

# 3

Capítulo

# Programa Experimental



### **3 Programa Experimental**

En este capítulo se presenta el programa de investigación experimental, en donde se describen tanto los ensayos de caracterización de los materiales compuestos utilizados, como los ensayos realizados en modelos reducidos y los ensayos estructurales efectuados sobre vigas de dovelas con pretensado exterior.

Igualmente se hará una presentación de los diferentes medios de instrumentación que se han utilizado en el transcurso de esta campaña experimental, así como los diferentes medios para transmitir las cargas (prensas, gatos, entre otros), y su adecuación a cada tipo de ensayo, indicándose los procedimientos utilizados para cada uno de los ensayos, con el fin de que puedan ser utilizados como referencia para futuros trabajos de investigación.

Todos los equipos y sistemas de adquisición de datos utilizados fueron facilitados por el Laboratorio de Tecnología de Estructuras (LTE) del Departamento de Ingeniería de la Construcción, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Barcelona (ETSECCPB).

#### **3.1 Materiales Compuestos de CFRP Utilizados**

Para el desarrollo de este programa experimental se han elegido dos sistemas de refuerzo basados en “*Carbon Fiber Reinforced Plastics*” (CFRP), el primero constituido por un tejido bidireccional de fibras de carbono adherido mediante la técnica del “wet-layup”, en donde la resina epóxica utilizada para la adhesión a la estructura de hormigón forma parte de la matriz del material compuesto (TFC), en segundo lugar se utilizó un sistema basado en laminados unidireccionales de CFRP preimpregnados de resina (CFK), los cuales fueron adheridos al hormigón siguiendo el procedimiento MBrace. A continuación se describen en detalle cada uno de los sistemas de refuerzo.

##### **3.1.1 Descripción del procedimiento TFC**

El procedimiento TFC es un procedimiento de refuerzo estructural mediante la adhesión de fibras de carbono en una matriz ligante de resina epóxica bicomponente. Este procedimiento se basa en el principio de adición de un material resistente a los

esfuerzos de tracción, adherido sobre las superficies de la pieza que debe ser reforzada para aumentar su capacidad portante.

La fabricación del compuesto directamente sobre el soporte tiene las siguientes ventajas: poder moldear la forma exacta de la pieza que debe ser reforzada, no tener otro interfaz de adherencia que la misma matriz del compuesto y, por consiguiente, no generar concentraciones de tensiones tangenciales que pueden provocar inicios de despegue en las zonas con poco espesor de resina [FREYSSINET, 1998].

El tejido del TFC está formado por fibras de carbono orientadas a 0° y 90° en la cadena y en la trama respectivamente con el fin de obtener una armadura flexible y deformable que pueda seguir las formas del soporte.

El tejido es bidireccional con mayor resistencia en sentido longitudinal (cadena). Está formado por un 70 % de fibras en el sentido de la cadena y de un 30 % de fibras en el sentido transversal (trama).

La Tabla 3.1 muestra las características mecánicas proporcionadas por el fabricante del sistema de refuerzo TFC [FREYSSINET, 1998].

Tabla 3.1. Características mecánicas de la sección efectiva [FREYSSINET, 1998].

<b>Característica</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Espesor medio aproximado	mm	0.43
Tracción de rotura	MPa	1,400
Módulo de Elasticidad	GPa	105
Tracción de rotura en 10 mm de ancho de cadena (longitudinal)	N	6,000
Tracción de rotura en 10 mm de ancho de trama (transversal)	N	2,500

Existen ciertas reglas de diseño proporcionadas por el fabricante para la aplicación del TFC como sistema de refuerzo a flexión, por lo que se deberán verificar ciertos aspectos como se muestra a continuación [FREYSSINET, 1998]:

La longitud de anclaje del TFC,  $\ell$ , es al menos igual a 100mm para un hormigón sano ( $f_{ck}=30\text{MPa}$ ); para un hormigón de menor resistencia ( $f_{ck}=20$  a  $25\text{MPa}$ ), se tomará  $\ell$  igual a 150mm.

El TFC debe ser prolongado, más allá de la sección reforzada a la flexión, con una distancia mínima de seguridad igual a 20cm.

Hay que comprobar que la tensión rasante  $\tau_u$  en la interfaz TFC-hormigón (figura 3.1) sea inferior a la tensión admisible en el hormigón recomendada por Freyssinet (1998).

$$\tau_u = \frac{V_u}{b_f \cdot d} \cdot \frac{F_f}{F_s + F_f} \quad (3.1)$$

donde,

$b_f$  es el ancho del encolado.

$V_u$  es el esfuerzo cortante máximo en ELU.

$F_f$  y  $F_s$  son las solicitaciones respectivas en el TFC y la armadura longitudinal existente.

Hay que comprobar que  $\tau_u < \tau' = 1,5 \text{ MPa}$ .

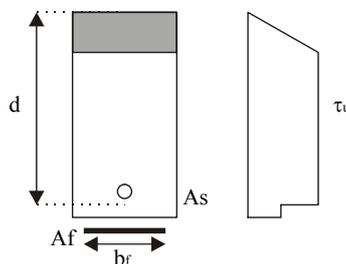


Figura 3.1. Diagrama de tensiones tangenciales [FREYSSINET, 1998]

### 3.1.2 Descripción del Procedimiento CFK MBrace

El procedimiento CFK MBrace consiste en láminas fabricadas por el método de extrusión constituidas por fibras de carbono unidireccionales impregnadas por resina epóxica y parcialmente pretensadas, con un módulo de elasticidad muy similar al del acero. Al tener un módulo de elasticidad mucho mayor que los sistemas formados por tejidos de fibras de carbono, la superficie del soporte a preparar se reduce significativamente debido a que la resistencia del laminado es superior y el área de la sección disminuye, además de ser más homogéneo debido a su fabricación, aunque cualquier imperfección en la superficie del soporte causa una concentración de esfuerzos que puede originar el despegue de la fibra, por lo que el control de calidad en la colocación tiene que ser mayor.

La Tabla 3.2 muestra las características mecánicas proporcionadas por el fabricante del sistema de refuerzo CFK 150/2000 [SCHERER, 1998]

Tabla 3.2. Características mecánicas del sistema de refuerzo CFK 150/2000 [SCHERER, 1998]

Característica	Unidad	Valor
Espesor Medio	mm	1.4
Tensión de Rotura	MPa	2,200-2,500
Modulo E	GPa	> 150
Deformación a Rotura	%	1.3
Tensión de Diseño	MPa	1,340 / 1,790
Para $\varepsilon = 0.6 / 0.8 \%$		

Dentro de las recomendaciones del fabricante encontramos las siguientes reglas de diseño [SCHERER, 1999].

Se deberá de verificar que,

$$V = \frac{M_v}{M_o} \leq 2 \quad (3.2)$$

donde,

$M_v$  es el valor de cálculo del momento de rotura a flexión de la parte reforzada de la estructura.

$M_o$  es el valor de cálculo del momento de rotura a flexión de la parte de obra sin refuerzo alguno.

Se verificará la sección reforzada a cortante para evitar el fallo por esta sollicitación, teniendo en cuenta que el refuerzo a flexión aplicado no incrementa la capacidad a cortante de la estructura.

Utilizando el diagrama de momentos se obtendrá la tensión del CFK y se seleccionará la longitud de anclaje según la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Selección de las longitudes de anclaje [SCHERER, 1999]

<b>Longitud de anclaje</b>	<b>Fuerza</b>
<b>(mm)</b>	<b>(kN)</b>
300	144
240	100
200	75
150	57

### **3.2 Modelos Experimentales**

Como se ha mencionado tanto en la introducción como en los objetivos de la presente tesis, los ensayos realizados durante la fase experimental se efectuaron con el objeto de ampliar el estado del conocimiento en relación al comportamiento de materiales compuestos de CFRP utilizados como refuerzo a flexión en estructuras de hormigón, formadas por dovelas en donde se presenten juntas secas.

La idea de realizar dichas pruebas nació de los resultados obtenidos tras realizar ensayos estructurales con vigas monolíticas reforzadas con tejido de CFRP [SALAVERRIA, 2002], las cuales presentaban una junta de construcción central que al parecer afectaba el comportamiento del CFRP al fisurar el hormigón adyacente a esta zona (figura 3.2),

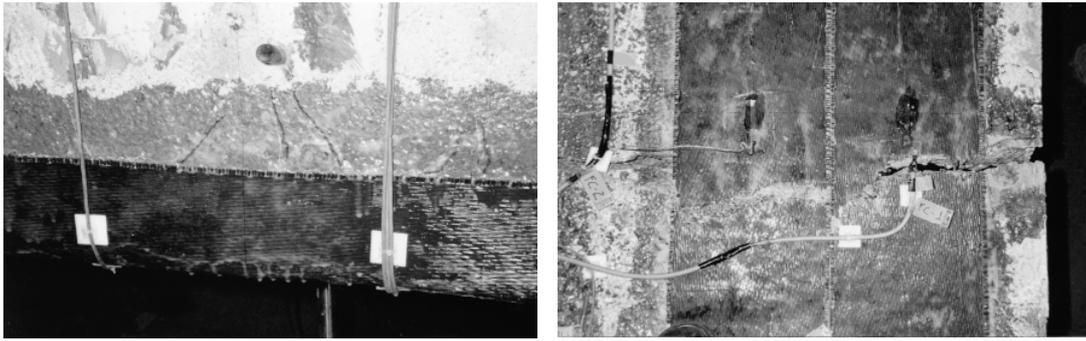


Figura 3.2. Ensayos en vigas monolíticas; (Izq.) Despegue del CFRP en zona de fisuración; (Der.) Rotura del CFRP en junta fría del hormigón [SALAVERRIA et al., 1999].

por lo que se hizo un primer planteamiento de ensayos con vigas de hormigón constituidas por dovelas, seguido por una serie de ensayos con modelos reducidos y por último ensayos de caracterización de los CFRP a tracción directa.

