logically show that, within the limits of the present analysis, system loss does not depend on the type of concrete or cement content. Moreover, the value obtained concurred with the theoretical value calculated from test parameters (15). These results confirm that the greater force loss recorded in SCC may be explained by the greater gap between specimen and frame.*

Tabla 4 / Table 4  
 Pérdidas de fuerza según su origen  
*Force loss by origin*

Tipo de hormigón <i>Concrete type</i>	Separación "s" (mm) <i>Gap "s" (mm)</i>	Pérdida de fuerza inducida <i>Induced stress loss</i> $\Delta P_{ind}$ (kN)	Pérdida de fuerza medida <i>Measured stress loss</i> $\Delta P_S$ (kN)	Pérdida de fuerza del sistema <i>System force loss</i> $\Delta P_{sis}$ (kN)
TC 350	0.034	1.21	5.92	4.71
SCC 50MF	0.162	5.77	11.76	5.98
TC 400	0.022	0.78	5.82	5.55
SCC 400MF	0.102	3.64	8.67	5.03
SCC 400F	0.076	2.71	8.49	5.78
TC 500	0.020	0.71	5.51	4.80
SCC 500M	0.093	3.31	8.06	4.74
SCC 500MF	0.156	5.56	10.16	4.60
SCC 500F	0.138	4.92	10.10	5.18

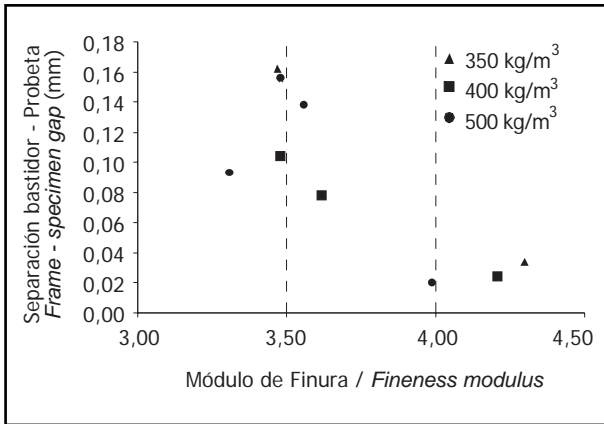


Figura 8. Separación probeta - bastidor en función del módulo de finura del hormigón.  
 Figure 8. Specimen - frame gap versus concrete fineness modulus.

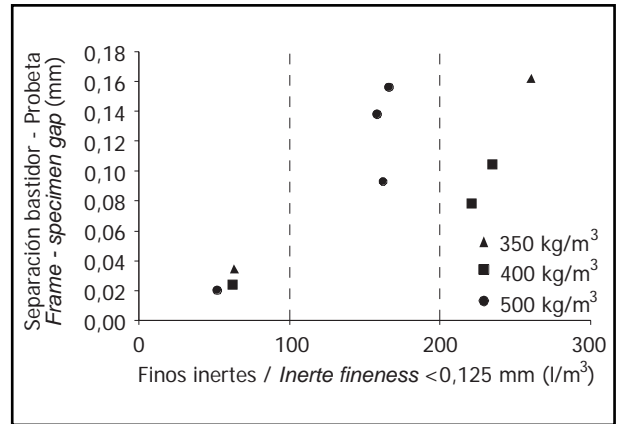


Figura 9. Separación probeta - bastidor en función del contenido en finos inertes del hormigón.  
 Figure 9. Specimen - frame gap versus concrete inert fineness.

