

# Comportamiento estructural de puentes de dovelas prefabricadas con pretensado exterior y junta seca.

## Primera parte: Ensayos de vigas

### *Structural behaviour of precast segmental concrete bridges with external prestressing and dry joints.*

#### *Part 1: Beam Tests*



**José Turmo**

ETS de Ingenieros de Caminos. Universidad de Castilla-La Mancha



**Joel Piernagorda**

Dept. de Ingeniería de la Construcción. Universidad Politécnica de Cataluña



**Gonzalo Ramos**

Dept. de Ingeniería de la Construcción. Universidad Politécnica de Cataluña



**Ángel Carlos Aparicio**

Dept. de Ingeniería de la Construcción. Universidad Politécnica de Cataluña

#### RESUMEN

Este trabajo de investigación presenta un estudio sobre el comportamiento de los puentes de dovelas de hormigón con pretensado exterior y juntas secas conjugadas, centrándose en el estudio de la respuesta a solicitaciones de flexión y cortante combinados, en servicio y en rotura. Se evalúa, asimismo, la posibilidad de sustituir total o parcialmente la armadura convencional de las dovelas tras la inclusión de fibras metálicas en el hormigón. Se presentan unos ensayos realizados sobre seis vigas con distinto grado de pretensado sometidas a flexión y a cortante, unas realizadas con hormigón convencional y otras con hormigón reforzado con fibras de acero. De todo lo anterior se han extraído interesantes conclusiones referentes al armado de las dovelas y al comportamiento global de este tipo de estructuras.

#### ABSTRACT

*This work presents a study of the behaviour of segmental concrete bridges with external prestressing, focussing on the response under combined flexure and shear, in the service and ultimate limit states. The possibility of replacing entirely or partially the conventional reinforcement of the segments through the incorporation of steel fibres in the concrete is also evaluated. Tests have been performed on large-scale beams with different levels of prestressing for evaluating the response under flexure and shear. These tests were conducted on conventional and steel fibre reinforced concretes. Significant*

*conclusions have been reached regarding the reinforcement detailing in the segments and the global behaviour of segmental structures with dry castellated joints.*

#### 1. INTRODUCCIÓN

Los puentes de dovelas de hormigón prefabricadas con pretensado exterior y junta seca se asocian a un proceso constructivo que pasa por ser el más rápido en su género. Estos puentes son construidos vano a vano. Para la construcción de cada vano las dovelas se disponen una junto a la otra suspendidas de una viga o apoyadas en una cimbra móvil y son ensambladas con pretensado exterior. En general no es necesaria la aplicación de una resina epoxy entre caras de dovelas. Son precisamente los puentes de dovelas con juntas secas sin resina con pretensado exterior los que son objeto de este estudio. Su característica más significativa es que no existe armadura adherente, ni activa ni pasiva, atravesando la junta. El primer ejemplo construido fue el Long Key Bridge<sup>1</sup>. Un ejemplo más reciente lo encontramos en Bangkok<sup>2</sup>

Ante cargas de servicio, estos puentes se dimensionan para que no se alcance el estado límite de descompresión, las secciones mantengan una compresión mínima de  $\sigma_n=0,5$  MPa y las juntas permanezcan cerradas. Cuando la sobrecarga aumenta hasta alcanzar los niveles de Estado Límite Último las juntas se abren ostensiblemente (Figura 1), la estructura pierde rigidez rápidamente y alcanza una flecha considerable. Además, no hay armadura pasiva que cruce la junta. De ahí



Figura 1. Junta abierta en ELU.

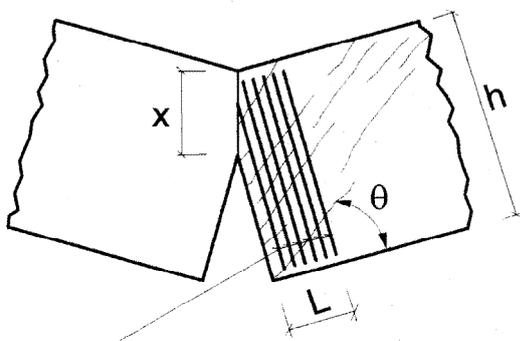
que los momentos flectores tengan que ser resistidos bien por más armadura activa bien por mayores tensiones iniciales en el acero. En puentes isostáticos, el ELU de solicitaciones normales, y no el ELS de descompresión, es el que guía el diseño<sup>3</sup>.

La transferencia de cortante a través de juntas abiertas es un

tema más complejo. La teoría universalmente aceptada propone que el cortante es transmitido a través de las juntas por forjados y almas mediante dos mecanismos cualitativa y cuantitativamente diferentes. El primero recoge el efecto del apoyo de las llaves conjugadas de las que normalmente están provistas estas juntas. El segundo representa la fuerza de rozamiento que surge cuando dos superficies planas y comprimidas intentan deslizarse la una contra la otra y que es proporcional a las compresiones actuantes<sup>4</sup>.

Uno de los puntos controvertidos en la evaluación de la resistencia a cortante de una junta es la cuantificación de la parte lisa comprimida de la sección que es susceptible de transmitir cortante ( $A_{sm}$ ). Algunos autores<sup>5,6</sup> acotan la parte de forjado capaz de transmitir cortante únicamente a la zona próxima a almas.

Otro punto que enfrenta a los investigadores es el armado de la dovela en la proximidad de la junta abierta. Algunos autores<sup>5,6</sup> defienden la necesidad de disponer una armadura para suspender el cortante en la proximidad de la junta abierta. En la Figura 2 se justifica gráficamente la inclusión de esta armadura.

Figura 2. Bielas de cortante con flexión positiva y armadura de suspensión<sup>6</sup>.

Aunque ya han sido ensayados modelos de puentes de dovelas con armadura no adherente bajo esfuerzos de flexión y

cortante combinados<sup>7,8,9,10</sup>, los autores creen que se aborda por primera vez un estudio experimental completo del comportamiento de estas estructuras tan singulares que incluya específicamente la armadura de suspensión y el ancho efectivo para la transmisión de cortante. También por primera vez se hacen ensayos a gran escala de este tipo de vigas con SFRC y se compara su comportamiento con vigas similares realizadas con hormigón convencional.

## 2. ESTUDIOS ANALÍTICOS

La respuesta de las vigas convencionales de hormigón ante solicitaciones tangentes, no se puede estudiar a nivel seccional. La formación de un mecanismo de celosía para la transmisión del cortante, antes de que se produzca la rotura, obliga a realizar un estudio espacial de la respuesta a cortante. De una manera análoga, la respuesta estructural de las vigas de hormigón con junta seca y pretensado exterior impide un mero análisis seccional para evaluar la respuesta a cortante.