Posiblemente a primera vista parezca un planteamiento al contrario del que se presentaría normalmente en una campaña experimental de investigación, iniciando en un principio con la caracterización de los materiales y terminando con los ensayos a nivel estructural. Sin embargo, la poca o inexistente investigación relacionada con elementos estructurales de hormigón constituidos por dovelas y reforzados con CFRP, condicionó a realizar un primer ensayo estructural en donde se contara con la suficiente documentación para poder denotar los posibles cambios en el comportamiento normal de la estructura, por lo que se decidió realizar una prueba piloto en la que se utilizarían vigas de dovelas pertenecientes a trabajos experimentales anteriores [ANLLO, 1996; GOMEZ, 1995] y en base a los resultados obtenidos, diseñar el programa experimental a seguir. Tomando en cuenta esto, la descripción de los ensayos se presenta de acuerdo a la secuencia real del trabajo, primeramente describiendo cada tipo de ensayo y después se describirá el procedimiento seguido en cada clase de refuerzo justificando así cada uno de los ensayos realizados.

### **3.2.1 Vigas de dovelas**

Como se ha mencionado anteriormente, se realizaron en un principio tres ensayos estructurales utilizando dos vigas de dovelas previamente ensayadas [ANLLO, 1996; GOMEZ, 1995]. El acero empleado en las armaduras pasivas es un B 500 S y el acero

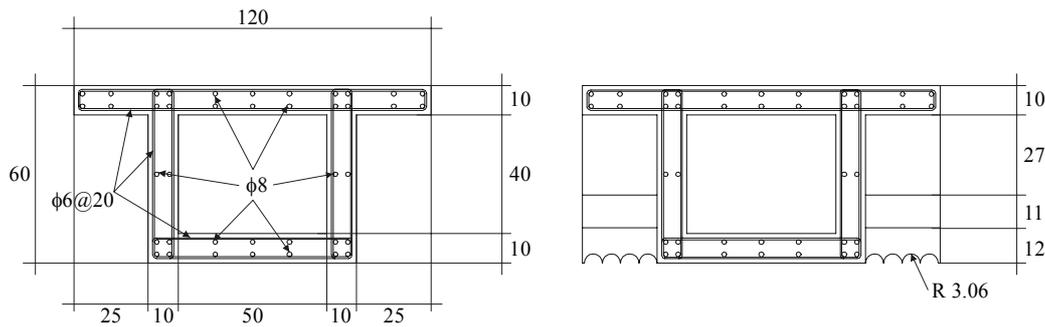


Figura 3.3. Dimensiones de la sección transversal en cm. (Izq.) Sección Tipo; (Der.) Sección en zona de desviadores.

activo tiene las siguientes características mecánicas:  $f_{py} = 1,700$  MPa y un  $f_{pu} = 1,860$  MPa. Las vigas presentan 7.20m de luz y una sección transversal en cajón (figura 3.3). Están configuradas por 7 dovelas prefabricadas; 5 centrales de 1.20m de longitud y 2 en los extremos de 0.825m, con juntas secas conjugadas y llaves de cortante múltiples, como se puede observar en la figura 3.4. Se utilizó un hormigón para su fabricación con resistencia característica a compresión  $f_{ck}$  igual a 34.42 MPa (351 Kp/cm<sup>2</sup>) en probeta cilíndrica y un módulo de elasticidad  $E = 27,458$  MPa (280,000 Kp/cm<sup>2</sup>) [GOMEZ, 1995].

El pretensado exterior en cada uno de los tres ensayos se realizó en dos etapas por medio de un gato unifilar (figura 3.5), consistiendo en dos tendones  $\phi 0.6''$ , con un área nominal de 140 mm<sup>2</sup> cada uno, dispuestos simétricamente en la sección. Quizá la magnitud del pretensado que se alcanza con dos tendones  $\phi 0.6''$  pueda resultar baja, pero la idea fue permitir la apertura de juntas centrales para poder reproducir la

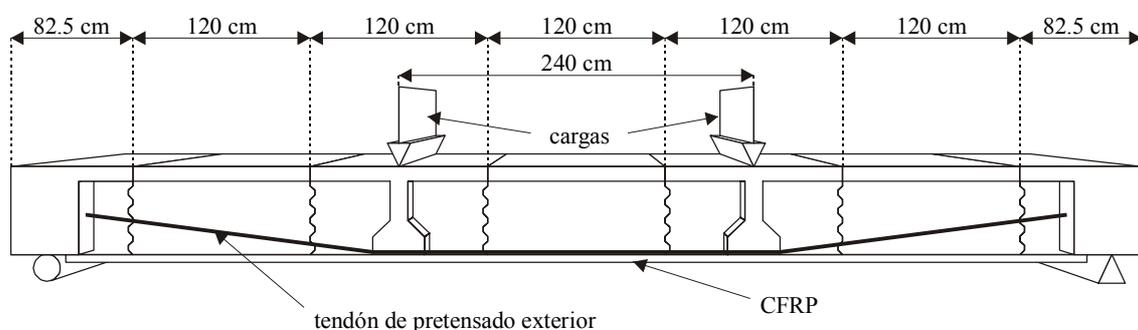


Figura 3.4 Dimensiones y método de carga en los ensayos estructurales

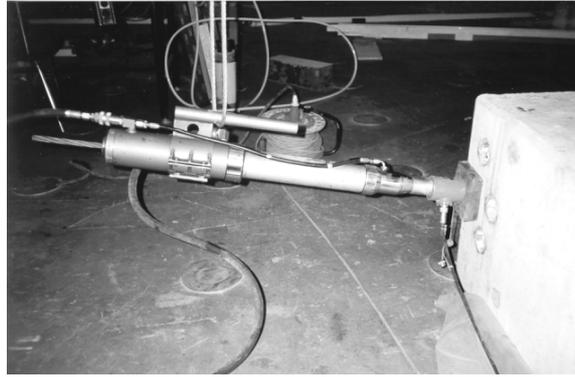


Figura 3.5. Gato de pretensado unifilar.

fisuración gradual localizada en la zona instrumentada del CFRP. Una vez reparadas las juntas dañadas, las vigas fueron pretensadas en dos etapas y colocadas bajo un pórtico de carga apoyándose sobre rodillos metálicos (uno fijo y uno móvil), con la finalidad de representar un esquema estático ideal (figura 3.6). Una vez colocadas bajo el pórtico de carga se preparó la superficie del hormigón para el pegado del CFRP escarificando la capa superficial del hormigón por medio del abujardado para proceder posteriormente con el pegado del CFRP.

Las tres vigas ensayadas se denominarán de aquí en adelante como: *VD-TFC1*, *VD-TFC2* y *VD-CFK3*, en donde las letras *VD* se refieren a Viga de Dovelas, las tres letras siguientes se refieren al tipo de CFRP empleado y el último número al orden cronológico del ensayo.

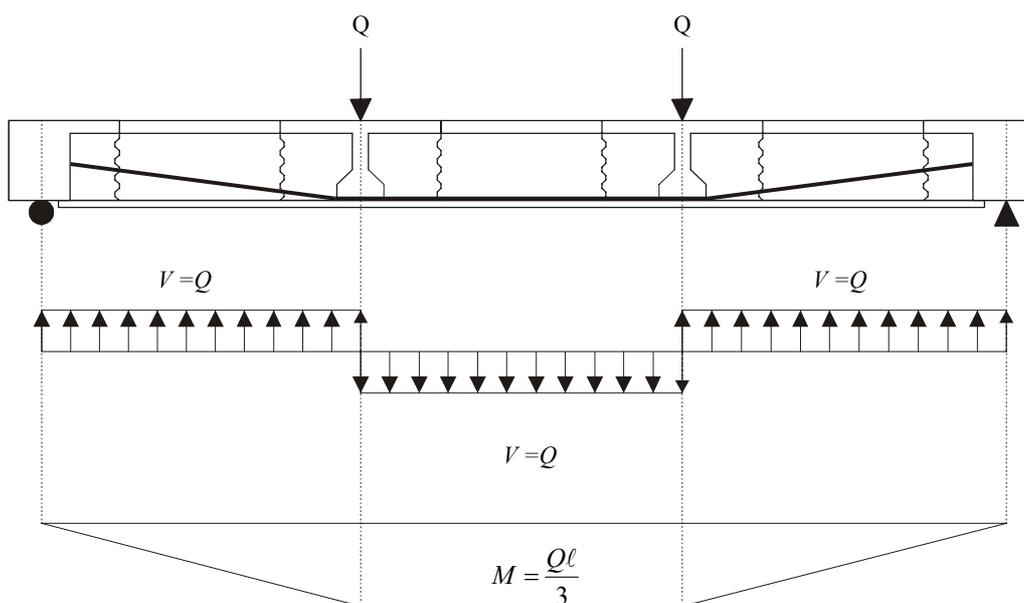


Figura 3.6. Diagrama de cortante y de momento flector

En estos ensayos se instrumentó la zona central de la viga, midiendo la apertura en las juntas centrales, flecha en el centro del vano, deslizamiento de tendones de pretensado en la zona de desviadores, deformaciones en el acero pasivo a tracción y compresión, deformaciones del acero activo en el tramo central e incrementos de pretensado en anclajes, deformaciones en hormigón y fibra de carbono en zonas próximas a las juntas y en el centro del vano (la instrumentación para cada uno de los ensayos estructurales se detalla más adelante). Se emplearon escalones de carga en los gatos hasta llegar al desprendimiento de la fibra utilizando un sistema de adquisición de datos estático.