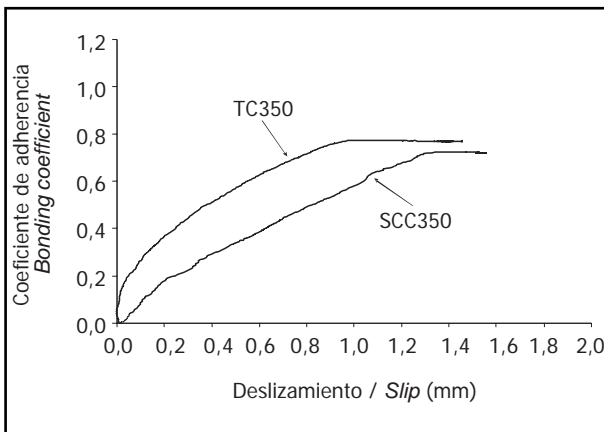


Figura 10. Coeficiente de adherencia en función del deslizamiento en el extremo libre. Hormigones con 350 kg/m³ de cemento.  
 Figure 10. Bond coefficient versus free end slippage for concrete with 350 kg/m³ of cement.

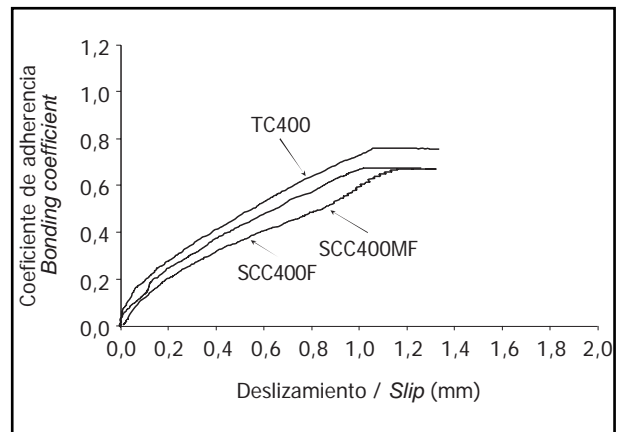


Figura 11. Coeficiente de adherencia en función del deslizamiento en el extremo libre. Hormigones con 400 kg/m³ de cemento.  
 Figure 11. Bond coefficient versus free end slippage for concrete with 400 kg/m³ of cement.

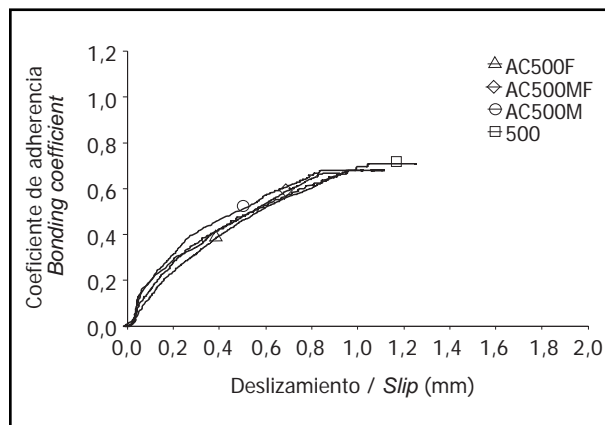


Figura 12. Coeficiente de adherencia en función del deslizamiento en el extremo libre. Hormigones con 500 kg/m³ de cemento.  
 Figure 12. Bond coefficient versus free end slippage for concretes with 500 kg/m³ of cement.

Las Figuras 8 y 9 muestran la separación entre probeta y bastidor en función del módulo de finura del hormigón y su contenido en finos inertes, respectivamente. En estas figuras se aprecia una tendencia a presentar mayor separación cuanto más fina es la granulometría del hormigón. Esto apoyaría la hipótesis que justifica las mayores pérdidas de fuerza a partir de la mayor retracción de los SCC.

### 6.3. Evolución de los deslizamientos en el extremo libre

Las Figuras 10, 11 y 12 muestran la evolución de los deslizamientos registrados en el extremo libre de una serie de probetas de longitud adherente superior a la longitud de transmisión, durante el destesado. En estas gráficas el valor representado en el eje de ordenadas es el coeficiente de adherencia " $U_t/\sqrt{f_c}$ " que considera el efecto de las variaciones de resistencia del hormigón entre las diferentes series. La tensión de adherencia  $U_t$  ha sido calculada como:

$$U_t = P_t / (4\pi\Phi L_t / 3) \quad [3]$$

Donde  $\Phi$  es el diámetro de la armadura de pretensado.