Es sabido que, en una viga cualquiera, el cortante  $V$  actuante en una sección  $x$  queda relacionado matemáticamente con el momento flector exterior  $M$  mediante la ecuación 1.

$$V(x) = \frac{\partial M(x)}{\partial x} \quad (1)$$

El momento flector exterior  $M$  en cada sección  $x$  de la viga es compensado por un par de fuerzas compuesto por un axil de compresión  $N_c$  y por un axil de tracción  $N_s$ , separados un brazo mecánico  $z$  (ecuación 2).

$$M(x) = N_s \cdot z = N_c \cdot z = N \cdot z \quad (2)$$

La ecuación 1, por tanto, se puede elaborar transformándose de la siguiente manera:

$$V(x) = \frac{\partial M(x)}{\partial x} = \frac{\partial (N \cdot z)}{\partial x} = z \cdot \frac{\partial (N)}{\partial x} + N \cdot \frac{\partial (z)}{\partial x} \quad (3)$$

En las vigas de hormigón convencional, el brazo mecánico  $z$  permanece aproximadamente constante entre dos secciones contiguas de la viga, al menos en los primeros estadios de carga, por lo que

$$\frac{\partial (z)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

y

$$V(x) = z \cdot \frac{\partial (N)}{\partial x} \quad (5)$$

La ecuación 5 es lo que tradicionalmente se conoce como el efecto viga, y conduce a una distribución de tensiones tangenciales repartidas a lo largo y ancho de la sección transversal (Figura 3.a), de modo que se suelen disponer unos cercos para que, cuando el alma de la viga fisure por cortante, se resistan

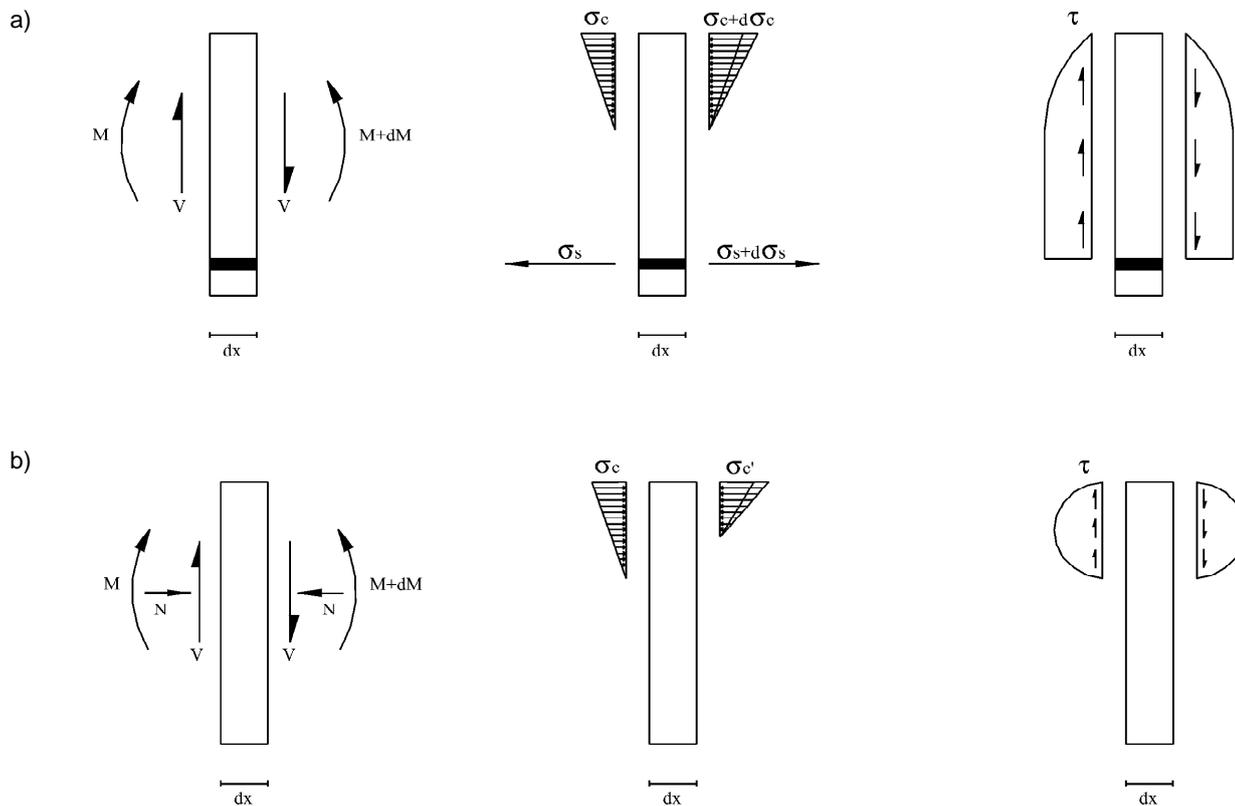


Figura 3. Tensiones normales y tangenciales en una viga de hormigón armado (a) y en una viga de dovelas con pretensado exterior (b).

las tracciones que antes soportaba el hormigón (analogía de la celosía). Si, por cualquier circunstancia, se pierde la adherencia entre la armadura longitudinal y el hormigón que la rodea, la armadura es incapaz de variar su tensión entre dos secciones de la viga, lo que implica en este caso

$$\frac{\partial(N)}{\partial x} = 0 \tag{6}$$

y

$$V(x) = N \cdot \frac{\partial(z)}{\partial x} \tag{7}$$

La ecuación 7 se conoce como efecto arco, e implica que el cortante es resistido por inclinación del axil de compresión. En general, estos dos mecanismos se superponen antes de que una viga agote por solicitaciones tangentes.

En una estructura de dovelas, con pretensado exterior, donde no existe armadura pasante, y el acero de pretensado sólo entra en contacto con el hormigón en anclajes y desviadores, el axil permanece constante en todas las secciones de la viga (aunque aumente con el nivel de carga), siendo por tanto el efecto arco el responsable de la transmisión de cortante. Así

pues, tensiones longitudinales de compresión y tensiones tangenciales se asocian, de modo que éstas están siempre presentes allí donde se encuentren aquéllas. La distribución de tensiones normales y tangenciales en una sección de la estructura queda representada en la Figura 3.b.

### 3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

#### 3.1. Diseño de los ensayos

Se ensayaron a cortante un total de seis vigas con sección transversal en doble T de 0,60 m de canto y 7,60 m de longitud, tres de ellas de hormigón convencional (PC) y otras tres de hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC). Las vigas estaban provistas de juntas secas conjugadas, con tres llaves de cortante cada una de 9 cm de altura.

