
CAPÍTULO 4

Capítulo 4 - ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL REFUERZO DE PUENTES

- 4.1 Introducción
- 4.2 Descripción metodológica
- 4.3 Descripción de los modelos y medios de ensayo
 - 4.3.1 Descripción de los materiales
 - 4.3.2 Trabajos de preparación
 - 4.3.3 Instrumentación utilizada
 - 4.3.3.1 - Caracterización de los sistemas utilizados
 - 4.3.3.2 - Transductores
 - 4.3.3.3 - Medidas de desplazamientos
 - 4.3.3.4 - Aplicación de cargas
- 4.4 Descripción de los ensayos
 - 4.4.1 Ensayos de caracterización de adherencia
 - 4.4.1.1 - Antecedentes
 - 4.4.1.2 - Objetivo del plan de Ensayo
 - 4.4.1.3 - Planteamiento y descripción del ensayo
 - 4.4.1.3.i Preparación de los modelos
 - 4.4.1.3.ii Tipo de ensayos
 - 4.4.1.4 - Medios de Carga e Instrumentación
 - 4.4.1.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga
 - 4.4.1.6 - Resultados
 - 4.4.2 Ensayos sobre modelo de puente: **VPE_1**
 - 4.4.3 Ensayos sobre modelo de puente: **VPE_2**
 - 4.4.4 Ensayos sobre modelo de puente: **VPE_3**
 - 4.4.5 Ensayos sobre modelo de puente: **VHA1_a**
 - 4.4.6 Ensayos sobre modelo de puente: **VHA1_b**
 - 4.4.7 Ensayos sobre modelo de puente: **VHA1_c**
 - 4.4.8 Ensayos sobre modelo de puente: **VHA1_d**
 - 4.4.9 Ensayos sobre modelo de puente : **VHA_PE_a**
 - 4.4.10 Ensayos sobre modelo de puente: **VHA_PE_b**
- 4.5 Resumen de resultados sobre modelos de puente

CAPITULO 4

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL REFUERZO DE PUENTES

4.1- INTRODUCCIÓN.

Dentro del objetivo general de la presente tesis, sobre el refuerzo a flexión de puentes mediante pretensado exterior y el encolado de bandas rígidas de aramida ó de tejidos de fibra de carbono; se han tenido que realizar varias series de ensayos, desde los iniciales de caracterización de los materiales a utilizar en las reparaciones (estáticos y dinámicos) hasta llegar al estudio experimental de modelos de puente bajo diferentes condiciones de carga.

El trabajo experimental para investigar la conveniencia del refuerzo de puentes usando fibras sintéticas tiene dos fases principales. En la primera el interés se centra en la obtención de las características de adherencia de las bandas de fibra con el hormigón existente y también en la técnica de preparación de las diferentes superficies. En la segunda, un grupo de modelos de puente han sido primeramente cargados hasta la rotura y después reparados y reforzados con los tejidos de fibra de carbono, fibra aramida y pretensado exterior, para ser ensayados de nuevo hasta rotura para comparar los niveles de cargas y los comportamientos en cada una de las secciones entre ambos ensayos.

4.2- DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA.

Dentro del desarrollo de las diferentes fases, tenemos en primer lugar, que plantear el desarrollo de un modelo teórico de la interfase fibra – adhesivo - hormigón. Para alcanzar este objetivo se plantean varias series de probetas de hormigón - fibra, hormigón – acero, a través de diferentes técnicas de pegado y el uso de varios tipos de adhesivos. Con estos trabajos se obtiene el tipo de epóxico más adecuado a ser utilizado y las operaciones a ser desarrolladas in situ cuando se aplique la fibra y obtener un comportamiento de unión óptimo. A partir de dichos ensayos iniciales, se procedió a otra serie de ensayos dinámicos, utilizando los materiales y la técnica de pegado que presentó el mejor comportamiento.

La fase dos comprende el ensayo de tres series de modelos de vigas – cajón:

- 1ª serie: 3 modelos fabricados in situ, de 14.80 mt. de longitud. Con pretensado exterior. Denominados en su orden: VPE_1, VPE_2 y VPE_3. Los modelos VPE_1 y VPE_2 corresponden a vigas continuas con pretensado exterior, anclado en los extremos en el primer caso y bloqueado sobre apoyo intermedio en el segundo. El modelo VPE_3 corresponde al VPE_1, que una vez llevado a rotura es reparado y reforzado con láminas rígidas de aramida, estando también el pretensado anclado en los extremos
- 2ª serie: 4 modelos, también de 14.80 mt. De longitud sin pretensado exterior. Denominados en su orden: VHA1_a, VHA1_b, VHA1_c y VHA1_d. El modelo VHA1_a es una viga continua de dos vanos en hormigón armado. Una vez llevada hasta rotura es reparada y reforzada con tejido de fibra de carbono, constituyéndose

en el modelo VHA1_b. Después del ensayo hasta rotura de este modelo, produciéndose la rotura por el apoyo intermedio, se efectúan 2 ensayos adicionales sobre los vanos prácticamente isostáticos que quedan como resultado (modelos VHA1_c y VHA1_d, que son los modelos prácticamente isostáticos).

- 3ª serie: 2 modelos, de 14.80 mt. De longitud. Con pretensado exterior. Denominados en su orden: VHA_PE_a y VHA_PE_b. El modelo VHA_PE_a es el resultante de la reparación y refuerzo (en este caso con tejido de fibra de carbono y pretensado exterior) del modelo del ensayo anterior después de haber sido cargado hasta rotura. Por último, el modelo VHA_PE_b corresponde a un modelo isostático de 1 vano resultado del vano que queda en estado prácticamente original con muy pocos daños tras el ensayo hasta rotura de la viga continua.

4.3 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS Y MEDIOS DE ENSAYO

A continuación se presentará una breve descripción de los elementos y medios de ensayo, los cuales se detallarán en la sección 4.4.

4.3.1 Descripción de los materiales

Hormigón:

Para los ensayos de caracterización se utilizó hormigón normal para construcción de tableros de puentes, con $f_{ck} = 35.0$ MPa.

Utilizando: Cemento I 45: 350 kg/m^3
 Arena: 694 kg/m^3
 Grava 12 mm: 1131 kg/m^3
 Relación A/C: 0.57
 Agua: 200 lts/m^3
 Slump: 4 – 5 cm
 Absorción: 3.5%

Armadura:

Las características mecánicas, de las barras de acero corrugadas utilizadas son:

Barras designadas como AEH 500 N (dureza natural), con límite elástico $f_y = 510$ MPa,, alargamiento en rotura 16%

Adhesivo:

Para los diferentes ensayos se han utilizado varias resinas epóxicas. Con distintas propiedades. La que se ha utilizado más posee una resistencia a tracción de 12 MPa, Modulo elástico de 12.100 MPa, y resistencia a compresión de 35MPa.

Materiales Compuestos:

Aramida:	Resistencia a tracción:	3.150	MPa
	Modulo de elástico:	125.000	MPa
	Alargamiento en rotura:	2.5	%
	Peso específico	1.250	kg/m ³
Fibra de Carbono:	Resistencia a tracción:	1.400	MPa
	Modulo de elástico:	10.5000	MPa
	Alargamiento en rotura:	1.3	%

Las características de los materiales empleados en la construcción de la viga son:

Hormigón de los elementos prefabricados H-400; $E_c = 38\,000$ MPa.

Acero pasivo: barras corrugadas de acero AEH 500 N.

Acero activo: Cordones $\varnothing 0.6''$ de acero 1.700 – 1.900 MPa.

4.3.2 Trabajos de preparación

Previo al planteamiento de cada uno de los ensayos se contó con el análisis numérico de los modelos, para dimensionar los elementos correspondientes. De esta cuenta se determinaron las fuerzas de pretensado a utilizar en los ensayos VPE y VHA_PE. También se ha tenido que hacer el cálculo de las fuerzas de pretensado a través de los diferentes tramos de los cordones, y sus correspondientes coeficientes de rozamiento.

La construcción de los modelos requirió el hormigonado in situ del apoyo central, para garantizar la continuidad entre los dos vanos, resultando un modelo monolítico.

La fijación de los elementos de medición tales como: células de carga, transductores de desplazamiento, galgas extensométricas a la estructura y su posterior conexión al sistema de adquisición de datos; requirió una elaborada preparación previa, debido al gran número de datos a ser tratados y almacenados.

Como parte de los trabajos de preparación también se tienen los cálculos previos para determinar las cuantías de fibras sintéticas a utilizar en las reparaciones.

4.3.3 Instrumentación utilizada

4.3.3.1- Caracterización de los sistemas utilizados

Básicamente, el sistema necesita contar con los siguientes elementos:

Transductores: Son los elementos encargados de medir las señales provocadas por un movimiento físico, es decir, cuantificar la alteración de la corriente eléctrica que atraviesa el

transductor. Estos transductores pueden ser galgas extensométricas (miden deformaciones) y los transductores de desplazamientos (transformadores diferenciales de variación lineal) para medir los deslizamientos.

Procesadores y acondicionadores de señal: modifican la señal de salida del transductor para que pueda ser transferido y registrado. A causa del gran volumen de información procesada por escalón de carga (hasta 100 canales por escalón). Para lo cual se utiliza el sistema de adquisición de datos. Dicho sistema de adquisición de datos transforma la señal eléctrica a una señal digital, para su proceso por medio de un ordenador; realiza además la función de barrido de todos los canales de entrada, de tal manera, que en cada instante transfiere la información al ordenador de cada uno de ellos (multiplexor). Formando la $\frac{3}{4}$ parte del puente de Wheatstone de las galgas extensométricas.

Proceso y registro de datos: realizando una serie de operaciones con los datos que nos permitirán posteriormente su almacenamiento como magnitudes físicas dentro de un fichero informático. Este proceso se realiza a través de un ordenador personal, almacenando los ficheros en código ASCII, para luego en el postproceso se transformarán en ficheros de hoja de cálculo, extensión XLS ó DAT.

4.3.3.2- Transductores

En primer lugar se han utilizado para la medición de deformaciones, las galgas extensométricas. Estas galgas son pequeñas resistencias unidas sobre un material de soporte formando una rejilla plana. Las galgas basan su funcionamiento en la variación de la resistencia eléctrica de un trozo de conductor (fenómeno de la piezorrestividad).

Las variaciones de tensión que soporta provocan su deformación, seguido por el consiguiente cambio en su sección por efecto Poisson. El efecto es por lo tanto una variación del potencial eléctrico entre determinados puntos del circuito. Esto implica que se debe definir una dirección, que es la de la parrilla, sobre la cual se detectarán las deformaciones uniaxialmente. Por lo anteriormente expuesto, se hace necesario que exista una buena unión entre el material soporte de la galga y el material que se pretende medir.

En general el pegado de la galga comienza con la elección de su colocación, seguidamente se debe regularizar la superficie del material base (que quede libre de partículas, aceite, polvo, etc). Esto se hace lijando la superficie, después aplicando un desengrasante, luego un ácido y finalmente el neutralizador. Se rellenan entonces los poros, se aplica el pegamento (tipo CN, PS ó NP-50) y se adhiere la galga. Secado el adhesivo, se sueldan sus terminales y se aísla cuidadosamente. Se verifica entonces con un Ohmímetro la resistencia de cada galga y presionando sobre ella para verificar la variación de voltaje. Procediendo entonces a la protección de la galga.

Durante los ensayos se utilizaron distintos tipos de galgas y adhesivos, tanto para valorar las lecturas sobre los distintos materiales, como también para comprobar el pegado de la galga. (ensayos de adherencia y caracterización de las fibras).

Para Hormigón:

Serie: LW
Tipo: PL-90-11
Longitud: 90 mm.
Resistencia característica: $120 \pm 0.3 \Omega$
Factor de galga : 2.10
Fabricante: Tokio Sokki Kenkyujo Co. Ltd.

Un criterio práctico para la selección de la longitud de las galgas de hormigón, es que debe tener una longitud de al menos tres veces el diámetro máximo del árido que se encuentra dentro del hormigón. Estas galgas son pegadas exteriormente.

Se utilizaron también, en los ensayos VHA y VHA_PE galgas extensométricas para embeber en hormigón. Siendo su elemento sensible una rejilla pelicular de Karma de níquel-cromo de 100 mm de longitud, lo que permite la integración de las deformaciones de los agregados o áridos del hormigón. El cuerpo de la galga está formado por un hormigón sintético que lo protege durante el vertido. Las características de este tipo de galgas son:

Serie: EGP
Tipo: EGP-5-120
Longitud: 100 mm.
Resistencia característica: $120 \pm 0.8 \Omega$
Factor de galga : 2.05
Rejilla fundida: 130 x 17 x 10 mm.
Fabricante: Tokio Sokki Kenkyujo Co. Ltd.

Para el Acero:

Serie: QF
Tipo: QFLA-3
Longitud: 3 mm.
Resistencia característica: $120 \pm 0.3 \Omega$
Factor de galga : 2.14
Fabricante: Tokio Sokki Kenkyujo Co. Ltd.

Se utilizó como adhesivo CN ó P-2. La preparación de la superficie para el acero se hace lijando la superficie, con lijas de grano progresivamente decreciente, posteriormente se limpia y neutraliza la superficie, debiendo tener al final sumo cuidado en aislar adecuadamente las terminales eléctricas.

Para la medida de la deformación en las bandas aramidas, se utilizaron:

Serie:	QF	QF	F
Tipo:	QFLA-3	QFCT-2	FLA-3-11
Longitud:	3 mm.	2 mm.	3 mm
Resistencia nominal:	$120 \pm 0.3 \Omega$	$120 \pm 0.3 \Omega$	$120 \pm 0.3 \Omega$
Factor de galga :	2.14	2.10	2.14
Fabricante:	Tokio Sokki Kenkyujo Co. Ltd.		

Para el pegado de estas bandas se han utilizado los siguientes adhesivos: P-2, CN, NP, PS y NP-50. Para la preparación superficial, se ha tenido que lijar la superficie de la fibra, eliminando la capa exterior de resina expóxi.

Para el Tejido de fibras de carbono, el tipo de galga ha sido el siguiente:

Serie: QGF
Tipo: GFLA-6
Longitud: 6 mm.
Resistencia nominal: $120 \pm 0.3 \Omega$
Factor de galga : 2.10
Fabricante: Tokio Sokki Kenkyujo Co. Ltd.

Para el pegado de estas bandas se han utilizado los siguientes adhesivos: CN y EA-2. Para la preparación superficial, se ha tenido que lijar la superficie de la fibra, eliminando la capa exterior de resina expóxi para el ensayo VHA. Para los ensayos VHA_PE se embebieron las galgas en el momento de la colocación del T.F.C.

El uso de fibra óptica fue uno de los elementos que permitieron comparar las mediciones realizadas por las galgas sobre el tejido de fibra de carbono. Las fibras ópticas utilizadas se basan en las redes de difracción de Bragg, los cuales son elementos ópticos basados en el comportamiento de estructuras difractivas periódicas del núcleo de una fibra óptica. La generación de un patrón periódico del índice de refracción de un medio mediante la generación de ondas estacionarias se logra por medio de las redes de difracción de Bragg. [Díaz-Carrillo, et. al. 1999]

4.3.3.3- Medidas de desplazamientos

Los elementos para medir los desplazamientos se denominan Transformadores Diferenciales de variación lineal ó LVDT (Linear Variation Differential Transformer). Este tipo de transductor, funciona a través del movimiento de su núcleo magnético interno, lo que hace variar la inductancia , con lo que se modifica la tensión de salida. [Jordan, 1997].

Los LVDT's utilizados en los ensayos fueron:

Para pequeños desplazamientos:

Modelo: DC 15
Rango de medida: ± 15 mm.
Sensibilidad: 20-30 mV/V/mm
Alimentación: 10 V corriente continua
Fabricante: Schlumberger industries

Para grandes desplazamientos:

Modelo: AC 150
Rango de medida: ± 150 mm.
Sensibilidad: 4-5mV/V/mm
Alimentación: 5 V corriente alterna
Fabricante: Schlumberger industries

Modelo: Temposonics
Rango de medida: ± 100 mm.
Sensibilidad: 0.10 mV/V/mm
Alimentación: 10 V
Fabricante: MTS

4.3.3.4- Aplicación de carga

La medición de las fuerzas dentro del sistema se efectuó a través de las denominadas Células de carga, que son elementos de medida de fuerzas de tracción o de compresión según su eje. Dichas células están constituidas por un cuerpo base donde van adheridas las galgas, de tal manera que forman un puente de Wheatstone completo. Para los distintos ensayos se han contado con células de carga para medición de cargas aplicadas por medio de los gatos hidráulicos, también para la medición de las fuerzas de pretensado de los cordones en los anclajes y finalmente debajo de los aparatos de apoyo en cada línea de soporte de la estructura. Las células de carga utilizadas fueron:

Para los gatos de los pórticos de carga:

Modelo: 92-d3-100K
Carga máxima: 450 kN.
Sensibilidad: 2 mV/V/mm
Alimentación: 10 V
Fabricante: Transducers. Int

Modelo: CBH500
Carga máxima: 500 kN.
Sensibilidad: 2.02 mV/V/mm
Alimentación: 10 V
Fabricante: Mutronic S.A.

Para los anclajes de pretensado:

Modelo: CLC-20A
Carga máxima: 266 kN.
Sensibilidad: 1.5 mV/V/mm
Alimentación: 10 V
Fabricante: TML Tokyo Sokki Kenjyujo Co. Ltd.

Para la medida de las reacciones en apoyo:

Modelo: de fabricación propia
Carga máxima: 2000 kN.
Sensibilidad: 20 mV/V/mm
Alimentación: 10 V
Fabricante: Transducers. Int

Aplicación de fuerza: se realizó mediante dos ó cuatro gatos de carga ENERPAC de 600 kN cada uno de carga máxima y un recorrido de 35 cm, según el esquema de distribución de cargas que se muestra en cada ensayo.