En todos los casos analizados se detecta un comportamiento inicial más rígido en los TC. Los SCC muestran curvas más tendidas manifestándose los deslizamientos más pronto, pero al final de la transmisión los deslizamientos finales son idénticos en SCC y TC. Las diferencias de comportamiento entre ambos tipos de hormigón son más evidentes cuando las dosificaciones en cemento son menores, pero dejan de ser apreciables con contenidos en cemento de 500 kg/m<sup>3</sup>. En estos casos, las diferencias de comportamiento se limitan a la ya comentada menor fuerza transmitida.

### 6.4. Longitud de anclaje

Después del destesado se procede a la operación de arrancamiento. La elaboración de curvas fuerza de arrancamiento en función de la longitud adherente de la probeta permite determinar la longitud de anclaje para cada una de las dosificaciones estudiadas. Las Figuras 13 y 14 presentan algunos ejemplos. Para cada hormigón se representa tanto la fuerza máxima alcanzada ( $P_A$ ) como la que produce el inicio de deslizamientos ( $P_W$ ). Se incluye, asimismo, la fuerza de anclaje de referencia ( $P_R$ ). La Tabla 5 muestra los valores de longitud de anclaje con y sin deslizamiento para los hormigones analizados.

No se han observado diferencias apreciables en la longitud de anclaje entre SCC y TC con alta dosificación en cemento. Además, en estos casos la longitud de anclaje con deslizamiento es menor que la longitud de transmisión. Sin embargo, se obtienen mayores longitudes de

*Figures 8 and 9 plot the gap between the specimen and frame versus the concrete fineness modulus and inert fines content, respectively. It may be inferred from these figures that the gap tends to be greater with finer concrete particle size. This would lend support to the hypothesis that attributes greater force loss to greater shrinkage in SCC.*

### 6.3. Free end slip

*Figures 10, 11 and 12 show the free end slip recorded during release for a series of specimens with an embedment length greater than the transmission length. The value of the bond coefficient " $U_t/\sqrt{f_c}$ " (which takes account of the effect of concrete strength variations in the different series) is represented on the Y-axis in these graphs. Bond stress  $U_t$  was calculated as:*

*Where  $\Phi$  is the prestressing strand diameter.*

*In all the cases analyzed the TC were found to be initially more rigid. The SCC exhibited flatter curves with earlier slip, but at transfer terminus, final slip was identical in SCC and TC. The differences in performance in the two types of concrete were more obvious when the cement dosages were smaller, and negligible with a cement content of 500 kg/m<sup>3</sup>. In this case the differences in behaviour were limited to the amount of force transferred as discussed above.*

### 6.4. Anchorage length

*Release was followed by the pull-out operation. Pull-out force versus specimen embedment length curves were used to determine the anchorage length for each dosage studied. Figures 13 and 14 provide a few examples. The maximum force attained ( $P_A$ ) and the force at initial slip ( $P_W$ ) are represented for each concrete. The reference anchorage force ( $P_R$ ) is likewise shown. Table 5 gives the anchorage length values with and without slip for the concretes analyzed.*

*No material differences were observed between high cement content SCC and TC. Moreover, under such circumstances the anchorage length with slip was lower than the transfer length. Nonetheless, longer anchorage lengths were found for the SCC than for the TC when 350*

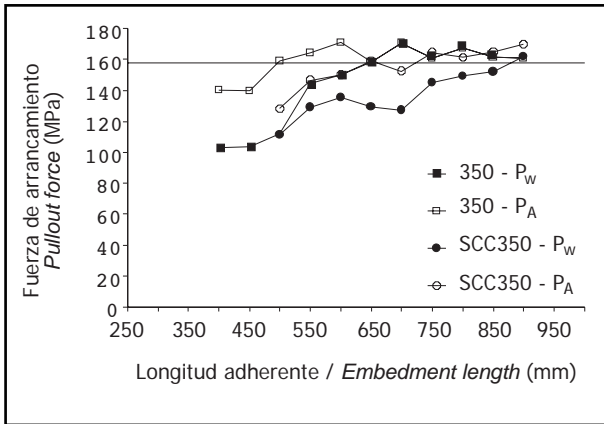


Figura 13. Fuerza de arrancamiento para hormigones con 350 kg/m<sup>3</sup> de cemento.