Estos ensayos pueden dividirse en dos series. La primera constaba de cuatro vigas biapoyadas de 7,20 m de luz, compuestas de tres dovelas de longitud variable ensambladas con pretensado exterior, a las que se les aplicaba una carga exterior  $Q_1$  llevándolas hasta rotura (Figura 4). Los ensayos de los que constaba esta serie se denominaron:

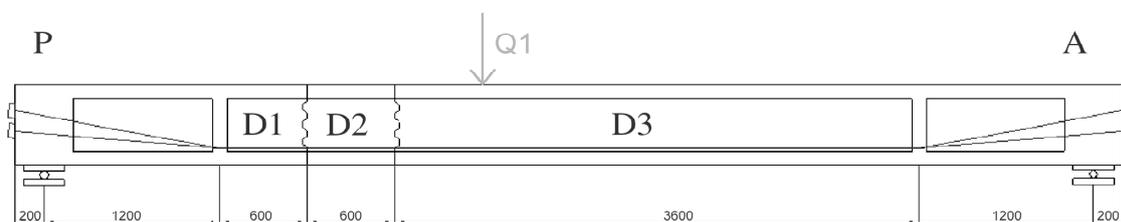


Figura 4. Ensayos V1. Dimensiones en mm.

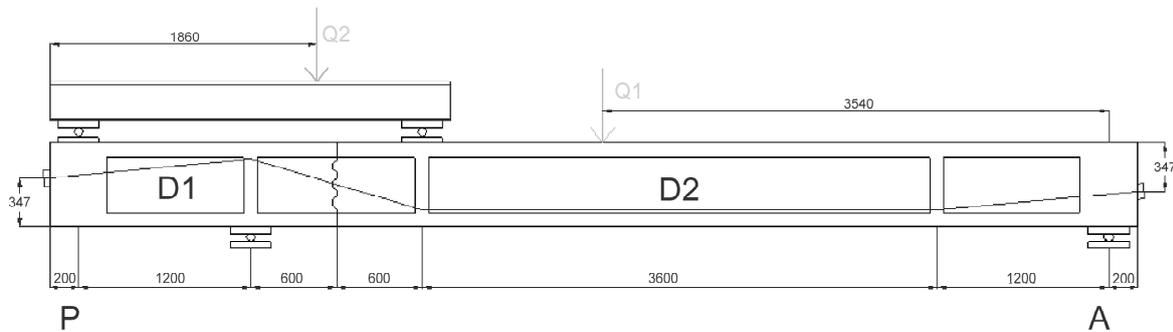


Figura 5. Ensayos V3. Dimensiones en mm.

1. V1-PC-35. Ensayo sobre una viga de hormigón de  $f_c=30$  MPa con un axil de pretensado de 0,350 MN.
2. V1-PC-70. Ensayo sobre una viga de hormigón de  $f_c=30$  MPa con un axil de pretensado de 0,650 MN.
3. V1-SFRC-35. Ensayo sobre una viga de hormigón reforzado con fibras de  $f_c=30$  MPa con un axil de pretensado de 0,290 MN.
4. V1-SFRC-70. Ensayo sobre una viga de hormigón reforzado con fibras de  $f_c=30$  MPa con un axil de pretensado de 0,650 MN.

Los ensayos V1-PC tenían como objetivos el verificar el comportamiento de la junta abierta ante solicitaciones de cortante, el cuantificar la influencia del axil de pretensado en la resistencia de la junta y de la estructura, y estudiar la eficacia de la armadura de cortante próxima a la junta abierta, para determinar si es necesario incluir la armadura de suspensión propugnada por algunos autores<sup>5,6</sup>. Con los ensayos V1-SFRC, complementarios de los anteriores, se quería además tantee la posibilidad de la sustitución de la armadura convencional de cortante en el caso de utilización de hormigones con fibras de acero. Para ello, la armadura convencional en estas vigas se eliminó por completo (salvo unos refuerzos longitudinales para evitar roturas prematuras por flexión en la dovela más larga y las armaduras presentes en anclajes y desviadores).

La segunda serie intentaba profundizar en el comportamiento de la junta abierta en la transmisión de cortante. En concreto, se pretendía medir la resistencia de la junta y comprobar la colaboración del forjado comprimido a la hora de transmitir cortante en estructuras con relaciones (luz de cortante)/d (canto útil) mayores que las empleadas en los ensayos de Fouré<sup>10</sup>. Para ello, se ensayaron a rotura dos vigas de 7,60 m de longitud y 0,60 m de canto, constituidas por dos dovelas, sometidas a tres puntos de carga (Figura 5). En cada estructura, que constaba de una luz principal de 6,00 m. y un voladizo de 1,40 m., se superaba el estado límite de descompresión mediante la actuación de una carga  $Q_1$ . Una vez conseguida la apertura de junta, se aplicaba la carga  $Q_2$  y se llevaba la viga a rotura, manteniendo constante la carga  $Q_1$ . La carga  $Q_2$ , permitía aumentar el cortante actuante en la junta, sin aumentar la ley de momentos flectores.

La disposición del ensayo V3 quería intentar reproducir las condiciones de una viga continua, en la que las juntas próxi-

mas a los apoyos se ven obligadas a soportar grandes momentos flectores y cortantes actuando concomitantemente. Se quería, además, comparar la influencia del SFRC en caso de vigas armadas con cercos. Las vigas se armaron convencionalmente, disponiendo una potente armadura de cortante en la zona de juntas (cercos  $\phi 16$  cada 200 mm).

Los ensayos de los que constaba esta segunda serie se denominaron:

1. V3-PC. Ensayo sobre una viga de hormigón de  $f_{cm}=33$  MPa con un axil de pretensado de 0,250 MN.
2. V3-SFRC. Ensayo sobre una viga de hormigón reforzado con fibras de  $f_{cm}=38$  MPa con un axil de pretensado de 0,250 MN.

En la Figura 6, se representa la sección transversal de las vigas en zona de centro luz. Una definición geométrica más completa y los detalles de armado de estos ensayos se encuentran descritos en los trabajos de Piernagorda<sup>11</sup> y Turmo<sup>12</sup>.