### 3.2.1.1 Preparación del ensayo VD-TFC1

En el primer ensayo con las vigas de dovelas se reforzó la zona inferior de ésta con 3 bandas de 20cm de ancho y 360cm de longitud utilizando el sistema de refuerzo TFC, pasando únicamente por las juntas centrales, como se muestra en la figura 3.7.

a. *Reparación de las juntas dañadas.* La reparación de las juntas dañadas de las dovelas se llevó a cabo utilizando un hormigón de reparación. El proceso de reparación se realizó en este orden:

- (i) Demolición y saneamiento del hormigón dañado.
- (ii) Aplicación de una resina epóxica para unir el hormigón viejo con el nuevo.
- (iii) Instalación de un encofrado estanco.
- (iv) Aplicación del hormigón de reparación.
- (v) Curado del hormigón en la parte expuesta.

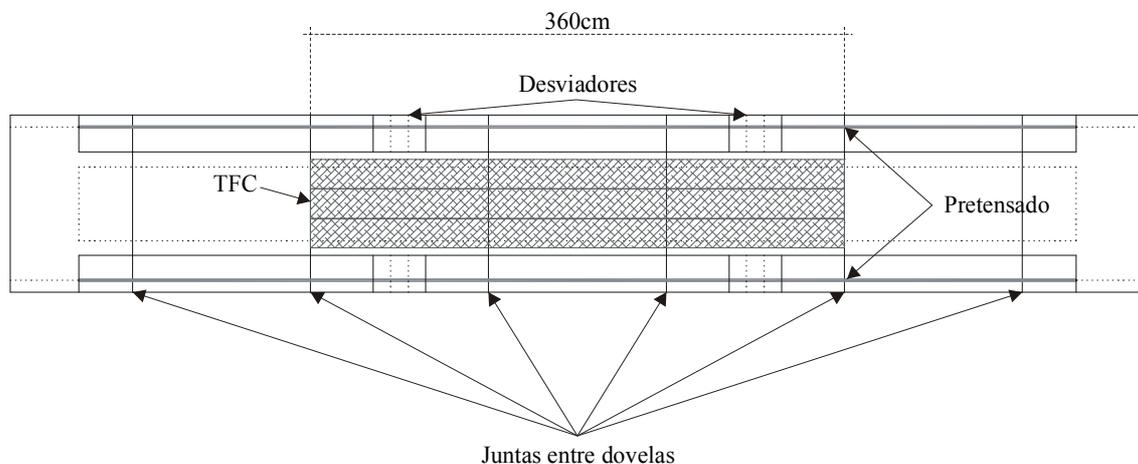


Figura 3.7. Vista inferior de la viga VD-TFC1

(vi) Retirado del encofrado.

La junta dañada se reparó monolíticamente, suponiendo que al no existir armadura pasante se fisuraría a niveles considerablemente bajos de carga, tratando de ahorrar tiempo evitando fabricar un encofrado que moldeara las llaves de cortante múltiples dañadas. Este proceso se ajusta al que se realizaría en la reparación de un puente real.

En la figura 3.8 se puede observar la junta entre las dovelas 2 y 3 antes y después de la reparación.

b. *Pretensado*. El pretensado se llevó a cabo en dos fases como se mencionó anteriormente. En la tabla 3.4 se muestran las fuerzas de pretensado en cada tendón y en cada anclaje (pasivo, activo) antes y después del clavado de cuña.

Tabla 3.4. Valores de tesado tomados de las células de carga de la viga VD-TFC1

Lectura	Tendón 1		Tendón 2	
	Activo (kN)	Pasivo (kN)	Activo (kN)	Pasivo (kN)
Tesado	172	158	174	158
Clavado	123	129	108	117

Conocida la diferencia de fuerza de pretensado entre los anclajes activo y pasivo, podemos obtener los coeficientes de rozamiento de los desviadores, a partir de la fórmula de rozamiento de Coulomb:

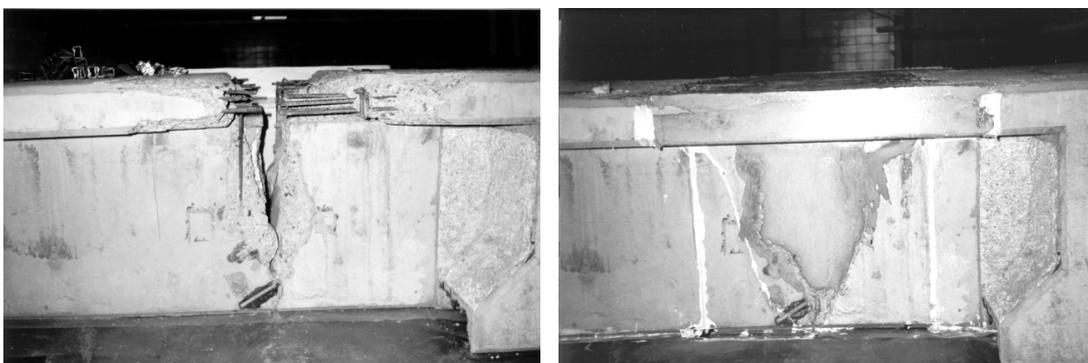


Figura 3.8. Reparación de la junta de dovelas 2 y 3. (Izq.) Antes de reparar; (Der.) Reparada.

$$\Delta P = P_0 \cdot (1 - e^{-\mu \cdot \alpha}) \quad (3.3)$$

donde,

- $\Delta P$  es la diferencia de fuerza de pretensado entre anclajes activo y pasivo,  
 $P_0$  la fuerza de pretensado en el anclaje activo,  
 $\mu$  el valor del coeficiente de rozamiento en los desviadores,  
 $\alpha$  el ángulo de desviación total del tendón entre anclajes activo y pasivo, o sea, la suma de los ángulos que forma con la horizontal el tendón en los desviadores (radianes).

Debido a que los tendones forman un ángulo de  $7.5^\circ$  con respecto a la directriz de la viga, el valor de  $\alpha$  será:

$$\alpha = 2 \cdot 7.5^\circ = 0.2618 \text{ rad} \quad (3.4)$$

Tabla 3.5. Valores de los coeficientes de rozamiento de la viga VD-TFC1

Tendón	Situación	Fuerza de tesado en anclajes		$\Delta P$ (kN)	$\mu$
		Activo (kN)	Pasivo (kN)		
1	Tesado	172	158	14	0.3243
	Clavado	123	129	-6	0.1819
2	Tesado	174	158	16	0.3685
	Clavado	108	117	-9	0.3057

A partir de este valor se obtienen los siguientes coeficientes de rozamiento en desviadores antes y después del clavado de cuña, tomando en cuenta que no existen desviaciones parásitas en el pretensado exterior (tabla 3.5). Como se puede observar, el valor de los coeficientes de rozamiento es elevado, además de cambiar significativamente al momento del tesado y el clavado de cuñas. Estos dos fenómenos se pueden explicar al observar el estado de los desviadores metálicos, los cuales al permanecer bastante tiempo a la intemperie sufrieron oxidación importante y alteración en la superficie (picaduras), por lo que es normal que al momento del tesado se

presenten valores de coeficiente de rozamiento muy elevados, por otra parte, al momento del tesado esta superficie sufrió una especie de pulido al rozar con el tendón, por lo que al momento del clavado de cuñas el coeficiente de rozamiento disminuye.

Las pérdidas debidas a penetración de cuña se calculan en un mismo anclaje a partir de las diferencias de fuerza de pretensado antes y después del clavado de la cuña. Debido a longitud reducida de la viga, estas pérdidas se reflejan en toda la longitud del tendón.

Tabla 3.6. Penetración de cuñas en la viga VD-TFC1

Tendón	Anclaje	Pérdidas por penetración de cuñas (kN)	<i>a</i> (mm)
1	Activo	49	13.47
	Pasivo	29	7.97
2	Activo	66	18.14
	Pasivo	41	11.27

El valor de penetración de cuña equivale al alargamiento del acero correspondiente a dichas pérdidas, y en este caso viene dado por la expresión:

$$a = \frac{\Delta P \cdot l_0}{A_p \cdot E_p} \quad (3.5)$$

donde,

$\Delta P$  es la diferencia de fuerza de pretensado antes y después del clavado de cuña,

$l_0$  la longitud inicial del tendón ( $l_0 = 2400 + 2 \cdot 2,625 / \cos 7.5^\circ = 7,695\text{mm}$ ),

$E_p$  módulo de deformación longitudinal del acero de pretensado (200,000 MPa),

$A_p$  el área del tendón (140mm<sup>2</sup>).