4.4 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

4.4.1 Ensayos de caracterización de adherencia

4.4.1.1 - Antecedentes

En el mes de Febrero de 1995, en el Departamento de Ingeniería de la Construcción, se dio inicio a esta campaña experimental. La primera fase dio inicio con la determinación de la adherencia entre el hormigón y los materiales compuestos a utilizarse en las reparaciones sobre los modelos de puentes. Para ello, se estudiaron ensayos anteriores realizados en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras [Agulló, L. y Gettu ,R; 1993].

4.4.1.2 - Objetivo del plan de Ensayo

El objetivo de esta fase experimental previa es determinar las características convencionales de adherencia ante cargas estáticas y posteriormente dinámicas de las fibras a utilizarse como elementos de reparación (pegados exteriormente) y el hormigón, a través de la utilización de diferentes técnicas de pegado y el uso de varios tipos de adhesivos; comparando dichos resultados con distintos ensayos de adherencia (de acero con armaduras embebidas, con armaduras dispuestas en segunda fase e inyectadas con mortero y fibras embebidas). Una vez establecida la mejor técnica y material de pegado, se hace una evaluación a fatiga mediante un ensayo dinámico.

4.4.1.3 - Planteamiento y descripción del ensayo

El planteamiento de los ensayos se orienta partiendo de las directrices de la anterior norma EH-91 en su anejo 5, permitiendo esta disposición de ensayo, conocer con gran exactitud la tracción y esfuerzos de tensión en la interfase hormigón – banda de fibra.

4.4.1.3.i Preparación de los modelos

Probetas de Ensayo

Forma y medida: Son elementos formados por dos bloques paralelepípedicos de hormigón armado, unidos por su parte inferior por la armadura ó fibra en estudio y en su parte superior por una rotula de acero (ver figura 4.1). El hormigón utilizado es el normal en la construcción de los tableros de puentes, con $f_{ck} = 35$ MPa. El armado de cada bloque: $4 \phi 8 + 2 \phi 6$, cercos $\phi 6$ a cada 5 cm.

Requisitos especiales: Cada viga de ensayo, esta apoyada sobre rodillos separados 50 cm entre ellos y a 5 cm de cada borde. En su parte superior se disponen 2 rodillos separados 15 cm entre ellos y a 7.5 cm del centro de la rótula. (ver figura 4.1)

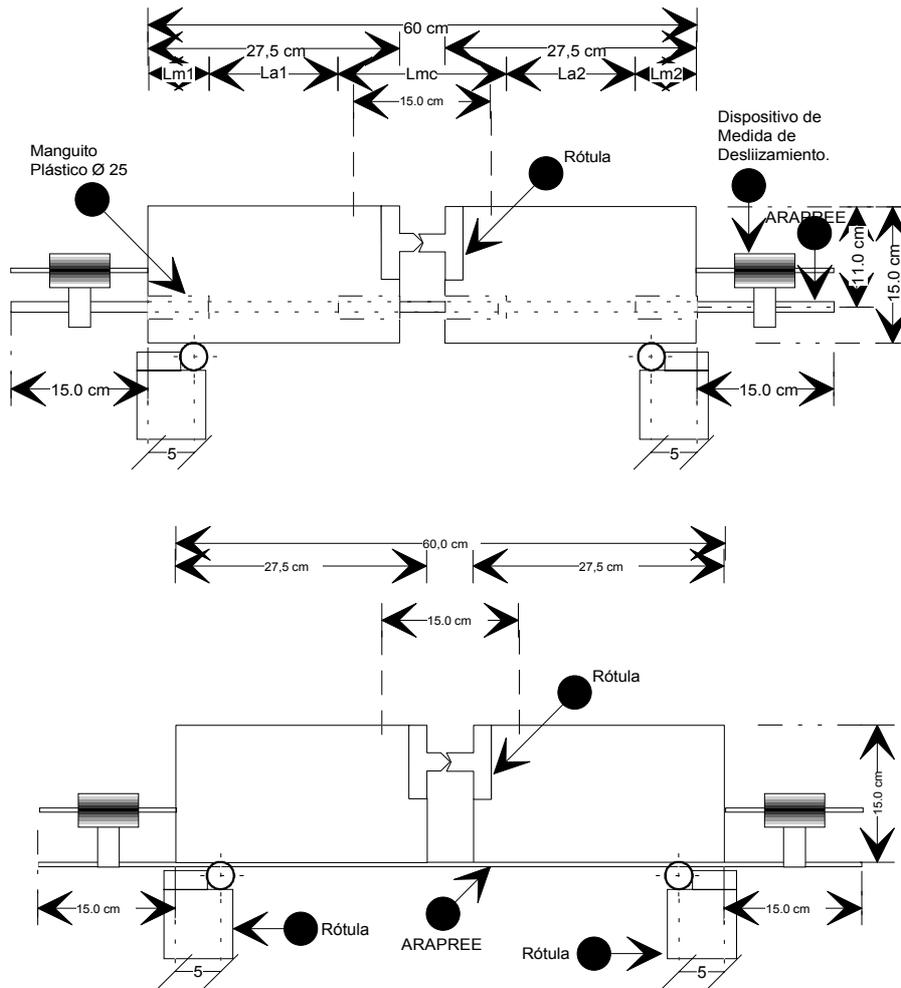


Figura 4.1 Características de las probetas para los ensayos de adherencia

La puesta en carga se realiza aplicando escalones por medio de una rampa relativa con velocidad de aplicación constante.

Algunos de los materiales empleados se presentan en la tabla 4.1:

MATERIAL	Rotura a Tracción	Modulo elástico	Rotura a compresión
Hormigón H-400			40MPa
Adhesivo C	16MPa	3.150MPa	45MPa
Adhesivo D	12MPa	12.100MPa	35MPa
Aramida	3.000MPa	12.500MPa	

Tabla 4.1 Materiales utilizados en los ensayos de adherencia.

4.4.1.3.ii Tipo de ensayos

Para la determinación de las características de adherencia de las fibras con el hormigón se han realizado los ensayos presentados en la tabla 4.2:

Refuerzo Utilizado	Código ensayo	Tipo de Ensayo	Dimensión Refuerzo	Características del Refuerzo	Longitud de adherencia (cm)	Número de ensayos
Acero	EA_ACE	Estático	Φ 16 mm	Embebido	14	3
Acero	EA_MI_1	Estático	Φ 16 mm	Con mortero inyectado	8	2
Acero	EA_MI_2	Estático	Φ 16 mm	Con mortero inyectado	12	2
Acero	EA_MI_3	Estático	Φ 16 mm	Con mortero inyectado	16	2
Arapree	EA_ARA	Estático	4mm x 20mm	Embebido	14	3
Arapree	EA_APE	Estático	4mm x 20mm	Pegado Exteriormente	27,5	18
Arapree	DINAMIC	Dinámico	4mm x 20mm	Pegado Exteriormente	27,5	3

Tabla 4.2 Ensayos de caracterización realizados.

Para el desarrollo de los ensayos se llegaron a determinar los siguientes parámetros de control:

Código Ensayo	Tipo de Control	Velocidad Rampa x Seg.	Longitud Rampa	Frecuencia	amplitud de onda	Nº de ciclos	Nº de secuencias	Almacenamiento (Seg.)	Observaciones
EA_ACE	posición	0,005 mm	-0,05 mm				500	1	
EA_APE	Clip	0,2 micrones	-4 micrones				550	3	
EA_ARA	posición	0,002 mm	-0,05 mm				500	1	
EA_MI	posición	0,002 mm	-0,05 mm				500	2	La = 8, 12 y 16 cm
DINAMIC	Carga		8 kN	2 Hz	± 3,2 kN	120	16700	30	2.004.000 ciclos

Tabla 4.3 Parámetros de control de los ensayos de caracterización

4.4.1.4 - Medios de carga e Instrumentación

Con el objetivo de obtener valores fiables de determinadas magnitudes físicas que permitan explicar el comportamiento de las probetas durante los ensayos, se ha utilizado para estas series, un sistema de adquisición de datos, el cual se encarga de registrar las variaciones en los transductores de desplazamiento colocados en los extremos de las barras de acero pasivo ó fibras Aramidas.

Dentro de los elementos utilizados para el desarrollo de los ensayos se tienen:

Dispuestos sobre las probetas:

- Transductores de desplazamiento (L.V.D.T.), sujetos a un dispositivo de fijación ubicado sobre las barras de refuerzo, son los encargados de medir los desplazamientos relativos de las barras respecto a los bloques de hormigón. El tipo de Transductor de desplazamiento utilizado se muestra a continuación.

Fabricante	Modelo	Rango de Medida	Sensibilidad	Alimentación
Schlumberger Industries	DC 15	± 15 mm	20 – 30 mV/V/mm	10 V C.C.

Tabla 4.4 Características de los transductores de desplazamiento utilizados.

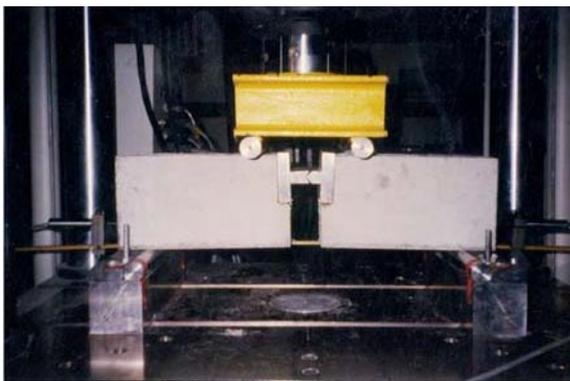
- Control de apertura de lazo cerrado “Clip” para el control de la velocidad de las rampas de carga. [Gettu, R. et al 1996].

Equipos de medición y carga:

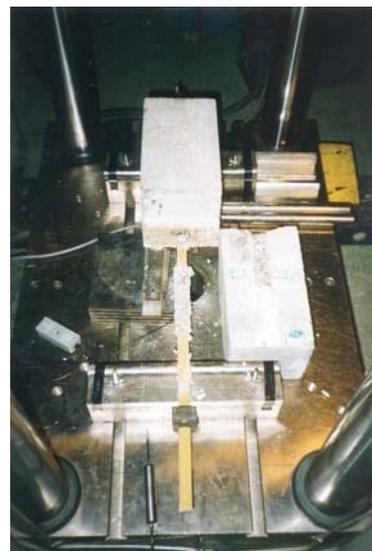
- Prensa : Instron 8505
- Ordenador de control : HP-Vectra RS 20 C

4.4.1.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga

El esquema del ensayo es el que puede verse en las fotografías 4.1 y 4.2 .



Fotografía 4.1 Vista general del montaje



Fotografía 4.2 Vista final del ensayo

- La aplicación de la carga se realiza por medio de la programación en el WaveMaker, que es el encargado de controlar la rampa relativa de aplicación de carga, que para los ensayos

estáticos fue de 0,002 mm/seg. a 0,005 mm/seg., y para los ensayos de fibra pegada exteriormente controlada por “Clip” una velocidad de control de 0,2 micrones/seg. Los ensayos dinámicos se controlaron también por medio del uso del “Clip” de apertura colocado en el centro de los dos bloques, bajo la rotula metálica.

Del proceso de carga descrito, para cada escalón se ha registrado la carga aplicada, el desplazamiento relativo del acero pasivo ó la fibra de refuerzo. El proceso descrito anteriormente continúa hasta la rotura de la probeta.

4.4.1.6 - Resultados

Se han obtenido diferentes registros de cargas de rotura (P_u) y deslizamientos relativos del elemento de refuerzo medidos externamente en los extremos de las barras.

Algunos de los resultados de los ensayos estáticos se presentan en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4. Se pueden observar a continuación las propiedades de adherencia de las bandas pegadas externamente al hormigón utilizando el adhesivo Tipo D. (figura 4.2), en la figura 4.3 se muestran los resultados de las barras de acero embebidas en el hormigón; por último se muestra en la figura 4.4 la comparativa entre las bandas embebidas en el hormigón y las bandas pegadas exteriormente. En el caso de los adhesivos de baja tensión de adherencia (adhesivos A, B y E que no se muestran), el fallo se produjo en el despegue de la interfase del adhesivo y la banda de fibra. Al mejorar la preparación de la superficie de hormigón y cambiando el tipo de adhesivo, las tensiones de adherencia se incrementaron a 3.5 MPa. Dicho valor es al cual aproximadamente el hormigón falla por tracción. Con este adhesivo, se logró obtener un buen resultado, ya que las probetas resistieron más de 2 millones de ciclos, con una fuerza armónica de 2 Hz sin llegar al despegue. La amplitud de la fuerza aplicada fue de 0.3 a 0.7 de la carga de rotura de los ensayos estáticos

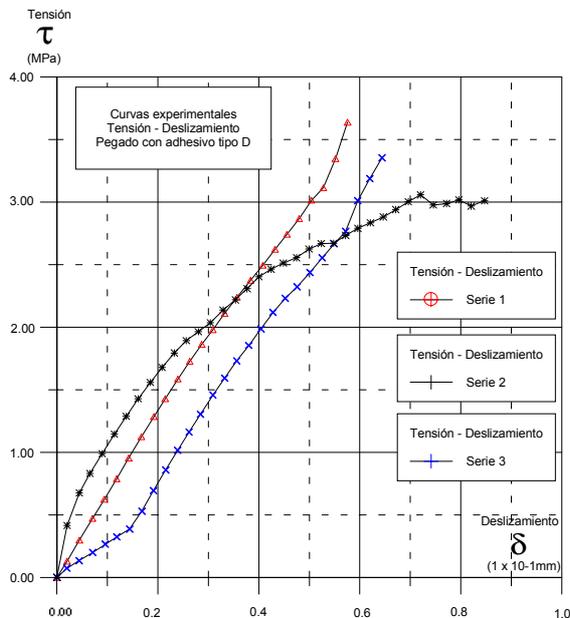


Figura 4.2 Curva tensión-deslizamiento ensayo bandas pegadas exteriormente

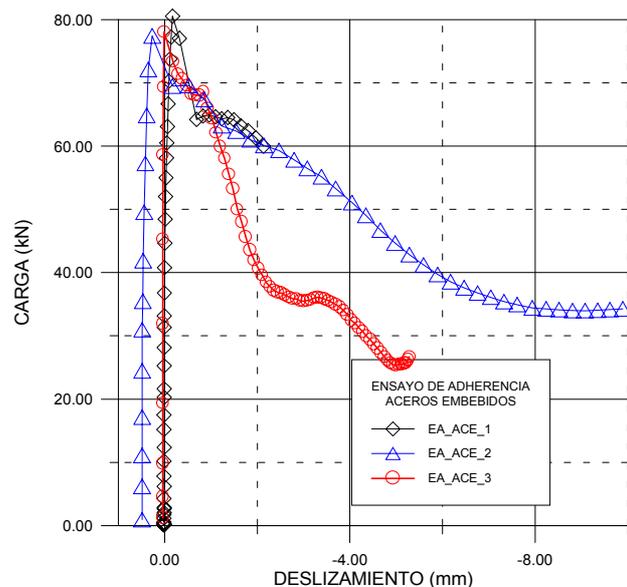


Figura 4.3 Curva carga-deslizamiento ensayo Acero embebido

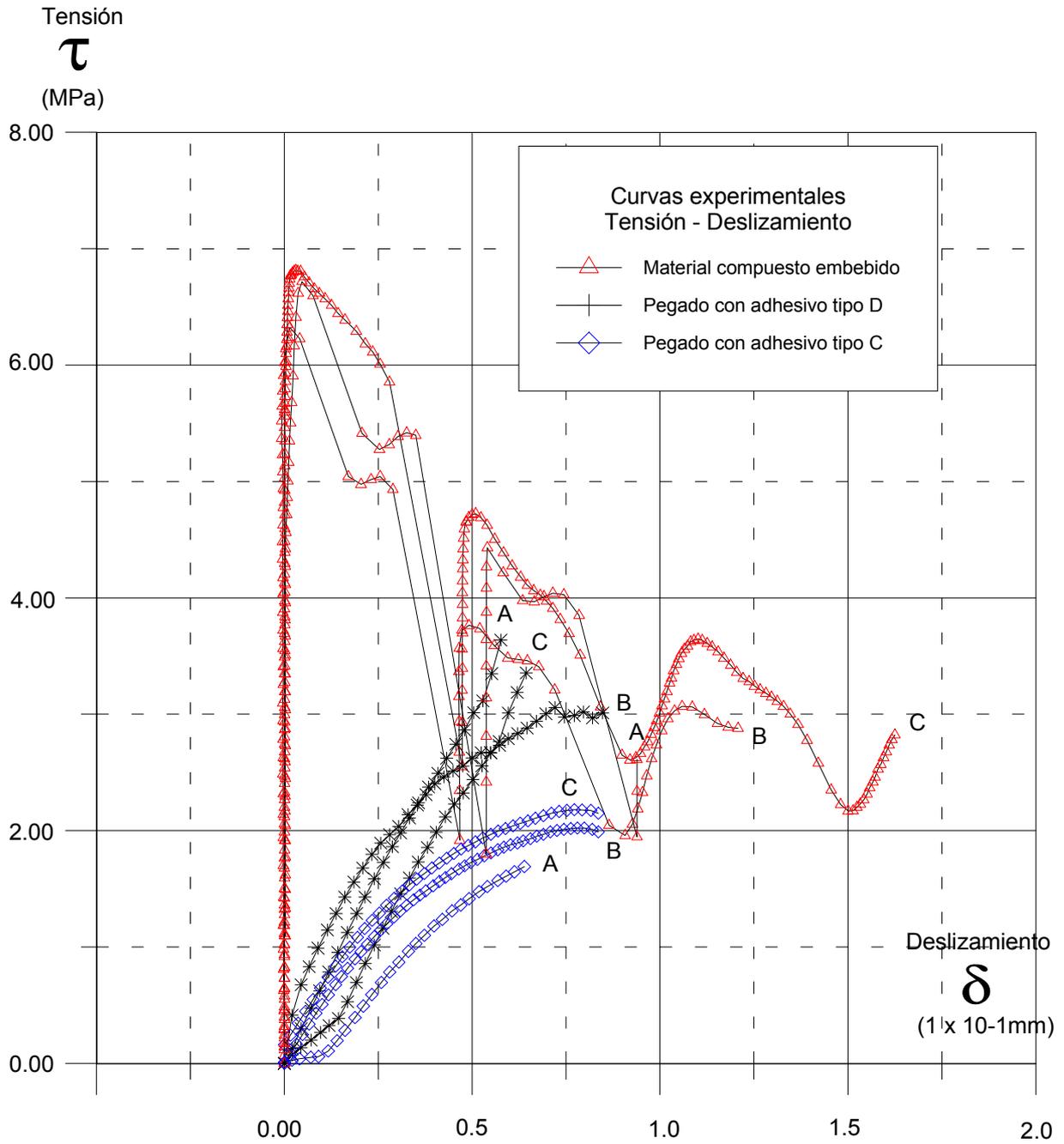


Figura 4.4 Curvas tensión-deslizamiento (resumen de resultados)