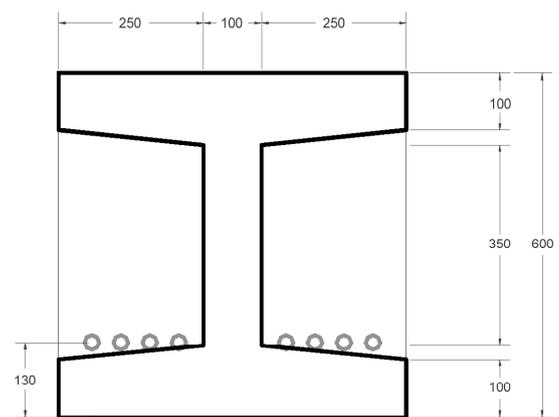


Figura 6. Sección transversal de las vigas.

### 3.2. Fabricación

El encofrado de las vigas se realizó mediante el serrado y unión de paneles fenólicos. Para configurar la geometría de la llave se utilizó chapa metálica moldeada en fábrica, que se adhirió al encofrado existente. La ferralla fue suministrada desde taller y posteriormente colocada en obra. En la Figura 7 se muestra un detalle de la disposición de la armadura en las vigas V1-SFRC. En la Figura 8, el armado de la viga V1-PC.



Figura 7. Armado de la viga V1-SFRC.



Figura 8. Armado de la viga V1-PC.

Nótese la diferencia, apreciable a simple vista, entre las cuantías de armado de las dos series.

El hormigón fue fabricado y transportado a obra desde planta. Las fibras (Dramix RC 65/35 BN) se incorporaron al camión hormigonera en la misma obra. Como se intentaba emular al máximo las condiciones reales de fabricación de los puentes de dovelas, el hormigonado se realizó en dos fases. En una primera fase se hormigonaron las dovelas extremas de la viga V1 (dovelas D1 y D3 de la Figura 4) y la dovela D1 de la viga V3 (Figura 5). Se procedió al vibrado con vibrador de aguja. Una vez endurecidas, se hormigonaron contra éstas la dovela central de la viga V1 y la dovela D2 de la viga V3. A los dos días se procedió al desencofrado.

El tesado fue realizado con el sistema BBR, mediante gato alevín. Las vigas V1-75 estaban provistas de ocho cables de pretensado, las V1-35, de cuatro, y las V3, de dos. El tesado se realizó desde el lado activo (marcado con una A en las Figuras 4 y 5).

### 3.3. Materiales

Para cada viga se usaron dos tipos distintos de hormigones. La dosificación de la mezcla por  $m^3$  fue 400 kg de cemento, 825 kg de arena (0-5 mm), 950 kg de grava (5-12 mm), 190 litros de agua y 0,9% de superplastificante. En el SFRC se añadieron, además, 60  $kg/m^3$  de fibra Dramix RC 65/35 BN.

Las resistencias a compresión del día del ensayo y los asentos de cono quedan resumidos en la tabla 1. Como acero pasivo se emplearon barras corrugadas de acero de calidad B500S, suministradas cortadas y dobladas. Como acero activo se empleó acero Y 1860 S7 de 15 mm (0,6") de diámetro.

### 3.4. Instrumentación

Las tensiones del acero activo se controlaron mediante células de carga (modelo C6A de HBM, con una carga nominal de 0,5 MN). Las células se dispusieron en los extremos activo y pasivo en los ensayos V1-SFRC-35, V1-SFRC-70 y V1-PC-35. También se efectuaban medidas de los incrementos de deformación de los cables mediante galgas adheridas a los cables de pretensado tras el tesado (G). Además, se midieron flechas y aperturas de junta mediante extensómetros magnéticos (Temposonic). Con todas estas medidas se quería recabar información para poder deducir, no sólo la magnitud del pretensado actuante, sino también la pérdida de excentricidad del mismo.

En los ensayos V1-PC, con objeto de comprobar la distribución de tensiones normales en el ancho del forjado, se embebieron unas galgas (EG) en el ala superior de la viga, en la zona próxima a la junta. También se introdujeron unas galgas embebidas (EG) en el seno de la dovela para intentar determinar la distribución de tensiones en el interior de la dovela entre juntas abiertas. Los actuadores utilizados en los ensayos, dos

Tabla 1. Características físicas y mecánicas de los hormigones de las vigas UPC.

	PC			SFRC		
	D1	D3	D2	D1	D3	D2
Asiento del cono (cm)	16		15	11		16
$f_c$ (MPa)-V1	37,2		33,9	33,9		34,5
$f_c$ (MPa)-V3	40,7		33,1	40,0		38,1

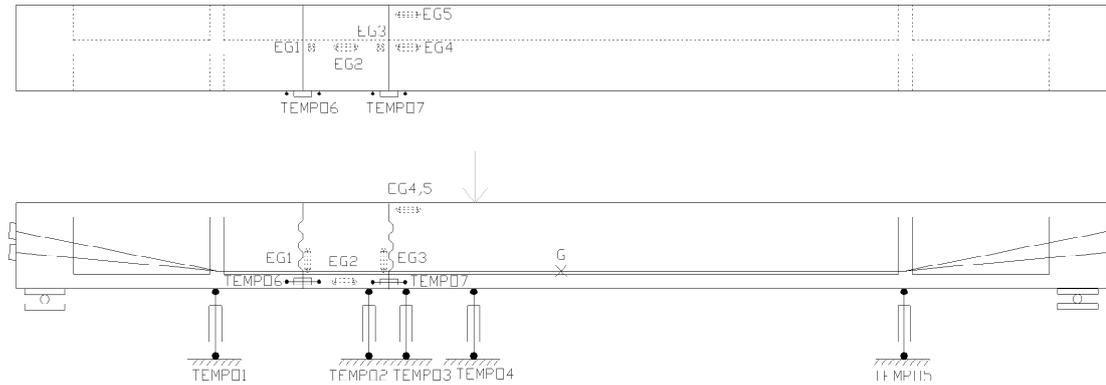


Figura 9. Instrumentación V1-PC.

gatos MTS de pistón hidráulico de 1 MN y 0,250 MN de capacidad, median la carga aplicada con su propia célula de carga.

Se presenta a modo de ejemplo en la Figura 9, la distribución de la instrumentación dispuesta en la viga V1-PC.

### 3.5. Resultados

#### 3.5.1. Serie de ensayos V1

El comportamiento de las vigas es lineal hasta que se produce la descompresión de la junta (entre dovelas D2 y D3), momento en el cual se produce una pérdida drástica de rigidez y la junta se abre. La carga de descompresión está íntimamente ligada al axil de pretensado, y su valor en cada ensayo se puede deducir, tanto de los puntos de cambio de pendiente en las curvas carga-flecha (Figura 10), como de los gráficos carga-apertura de junta (Figura 11). Una vez descomprimida la junta, ésta continúa abriéndose ante carga creciente y la flecha de la viga aumenta. La junta entre las dovelas D1 y D2 no llega a abrirse en ningún ensayo.