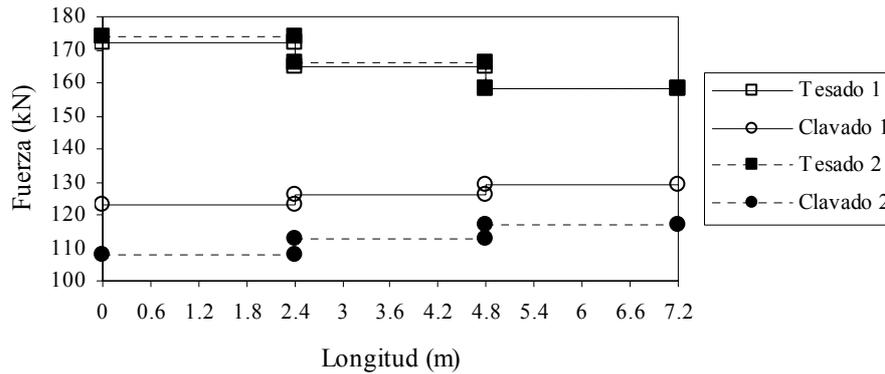


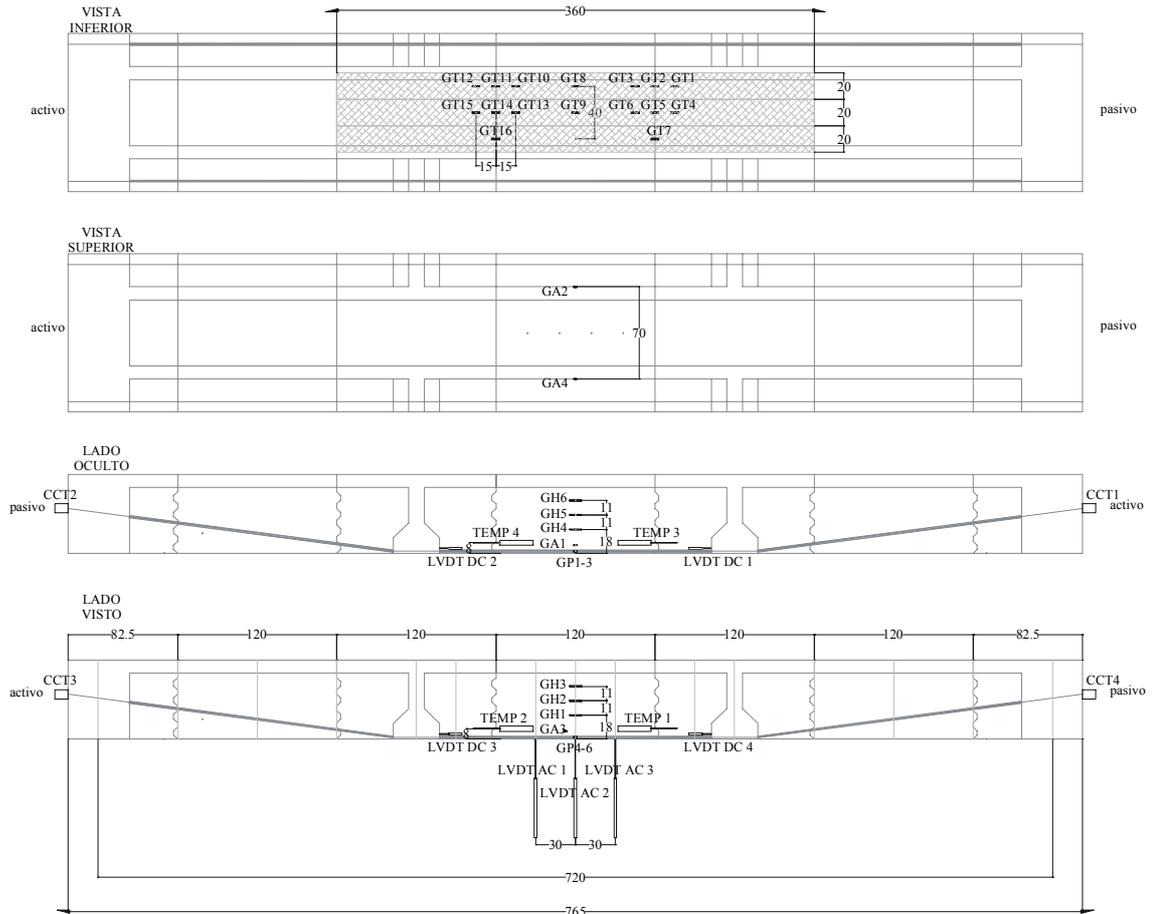
Figura 3.9. Variación de la fuerza de tesado a lo largo de la viga VD-TFC1

Los valores de  $a$  para los anclajes activo y pasivo de los tendones 1 y 2 se exponen en la tabla 3.6. La variación de la fuerza de pretensado a lo largo de los tendones se muestra en la figura 3.9

c. *Instrumentación.* Como se mencionó al comienzo de este capítulo, los ensayos estructurales con las vigas de dovelas se llevaron a cabo como prueba piloto, por esto, fue necesario instrumentar la viga además del CFRP, para poder revelar cualquier cambio en el comportamiento comparando los datos obtenidos de los ensayos realizados por Gómez (1995) y Anlló (1996).

En la tabla 3.7 se muestra la instrumentación empleada en los ensayos de las vigas de dovelas y en la figura 3.10 la disposición de los diversos sistemas de medición utilizados en la viga VD-TFC1.

d. *Método de Carga.* Como se mencionó al principio de este capítulo, la viga se colocó bajo un pórtico de carga equipado con dos gatos hidráulicos de 600kN de capacidad, y se llevó a rotura aplicando escalones de carga de aproximadamente 10kN en cada uno de los gatos.



Referencia	Tipo
CCG	Células de carga en gatos hidráulicos
CCT	Células de carga en anclajes de pretensado
GA	Galgas extensométricas en acero pasivo
GH	Galgas extensométricas en hormigón
GP	Galgas extensométricas en pretensado
GT	Galgas extensométricas en TFC
LVDT AC	LVDT en dovela central
LVDT DC	LVDT en desviadores
TEMP	Temposonics en juntas centrales

Figura 3.10. Disposición de la instrumentación en la viga VD-TFC1

Tabla 3.7. Instrumentación empleada en las vigas de dovelas

Número	Referencia	Tipo	Medición
2	CCG	Células de carga	Carga aplicada a la viga durante el ensayo.
4	CCT	Células de carga	Incrementos en la fuerza de pretensado, tanto en el anclaje activo como el pasivo.
4	GA	Galgas extensométricas	Deformaciones en el acero pasivo de las vigas.
6	GH	Galgas extensométricas	Deformación en el hormigón para conocer el estado de tensiones.
6	GP	Galgas extensométricas	Deformaciones en el tramo central de los tendones de pretensado.
16-20	GT (TFC) GC (CFK)	Galgas extensométricas	Deformaciones a lo largo del material compuesto de CFRP
1-3	LVDT AC	LVDT (Linear Variable Differential Transducer)	Flecha y giros en la dovela central de la viga.
4	LVDT DC	LVDT (Linear Variable Differential Transducer)	Deslizamiento de los tendones de pretensado en desviadores.
4	TEMP	Temposonics (Transductores magnéticos)	Apertura de juntas en las dovelas centrales.

### 3.2.1.2 Preparación del ensayo VD-TFC2

Para el segundo ensayo con las vigas de dovelas se utilizó la misma viga VD-TFC1 una vez ensayada después de repararla. En este segundo ensayo, se utilizó el refuerzo colocado en la viga VD-TFC1 aplicando unas extensiones de 167cm en ambos extremos utilizando un solape efectivo de 20cm de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. Por tanto, el refuerzo de la viga VD-TFC2 en la zona inferior consistió en 3 bandas de 20cm de ancho y 654cm de longitud utilizando el sistema de refuerzo TFC, pasando a través de las cuatro juntas centrales, como se muestra en la figura 3.11.

a. *Reparación de las juntas dañadas.* La reparación de las juntas dañadas después del ensayo VD-TFC1 se llevó a cabo utilizando un hormigón de reparación y un mortero de reparación adicionado con fibras sintéticas. El proceso de reparación se realizó en este orden:

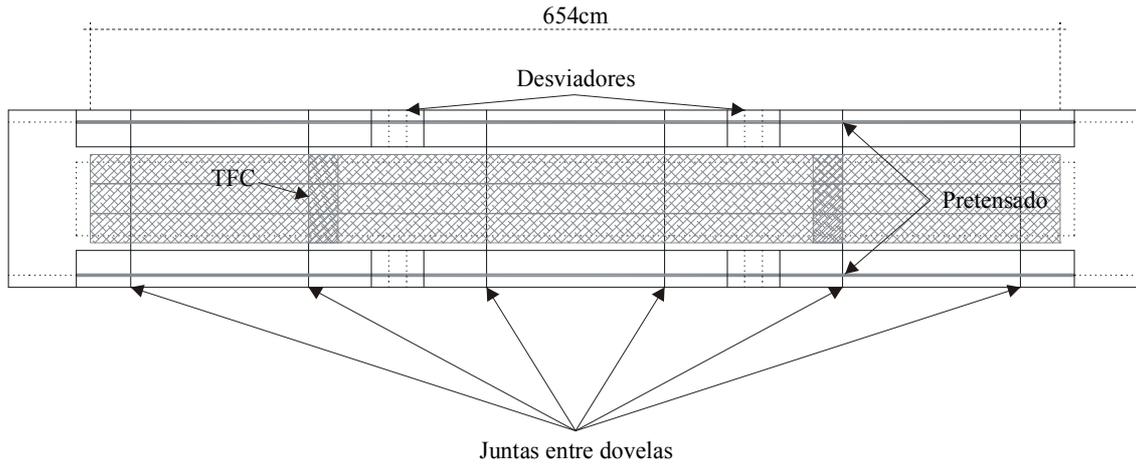


Figura 3.11. Vista inferior de la viga VD-TFC2

- (i) Demolición y saneamiento del hormigón dañado.
- (ii) Aplicación de una resina epóxica para unir el hormigón viejo con el nuevo.
- (iii) Aplicación del hormigón de reparación en las juntas centrales.
- (iv) Curado del hormigón en la parte expuesta.
- (v) Aplicación del mortero de reparación en las llaves de cortante rotas.
- (vi) Curado del mortero de reparación en la parte expuesta.