El resumen de resultados de esta fase experimental es el que se muestra en la tabla 4.5:

Probeta	Material de Refuerzo	Tipo de Ensayo	Ubicación del Refuerzo	Carga (kN)	Tensión de Adherencia MPa (Kp/cm ²)
EA_ ACE	Acero	Estático	Acero Embebido	81.17	14.4 (144.17)
EA_ MI	Acero	Estático	Mortero Inyectado	85.40	17.9 (179.40)
EA_ ARA	Arapree	Estático	Arapree Embebido	38.00	7.0 (70.68)
EA_ APE	Arapree	Estático	Arapree Pegado Exterior	24.10	3.5 (34.86)

Tabla 4.5 Resumen de resultados experimentales

4.4.2 Ensayos sobre modelo de puente: VPE_1

4.4.2.1 - Antecedentes

Dentro del programa de experimentación sobre el estudio para la evaluación y reparación de puentes construidos ya iniciado [Gómez, D;1994, Anllo, M;1996, Jordán, J; 1997], se plantea una primera serie de vigas de hormigón armado con pretensado exterior, para ser rotas con y sin bloqueo de los tendones de pretensado en el apoyo central y una posterior reparación con fibras Aramidas. Es decir, en un caso el pretensado exterior se ancla sólo en ambos extremos, mientras que en el otro existen adicionalmente anclajes en el apoyo intermedio.

4.4.2.2 - Objetivo del plan de Ensayo

Esta fase experimental tiene por objeto establecer la capacidad última en rotura de las secciones transversales del modelo de puente mediante el estudio de su respuesta estructural a flexión sometida a estados avanzados de carga. Se trata en el presente caso de una viga continua de hormigón con pretensado exterior (sin bloqueo en el apoyo intermedio). Es decir, con los anclajes de pretensado ubicados en los extremos de la viga y siendo el único impedimento para el deslizamiento de los cordones, el rozamiento existente entre los desviadores y los cordones. Dichos resultados se contrastarán con los valores obtenidos de la aplicación de un modelo numérico de análisis. Posteriormente, se bloqueará el pretensado exterior en el apoyo intermedio y también se contrastarán con la última fase que será la reparación y refuerzo de la viga con fibras Aramidas.

4.4.2.3 - Planteamiento y descripción del ensayo

Para lograr el objetivo ya descrito se determinaron las siguientes características del modelo:

Cada viga continua es de dos vanos de 7.20 m de luz cada uno, y longitud total igual a 14.40 m de sección tipo Cajón y un canto constante de 0.60 m. (ver figura 4.5)

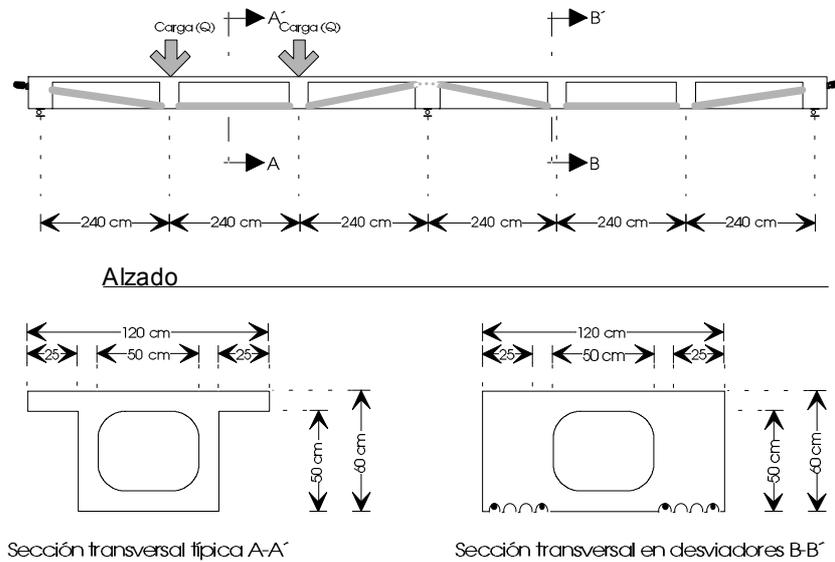


Figura 4.5 Alzado y sección transversal de la viga VPE_1

Los materiales empleados fueron:

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
Hormigón H-400	$E_c = 38.000 \text{ MPa}$
Acero Pasivo	AEH 500 N
Acero Activo $\phi 0.6''$	1 700 – 1 900 MPa

Tabla 4.6 Características de los materiales Utilizados en el ensayo

4.4.2.3.i Trabajos preliminares

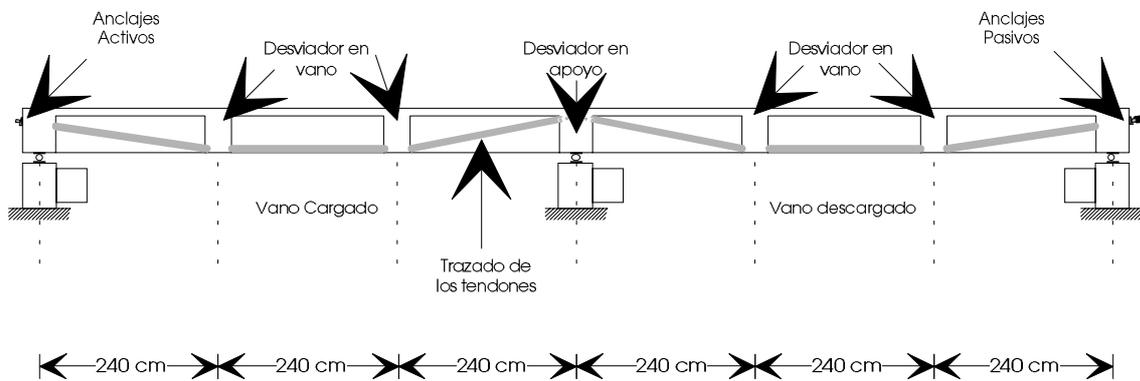
Para la construcción de la viga, conformada por dos semivigas prefabricadas, era necesario realizar un diafragma de unión hormigonado "in situ" en el apoyo intermedio. En dicha junta se colocaron armaduras necesarias para la construcción de la traviesa de desviación del pretensado. Se colocaron las dos semivigas sobre apoyos provisionales con la ayuda del puente grúa y de un camión con pluma elevadora. Seguidamente se procedió a sustituir los apoyos provisionales exteriores por los definitivos.

Para obtener la hiperestaticidad de las dos semivigas se ferralló y encofró la zona del diafragma de apoyo intermedio que posteriormente se hormigonó.

4.4.2.3.ii Preparación del modelo

Una vez hormigonada la junta, y extraídos los apoyos provisionales cercanos al apoyo intermedio se realizó la operación de tesado. Se utilizaron cuatro cordones $\phi 0.6"$. El trazado se puede observar en la figura 4.6. Se utilizó un acero de 1700 MPa de límite elástico y 1900 MPa de tensión máxima de rotura.

El tesado se realizó con un gato Alevín de Stronghold, controlando el nivel de tesado de los cordones no instrumentados con el manómetro de la central de presión. En los tendones instrumentados, adicionalmente al manómetro ya apuntado, existían también las células de carga en los anclajes.

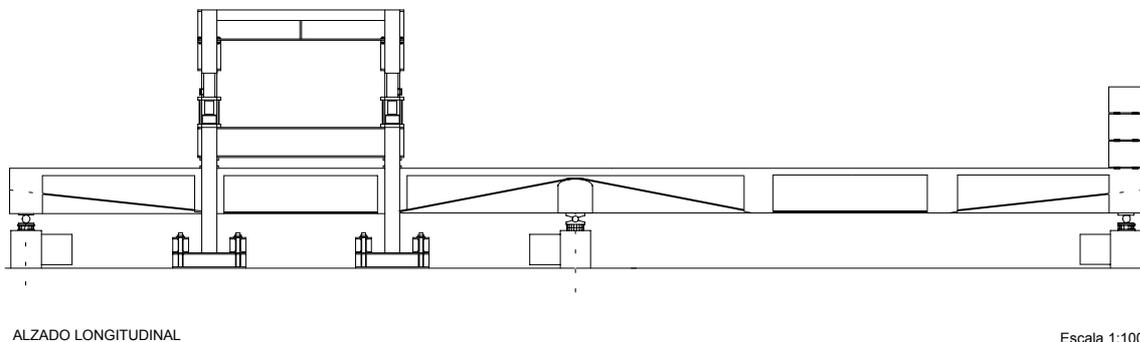


Alzado

Figura 4.6 Trazado de los cordones de pretensado.

4.4.2.4 - Medios de carga e Instrumentación

La introducción de cargas se realizó con la ayuda de un pórtico de carga (ver figura 4.7)



ALZADO LONGITUDINAL

Escala 1:100

Figura 4.7 Posicionamiento de la viga y pórtico de carga en los ensayos.

Las cargas se introducen mediante dos gatos de carga ENERPAC de 600 kN de carga máxima cada uno y con un recorrido de 35 cm. Junto a los gatos se encuentran las células de carga que permiten controlar las fuerzas aplicadas al sistema.

Instrumentación:

Utilizando el sistema de adquisición de datos con capacidad máxima de 100 canales, Se dispusieron canales para la medición de:

- Fuerzas externas sobre la viga: Células de carga en pórtico: LC1 y LC2 (ver en figura 4.8) y reacciones en apoyos: LC7, LC8, LC9, LC10, LC11 y LC12 (ver en figura 4.8).

- Cordones de pretensado: disponiendo 3 galgas por tramo de viga en cada lado sobre los cordones; de la G1 a la G24 (ver en figura 4.8). Deslizamientos de los tendones en desviadores mediante los LVDT's: L7 al L14(ver en figura 4.9).

- Células de carga en anclajes: LC3, LC4, LC5 y LC6 (ver en figura 4.8).

- Transductores de desplazamiento para la medición de flechas: L1 a L6 (ver en figura 4.9).

- Deformaciones seccionales: colocando galgas de hormigón GH1 a la GH10 y galgas para medir deformaciones en acero pasivo: GA1 a la GA6 (ver en figura 4.10).

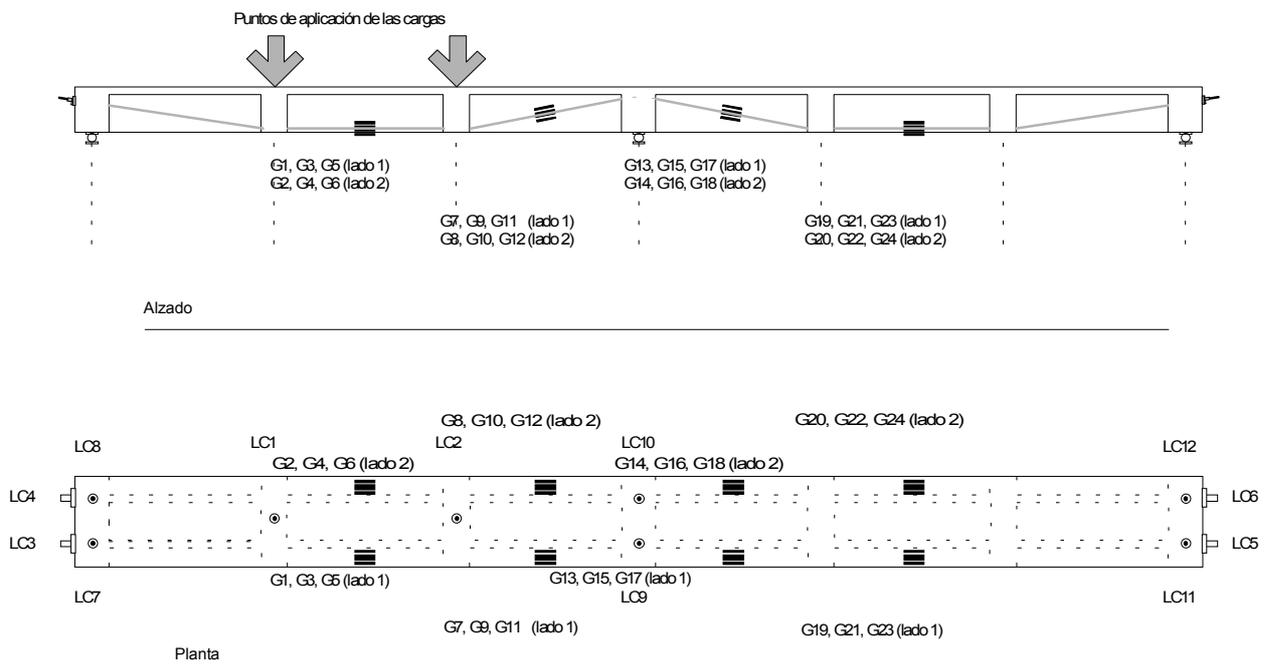


Figura 4.8 Distribución de Células de Carga en anclajes, Células de carga en pórtico, Reacciones en apoyos y Galgas en acero activo.

- Movimientos de la viga: Obtención de la deformada y giros de la viga por medio de LVDT's.

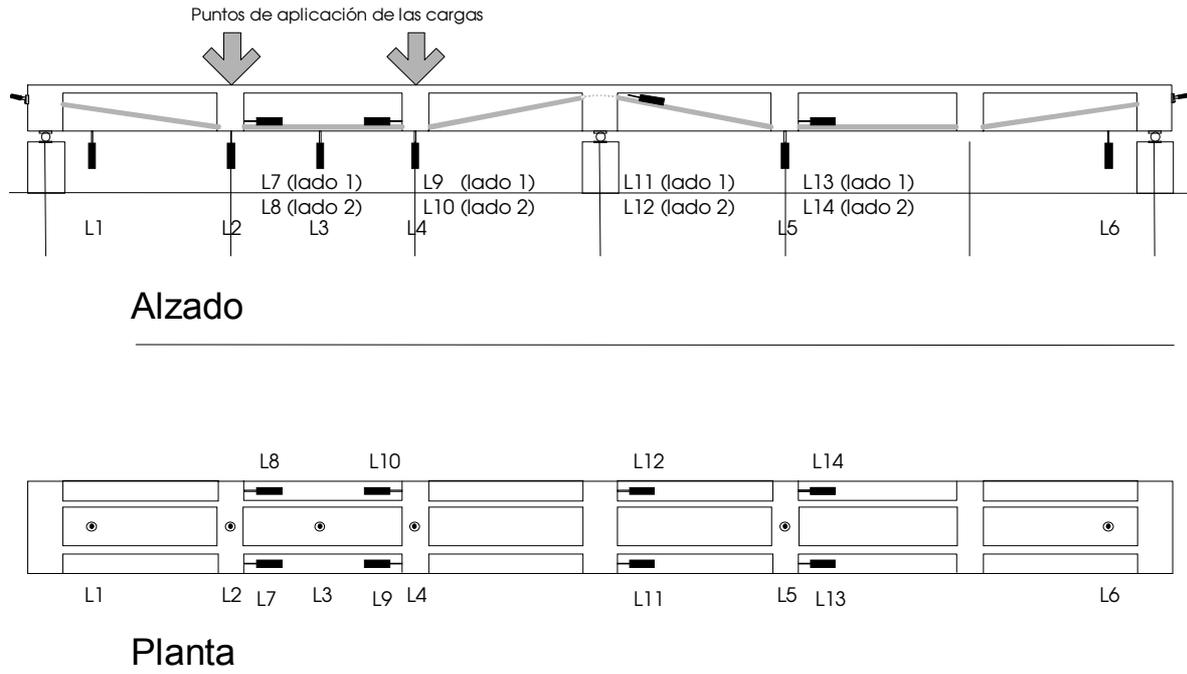


Figura 4.9 Distribución de LVDT's de Flechas y de LVDT's de deslizamiento en cables.