El comportamiento del pretensado medido en los anclajes a lo largo del ensayo V1-SFRC-70 queda definido en la Figura 12, siendo este gráfico cualitativamente similar a los obtenidos en los otros ensayos de la serie V1. En el gráfico se aprecia cómo el pretensado permanece prácticamente constante antes de alcanzar la carga  $Q_D=0,152MN$ , correspondiente a la descompresión de la junta. El pretensado sólo aumenta significativamente tras la apertura de junta, permaneciendo prácticamente constante antes de ésta. El incremento medio de pretensado en rotura llega a ser de un 45% con respecto al pretensado inicial (de  $\sigma_{p0}=574MPa$  hasta  $\sigma_{pf}=833MPa$ ), siendo mayor el incremento de tensión en los cables más cortos (medidos con la célula C2) que en los más largos (medidos con la célula C1). Los incrementos de tensión medidos en el anclaje activo coinciden con los medidos en el anclaje pasivo.

Las galgas embebidas sólo se dispusieron en los ensayos V1-PC. En la Figura 13 se reflejan las curvas carga-deformaciones en las galgas embebidas obtenidas en el ensayo V1-PC-70. El comportamiento de las galgas EG4 y EG5, situadas en el ala superior de la viga, es muy similar, aumentando paulatinamente sus deformaciones de compresión a medida que

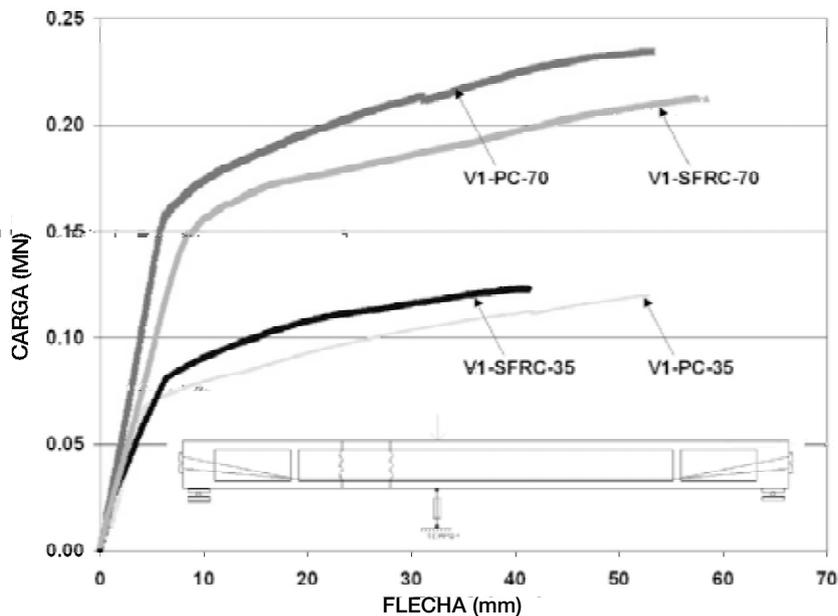


Figura 10. Gráfico carga-flecha bajo carga en ensayos V1.

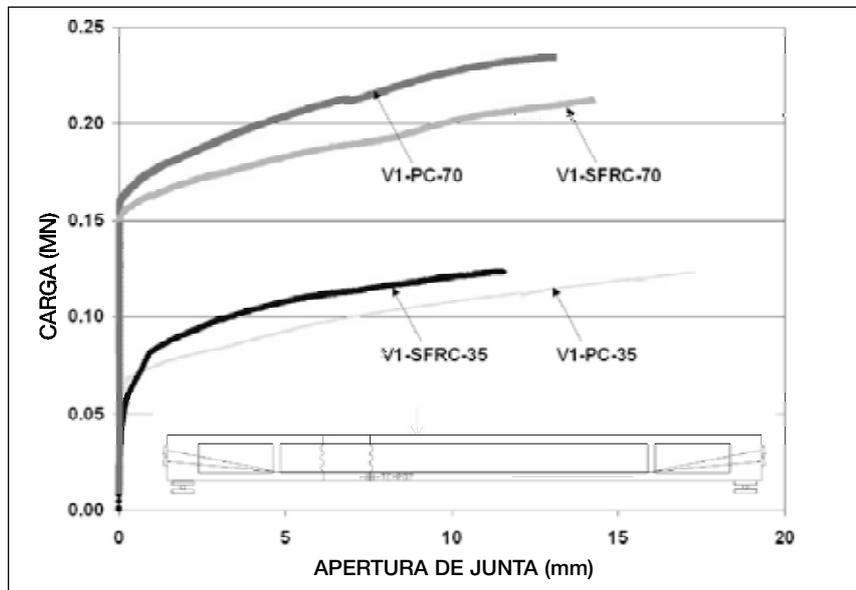


Figura 11. Gráfico carga-deformación en las galgas embebidas en el ensayo V1-PC-70.

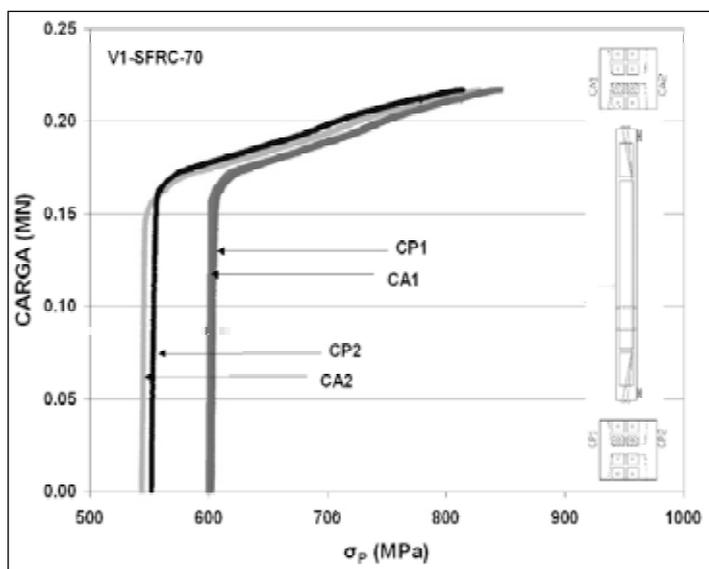


Figura 12. Gráfico Ensayo V1-SFRC-70.  
Gráfico carga-tensión en el acero de pretensado  $\sigma_p$  medida en las células de carga en anclajes activos CA y pasivos CP.