En este segundo ensayo no se realizó ninguna modificación con respecto al primero, debido a que la junta que había sido reparada monolíticamente, fisuró tras realizarse el primer ensayo como se había previsto, por lo que la junta fisurada presentaba gran similitud estructural en comparación a las dovelas originales.

b. *Pretensado*. Para este segundo ensayo estructural, el pretensado no se modificó. Cabe mencionar que después de efectuar el ensayo VD-TFC1 se registraron pérdidas de pretensado al descargar, posiblemente atribuidas al daño ocasionado en las llaves de cortante durante el primer ensayo, relajación del acero y deformación remanente en el mismo, ya que se llegaron a tensiones cercanas a las de fluencia en el acero activo, aunque no puede determinarse de manera exacta el porcentaje atribuido a cada uno de los factores con total seguridad. En la tabla 3.8 se muestran las fuerzas de pretensado en cada tendón y en cada anclaje antes de realizarse este segundo ensayo.

Tabla 3.8. Valores de tesado tomados de las células de carga de la viga VD-TFC2

Lectura	Tendón 1		Tendón 2	
	Activo (kN)	Pasivo (kN)	Activo (kN)	Pasivo (kN)
Inicial	75.8	78.5	73.0	76.0

c. *Instrumentación.* La instrumentación utilizada en esta segunda viga fue similar a la usada en la viga VD-TFC1, por lo que la información mostrada en la tabla 3.7 sirve de referencia para la instrumentación empleada en este ensayo. En la figura 3.12 se puede observar la disposición de los diversos sistemas de medición utilizados en la viga.

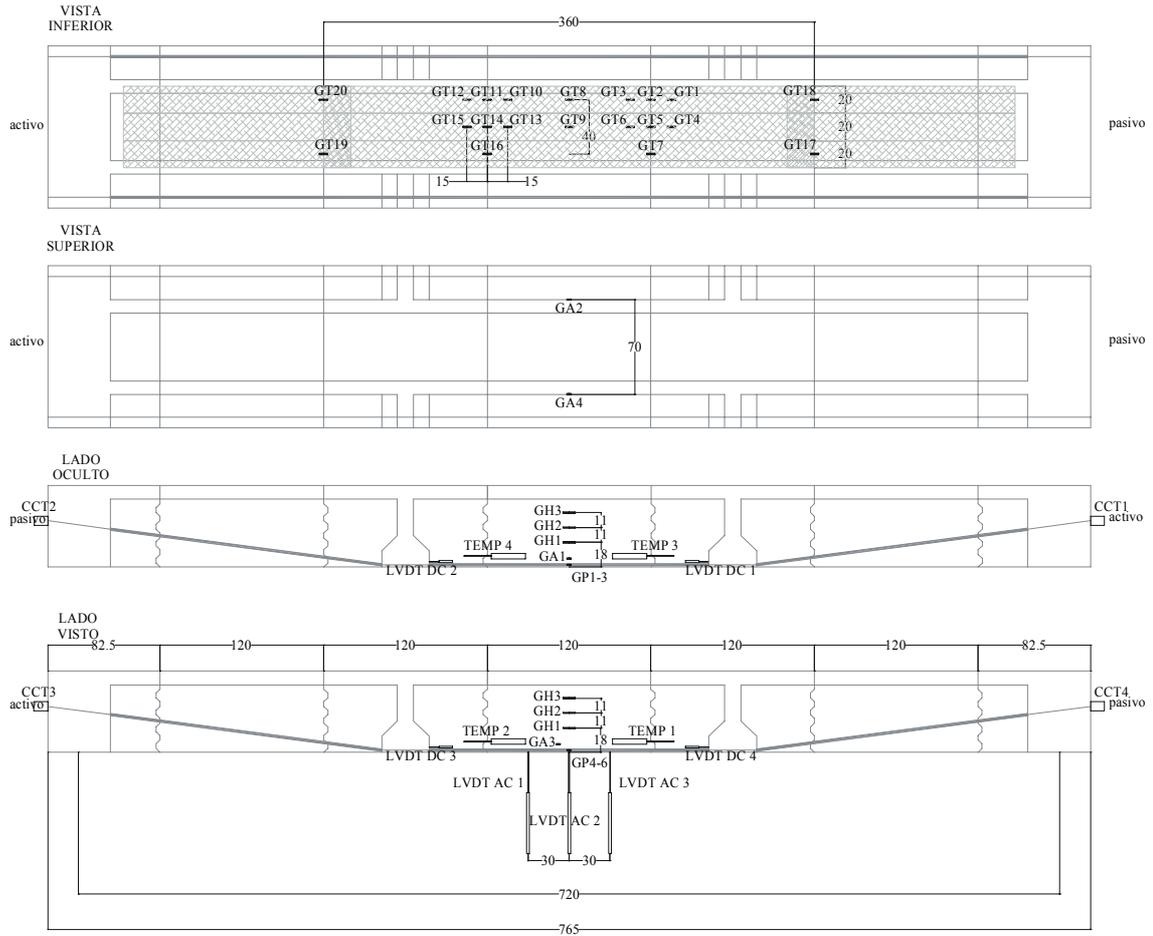
d. *Método de Carga.* De igual forma que en el primer ensayo, la viga se colocó bajo un pórtico de carga equipado con dos gatos hidráulicos de 600kN de capacidad, y se llevó a rotura aplicando escalones de carga de aproximadamente 10kN en cada uno de los gatos.

### 3.2.1.3 Preparación del ensayo VD-CFK1

En este tercer ensayo con las vigas de dovelas se reforzó la zona inferior de ésta con 5 láminas de 5cm de ancho y 660cm de longitud utilizando el sistema de refuerzo CFK, pasando a través de las cuatro juntas centrales, como se muestra en la figura 3.13.

a. *Reparación de las juntas dañadas.* La reparación de las juntas dañadas de las dovelas se llevó a cabo utilizando un hormigón de reparación. El proceso de reparación se realizó en este orden:

- (i) Demolición y saneamiento del hormigón dañado.
- (ii) Reconstrucción de las armaduras pasivas.
- (iii) Aplicación de una resina epóxica para unir el hormigón viejo con el nuevo.
- (vii) Instalación de un encofrado estanco en los lados y una dovela para moldear las llaves de cortante.
- (viii) Aplicación del hormigón de reparación.
- (ix) Curado del hormigón en la parte expuesta.
- (iv) Retirado del encofrado.



Referencia	Tipo
CCG	Células de carga en gatos hidráulicos
CCT	Células de carga en anclajes de pretensado
GA	Galgas extensométricas en acero pasivo
GH	Galgas extensométricas en hormigón
GP	Galgas extensométricas en pretensado
GT	Galgas extensométricas en TFC
LVDT AC	LVDT en dovela central
LVDT DC	LVDT en desviadores
TEMP	Temposonics en juntas centrales

Figura 3.12. Disposición de la instrumentación en la viga VD-TFC2

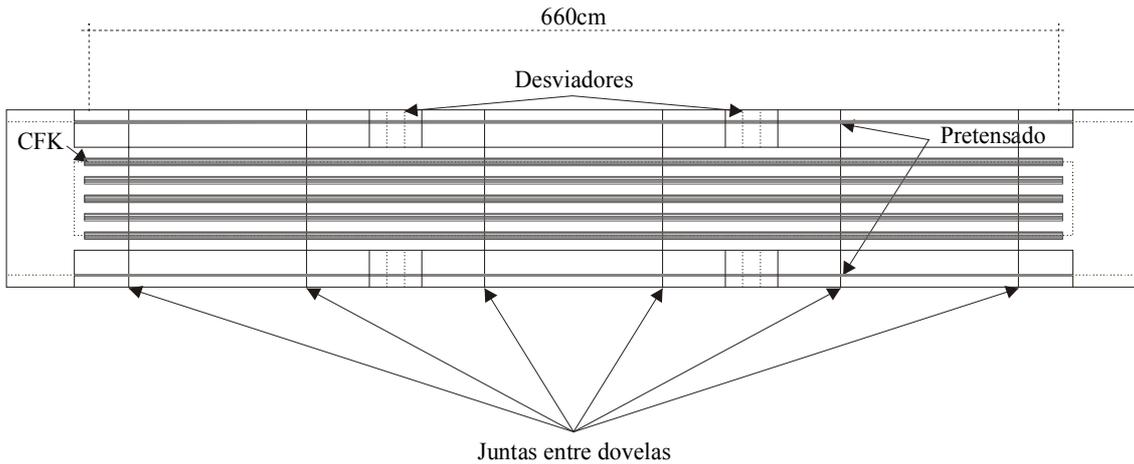


Figura 3.13. Vista inferior de la viga VD-CFK1

A diferencia de la viga VD-TFC1, la junta dañada se reparó respetando las dovelas, tratando de reconstruir las llaves de cortante utilizando la dovela conjugada del otro extremo como encofrado y después usando la dovela recién hormigonada como encofrado para la siguiente, con el fin de lograr un ajuste de la geometría bastante preciso.