Figure 13. Pull-out force versus embedment length for concretes with 350 kg/m<sup>3</sup> of cement.

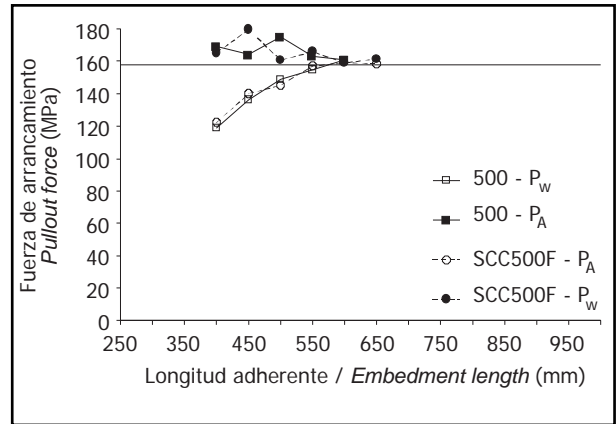


Figura 14. Fuerza de arrancamiento para hormigones TC500 y SCC 500F.

Figure 14. Pull-out force versus embedment length for concretes TC500 and SCC 500F.

Tabla 5 / Table 5  
Resultado final  
Final results

Tipo de hormigón <i>Concrete type</i>	w/c	f <sub>c</sub> - 24 h (MPa)	Longitud de transmisión <i>Transmission length</i> (mm)	Longitud de anclaje con deslizamiento <i>Anchorage length with slipp</i> (mm)	Longitud de anclaje sin deslizamiento <i>Anchorage length without slipp</i> (mm)
TC 350	0,50	35	550	550	650
SCC 350MF	0,52	35	550	650	> 900
TC 400	0,45	35	550	500	700
SCC 400MF	0,46	42	550	550	700
SCC 400F	0,46	45	550	550	700
TC 500	0,36	58	450	400	600
SCC 500M	0,36	59	450	400	600
SCC 500MF	0,36	61	450	400	600
SCC 500F	0,36	60	450	400	60

anclaje para los SCC que para los TC cuando el contenido en cemento es de 350 o 400 kg/m<sup>3</sup>. Todo ello aunque la longitud de transmisión no haya sido afectada por el tipo de hormigón. Estas diferencias son mayores cuanto menor es la resistencia a compresión del hormigón.

## 7. CONCLUSIONES

- Ha sido analizado el comportamiento adherente, en transmisión y anclaje, de cordones de pretensado de siete alambres en SCC con diferentes relaciones agua/cemento, cantidad de cemento y granulometrías, y se han comparado con el comportamiento en TC equivalentes.

to 450 kg/m<sup>3</sup> of cement were used. The foregoing observations notwithstanding, transmission length was not affected by the type of concrete. The lower the concrete compressive strength, the greater were the differences observed.

## 7. CONCLUSIONS

- Transfer and anchorage bond performance was analyzed in seven-wire prestressing strands embedded in SCC with different water/cement ratios, cement contents and particle size distributions, and the results compared to performance in equivalent TC.