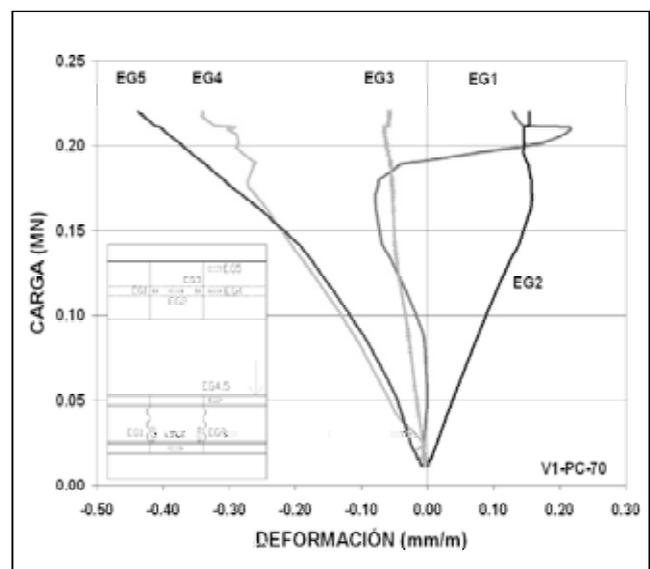


Figura 13. Gráfico carga-deformación en las galgas embebidas en el ensayo V1-PC-70.

aumenta el nivel de carga. Esto implica que las tensiones normales se distribuyen uniformemente en todo el ancho del forjado, lo que permitirá el análisis de la viga despreciando el efecto del arrastre por cortante (shear lag). La galga EG2, situada en el forjado inferior, va perdiendo paulatinamente la compresión que inicialmente le había provocado el pretensado a medida que aumenta el nivel de carga. Una vez alcanzado el estado límite de descompresión, la curva adopta una tangente vertical, correspondiente a deformación cero.

De la fase de prerrotura cabe destacar que la posición aparente de la fibra neutra, así como el número de llaves que trabajan y la fisuración, están íntimamente ligadas al axil de pretensado. También hay que señalar que sólo se llevaron a rotura las vigas con hormigón convencional. La inexistencia de armaduras en las vigas V1-SFRC hizo temer una forma de rotura frágil que atentara contra la integridad de personas y

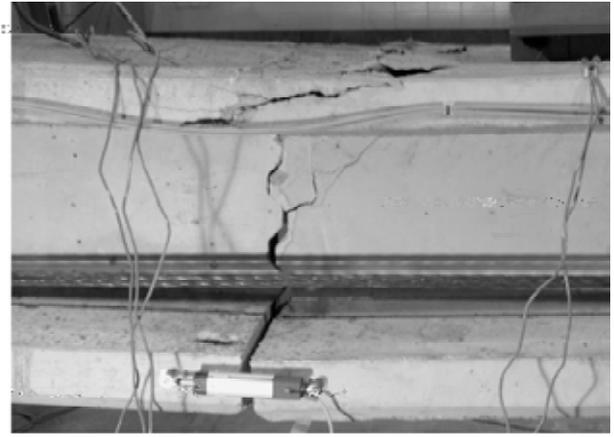
equipos, por lo que los ensayos fueron interrumpidos cuando se intuía un fallo inminente.

En la viga V1-PC-35 la fisuración sólo afecta a las llaves superiores (Figura 14.b). A la aparición de fisuración diagonal en la dovela D3 que parte de las bases de las llaves y se orienta a  $40^\circ$  hacia el punto de carga, le sucede la propagación de una fisura vertical, siguiendo la posición del cerco. Por último aparece una fisura horizontal en la cabeza comprimida en la zona de junta, por exceso de tensiones normales, que progresa en dirección de la carga perdiendo su horizontalidad debido a la combinación de tensiones normales y tangenciales. La viga termina rompiendo por el forjado bajo un cortante  $V_u=0,081$  MN

En la viga V1-PC-70 la fisuración afecta a las tres llaves (Figura 14.d), como consecuencia de la mayor profundidad de



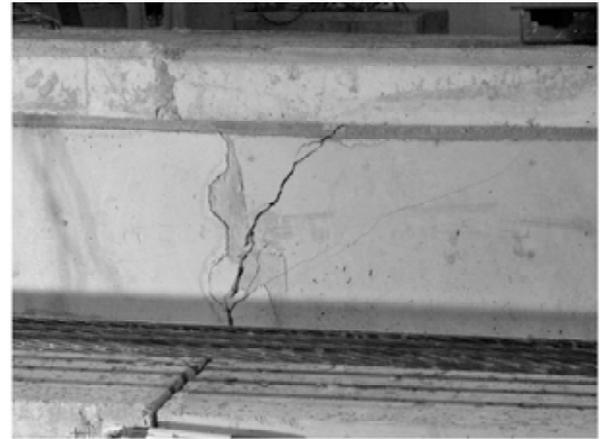
a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 14. Fisuración obtenida en los ensayos.

V1-SFRC-35(a); V1-PC-35 (b)  
 V1-SFRC-70 (c) ; V1-PC-70 (d)  
 V3-SFRC (e) ; V3-PC (f).

la fibra neutra. De nuevo el armado de la dovela induce una bifurcación de la fisura en dos, de modo que la fisura progresa siguiendo el trazado de la armadura de cortante, perpendicular a la directriz de la pieza. Es esta fisura la que termina concentrando toda la apertura, discurriendo con una inclinación de  $70^\circ$ . La rotura se produce por penetración de la fisura de cortante en la cabeza de compresión para un cortante  $V_u=0,136$  MN.

En la viga V1-SFRC-35 apareció una fisura partiendo de la base de la llave central. Ésta progresó a  $45^\circ$  hasta llegar a la zona inferior del forjado, momento en el cual continuó desarrollándose en el plano horizontal de unión entre alma y forjado, formándose una fisura de rasante. Esta fisura alcanzó una apertura notable, como se aprecia en la Figura 14.a. La viga alcanzó un cortante máximo en la junta  $V_u=0,074$  MN. El ensayo fue interrumpido sin alcanzar la carga de rotura.

En la viga V1-SFRC-70 apareció una gran fisura que partía de la base de la llave inferior y progresaba hacia el punto de carga, con un ángulo de 30° (Figura 14.c). Esta fisura desarrolló una gran apertura, prolongándose la apertura de junta por el seno de la dovela a través de la fisura. Las deformaciones de la viga fueron considerables, apreciándose a simple vista. El ensayo fue interrumpido sin alcanzar la carga de rotura cuando la junta soportaba un cortante  $V_u=0,126$ .