En la figura 3.14 se puede observar la reparación de la junta dañada.

b. *Pretensado*. El pretensado se llevó a cabo en dos fases al igual que la viga VD-TFC1. En la tabla 3.4 se muestran las fuerzas de pretensado en cada tendón y en cada anclaje (pasivo, activo) antes y después del clavado de cuña.



Figura 3.14. Reparación de la junta de dovelas VD-CFK1.

Tabla 3.9. Valores de tesado tomados de las células de carga de la viga VD-CFK1

Lectura	Tendón 1		Tendón 2	
	Activo (kN)	Pasivo (kN)	Activo (kN)	Pasivo (kN)
Tesado	183	164	185	166
Clavado	122	133	127	137

Del mismo modo que en la viga VD-TFC1 se calculan los coeficientes de rozamiento a partir de la diferencia de fuerza de pretensado entre los anclajes activo y pasivo utilizando la fórmula de rozamiento de Coulomb (Tabla 3.10).

Tabla 3.10. Valores de los coeficientes de rozamiento de la viga VD-CFK1

Tendón	Situación	Fuerza de tesado en anclajes		$\Delta P$ (kN)	$\mu$
		Activo (kN)	Pasivo (kN)		
1	Tesado	183	164	19	0.4187
	Clavado	122	133	-11	0.3297
2	Tesado	185	166	19	0.4139
	Clavado	127	137	-10	0.2895

Del mismo modo que en la viga VD-TFC1, el valor de los coeficientes de rozamiento fue elevado, además de cambiar significativamente al momento del tesado y el clavado de cuñas, siendo la explicación de dicho fenómeno la misma que ya hemos apuntado al hablar del ensayo en la viga VD-TFC1.

En la tabla 3.11 se muestran las pérdidas debidas a penetración de cuña calculadas a

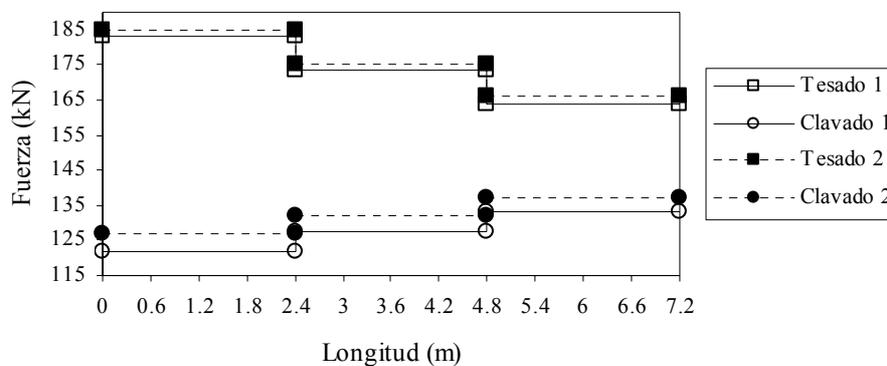


Figura 3.15. Variación de la fuerza de tesado a lo largo de la viga VD-CFK1

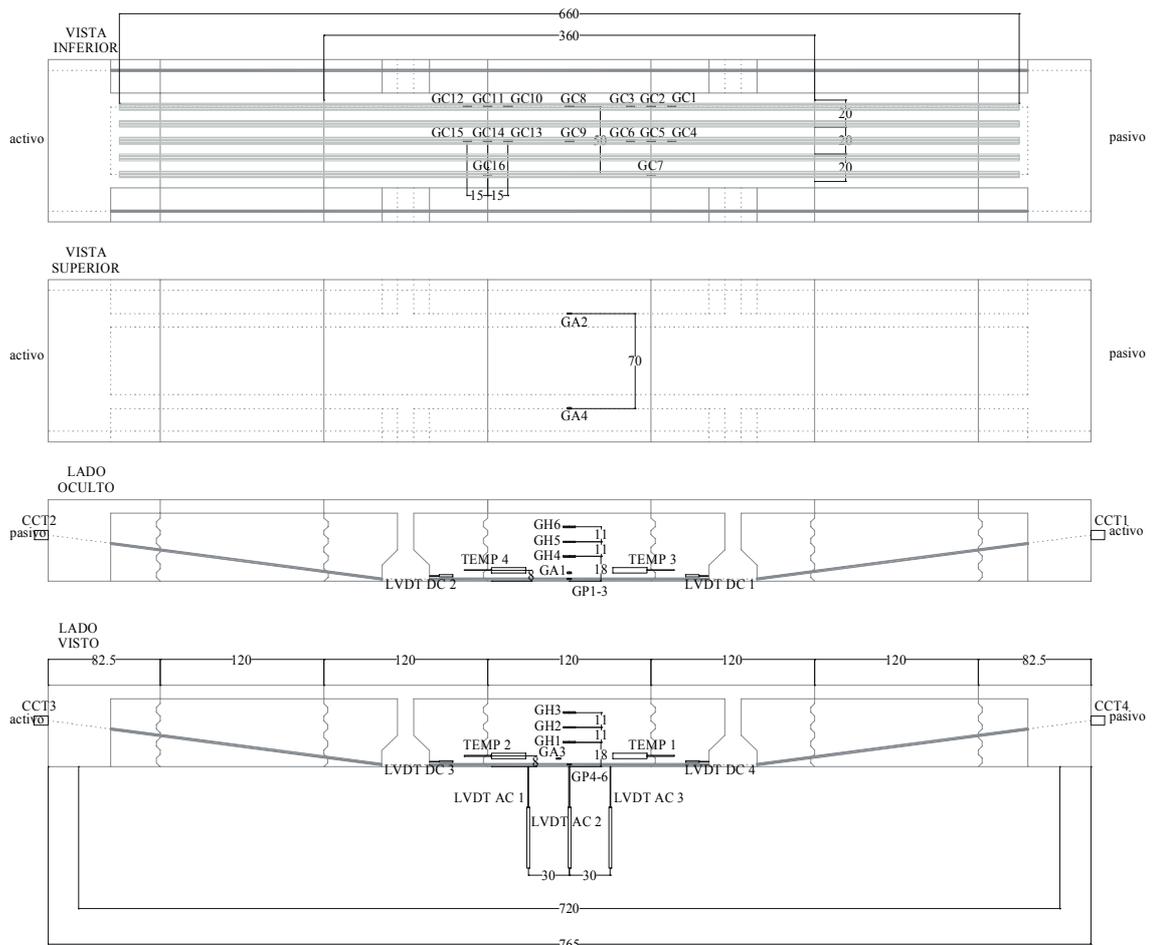
partir de las diferencias de fuerza de pretensado antes y después del clavado de la cuña (ecuación 3.5). Debido a longitud reducida de la viga, estas pérdidas se reflejan en toda la longitud del tendón. La variación de la fuerza de pretensado a lo largo de los tendones se muestra en la figura 3.15.

c. *Instrumentación.* La instrumentación utilizada en esta tercera viga fue similar a la usada en la viga VD-TFC1 y VD-TFC2, por lo que la información de la tabla 3.7 sirve de referencia para la instrumentación empleada en este ensayo. En la figura 3.16 se puede observar la disposición de los diversos sistemas de medición utilizados en la viga.

d. *Método de Carga.* De igual forma que en el primer ensayo, la viga se colocó bajo un pórtico de carga equipado con dos gatos hidráulicos de 600kN de capacidad, y se llevó a rotura aplicando escalones de carga de aproximadamente 10kN en cada uno de los gatos.

Tabla 3.11. Penetración de cuñas en la viga VD-CFK1

<b>Tendón</b>	<b>Anclaje</b>	<b>Pérdidas por penetración de cuñas (kN)</b>	<b><i>a</i> (mm)</b>
1	Activo	61	16.76
	Pasivo	31	8.52
2	Activo	58	15.94
	Pasivo	29	7.97



**Referencia**

**Tipo**

CCG	Células de carga en gatos hidráulicos
CCT	Células de carga en anclajes de pretensado
GA	Galgas extensométricas en acero pasivo
GH	Galgas extensométricas en hormigón
GP	Galgas extensométricas en pretensado
GC	Galgas extensométricas en CFK
LVDT AC	LVDT en dovela central
LVDT DC	LVDT en desviadores
TEMP	Temposonics en juntas centrales

Figura 3.16. Disposición de la instrumentación en la viga VD-CFK1

## 3.2.2 Ensayos de adherencia

### 3.2.2.1 Introducción y objeto de estudio

La segunda serie de ensayos incluidos en este trabajo consistió en modelos reducidos diseñados de tal forma que representaran la zona de junta de dovelas una vez descomprimida. Para lograr esto se trató de diseñar las probetas de adherencia basándose en ensayos existentes de adherencia para barras de acero y posteriormente realizar modificaciones para adecuarlo a las necesidades existentes.