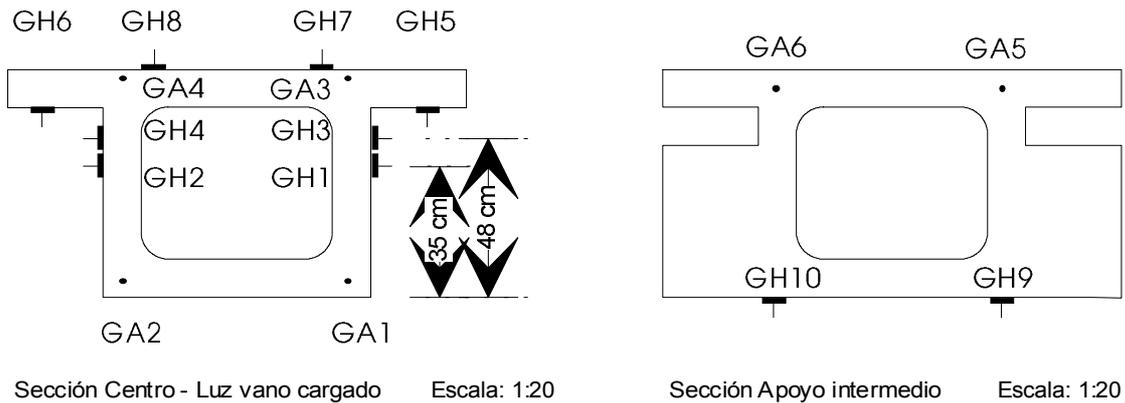


Figura 4.10 Ubicación de las galgas de hormigón y acero pasivo

4.4.2.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga

El día 13 de abril de 1996, se realizó el ensayo de la viga VPE_1; El proceso de carga se efectuó mediante la introducción de escalones de carga a través de una célula de presión y el control por medio del sistema de adquisición de datos centrado principalmente en la deformación del acero pasivo y hormigón en centro luz de vano cargado. Con dichos parámetros se tomaba la decisión en cuanto al valor del incremento de la carga a aplicar.

La fisuración inicial apareció en la zona inferior del vano cargado, siendo estas fisuras de flexión, para una carga aplicada en ése instante de 180 kN por gato. Para la determinación del inicio de la fisuración se tuvo en cuenta la existencia previa de fisuras por retracción del hormigón, por manipulación y montaje de las semivigas.

Al aumentar las cargas, las fisuras por flexión positiva se fueron haciendo numerosas (fotos 4.3 y 4.5). Esta situación generó la rotura de alguna de las galgas colocadas sobre el hormigón. Aparecieron también fisuras por cortante - flexión en zonas cercanas a los apoyos del vano cargado. Con una carga en cada gato de 355 kN, se produjo la aparición de una fisura por

flexión negativa en apoyo intermedio (fotos 4.4 y 4.6). Su apertura fue muy importante debido al poco armado en dicha zona.

A los 380 kN de carga por gato, se produjeron un estruendo y una vibración muy importantes, atribuyéndosele al deslizamiento de un cordón no instrumentado. A los 395 kN se procedió a la primera descarga debido al despegue del apoyo exterior del vano no cargado y a la plastificación de acero pasivo cerca de los desviadores. La carga de 395 kN/gato puede considerarse como la carga última del ensayo.

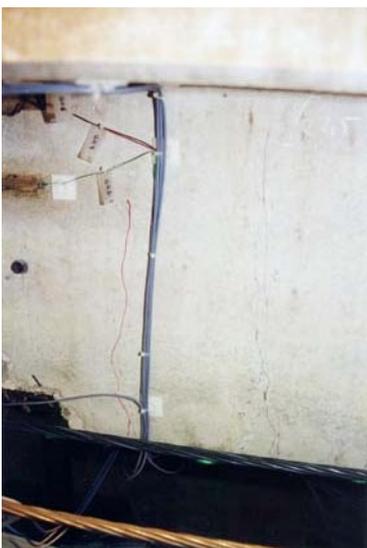
El segundo ciclo de carga se efectuó de manera similar al primero. En este segundo caso no se presento ningún estruendo ni deslizamiento. Cuando fue agotada la capacidad portante de la viga, (el diagrama carga – flecha indicaba claramente la horizontalidad de la curva) se procedió a la descarga. En las fotografías 4.7 y 4.8 pueden verse distintas fases de la ejecución del ensayo.



Fotografía 4.3 Fisuración en sección centro-luz vano cargado



Fotografía 4.4 Fisuración en sección de apoyo Intermedio



Fotografía 4.5 Aspecto de la fisuración en sección centro-luz vano cargado



Fotografía 4.6 Aspecto de la fisuración en sección de apoyo Intermedio



Fotografía 4.7 Deformada de la viga durante el ensayo VPE_1



Fotografía 4.8 Aspecto de la deformada en sección de centro luz

4.4.2.6 – Resultados

Los resultados figuran resumidos en los anejos en forma de los registros de datos. Los resultados más relevantes se presentan en las gráficas siguientes:

- i) Curva Carga - Flecha
- ii) Curva Carga - Reacciones en apoyos
- iii) Curva Carga - Deformación en sección de centro luz vano cargado
- iv) Incrementos de tensión y deformaciones en cordones
- v) Evolución de la deformación en la sección de centro luz vano cargado

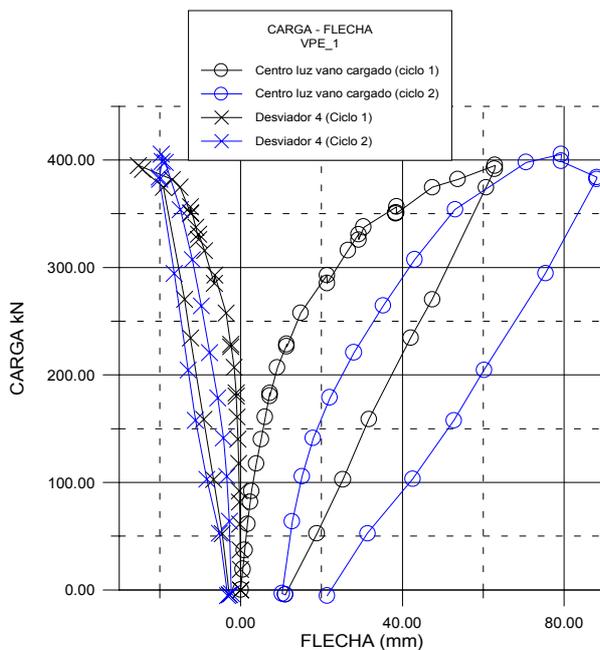


Figura 4.11 Evolución de la flecha en centro luz y el cuarto desviador.

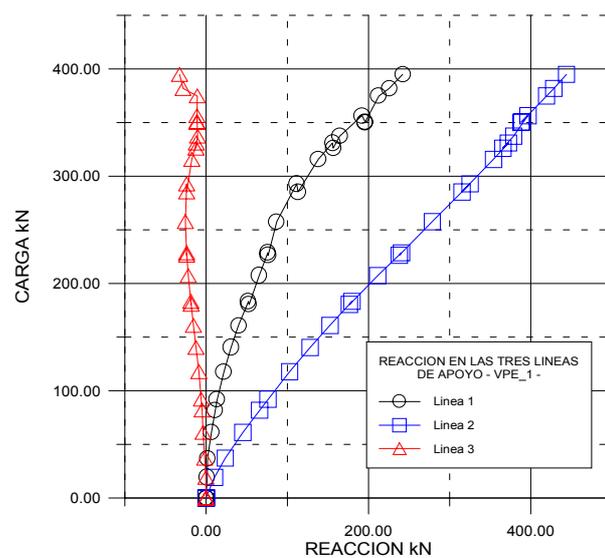


Figura 4.12 Evolución de las reacciones en las tres líneas de apoyo.

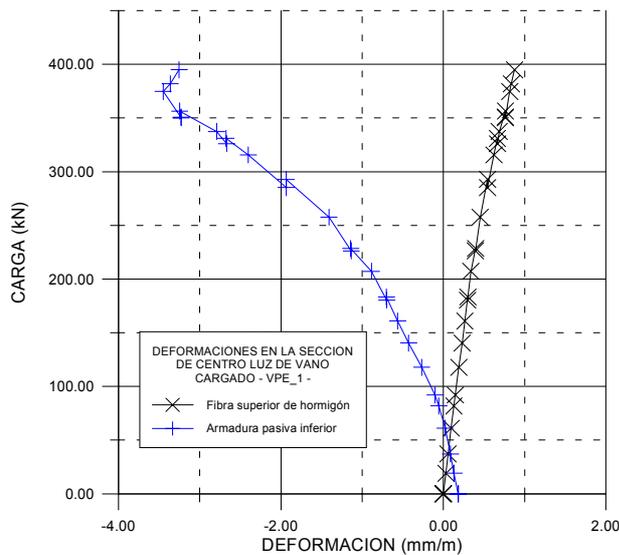


Figura 4.13 Evolución de la deformación del hormigón y el acero pasivo .

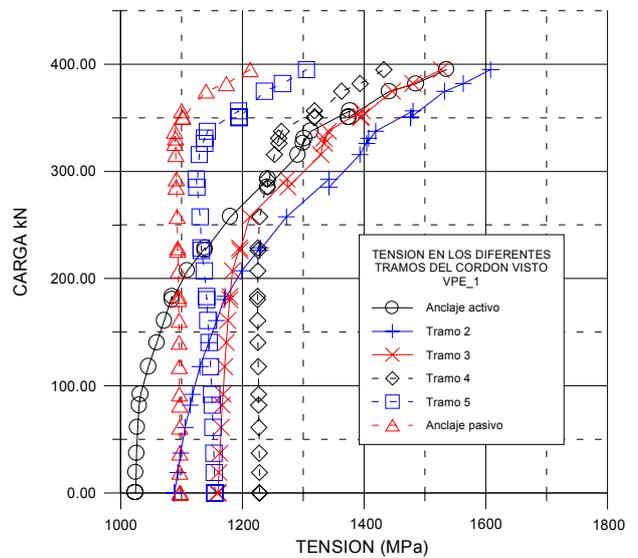


Figura 4.14 Evolución de tensiones en los diferentes tramos.

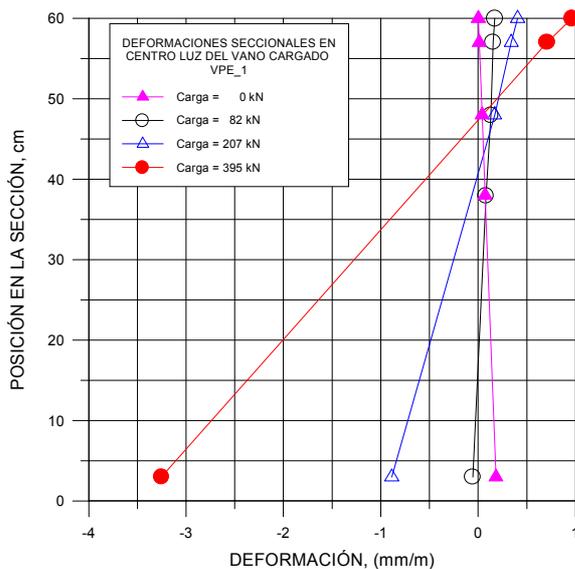


Figura 4.15 Evolución de la deformación en la sección de centro luz .

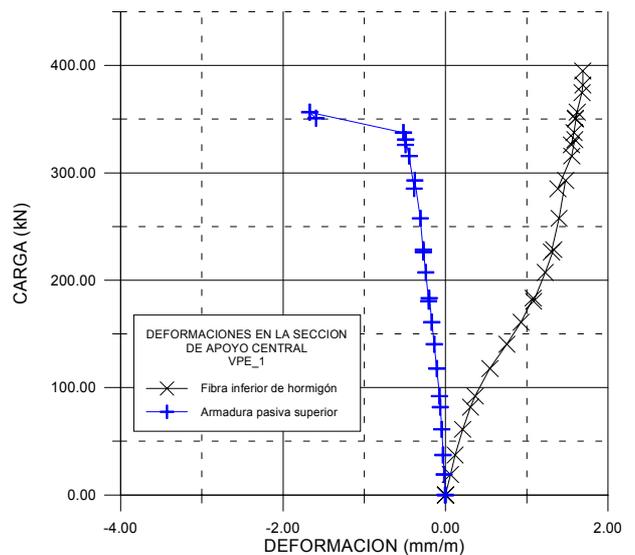


Figura 4.16 Evolución de la deformación en la sección de apoyo central.

La figura 4.14 muestra como es algunos tramos de los cordones, no se produce un incremento notable en la tensión hasta que se produce el deslizamiento Cordón-Traviesa para una carga aproximada de 380 kN/gato. La figura 4.15 muestra como la sección se mantiene plana incluso para estados avanzados de carga.

4.4.3 Ensayos sobre modelo de puente: VPE_2

4.4.3.1 - Objetivo del ensayo

Esta fase experimental tiene por objeto establecer la capacidad última en rotura de una viga continua de hormigón con pretensado exterior semejante al ensayo VPE_1; pero ahora con bloqueo en el apoyo intermedio. Es decir, con los anclajes de pretensado ubicados en los extremos de la viga y materializando un bloqueo de los cordones en la traviesa de apoyo intermedio, cambiando, por lo tanto, la longitud de los tendones de pretensado entre puntos con deslizamiento impedido respecto a la viga. Dichos resultados se contrastarán con los valores obtenidos de la aplicación de un modelo numérico de análisis. Por último, la fase subsiguiente será la reparación y refuerzo de la viga con fibras Aramidadas (AFRP) y su posterior ensayo hasta rotura.

4.4.3.2 - Planteamiento y descripción del ensayo.

Para lograr el objetivo ya descrito se mantuvieron las características del modelo, e introduciendo pequeñas modificaciones se ha logrado modificar su comportamiento estructural:

La viga ensayada es de dos vanos de 7.20 m de luz cada uno, y longitud total igual a 14.40 m de sección tipo Cajón y un canto constante de 0.60 m. (ver figura 4.5)

Los materiales empleados fueron:

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
Hormigón H-400	$E_c = 38.000 \text{ MPa}$
Acero Pasivo	AEH 500 N
Acero Activo $\phi 0.6''$	1 700 – 1 900 MPa

Tabla 4.7 Características de los materiales empleados en el ensayo VPE_2

4.4.3.2.i Trabajos preliminares

Aprovechando la infraestructura dispuesta para el ensayo anterior, y con la misma distribución de las cargas; se procedió a apuntalar la viga para realizar el destesado y sustituir los cordones de pretensado, para luego reparar la zona de apoyo intermedio donde apareció una gran fisura en el ensayo anterior. Así mismo, se realizaron un par de agujeros sobre el voladizo de la viga, en zona de apoyo central para introducir y posteriormente colocar el bloque de anclaje de los cordones.

4.4.3.2.ii Preparación del modelo

Para efectuar el bloqueo de los cordones se colocó una placa apoyada en el lateral del desviador y en el voladizo del forjado superior de la viga. La placa se fijó con un mortero sin retracción de alta resistencia. La placa de bloqueo era de acero A360, de dimensiones 400 x 250 x 50 mm. Dicha placa incluía dos taladros circulares que permitían el paso de los cordones a

través de ellos, completándose el bloqueo de cada tendón con una placa de anclaje y el casquillo de bloqueo. (ver fotografía 4.13)

El pretensado fue similar al de la viga anterior. Sólo que al tesar a los 170 kN, se procedió a colocar los casquillos de bloqueo en posición final. Acto seguido fue el de terminar el proceso de tesado. Asegurándose de esta forma el bloqueo efectivo y controlado de los tendones.

4.4.3.2.iii Reparación del puente

Como ya se ha dicho, la reparación de la viga se realizó en zona de apoyo intermedio; efectuándose dicha reparación con un mortero de reparación de alta resistencia sin retracción; obteniéndose una resistencia a compresión a los 7 días según especificaciones del fabricante del orden de los 490 Kp/cm².

4.4.3.3 - Medios de carga e Instrumentación

La introducción de cargas se realizó con la ayuda del pórtico de carga utilizado en el ensayo VPE_1 (ver figura 4.7).

Instrumentación (ver figuras 4.8, 4.9 y 4.10):

Utilizando el sistema de adquisición de datos con capacidad máxima de 100 canales. se dispusieron canales para la medición de:

- Fuerzas externas sobre la viga: Células de carga en pórtico y reacciones en apoyos. (8 canales)
- Cordones de pretensado: disponiendo 3 galgas por tramo de viga en cada lado sobre los cordones (24 canales). Deslizamientos de los tendones en desviadores (6 canales). Células de carga en anclajes activos, pasivos y en el bloqueo (6 canales).
- Movimientos de la viga: Obtención de la deformada y giros de la viga por medio de LVDT's. (7 canales)
- Deformaciones seccionales: Se dispusieron galgas sobre hormigón y sobre acero pasivo en la sección de centro luz de vano cargado (10 canales para galgas de hormigón y 4 para galgas sobre acero pasivo).

4.4.3.4 - Realización del ensayo

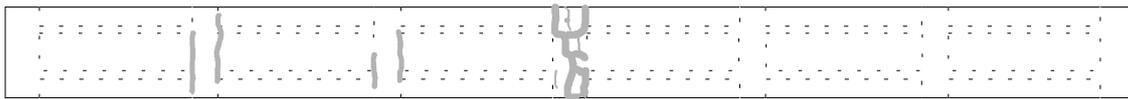
El día 24 de mayo de 1996, se realizó el ensayo de la viga VPE_2; El proceso de carga se efectuó mediante la introducción de escalones de carga, controlando a través de una célula de

presión y por medio del sistema de adquisición de datos centrado principalmente en la deformación del acero pasivo y hormigón en centro luz de vano cargado, de la misma manera que se utilizó en la viga VPE_1. Con dichos parámetros se tomaba la decisión en cuanto al valor del incremento de la carga a aplicar.

En este ensayo se llevaron a cabo tres ciclos de carga y descarga. En el primer ciclo y debido a la fisuración existente, se puede estimar que las fisuras se empezaron a abrir a partir de los 100 ó 150 kN por gato. En términos generales, la fisuración fue muy similar a la obtenida en el ensayo anterior.

Se puede destacar la aparición de una fisura para una carga de 270 kN, inmediatamente después de la placa de bloqueo. Durante el último escalón del primer ciclo de carga, se quitaron los LVDT's debido a que la flecha de la viga hacía que el vástago ya no registrase ninguna variación de desplazamiento. En este primer ciclo se llegó a una carga de 410 kN.