### 3.5.2. Serie de ensayos V3

En los ensayos V3 se aplica en primer lugar una carga  $Q_1$  en la zona de centro luz. El comportamiento de las vigas es lineal hasta que se produce la descompresión de la junta, momento en el cual se produce una pérdida de rigidez y la junta se abre. Una vez descomprimida la junta, ésta continúa abriéndose ante carga creciente y la flecha de la viga aumenta ostensiblemente. Cuando la carga  $Q_1$  alcanza el valor  $Q_{1u}=0,198$  MN, la bomba de aceite se bloquea, manteniendo esta carga  $Q_{1u}$  constante hasta el final del ensayo. En ese momento, no se aprecia ningún tipo de fisuración en el seno de la viga.

Manteniendo constante la carga  $Q_{1u}$ , el segundo actuador introduce dos cargas en la estructura de valores  $0,31 \cdot Q_2$ , actuando en la zona de voladizo, y  $0,69 \cdot Q_2$ , actuando en el vano.

En la viga V3-PC, las fisuras surgen de las dos llaves superiores (Figura 14.f). Estas fisuras, que surgen de las llaves y avanzan hacia el punto de carga, son interceptadas por el cerco de cortante próximo a la junta. La fisuración progresa siguiendo este cerco y su apertura se hace considerable, concentrándose en la fisura que surge de la llave central. Esta fisura, con su apertura, hace que las caras de la junta situadas por debajo de ella se alejen. La viga termina rompiendo por combinación de tensiones normales y tangenciales en el forjado superior para un cortante en la zona de junta  $V_u=0,134$  MN.

La fisuración observada en la viga V3-SFRC parte de las dos llaves superiores (Figura 14.e). La primera fisura, que parte de la base de la llave superior, se forma para una carga  $Q_2=0,04$  MN. A partir de ese momento se aprecia una pérdida de rigidez en la estructura, aunque la presencia de fibras hace que esta pérdida de rigidez sea más gradual que en V3-PC. Esta fisura progresa a 45° hacia el punto de carga, sin inter-

ceptar ningún cerco. La viga no responde a los incrementos de carga aumentando la apertura de junta, sino aumentando la apertura de fisura, de modo que la fisura aparenta ser una prolongación de la junta abierta. La junta abierta y la fisura dan la impresión de separar la estructura en dos mitades que tienen movimiento de sólido rígido, encontrándose el centro de rotación en el plano de la fisura. La fisura inicial progresa hasta romper el forjado por combinación de tensiones normales y tangenciales, para un cortante  $V_u=0,132$  MN.

## 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados de los ensayos sobre vigas quedan resumidos en la tabla 2. En ésta se incluye el cortante máximo  $V_{u,exp}$  en la junta crítica y el momento exterior  $M_d$  concomitante actuante en esta sección de junta. Se tabula, asimismo, el axil de pretensado  $P_f$  medido en los anclajes por las células de carga en el momento de alcanzarse este cortante máximo  $V_{u,exp}$ . Se añade el momento último respuesta  $M_u$  de la sección de junta crítica. Este momento  $M_u$  se ha calculado considerando la pérdida de excentricidad del pretensado  $\Delta e$  máxima medida en los ensayos. Antes de interpretar los resultados, hay que recordar que las vigas V1-SFRC no fueron llevadas a rotura.

El análisis de la tabla 2 parece descartar una rotura por sollicitaciones normales puras en el plano de la junta. El coeficiente de seguridad a la rotura  $\gamma_f$ , calculado como cociente entre el momento actuante en la zona de junta  $M_d$  y el momento último respuesta de la sección de junta  $M_u$ , es siempre menor que la unidad, con valores que oscilan entre 0,73 y 0,89. La tabla 2 parece indicar una tendencia, y es que las vigas no rompen debido a agotar su capacidad por tensiones normales en la sección de junta. Esto, junto con el análisis de la propagación de la fisuración hasta rotura, indica una rotura por elevadas tensiones normales combinadas con tensiones tangenciales, con un mecanismo de rotura que no es seccional, sino espacial.

Del estudio teórico se deducía que en una estructura de dovelas, con pretensado exterior, donde no existe armadura pasante, es el efecto arco el responsable de la transmisión de cortante. Esto implicaba que las tensiones longitudinales de compresión y las tensiones tangenciales quedaban asociadas, transmitiéndose el cortante tras la apertura de junta a través de

Tabla 2. Resultados vigas UPC

	$V_{u,exp}$ (MN)	$P_f$ (MN)	$M_d$ (MNm)	$M_u$ (MNm)	$\Delta e$ (mm)	$\gamma_f$
V1-PC-35	0,081	0,582	0,217	0,247	42	0,88
V1-SFRC-35	0,074	0,529	0,195	0,234	24	0,83
V1-PC-70	0,136	0,905	0,350	0,394	23	0,89
V1-SFRC-70	0,126	0,933	0,326	0,407	21	0,80
V3-PC	0,134	0,309	0,074	0,088	6	0,84
V3-SFRC	0,132	0,654	0,074	0,101	5	0,73

todo el ancho eficaz del forjado. Los resultados obtenidos en los ensayos confirman estas teorías.

Uno de los resultados aparentemente más sorprendentes obtenidos de los ensayos es el hecho de que vigas con un armado muy distinto presenten resistencias muy similares. Las vigas armadas con armadura de cortante V1-PC presentan un cortante último muy similar a aquellas reforzadas con fibras pero desprovistas de cercos V1-SFRC. El ancho de la fisura principal, apreciada a simple vista en los ensayos, permite afirmar que la contribución de las fibras a la transmisión de cortante a través de la zona de fisura se puede despreciar en la práctica, así como cualquier tipo de transmisión de tensión tangencial proveniente del efecto de engranaje de los áridos. El mecanismo de respuesta a cortante que permite asegurar la transmisión de tensiones tangenciales en las vigas sin armadura de cortante es el efecto arco. Sólo el efecto arco permite justificar que vigas sin cercos soporten cortantes tan similares a las de las vigas con cercos.

Las armaduras de cortante, por tanto, no parecen eficaces en este tipo de ensayos. Aunque pueden servir para controlar la fisuración (como pone de manifiesto la comparación entre las Figura 14.c y Figura 14.d), las armaduras contiguas a la junta abierta no tienen encomendada la misión de transmitir cortante ya que no enlazan cordón traccionado y comprimido de ninguna celosía. El hecho de no existir efecto viga y de limitarse la transmisión de tensiones tangenciales a las zonas comprimidas, dificulta la formación de una celosía haciendo que los cercos de cortante tengan un papel secundario. De hecho, la fisura que en el ensayo V1-SFRC-70 se propaga entre la junta y el punto de carga (Figura 14.c), haciendo que en la fase final del ensayo la fibra neutra se encuentre en el plano de unión entre alma y forjado, no impide a la estructura la transmisión de cortante.