El ensayo modelo seleccionado para desarrollar las pruebas de adherencia se basó en los ensayos recogidos en la normativa EH-91 (1998) teniendo como objeto determinar la adherencia de los CFRP utilizados como refuerzo en elementos de hormigón armado constituidos por dovelas.

El ensayo diseñado consiste en someter a flexión simple las probetas de ensayo hasta la falla total de la adherencia del CFRP, registrando al mismo tiempo las deformaciones en la superficie del material compuesto en la parte libre, así como en la zona próxima a la superficie interior de las semivigas de hormigón.

### 3.2.2.2 Probetas de ensayo

a. *Número de probetas.* Se realizaron dos series de ensayos de 8 probetas cada serie; 4 probetas utilizando el sistema de refuerzo TFC y otras 4 utilizando el sistema de refuerzo CFK, en total 16 probetas.

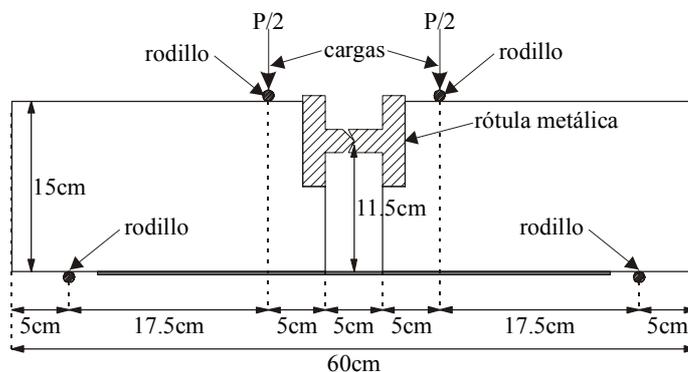


Figura 3.17. Dimensiones de las probetas de adherencia

b. *Formas y medidas.* Las probetas utilizadas de 15 x 15 x 60cm, están constituidas por dos bloques paralelepípedicos de hormigón armado (figura 3.17), unidos en su parte inferior por el CFRP y en la parte superior por una rótula de acero (figura 3.18).

c. *Armaduras auxiliares.* El refuerzo de cada bloque se realiza utilizando: 4 barras  $\phi$  8mm y 4 barras  $\phi$  6mm como refuerzo longitudinal, y cercos  $\phi$  6mm a cada 50mm, el acero utilizado es B 500 S (Figura 3.19).

d. *Composición y mezcla del hormigón.* El hormigón utilizado en este ensayo es similar en cuanto a características mecánicas con relación al que se empleó para la construcción de las dovelas de las vigas ensayadas, con una resistencia media a compresión  $f_{cm} \approx 40\text{MPa}$  aproximadamente. La dosificación del mismo se muestra en la

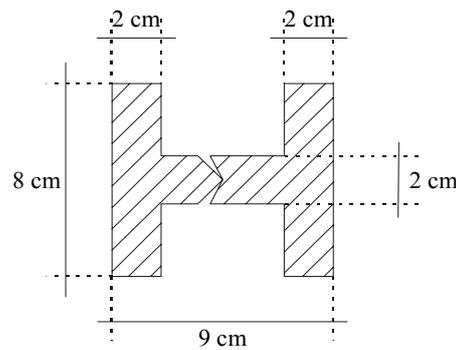


Figura 3.18. Rotula de acero utilizada en los ensayos de adherencia

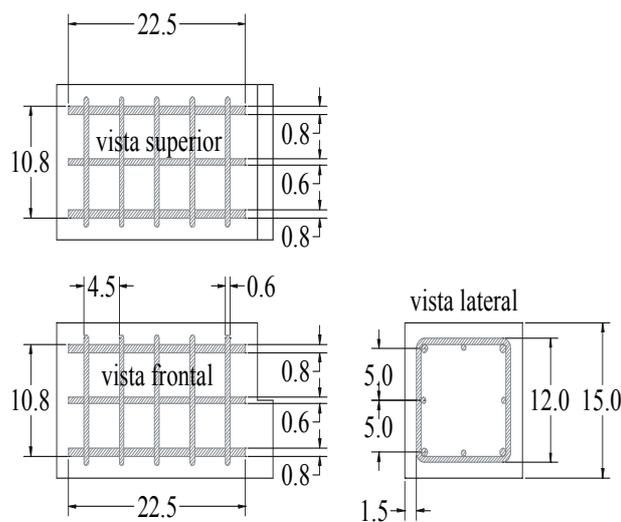


Figura 3.19. Armaduras auxiliares de las probetas de adherencia (cm)

tabla 3.7. La mezcla se realizó por medios mecánicos en hormigonera de eje vertical. La duración del amasado fue de tres minutos al menos hasta la adición del agua, incorporando el superfluidificante al minuto de mezclado prolongándolo por tres minutos más.

Tabla 3.7. Dosificación del hormigón empleado para la fabricación de las probetas de adherencia.

Material	Peso (kgf)
Arena (0-5mm)	907
Grava (5-12mm)	1015
Cemento (42.5R)	368
Agua	213
Aditivo (DARCEM)	1.7

e. *Confección, desencofrado y conservación de probetas.* Para su fabricación se utilizaron moldes horizontales metálicos de 15 x 15 x 60cm, utilizando como separador entre bloques un trozo de espuma de poliuretano para dejar el espacio necesario para la colocación de la rótula metálica (Figura 3.20). El hormigón se vibró mediante mesa vibrante y se alisó después con llana. Las probetas una vez hormigonadas se cubrieron con plástico durante tres días para posteriormente ser desmoldeadas. Una vez desencofradas se colocaron en una cámara húmeda con una humedad relativa del 95% y una temperatura de 20°C, durante 28 días.

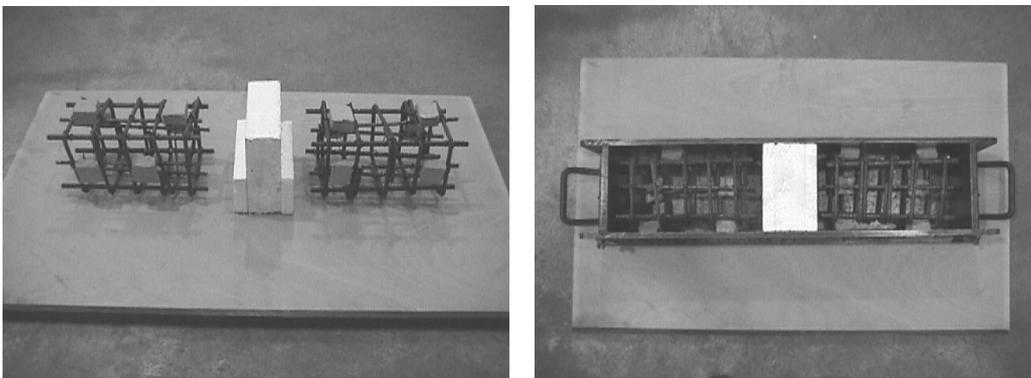


Figura 3.20. Detalle de la fabricación de las probetas de adherencia

f. *Preparación de los CFRPs.* Las probetas de CFRP utilizadas en los ensayos de adherencia se prepararon de acuerdo a las dimensiones de la tabla 3.8. La preparación superficial utilizada en el hormigón fue la misma que la elegida para las vigas de dovelas, mediante escarificación por medio de abujardado.

g. *Resistencia del hormigón.* Se determinó mediante 3 probetas cilíndricas por amasada de 15 x 30cm confeccionadas y conservadas en las mismas condiciones que las vigas, rompiéndolas a los 28 días después de su fabricación.

Tabla 3.8. Dimensiones del CFRP en los ensayos de adherencia.