- Se ha utilizado el método de ensayo ECADA que se ha mostrado eficaz para detectar diferencias en los comportamientos adherentes estudiados.
  - Los SCC y los TC equivalentes tienen una resistencia a compresión similar, pero la resistencia a tracción de los SCC ha sido superior.
  - Las pérdidas de fuerza durante el destesado han sido siempre superiores en los SCC, especialmente cuando los contenidos en adiciones inertes es grande. Esta respuesta ha sido atribuida a la mayor retracción del hormigón y se ha calculado su efecto a partir de la evolución de los deslizamientos en el extremo tensionado. Esto conduce a plantear mayores pérdidas de pretensado cuando se utilice SCC, con independencia de su nivel de resistencia.
  - Los SCC fabricados con dosificaciones más bajas de cemento muestran un comportamiento más dúctil en lo relativo al deslizamiento en el extremo libre durante el proceso de destesado. Sin embargo, tanto la longitud de transmisión como los deslizamientos finales en el extremo libre son similares para los SCC y los TC equivalentes.
  - La longitud de anclaje ha sido analizada tanto aceptando deslizamientos relativos de la armadura en el extremo libre (longitud de anclaje con deslizamiento  $L_A$ ), como sin permitir deslizamientos (longitud de anclaje sin deslizamiento  $L_W$ ).
  - Cuando la dosificación en cemento es baja las longitudes de anclaje son mayores para los SCC. Sin embargo, cuando la dosificación en cemento es alta no se han encontrado diferencias en las longitudes de anclaje. Los hormigones con baja relación agua/cemento presentan una longitud de anclaje con deslizamiento menor que la longitud de transmisión. Cuando la relación agua/cemento aumenta estas diferencias disminuyen.
  - La longitud de anclaje sin deslizamiento es siempre mayor que la longitud de anclaje con deslizamiento.
- *The ECADA test method used proved to be effective in detecting differences in the bond behaviour studied.*
  - *While SCC and TC showed a similar compressive strength, tensile strength was higher in the SCC.*
  - *Force losses during release were consistently greater in the SCC, particularly when the inert addition content was high. This finding was attributed to more intense concrete shrinkage and its effect was calculated from stressed end slip. As a result, SCC design should make provision for greater prestressing loss, regardless of concrete strength.*
  - *The SCC made with lower doses of cement were more ductile in terms of free end slip during release. Nonetheless, both the transmission length and the final free end slip values were similar for SCC and the equivalent TC.*
  - *Anchorage length was analyzed both relative to reinforcement slip in the free end (anchorage length with slip,  $L_A$ ) and without slip (anchorage length without slip,  $L_W$ ).*
  - *Anchorage length was greater in the SCC with low cement contents. At high cement doses, however, no differences were observed in anchorage length. Concretes with low water/cement ratios had a smaller anchorage length with slip than transmission length. This difference declined as the water/cement ratio rose.*
  - *Anchorage length without slip was consistently greater than anchorage length with slip.*

## AGRADECIMIENTOS

El contenido de este artículo forma parte de una investigación que se está desarrollando en el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universidad Politécnica de Valencia en colaboración con las empresas PREVALESA e ISOCRON. Este trabajo cuenta con la financiación del Ministerio de Ciencia y Tecnología y fondos FEDER (Proyecto MAT2003-07157). Agradecemos la colaboración de las empresas, así como del equipo técnico del laboratorio de estructuras de hormigón de la Universidad Politécnica de Valencia.

## ACKNOWLEDGEMENTS

*The content of this article forms a part of research that the Polytechnic University of Valencia's Concrete Science and Technology Institute (ICITECH) is presently conducting in conjunction with PREVALESA and ISOCRON. This study was funded by the Ministry of Science and Technology and ERDF (Project MAT2003-07157). The authors wish to thank the above companies as well as the concrete structures laboratory technicians at the Polytechnic University of Valencia for their cooperation*

## BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Mitchell, D.; Cook, W. D.; Khan, A. A.; Tham, Th.: "Influence of high strength concrete on transfer and development length of pretensioning strand", *PCI Journal*, May-Jun 1993, pp. 52-66.
- (2) Cousins, Th. E.; Stallings, J. M.; Simmons, M. B.: "Reduced strand spacing in pretensioned, prestressed members", *ACI Structural Journal*, May-Jun 1994, pp. 277-286.
- (3) Uijl, J.A den: "Transfer Length of prestressing strands in HPC", *PCI Journal*, 1996, pp. 75- 90.
- (4) Skarendahl, A.; Petersson, O.: *Self-Compacting Concrete: State of the Art report of RILEM Technical Committee 174 SCC*. RILEM Publications S.A.R.L., 2000.
- (5) Okamura, H.: "Self-Compacting Concrete", *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, nº 5 (2003), pp. 5-15.
- (6) Sonebi, M.; Bartos, P. J. M.; Zhu, W.; Gibbs, J.; Tamimi, A.: "Properties of Hardened Concrete. Task 4 - Final Report", *Brite EuRam Proposal n.º BE96-3801*, May, 2000.
- (7) EFNARC: *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use*. www.efnarc.org, May, 2005.
- (8) Lorrain, M.; Daud, A.: "Bond in Self-Compacting Concrete", *Proceedings Bond in Concrete from research to standards*, pp. 529-536, Budapest, november, 2002.
- (9) Zhu, W.; Bartos, P. J. M.: "Micromechanical Properties of Interfacial Bond in Self-Compacting Concrete", *Proceedings Bond in Concrete From research to standards*, pp. 387-394, Budapest, november, 2002.
- (10) PCI: *Interim Guidelines for the use of self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants*, First Edition, Chicago, IL, 2003.
- (11) Burgueño, R.; Haq, M.: "Transfer and development length of prestressing strands in precast/prestressing girders using Self-Consolidating concrete", *Proceedings SCC 2005 - Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Chicago, September, 2005.
- (12) Hegger, J.; Kommer, B.: "Pretensioning in Self-Consolidating Concrete (SCC)", *Proceedings SCC 2005 - Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC) and the fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Chicago, September, 2005.
- (13) ACI Comité 318: "Building Code Requirements for reinforced Concrete (ACI 318-5)", *American Concrete Institute*, Detroit, 2005.
- (14) AENOR: *Eurocódigo 2 Proyecto de Estructuras de Hormigón*, 1998.
- (15) Martí, J. R.: "Experimental study on bond of prestressing strand in high-strength concrete" PhD Thesis, UMI Dissertation Services, ISBN 0-493-55092-5, 2002. (In spanish.)
- (16) Martí Vargás, J. R.; Serna-Ros, P.; Fernández-Prada, M. A.; Miguel-Sosa, P. F.; Arbeláez, C. A.: "Test method for determination of the transmission and anchorage lengths in prestressed reinforcement", *Magazine of Concrete Research*, vol. 58, nº 1 (2006), febrero, pp. 21-29.
- (17) AENOR: *UNE 80300 IN Recomendaciones para el uso de los cementos*.
- (18) AENOR: *UNE 36094:1997 Alambres y cordones de acero para armaduras de hormigón pretensado*, Madrid, 1997.
- (19) Rigueira, J. W.: "Estudio de la influencia de la granulometría de los sólidos en el diseño de hormigones autocompactables". *5º Simposio internacional de estructuras, geotecnia y materiales de construcción Santa Clara, Cuba* 19-22 November, 2002.
- (20) AENOR: *UNE 83313:1990: Ensayos de Hormigón. Medida de la consistencia del Hormigón fresco. Método del Cono de Abrams*.
- (21) AENOR: *UNE-EN 12390-6:2001: Ensayos de Hormigón Endurecido. Parte 6: Resistencia a Tracción Indirecta de Probetas*.
- (22) Martí Vargás, J. R.; Arbeláez, C. A.; Serna-Ros, P.; Fernández-Prada, M. A.; Miguel-Sosa, P. F.: "Transfer and development lengths of concentrically prestressed concrete", *PCI journal*; vol. 51, nº 5 (2006), sept-oct., pp. 74-85.

\* \* \*