Seguidamente se llevaron a cabo dos ciclos de carga más, para completar la información. No se presentaron hechos significativos en estos dos ciclos.



Planta 1

Escala: 1:100



Planta 2

Escala: 1:100

Figura 4.17 Localización de los daños tras el ensayo (Planta 1: Zona superior. –Planta 2: zona inferior).

En la figura 4.17 y fotos 4.9 a 4.14 se recoge la información gráfica relativa a los daños aparecidos durante el proceso de carga.



Fotografía 4.9 Fisuración en desviador 1 de la sección centro-luz vano cargado



Fotografía 4.10 Fisuración en desviador 2 de la sección centro-luz vano cargado



Fotografía 4.11 Aspecto de la fisuración en sección centro-luz vano cargado



Fotografía 4.12 Aspecto de la fisuración en sección de apoyo Intermedio



Fotografía 4.13 Aspecto de la sección de apoyo central.



Fotografía 4.14 Aspecto de la deformada de la viga VPE_2

4.4.3.5 - Resultados

En este segundo ensayo, la longitud de los cordones entre puntos de anclaje es la mitad que en el ensayo VPE_1 debido al bloqueo de los cordones, por lo que el incremento de rigidez y de la capacidad portante resultantes, se han cumplido durante el ensayo.

Los resultados figuran resumidos en los anejos en forma de los registros de datos. Los resultados más relevantes se presentan en las relaciones siguientes:

- i) Curva Carga - Flecha
- ii) Curva Carga - Reacciones en apoyos
- iii) Curva Carga - Deformación en secciones de centro luz
- iv) Incrementos de tensión y deformaciones en cordones
- v) Evolución de la deformación de las secciones

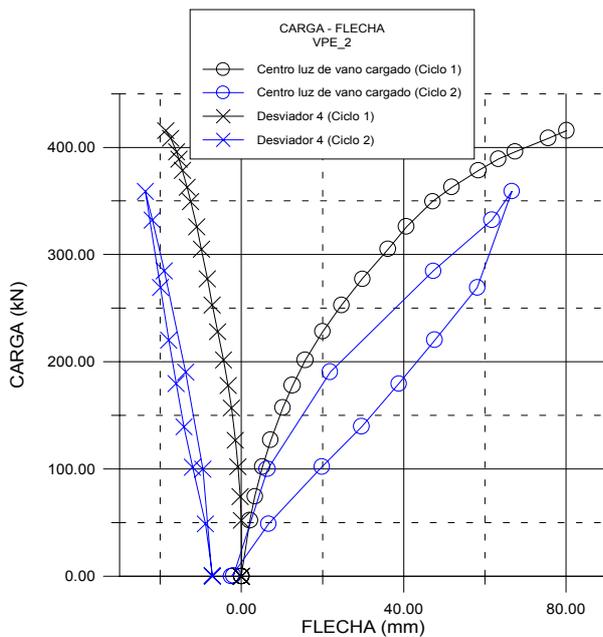


Figura 4.18 Evolución de la flecha en centro luz y el cuarto desviador.

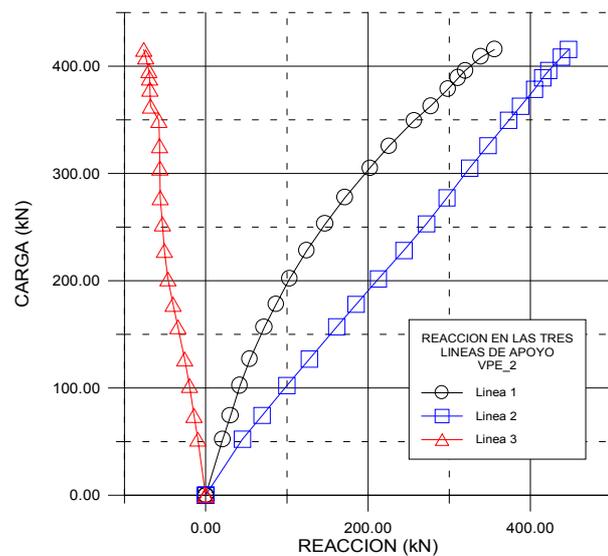


Figura 4.19 Evolución de las reacciones en las tres líneas de apoyo.

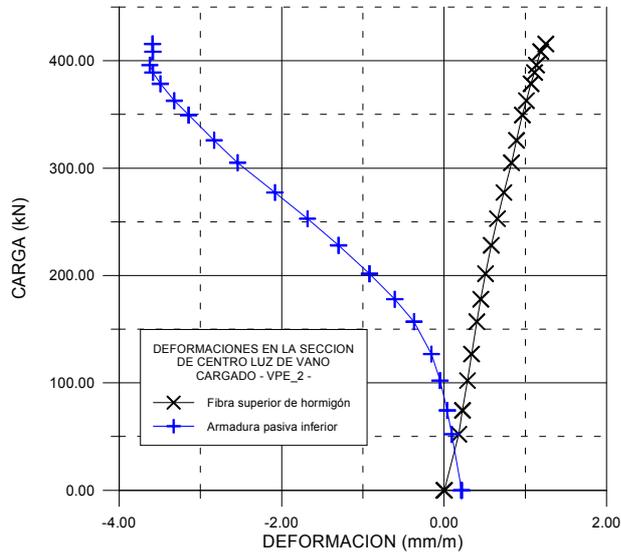


Figura 4.20 Evolución de la deformación del hormigón y el acero pasivo .

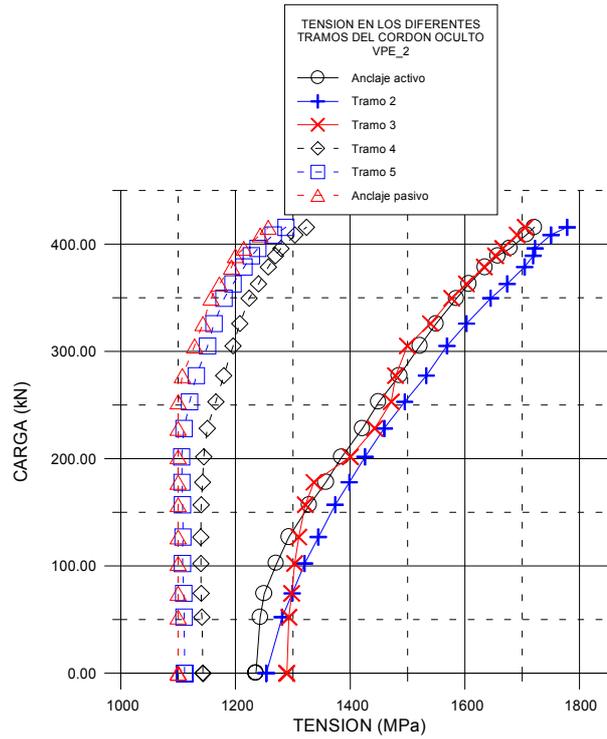


Figura 4.21 Evolución de tensiones en los diferentes tramos.

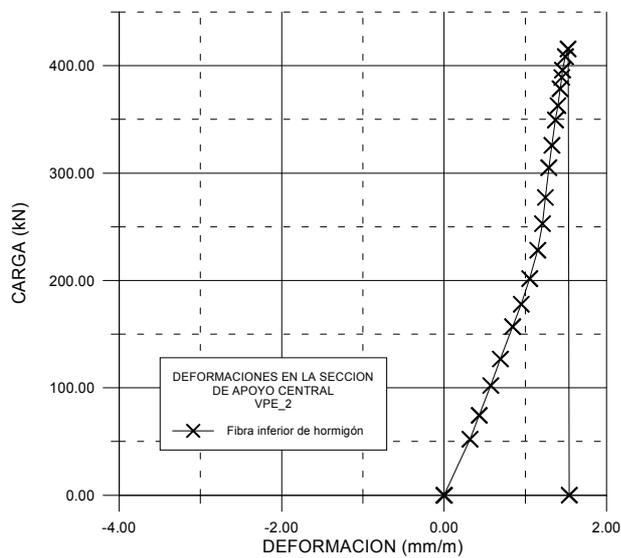


Figura 4.22 Evolución de la deformación en la sección de apoyo central.

4.4.4 Ensayos sobre modelo de puente: VPE_3

4.4.4.1 - Antecedentes

Continuando con el programa experimental sobre el estudio para la evaluación y reparación de puentes construidos ya apuntado en los ensayos anteriores, se plantea una tercera viga para ser llevada a rotura, de hormigón armado y pretensado exterior. Dicho pretensado exterior no presenta bloqueo de los tendones de pretensado en el apoyo central análogamente a la viga VPE_1. En esta viga se sustituye con fibras aramidas el acero pasivo de las secciones de centro luz del vano cargado y de apoyo intermedio.

4.4.4.2 - Objetivo del plan de Ensayo

Esta fase experimental tiene por objeto establecer la capacidad última en rotura de la sección transversal de centro luz del vano cargado y de apoyo intermedio del modelo de puente. Se trata, en el presente caso, de la misma viga continua de hormigón con pretensado exterior del ensayo anterior VPE_1 (sin bloqueo en el apoyo intermedio). Dichos resultados se contrastarán con los valores obtenidos en los ensayos anteriores para verificar la eficacia de la reparación con las bandas de fibra aramida y también con el modelo numérico de análisis.

4.4.4.3 - Planteamiento y descripción del ensayo

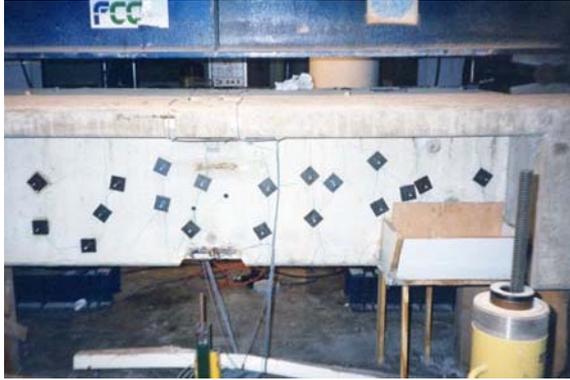
Se utiliza la misma viga ensayada en el ensayo VPE_1 reparada en las secciones de vano y de apoyo. Debido a los daños provocados durante el ensayo, la viga tuvo que ser apuntalada en toda su longitud, previo a destesar y sustituir los cordones de pretensado del ensayo anterior. Adicionalmente hubo que remover el hormigón dañado y las barras de acero pasivo en zonas de apoyo intermedio y centro luz del vano cargado que estaban completamente plastificados. Puede verse en las fotografías 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18 el total de hormigón y barras de acero pasivo perdidos durante el ensayo anterior. Es necesario remarcar que el acero activo superó también su límite elástico.



Fotografía 4.15 Vista inferior del vano cargado. La armadura longitudinal se ha cortado.



Fotografía 4.16 Apoyo central. Se han retirado el hormigón dañado y acero pasivo



Fotografía 4.17 Vista de la red de inyectores previo a la inyección de las fisuras



Fotografía 4.18 Trabajos preliminares de apeo provisional

4.4.4.3.i Reparación del modelo

El método de reparación trató de simular la secuencia de reparación a utilizar en un puente existente. Primero, apuntalando y recuperando flechas; luego reemplazando con microhormigón de reparación grandes porciones de las secciones originales de hormigón que fueron dañadas (fotografías 4.15 y 4.16). Las fisuras existentes fueron inicialmente saneadas, luego colocados los inyectores para a continuación colocar un mortero de fraguado rápido para sellar las fisuras, y por último, se procedió a inyectar las fisuras con resina epoxi. (fotografías 4.19 y 4.20).



Fotografía 4.19 Vista de las zonas de hormigón reparadas y fisuras inyectadas



Fotografía 4.20 Zona de apoyo central reparada con microhormigón sin retracción

Después de que se reconstruyeran las secciones de hormigón y las fisuras fueran inyectadas, los cordones de pretensado exterior fueron sustituidos. El acero pasivo de la zona central del vano cargado y apoyo intermedio es reemplazado por las bandas de fibras aramidas (con dimensiones: largo : 3000 mm, ancho: 20 mm y espesor de 4 mm cada una) (foto 4.21). Se sustituyó, adicionalmente, uno de los cercos a cortante del alma de la sección por un refuerzo con fibra (foto 4.22), de manera que, el monto total de fibras aramidas colocado era

mecánicamente equivalente a los cercos que se cortaron. A causa del pretensado exterior, el control de las fisuras debido a la flexión no es crítico para la viga reparada. Por lo tanto la cantidad de aramidas a flexión positiva y negativa, depende de dos condiciones: evitar la rotura frágil, de acuerdo a los requisitos de rigidez [Euro código 2, 1995] y obtener los márgenes de seguridad en estados límites últimos a flexión parecidos al de la viga original. (El cálculo del monto de fibras aramidas puede verse en el anejo 9).



Fotografía 4.21 Bandas de fibra aramida pegadas en apoyo central y vano cargado



Fotografía 4.22 Refuerzo a cortante en el alma de la sección

4.4.4.4 - Medios de carga e Instrumentación

La introducción de cargas se realizó con la ayuda del mismo pórtico de carga del ensayo anterior (ver figura 4.7)

Las cargas se introdujeron mediante los dos gatos de carga ENERPAC de 600 kN de carga máxima cada. Junto a los gatos, como antes, se encuentran las células de carga que permiten controlar las fuerzas aplicadas al sistema.

Como ya se ha comentado, la instrumentación fue básicamente la misma que en el ensayo anterior VPE_1. Adicionalmente se colocaron un total de 13 galgas en las bandas de aramida, 7 de ellas puestas sobre el apoyo intermedio y 5 en centro luz del vano cargado (ver figura 4.23). La última galga fue colocada en la fibra dispuesta como cerco (ver foto 4.22). Una galga se colocó también en el cerco situado más cerca de la fibra aramida.

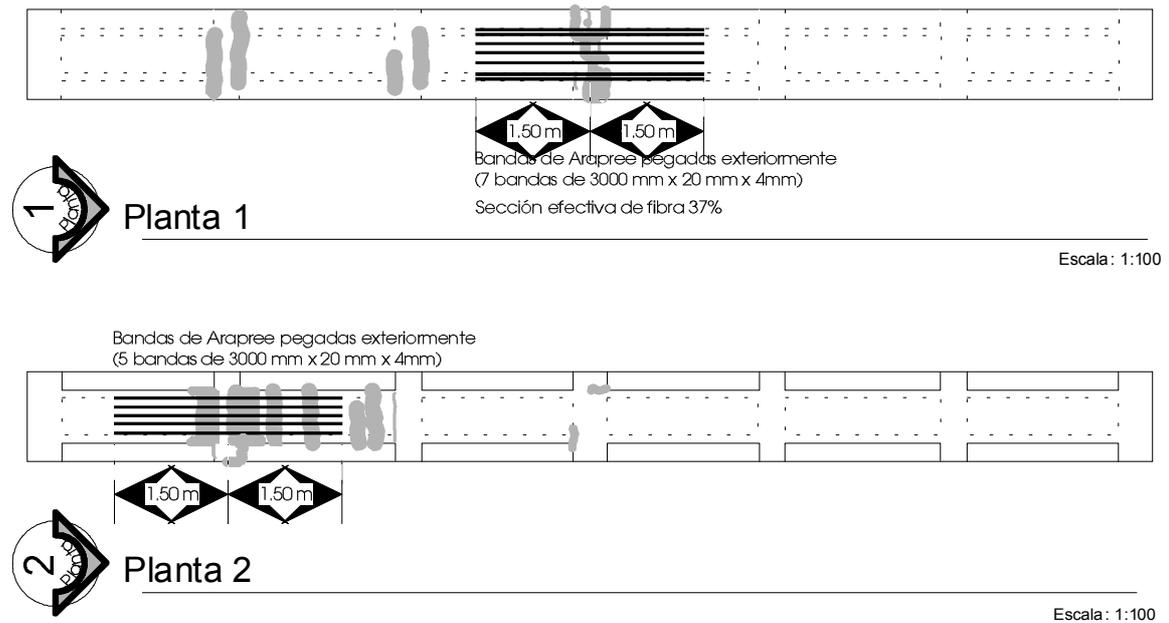


Figura 4.23 Disposición de las bandas de aramidas en apoyo central y sección centro luz

4.4.4.5 - Realización del ensayo

El día 12 de junio de 1997, se realizó el ensayo de la viga VPE_3; El proceso de carga se efectuó mediante la introducción de escalones de carga, controlando a través de la célula de presión y por medio del sistema de adquisición de datos ya apuntados, centrándose principalmente el control en la deformación del acero pasivo, en el hormigón en centro luz de vano cargado y en las fibras aramidas.

En este ensayo se realizó únicamente un ciclo de carga; debido a que se produjo el colapso de la estructura de forma súbita. La primera fisura apareció en la zona inferior del cajón de la viga, cerca del desviador y a un nivel de carga de 150 kN en el área donde el hormigón fue reemplazado, y el acero de refuerzo fue removido y sustituido por las bandas de fibras aramidas. Dicha área también fue la más dañada en los ensayos anteriores. A medida que se hacían los incrementos de carga, las fisuras iban creciendo en longitud y anchura. Se presentó durante el ensayo un buen control de la apertura de las fisuras por medio de las bandas de fibra a pesar de la no existencia de armadura pasiva interior. La fisuración se formó muy cerca de las fisuras inyectadas de la viga en estado original, pero no coincidiendo con fisuras anteriores, lo cual confirma la bondad de la reparación (ver figura 4.24).