Resulta evidente que, si no se forma celosía alguna, las armaduras de suspensión no parecen necesarias. Además, el mapa de fisuración observado en los ensayos no refleja aquel representado en la Figura 2 que justificaba la colocación de armaduras de suspensión. A pesar de la fisuración diagonal, no hay posibilidad de formación de una celosía, ni siquiera localmente, por debajo de las llaves en contacto. Las bielas de compresión no pueden equilibrarse en la zona de junta abierta, ya que no se dispone de armadura longitudinal convenientemente anclada que recoja la componente horizontal de las compresiones.

El análisis de la fisuración que experimentan las vigas en el estado de prerrotura, con una fisura diagonal que atraviesa todo el ancho del forjado, (Figura 14.a y Figura 14.e) confirman que todo el forjado es susceptible de transmitir cortante (o, al menos, era susceptible de transmitir cortante en todo su ancho eficaz). La transmisión del cortante por el forjado incrementa la flexión transversal, debiendo proveerse, si no se quiere comprometer la capacidad portante de la estructura, las oportunas armaduras de flexión transversal.

## 5. CONCLUSIONES

Los ensayos realizados sobre vigas nos permiten extraer conclusiones muy interesantes sobre el comportamiento de

las estructuras con junta seca, a pesar que su extrapolación a puentes reales deba ser realizada con cuidado. El hecho de que en la sección transversal de la viga no se guardara la proporcionalidad entre el ancho del forjado y el canto de la sección que se encuentra en la sección cajón de un puente real, (la relación entre el ancho del forjado y el canto de la viga es menor que en un puente real), la inserción de llaves de dimensiones reales en una viga de canto reducido, la propia geometría de las vigas, realizadas con dovelas de diferentes longitudes, y las cargas introducidas, todas ellas puntuales y no repartidas, hace que la extrapolación a puentes reales no sea directa.

La adición de fibras al hormigón no parece aumentar la capacidad de resistencia de las vigas. Así lo muestran los resultados obtenidos con las vigas V3.

A partir de la junta surge una fisuración que termina por agotar la estructura. La rotura por cortante en las vigas no es seccional, como en flexión, sino espacial.

El mapa de fisuras que se dibuja en la zona próxima a la junta, parece estar muy influido por la profundidad de la fibra neutra, o al menos, por el número de llaves en contacto.

El mapa de fisuras que justifica la colocación de armadura de suspensión en la proximidad de juntas abiertas no aparece. Es más, la armadura convencional de cortante no parece ser efectiva en estos ensayos, resistiendo las vigas provistas de cercos, esfuerzos cortantes últimos muy similares a vigas análogas de SFRC sin armadura (serie V1).

La forma de rotura del forjado, con fisuras que lo atraviesan de lado a lado, parece descartar la teoría de transmisión de tensiones tangenciales únicamente en la zona de almas.

Tanto el análisis teórico como los ensayos apoyan la tesis de que tensiones normales y tensiones tangenciales se asocian en este tipo de estructuras, siendo capaz el forjado de transmitir tensiones tangenciales en todo su ancho eficaz.

El incremento de flexión transversal que supone el hecho de que parte del cortante se transmita por el forjado deberá ser tenido en cuenta en el dimensionamiento de la armadura transversal del forjado.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Ciencia y Tecnología, por financiar parcialmente la investigación desde el proyecto MAT2002-00849. Al Ministerio de Fomento por la financiación parcial de la investigación a través del proyecto "Estudio teórico experimental de la transferencia de cortante en vigas de dovelas de hormigón reforzado con fibras, con pretensado exterior y junta seca". Al Ministerio de Educación y Cultura por la beca de Formación de Profesorado Universitario que recibió uno de los autores y que disfrutó desde 2000 hasta 2003. A FCC y BBR que realizaron la construcción y el tesafo de las vigas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. Muller, J. "Construction of the Long Key Bridge". *Journal of the Prestressed Concrete Institute*. November-December 1980, pp 97-111.
2. Shafer, G. "Bangkok Blockbuster". *Civil Engineering Magazine*. ASCE. January 1999. Vol 69. Number 1
3. Ramos, G.(1994) "Estudio del comportamiento en servicio, prerrotura y rotura de puentes de hormigón con pretensado exterior", Tesis doctoral. Barcelona. Febrero, 1994
4. Breen, J. et al.(1993). "Shear Strength of Segmental Structures". *Proceedings of the Workshop AFPC External Prestressing in Structures*. Saint-Rémy-lès-Chevreuse. June, 1993, pp287-296.
5. Virlogeux, M. et al. «Some Elements for a Codification of External Prestressing and of Precast Segments". *Proceedings of the Workshop AFPC External Prestressing in Structures*. Saint-Rémy-lès-Chevreuse. June, 1993, pp 449-466.
6. ATEP "Proyecto y construcción de puentes y estructuras con pretensado exterior. Madrid. Septiembre 1996.
7. Mac Gregor, R. J. G. "Evaluation of Strength and Ductility of a Three-span Externally Post-tensioned Box Girder Bridge Model". Directed by: Prof. Dr. J.E. Breen. Ph. D. Dissertation. University of Texas at Austin. August 1989.
8. Ramírez Aguilera, G. "Behavior of Unbonded Post-tensioning Segmental Beams with Multiple Shear Keys". Directed by: Prof. Dr. J.E. Breen. Master Thesis. University of Texas at Austin. January 1989.
9. Anlló, M. "Análisis Experimental hasta Rotura de Vigas de Hormigón con Pretensado Exterior". Tesina de Especialidad. Universitat Politècnica de Catalunya. Mayo 1996.
10. Foure, B. et al. "Shear Test on Keyed Joints between Precast Segments". *Proceedings of the Workshop AFPC External Prestressing in Structures*. Saint-Rémy-lès-Chevreuse. June, 1993, pp 297-319.
11. Piernagorda, J. (2002) "Ensayo hasta rotura por cortante de vigas de dovelas" Tesina de especialidad. ETS de Ingenieros de Caminos de Barcelona. Junio 2002
12. Turmo J. Estudio del comportamiento a flexión y cortante de puentes de dovelas de hormigón con pretensado exterior y junta seca. Dirigida: Prof. Dr. A.C. Aparicio and Prof. Dr. G. Ramos. Tesis Doctoral. ETSICCP de Barcelona. Dept. Ing. de la Construcción. Julio 2003.

<http://www.tdx.cesca.es/TDX-1030103-090157/>