Dimensión	TFC	CFK
	mm	mm
Ancho	80,0	100,0
Longitud	450,0	450,0
Espesor	0,4	1,4
Número de probetas	8	8

h. *Instrumentación.* El CFRP se instrumentó con dos galgas extensométricas en la zona central, ya que en este punto se presenta la máxima tensión de la fibra y dos galgas más, colocadas a 10cm del centro para controlar el despegue de la fibra. La disposición de las galgas se muestra en la figura 3.21a. Dos de los ensayos fueron instrumentados

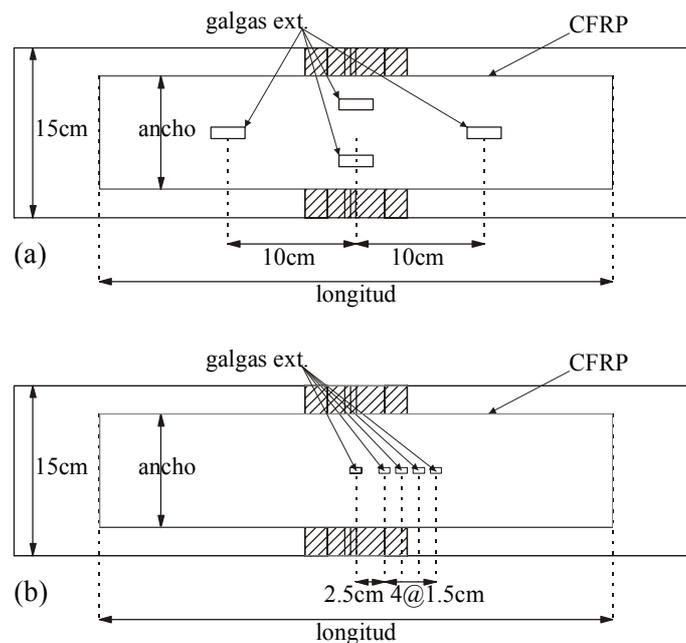


Figura 3.21. Distribución de las galgas extensométricas en los ensayos de adherencia

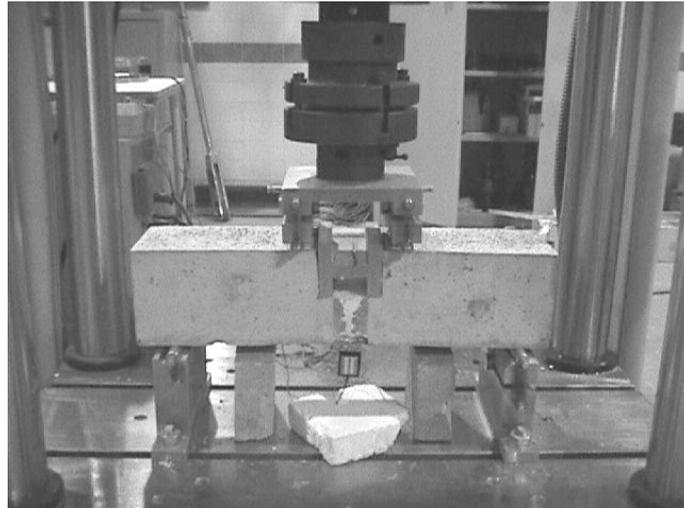


Figura 3.22. Probeta de adherencia colocada en la prensa INSTRON

con cinco galgas extensométricas como se muestra en la figura 3.21b, con el fin de determinar la distribución de las tensiones tangenciales en la zona próxima a la pared interna de los bloques.

i. *Procedimiento de carga.* La probeta se apoyó sobre dos rodillos metálicos separados 50cm uno del otro a 5cm del borde de la probeta. Para llevar a cabo el ensayo se utilizó una prensa de 1,000kN de capacidad de carga controlando el ensayo por desplazamiento del pistón a una velocidad de 0.01mm/seg (Figura 3.22). Esta velocidad de carga se eligió debido a la naturaleza frágil del mecanismo de rotura cuando se presenta el despegue del sistema de refuerzo.

En un principio se trató de controlar el ensayo mediante un clip en la zona central de la probeta para establecer como condición de ensayo la apertura del espacio entre bloques de hormigón. Sin embargo, la fisuración en esta zona impidió que se pudieran obtener datos congruentes del ensayo, por lo que se decidió llevar a cabo el control del ensayo mediante el desplazamiento del pistón de la prensa.

La notación que se utilizará de aquí en adelante para las probetas de adherencia será la siguiente [FRP][N° de serie]-[N° de probeta]. Así por ejemplo, la primera probeta reforzada con TFC de la primera serie sería: *TFC1-1*.

### 3.2.3 Ensayos de caracterización a tracción directa de los CFRPs

#### 3.2.3.1 Introducción y objeto de estudio

Con el fin de verificar los resultados obtenidos tanto en las vigas de dovelas como en las probetas de adherencia, se decidió realizar ensayos de caracterización del sistema de refuerzo TFC debido a la naturaleza de su colocación, con el fin de comparar tanto el módulo de elasticidad como la resistencia a tracción con los datos proporcionados por los fabricantes.

Por otro parte, se decidió que no era necesaria la fabricación de probetas con el sistema de refuerzo CFK, debido a que existe abundante literatura sobre la caracterización de este tipo de sistema de refuerzo verificando que los datos obtenidos en laboratorio son muy similares a los proporcionados con el fabricante (punto 3.1.2).

El módulo de elasticidad de los sistemas de reparación se obtuvo a partir de ensayos a tracción directa conforme a la norma ASTM D 3039 “*Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber – Resin Composites*” [ASTM D 3039, 1989], utilizando probetas como las que se muestran en la Figura 3.23.

#### 3.2.3.2 Probetas de ensayo

a. *Número de probetas.* Para la caracterización se fabricaron 5 probetas del sistema de refuerzo TFC, reforzando los extremos con láminas de fibra de carbono para evitar la

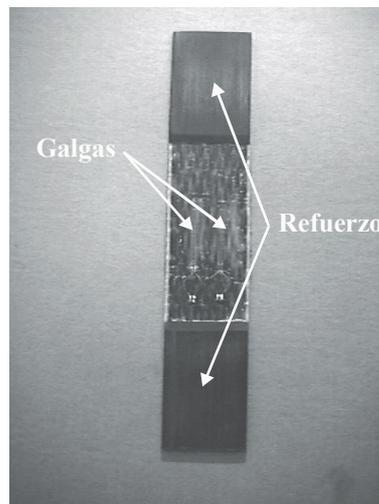


Figura 3.23. Probeta utilizada para los ensayos a tracción directa ASTM D 3039

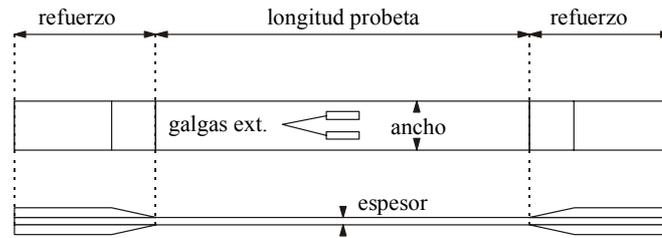


Figura 3.24. Dimensiones y colocación de galgas extensométricas del ensayo ASTM D 3039

rotura en la zona de mordazas debido a las tensiones de compresión parásitas originadas en esta zona en el transcurso del ensayo.

b. *Formas y medidas.* Las probetas utilizadas son de forma rectangular conservando el sentido privilegiado de la fibra longitudinalmente. En la Tabla 3.8 se muestran las dimensiones de las probetas para cada CFRP según el esquema de la figura 3.24.

Tabla 3.8. Dimensiones de la probetas ASTM D 3039.

Dimensión	TFC
	mm
Ancho	50.0
Longitud	110.0
Espesor	0.4
Refuerzo	70.0

c. *Refuerzo en la zona de mordazas.* Para evitar la rotura prematura de la probeta en la zona próxima a las mordazas fue necesario reforzar las probetas en sus extremos con dos trozos de lámina de CFRP de fibra de carbono. Se seleccionó este tipo de material para conservar una compatibilidad en cuanto a las deformaciones con el material a ensayar. Las medidas de las láminas de refuerzo se muestran en la tabla 3.8.

d. *Confeción, y conservación de probetas.* Las probetas de TFC, se fabricaron individualmente y se sometieron a un proceso de curado en cámara climática a 23°C y 50% de humedad relativa según la normativa ASTM.

e. *Instrumentación.* Los especímenes fueron instrumentados en la zona central con dos galgas extensométricas colocadas a 1/3 del ancho de la probeta, embebidas en la resina de la matriz en el momento de su fabricación.

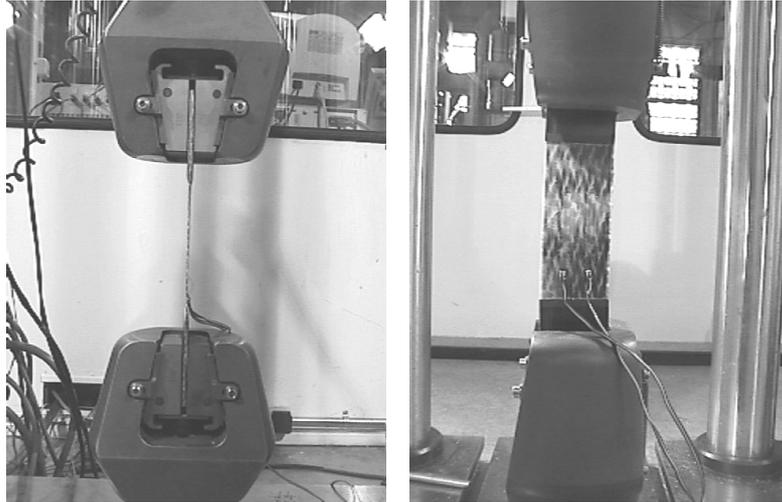


Figura 3.25. Vista frontal y vista lateral del ensayo ASTM D 3039.

f. *Procedimiento de carga.* Las probetas se colocaron en una prensa INSTRON de 1000kN, sujetándolas por los extremos reforzados mediante unas mordazas metálicas como se muestra en la figura 3.25. El control del ensayo fue por desplazamiento del pistón de la prensa a una velocidad de 0.03 mm/seg, dentro del rango que marca la normativa ASTM D 3039.

La notación que se utilizará de aquí en adelante para las probetas de tracción directa será la siguiente  $[TFC]-[N^{\circ} \text{ de probeta}]$ , así por ejemplo la denominación de la primera probeta sería: *TFC-1*.