La carga última fue de 360 kN, estando muy cerca de la carga de 395 kN que alcanzó la viga original en su ensayo a rotura (viga VPE_1). El fallo final fue repentino. La última carga fue registrada cuando se presentó una repentina y progresiva rotura por adherencia entre fibras aramidas y hormigón. La rotura se produjo en el hormigón de la misma manera que en los ensayos de caracterización de adherencia, es decir, por delaminación y rotura a tracción en el sustrato de hormigón, lo cual confirma que la fibra se colocó correctamente, al fallar antes el hormigón que las interfases hormigón-adhesivo y adhesivo-aramida. Se trata de una rotura según el modo de fallo de delaminación provocada por la existencia de fisuras de flexión. Al no existir armadura pasiva interior capaz de absorber las tensiones liberadas por el despegue de la lámina localizada en la zona de fisura, y al tratarse de una banda rígida, después de que se produzca el desgarramiento localizado de la fibra en la zona de la fisura, se produce una propagación rápida de la

delaminación hacia el extremo de la lámina de refuerzo, provocando el desprendimiento total del compuesto. La propagación rápida de la delaminación hace que la rotura sea súbita. Una vez que las bandas fallaron, la carga se transmitió bruscamente al acero activo, el cual llegó a alcanzar valores cercanos a la tensión de rotura, provocando la rotura de un alambre del tendón, el fallo del pretensado y la rotura de la viga (ver fotografías 4.23, 4.24, 4.25 y 4.26).

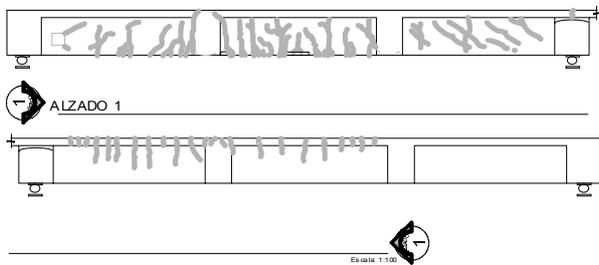


Figura 4.24a Localización de fisuras en el lado visto

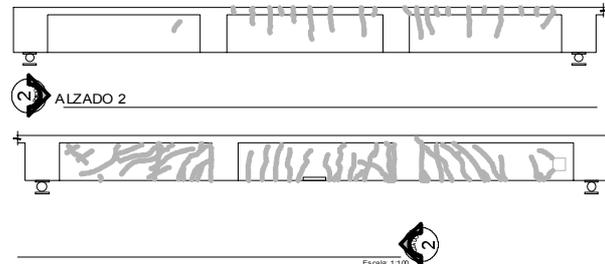


Figura 4.24b Localización de fisuras en el lado oculto



Fotografía 4.23 Vista del estado final de las fibras en apoyo central



Fotografía 4.24 Vista inferior del vano cargado



Fotografía 4.25 Vista del apoyo central, puede verse el control de las fisuras



Fotografía 4.26 Vista del cordón roto durante el ensayo

4.4.4.6 - Resultados

En este ensayo, la longitud de los cordones entre puntos de anclaje es igual que en el ensayo VPE_1.

Los resultados figuran resumidos en los anejos en forma de los registros de datos. Los resultados más relevantes se presentan en las relaciones siguientes:

- i) Curva Carga - Flecha
- ii) Curva Carga - Reacciones en apoyos
- iii) Curva Carga - Deformación en secciones de centro luz
- iv) Incrementos de tensión y deformaciones en cordones
- v) Evolución de la deformación de las secciones
- vi) Deformaciones en las fibras aramidadas en apoyo intermedio y centro luz

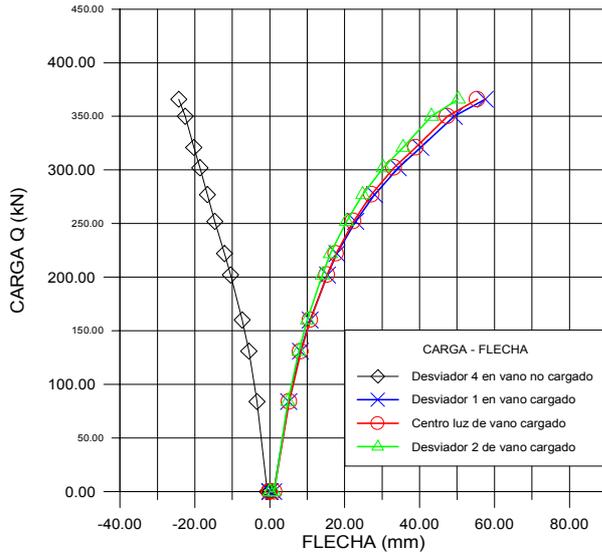


Figura 4.25 Evolución de la flecha en centro luz y el cuarto desviador.

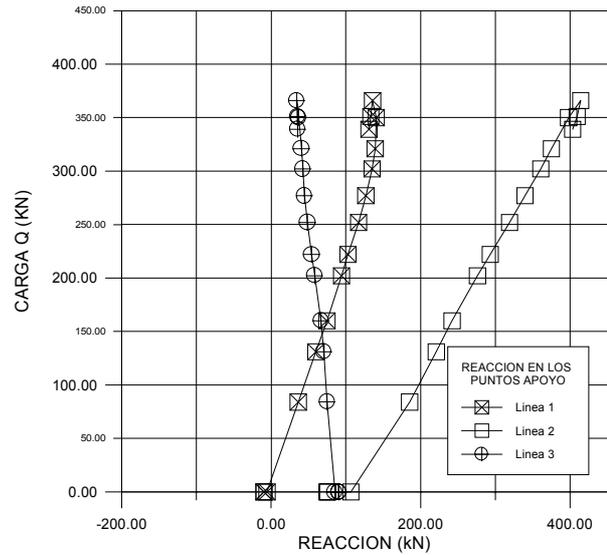


Figura 4.26 Evolución de las reacciones en las tres líneas de apoyo.

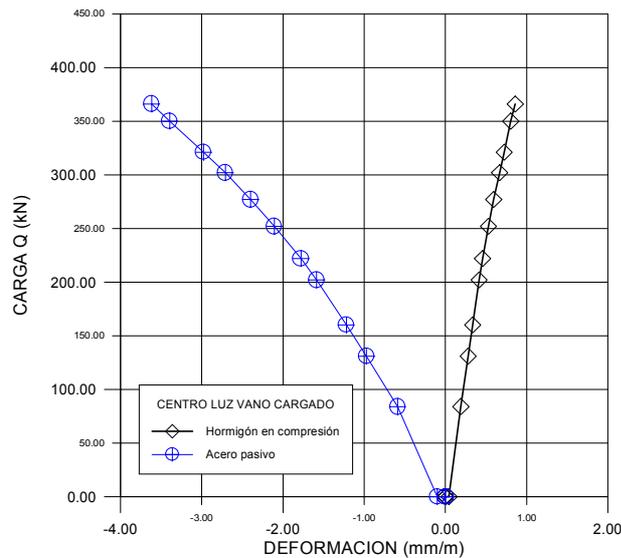


Figura 4.27 Evolución de la deformación del hormigón y el acero pasivo.

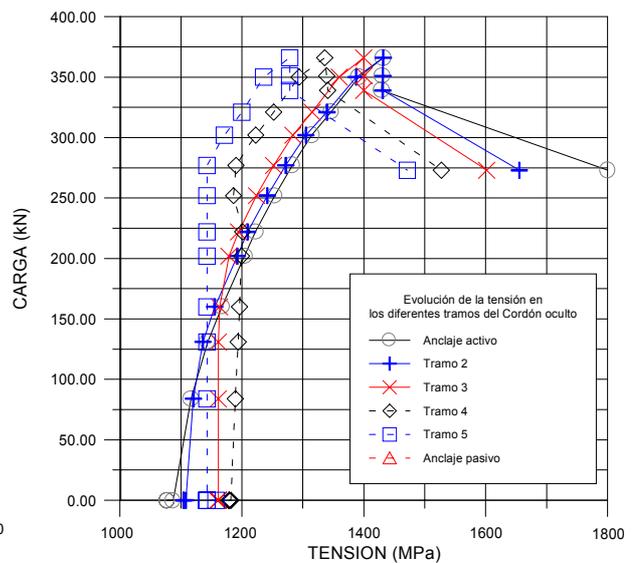


Figura 4.28 Evolución de tensiones en los diferentes tramos cordón oculto.

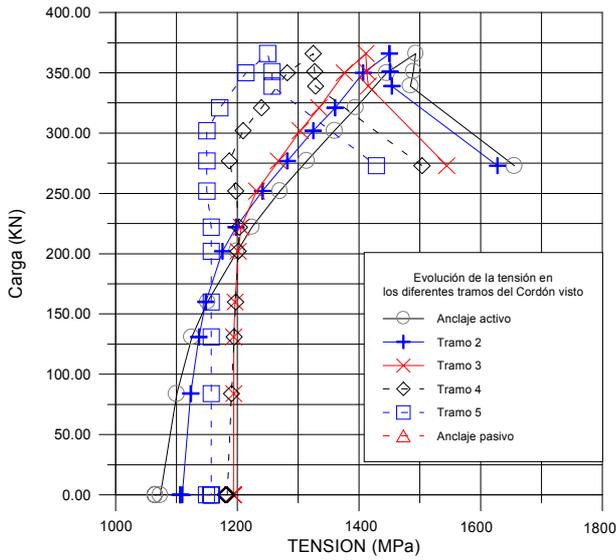


Figura 4.29 Evolución de tensiones en los diferentes tramos cordón visto.

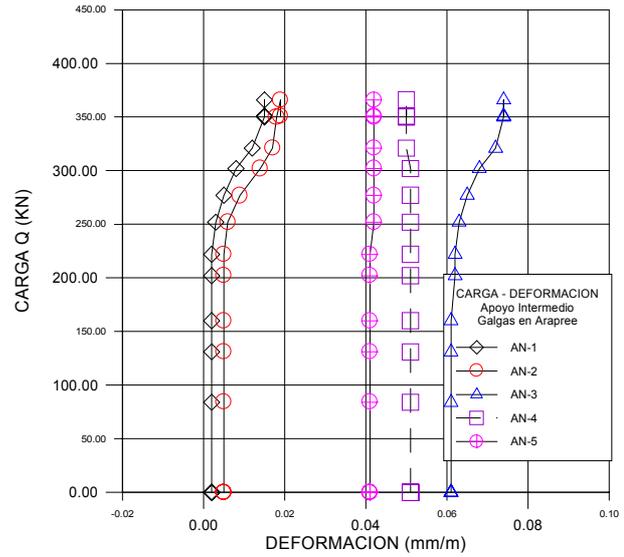


Figura 4.30 Evolución de la deformación en las bandas de aramida en apoyo.

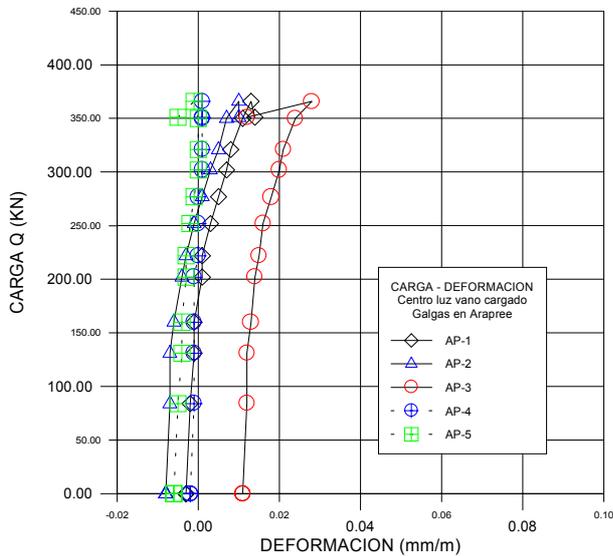


Figura 4.31 Evolución de la deformación en las bandas de aramida en centro luz del vano cargado

Tal como se observa en las figuras 4.30 y 4.31, la deformación máxima en las bandas de aramida es aproximadamente del 0.2%, es decir, bastante parecidos a las deformaciones registradas en el acero pasivo en dichos puntos en el ensayo VPE_1, pero muy lejos de su deformación última estimada en el 2%.

4.4.5 Ensayos sobre modelo de puente: VHA1_a

4.4.5.1 - Antecedentes

A continuación se plantea otra serie de modelos de puente para ser primeramente cargados y llevados a rotura y posteriormente reparados con fibra de carbono. En este primer

caso se trata de una viga de hormigón armado, a la que inicialmente no se le pretensará. Esta viga será posteriormente reparada sustituyendo el acero pasivo por fibras de carbono y por último se plantea repararla y reforzarla con la adición de fibra de carbono y con pretensado exterior.

4.4.5.2 - Objetivo del plan de Ensayo

Inicialmente, esta fase experimental tiene por objeto determinar la capacidad última en rotura de las diferentes secciones del modelo de puente, en el presente caso de hormigón armado, mediante el estudio de la respuesta estructural a flexión, contrastando los valores obtenidos experimentalmente con la aplicación de un modelo numérico de análisis. La posterior reparación y refuerzo de la viga ensayada con las fibras de carbono, permitirá contrastar el modelo de puente en su estado original contra la reparación y utilización de fibras de carbono.

Se configura para el efecto, el esquema de cargas que permita reproducir una situación particular de esfuerzos; buscando la flexión máxima negativa en el apoyo central, posicionando para ello, la carga “2Q” en centro luz del vano uno, y dos cargas “Q” a 2.40 m de los apoyos en el vano dos.(ver figura 4.32)

4.4.5.3 - Planteamiento y descripción del ensayo

Descripción del modelo ensayado:

Cada elemento, de longitud igual a 14.40 m esta compuesta por una viga continua de dos vanos de 7.20 m de luz cada uno. La sección es de tipo cajón, y con canto constante de 0.60 m. (ver figura 4.32 y 4.33)

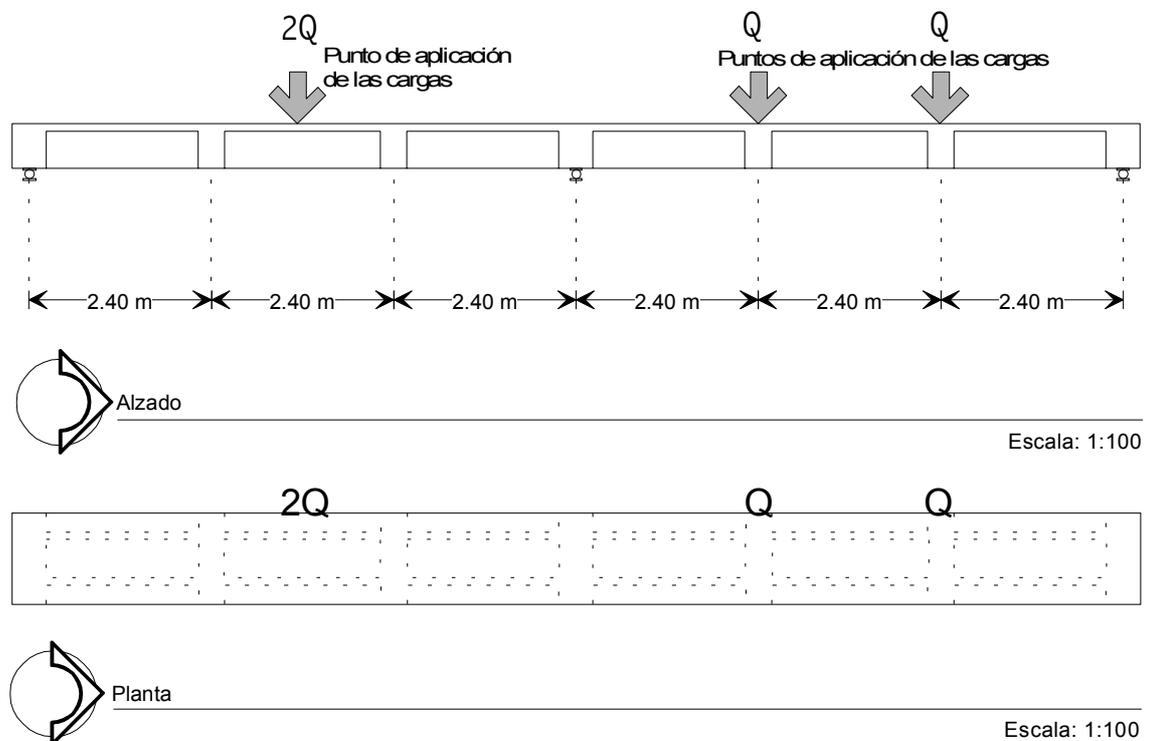


Figura 4.32 Alzado y Planta de la Viga VHA1_a y configuración de cargas.

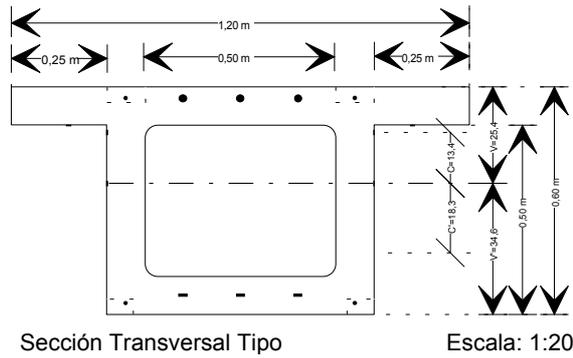


Figura 4.33 Sección transversal de la viga

Los materiales empleados fueron:

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
Hormigón H-400	$E_c = 38.000 \text{ MPa}$
Acero Pasivo	AEH 500 N

Tabla 4.8 Características de los materiales empleados

4.4.5.3.i Trabajos preliminares

Para la preparación del ensayo primeramente se situaron los tres bloques de apoyo y se colocó el pórtico de carga número dos en su posición final, respetando el esquema de cargas planteado.

Acto seguido, los dos tramos de la viga se colocaron en posición sobre el sistema de apoyos definitivo con la ayuda del puente grúa; dejando en la parte inferior las rótulas apoyos las y las células de carga correspondientes; también se dejaron apoyos provisionales cerca de la junta los cuales fueron retirados después del hormigonado de la traviesa de apoyo. En dicha junta se procedió a colocar armadura a cortante y refuerzo longitudinal con la distribución que se muestra en la figura 4.34. También se colocaron Galgas Extensométricas embebidas en la parte inferior de la sección de hormigón; y las Galgas pegadas en el acero pasivo superior, recubiertas y protegidas por flejes plásticos de 2,5 cm de diámetro, para la medición de deformaciones en la sección de apoyo intermedio(ver fotografías 4.27 y 4.28). Luego, se posicionó el encofrado sobre la zona en cuestión, dejando en posición definitiva las rótulas y células de carga de los apoyos de esta zona.



Fotografía 4.27 Vista del montaje de las dos semi-vigas y apoyos provisionales



Fotografía 4.28 Vista de la colocación de las galgas embebidas en apoyo.

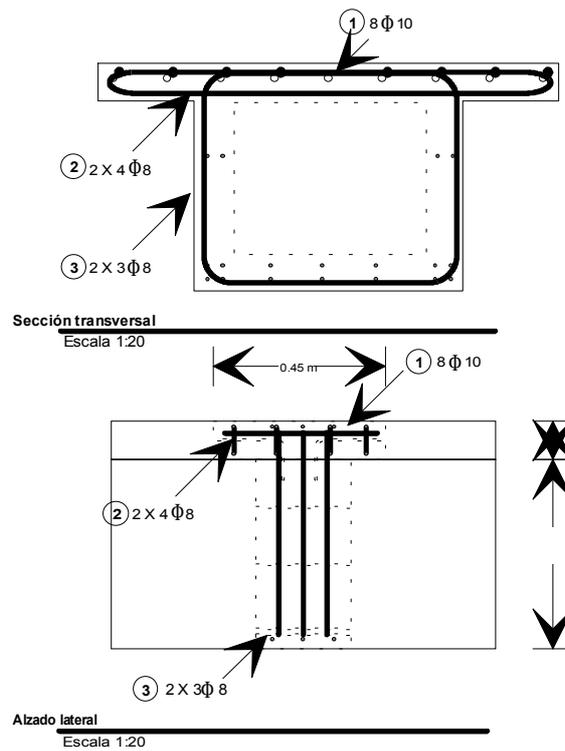


Figura 4.34 Detalle de junta de hormigonado en apoyo intermedio

4.4.5.3.ii Preparación del modelo

Posterior a la colocación de las galgas extensométricas se procedió a verter el hormigón H-350 como junta. Fueron vertidos en esta junta 180 l de hormigón con una resistencia a los 9 días de 280 kp/cm^2 . Esta junta no incluyó ningún diafragma de desviación debido a que

dentro de los análisis realizados la disposición del pretensado exterior de refuerzo para el ensayo final no lo incluía.

A partir de este momento se inició el trabajo de preparación de las superficies de hormigón y de acero pasivo para la colocación de las galgas que se utilizaron. Estos trabajos incluyeron la regularización de las superficies, lijado, neutralización de los poros, relleno de poros y pegado de galgas extensométricas.

4.4.5.4 - Medios de carga e Instrumentación

La introducción de las cargas se realizó con 2 pórticos de carga, constituidos por perfiles metálicos (ver figura 4.35)

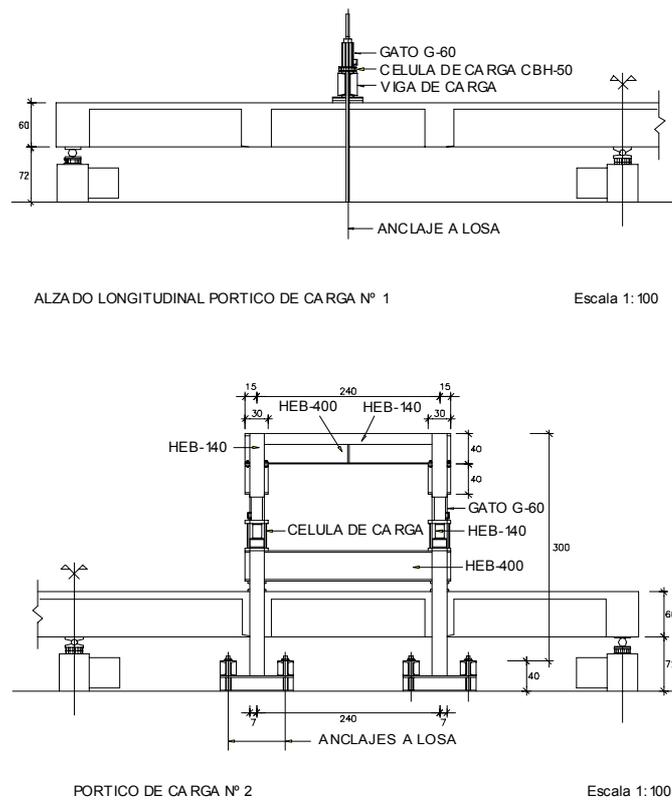


Figura 4.35 Pórticos de carga utilizados en el ensayo VHA1_a

Las cargas se introducen mediante un grupo de cuatro gatos de carga ENERPAC de 600 kN de carga máxima cada uno y con un recorrido de 35 cm. La central de presión es la misma para todo el sistema. Conjuntamente con los gatos se encuentran, las células de carga que permiten controlar la magnitud de las cargas introducidas.

Instrumentación:

La instrumentación en su mayor parte viene condicionada por el desarrollo mismo de las fases anteriores. Se continuó utilizando el sistema de adquisición de datos con capacidad

máxima de 100 canales. La distribución de canales debía permitir el posterior uso de los canales disponibles para la instrumentación de las fibras de reparación y posteriormente para los cordones de pretensado de refuerzo. La distribución de los canales fue la siguiente:

REGISTRO DE DISTRIBUCIÓN DE CANALES DE LA D.A.U. y M.C.						
DAU	MC	CODIGO	TIPO	USO	NOMBRE ARCHIVO	POSICIÓN
8	9	GP1	Galga	Acero pasivo	@Galqcla	C.L. Vano 1. fibra Inf.
9	10	GP2	Galga	Acero pasivo	@Galqcla	C.L. Vano 1. fibra Inf.
10	11	GP3	Galga	Acero pasivo	@Galqcla	C.L. Vano 1. fibra Sup.
11	12	GP4	Galga	Acero pasivo	@Galqcla	C.L. Vano 1. fibra Sup.
12	13	GP5	Galga	Acero pasivo	@Galqclb	C.L. Vano 2. fibra Inf.
13	14	GP6	Galga	Acero pasivo	@Galqclb	C.L. Vano 2. fibra Inf.
14	15	GP7	Galga	Acero pasivo	@Galqclb	C.L. Vano 2. fibra Sup.
15	16	GP8	Galga	Acero pasivo	@Galqclb	C.L. Vano 2. fibra Sup.
16	17	AE1	Embebida	Acero	@Galq_ap y @Acem	Apoyo Intermedio
17	18	AE2	Embebida	Acero	@Galq_ap y @Acem	Apoyo Intermedio
18	*	Volts.	5 Volts.	Alimentación		M.C.
19	*	Volts.		Alimentación		M.C.
20	19	AE3	Embebida	Acero	@Galq_ap y @Acem	Apoyo Intermedio
21	20	GC1	Galga	Cortante	@Galco	Apoyo exterior L. visto
22	21	GC2	Galga	Cortante	@Galco	Apoyo exterior L. Oculto
23	22	GC3	Galga	Cortante	@Galco	Apoyo exterior L. visto
24	23	GC4	Galga	Cortante	@Galco	Apoyo exterior L. Oculto
25	24	GH1	Galga	Hormigón	@Galqcla	C.L. Vano 1
26	25	GH2	Galga	Hormigón	@Galqcla	C.L. Vano 1
27	26	GH3	Galga	Hormigón	@Galqcla	C.L. Vano 1
28	27	GH4	Galga	Hormigón	@Galqcla	C.L. Vano 1
29	28	GH5	Galga	Hormigón	@Galqcla	C.L. Vano 1
30	29	GH6	Galga	Hormigón	@Galqcla	C.L. Vano 1
31	30	GH7	Galga	Hormigón	@Galqclb	C.L. Vano 2
32	31	GH8	Galga	Hormigón	@Galqclb	C.L. Vano 2
33	32	GH9	Galga	Hormigón	@Galqclb	C.L. Vano 2
34	33	GH10	Galga	Hormigón	@Galqclb	C.L. Vano 2
35	34	GH11	Galga	Hormigón	@Galqclb	C.L. Vano 2
36	35	GH12	Galga	Hormigón	@Galqclb	C.L. Vano 2
37	36	HE1	Embebida	Hormigón	@Galq_ap y @Horem	Apoyo Intermedio
38	*	Volts.	10 Volts.	Alimentación		M.C.
39	*	Volts.		Alimentación		M.C.
40	37	HE2	Embebida	Hormigón	@Galq_ap y @Horem	Apoyo Intermedio
41	38	HE3	Embebida	Hormigón	@Galq_ap y @Horem	Apoyo Intermedio
58	*	Volts.		Alimentación		M.C.
59	*	Volts.		Alimentación		M.C.
74	69	LC1	Célula	Gato	@C cargg	Pórtico 2 -L. Izq.-
75	70	LC2	Célula	Gato	@C cargg	Pórtico 2 -L. Der.-
76	71	LC3	Célula	Gato	@C cargg	Pórtico 1 -L. visto-
77	72	LC4	Célula	Gato	@C cargg	Pórtico 1 -L. oculto-
78	*	Volts.		Alimentación		M.C.
79	*	Volts.		Alimentación		M.C.
80	73	LC5	Célula	Carga	@C carga	Apoyo 1 -L. visto-
81	74	LC6	Célula	Carga	@C carga	Apoyo 1 -L. oculto-
82	75	LC7	Célula	Carga	@C carga	Apoyo Inter. -L. visto-
83	76	LC8	Célula	Carga	@C carga	Apoyo Inter. -L. oculto-
84	77	LC9	Célula	Carga	@C carga	Apoyo 2 -L. visto-
85	78	LC10	Célula	Carga	@C carga	Apoyo 2 -L. oculto-
88	15(81)	L1	Lvdt	Flecha	@Lvdt f	Apoyo 1
89	16(82)	L2	Lvdt	Flecha	@Lvdt f	C. L. Vano 1
90	17(83)	L3	Lvdt	Flecha	@Lvdt f	Apoyo Intermedio V.1
91	18(84)	L4	Lvdt	Flecha	@Lvdt f	Apoyo Intermedio V.2
92	19(85)	L5	Lvdt	Flecha	@Lvdt f	C.L. Vano 2
93	20(86)	L6	Lvdt	Flecha	@Lvdt f	Apoyo 2

Tabla 4.9 Distribución de los canales para el ensayo y ficheros asignados en el ensayo de la viga VHA1_a.

Se hace, por tanto, necesario agrupar por bloques la instrumentación; siendo el criterio el objeto de la medida. En consecuencia los bloques son: Fuerzas externas, movimientos de la viga y deformaciones seccionales de la viga.

Fuerzas externas:

Son las cargas introducidas por los pórticos de carga y también las reacciones en los apoyos, disponiéndose para la medición de fuerzas células de carga. Dichas células, se ubicaron bajo cada uno de los gatos ENERPAC G-60. Para la medición de las reacciones se dispusieron dos células de carga en cada línea de apoyo una debajo de cada alma. (ver figura 4.36)

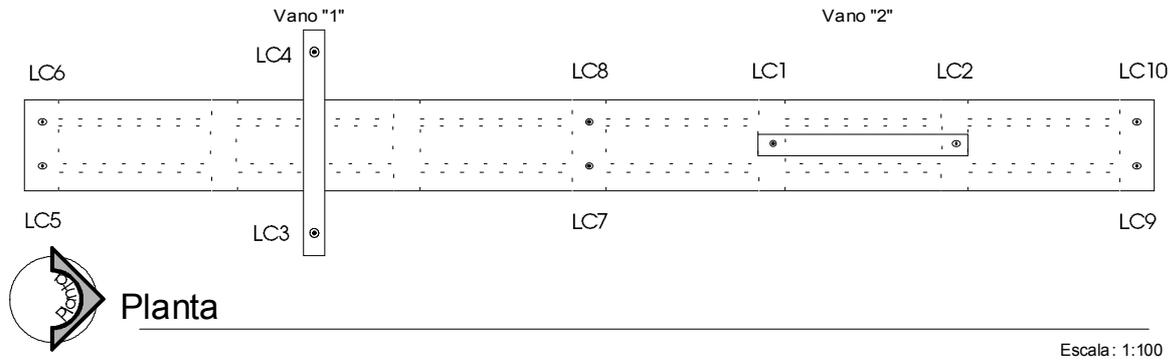


Figura 4.36 Distribución de las células de carga en pórticos y reacciones en apoyos

Movimientos de la viga:

Para llegar a determinar la deformada de la viga en cada momento del ensayo fue necesario la colocación de LVDT's en diferentes puntos de la viga; y con ello determinar los giros y los valores de las flechas (ver figura 4.37).

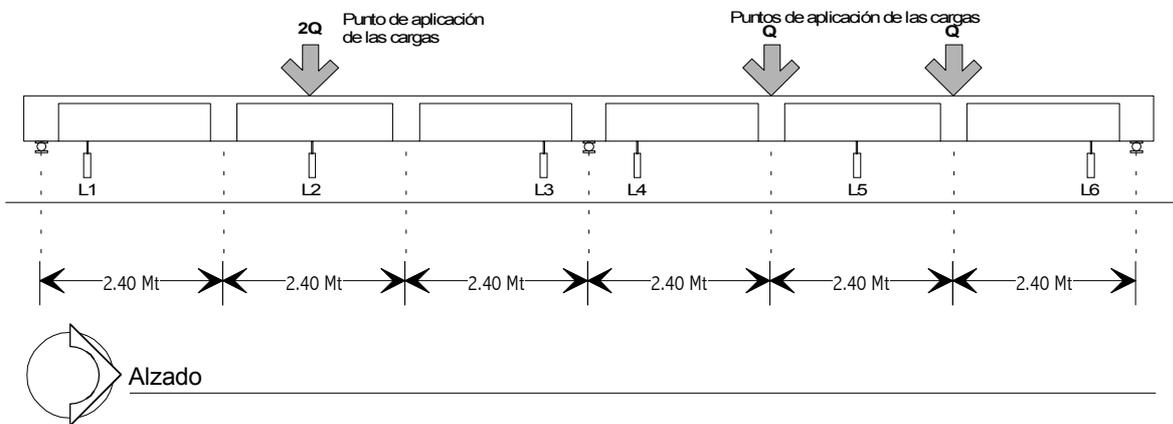


Figura 4.37 Distribución de los LVDT's de flechas

Deformaciones seccionales:

Se colocaron galgas extensométricas para registrar la deformación, tanto de acero pasivo como de hormigón en las secciones de centro luz y apoyo intermedio, para poder llevar a cabo un control del estado deformacional de la sección. (ver figura 4.38)

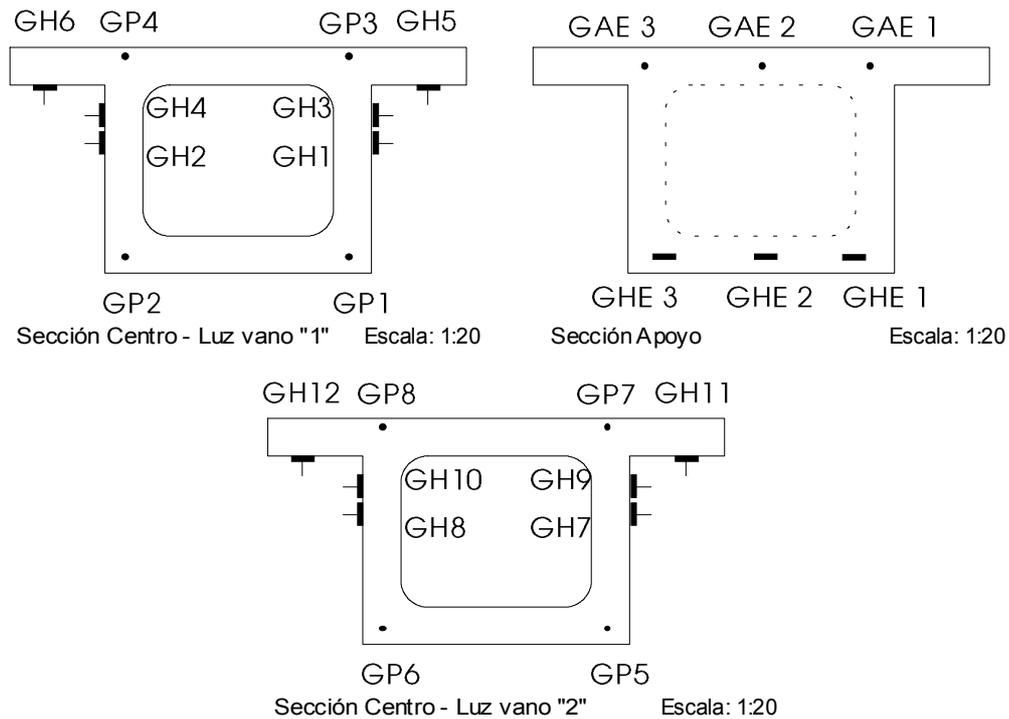


Figura 4.38 Ubicación de las galgas en hormigón y acero pasivo en las diferentes secciones.

4.4.5.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga

El ensayo se realizó en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras, el día 3 de febrero de 1998.

En este ensayo se llevaron a cabo cuatro ciclos de carga y descarga. Los ciclos segundo y tercero llegaron casi al 50% de la carga de rotura inicial, esto fue debido a la pérdida de control durante dichos ciclos del programa informático; el cual no permitía el registro de los subsiguientes incrementos de carga. Esta situación fue solucionada en el cuarto y último ciclo.

La puesta en carga se efectuó aplicando escalones de carga en la viga, siendo estos incrementos de 5 bares cada uno ($\approx 4,5$ kN). Luego se efectuaban las lecturas con la instrumentación correspondiente, por medio del sistema de adquisición de datos. Durante el ensayo se observaron algunos parámetros de control tales como: la carga aplicada, la deformación máxima en acero pasivo y hormigón del apoyo intermedio y la gráfica Carga - flecha del vano 1; los cuales fueron constantemente observados en tiempo real para registrar cualquier incidencia en el desarrollo del ensayo.

La fisuración comenzó a ser apreciable a simple vista a partir de los 40 y 45 kN de carga por gato, siendo éstas fisuras por flexión, principalmente en el vano uno. Ya que se trataba de una viga de hormigón armado y debido a la configuración de cargas adoptada, dicha fisuración surgió como era de esperarse en la zona donde los momentos eran máximos.

Al aumentar las cargas, las fisuras por flexión positiva se hicieron más numerosas, proliferando también en el vano dos. A los 55 kN aparecieron algunas fisuras por cortante - flexión en zonas cercanas a los apoyos y también en las cercanías del apoyo intermedio en la parte exterior del voladizo (fotos 4.30 y 4.32)

A los 70 kN fue apreciable la aparición de una fisura justo sobre el apoyo intermedio en zona de momentos negativos (fotografía 4.30). A medida que se incrementaban las cargas esta fisura se fue propagando en longitud y anchura; mientras que en centro de luz de los dos vanos el incremento apreciable era en el número de fisuras observadas (fotografía 4.31).

La rotura se produjo por alargamiento de la armadura pasiva en la fibra superior de la sección de apoyo intermedio. Ya que visualmente no se podían cuantificar las deformaciones en armaduras pasivas y hormigón; las lecturas de las galgas y la lectura de carga de los gatos permitieron establecer el instante de la rotura, que se alcanzó a los 92,8 kN/gato. Durante la descarga se produjo un cierre parcial de las fisuras, a pesar de tratarse de un elemento de hormigón armado.



Fotografía 4.29 Deformada de la viga en un momento del ensayo VHA1_a



Fotografía 4.30 Fisuración de la viga en zona de máximo momento negativo



Fotografía 4.31 Fisuración de la viga en zona momentos positivos.



Fotografía 4.32 Vista del apoyo central. Puede verse la fisuración existente.

4.4.5.6 - Resultados

Los resultados figuran resumidos en los anejos en forma de los registros de datos. Los resultados más relevantes se presentan en las relaciones siguientes:

- i) Curva Carga - Flecha
- ii) Curva Carga - Reacciones en apoyos

- iii) Curva Carga - Deformación en apoyo intermedio
- iv) Curva Carga - Deformación en secciones de centro luz
- v) Evolución de la deformación de las secciones

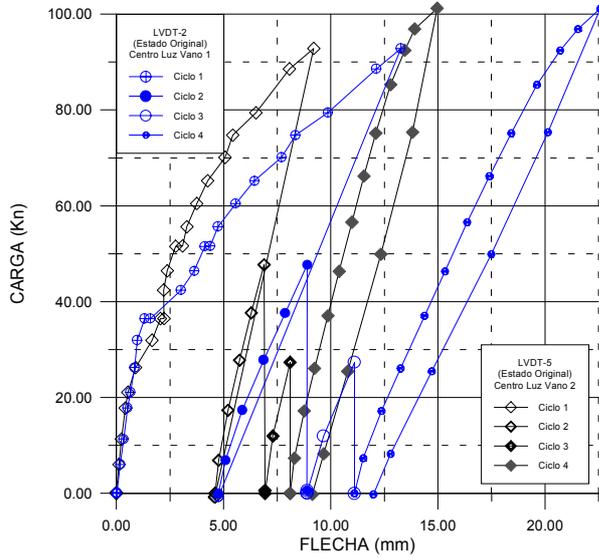


Figura 4.39 Evolución de la flecha en centro luz vanos 1 y 2.

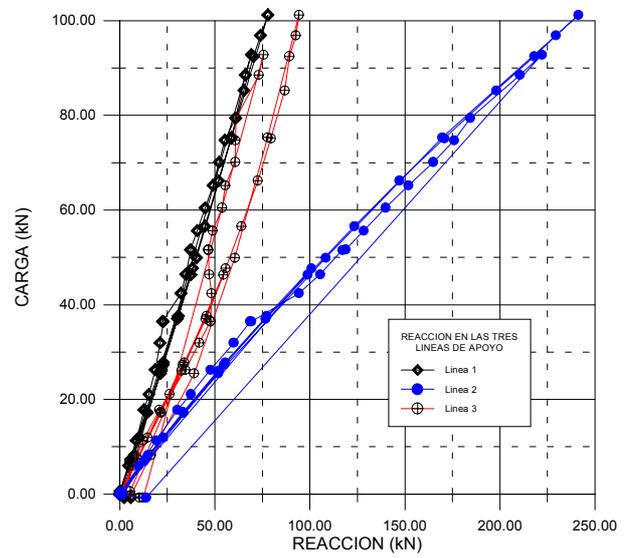


Figura 4.40 Evolución de las reacciones en las tres líneas de apoyo para los distintos ciclos de carga.

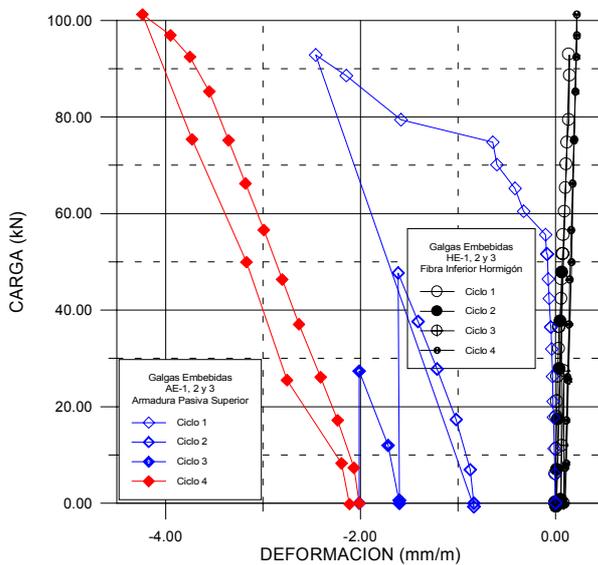


Figura 4.41 Evolución de la deformación de la sección en apoyo intermedio.

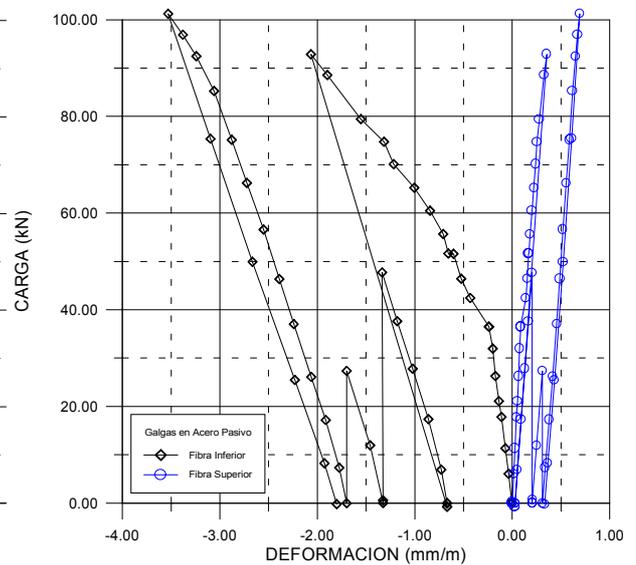


Figura 4.42 Evolución de la deformación en centro luz vano 1.

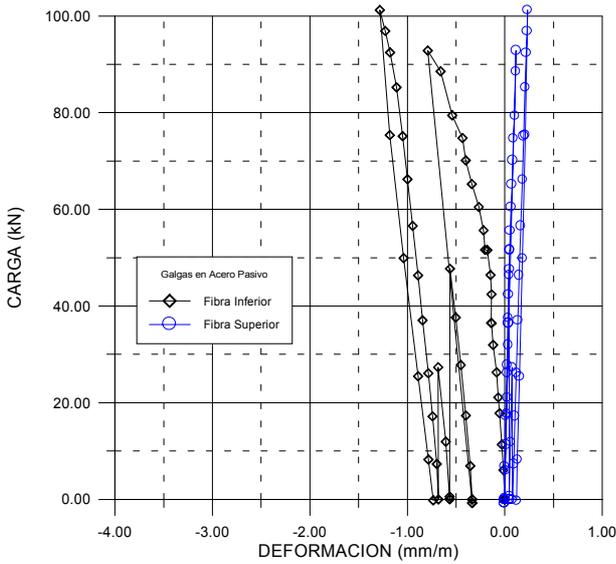


Figura 4.43 Evolución de la deformación de la sección centro luz vano 2.

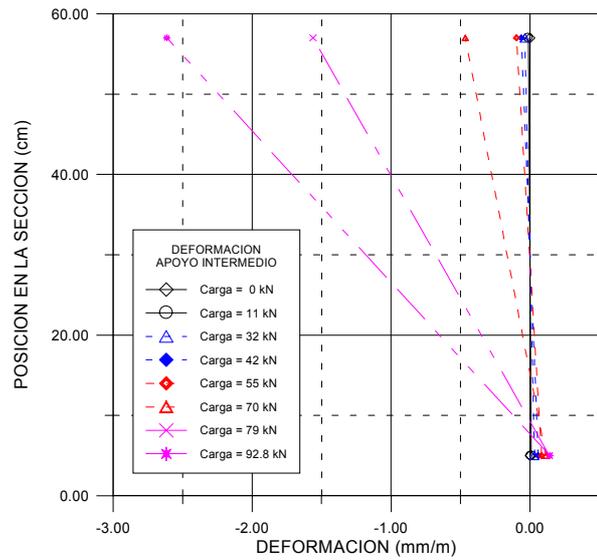


Figura 4.44 Evolución de la deformada de la sección en apoyo central (Ciclo 1).

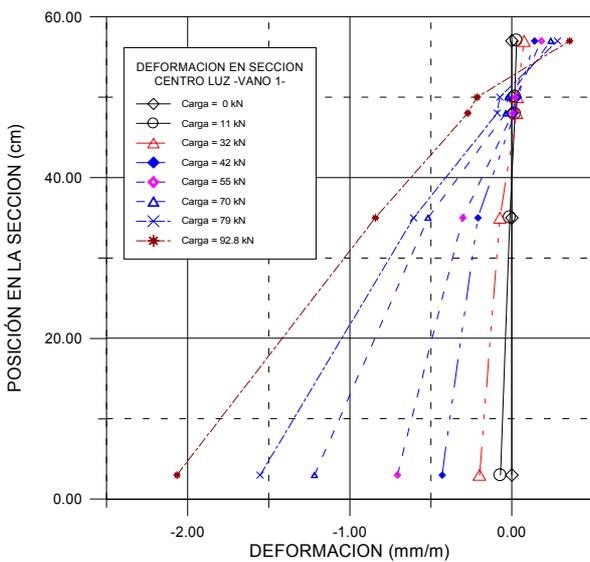


Figura 4.45 Evolución de la deformada de la sección centro luz vano 1 (Ciclo 1).

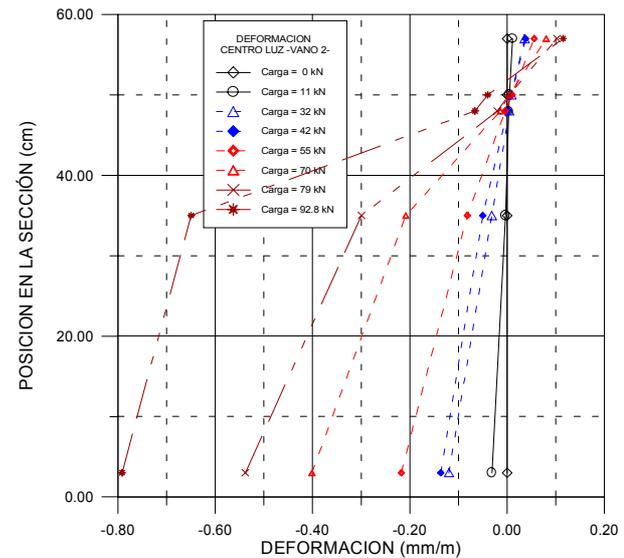


Figura 4.46 Evolución de la deformada en centro luz vano 2 (Ciclo 1).

4.4.6 Ensayos sobre modelo de puente: VHA1_b

4.4.6.1 - Antecedentes

A continuación se plantea el segundo ensayo de la serie, en el cual el modelo ensayado anteriormente (VHA1_a) es reparado sustituyendo el acero pasivo por fibras de carbono.

4.4.6.2 - Objetivo del plan de Ensayo

Esta fase tiene por objeto determinar la capacidad última en rotura de las diferentes secciones del modelo de puente reparado. En el presente caso, se utiliza el mismo modelo de hormigón armado utilizado en el ensayo VHA1_a, reparándolo y cargándolo hasta rotura mediante el estudio de la respuesta estructural a flexión. Con los valores experimentales se plantea verificar la utilización de fibras de carbono en zonas donde se han cortado las barras de acero pasivo, viendo si dichas fibras pueden llegar a ser un sustituto eficaz de dichas armaduras.

Se mantiene para el efecto, el esquema de cargas ya utilizado, el cual permite reproducir ésta situación particular de esfuerzos; buscando la flexión máxima negativa en el apoyo central, posicionando para ello, una carga “2Q” en centro luz del vano uno, y dos cargas “Q” a 2.40 m de los apoyos en el vano dos.(ver figura 4.47)

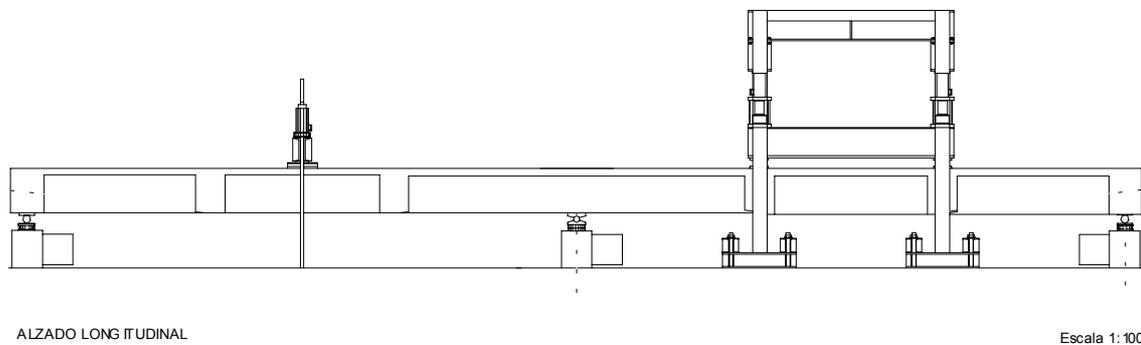


Figura 4.47 Alzado general del ensayo VHA1_b

4.4.6.3 - Planteamiento y descripción del ensayo

Descripción del modelo ensayado:

El elemento, de longitud igual a 14.40 m esta compuesta por una viga continua de dos vanos de 7.20 m de luz cada uno. La sección es de tipo Cajón, con canto constante de 0.60 m. es la misma que la del ensayo anterior (ver figuras 4.32 y 4.33)

4.4.6.3.i Trabajos preliminares

En primer lugar para la preparación del ensayo y con la ayuda de gatos ENERPAC de 900 kN se recuperaron las flechas remanentes del ensayo anterior; se situaron también los apeos provisionales para los dos tramos de la viga previa a la reparación. De la misma manera se procedió a quitar el hormigón en mal estado y cortar las barras de acero pasivo en la zona superior de apoyo intermedio y fibra inferior en sección de centro luz vano 1; quedando en ambas zonas bloques a hormigonar “in situ”. Estos trabajos se muestran en las fotografías 4.33 y 4.34. Se dejaron las Galgas Extensométricas embebidas en la parte inferior de la sección de hormigón; del apoyo intermedio ya que su funcionamiento era correcto.



Fotografía 4.33 Preparación del hormigón y el acero pasivo en centro luz vano 1.



Fotografía 4.34 Preparación del hormigón y el acero en apoyo intermedio.

4.4.6.3.ii Preparación del modelo

Posteriormente, se procedió a preparar el encofrado para verter microhormigón de reparación autonivelante y sin retracción en ambas secciones de la viga (centro luz vano 1 y apoyo intermedio). También se prepararon las zonas donde se rompieron algunas galgas extensométricas, principalmente galgas de hormigón PL-90 1Y. Así mismo, se prepararon las superficies de las fisuras para su posterior inyección con resina epoxi.

Para la sección de vano 1, se utilizó un mortero de reparación tixotrópico reforzado con fibras.

4.4.6.3.iii Reparación del puente

Una vez preparada la viga, se procedió a hormigonar y reparar las zonas dañadas, también se colocaron los inyectores, se sellaron y posteriormente se inyectaron las fisuras. (ver fotos 4.35 y 4.36)



Fotografía 4.35 Preparación y sellado de fisuras en sección de centro luz vano 1.



Fotografía 4.36 Vista inferior de los inyectores, fisuras selladas y rehormigonado.

El las zonas de momento negativo y positivos máximos se abujardó el hormigón para la colocación de la fibra de carbono. (ver fotos 4.37 y 4.38 y figura 4.48) El cálculo del refuerzo y el procedimiento de pegado pueden verse en los Anejos 9 y 10 respectivamente.



Fotografía 4.37 Preparación superficial del hormigón.



Fotografía 4.38 Vista de la colocación de la fibra de carbono en el apoyo intermedio.

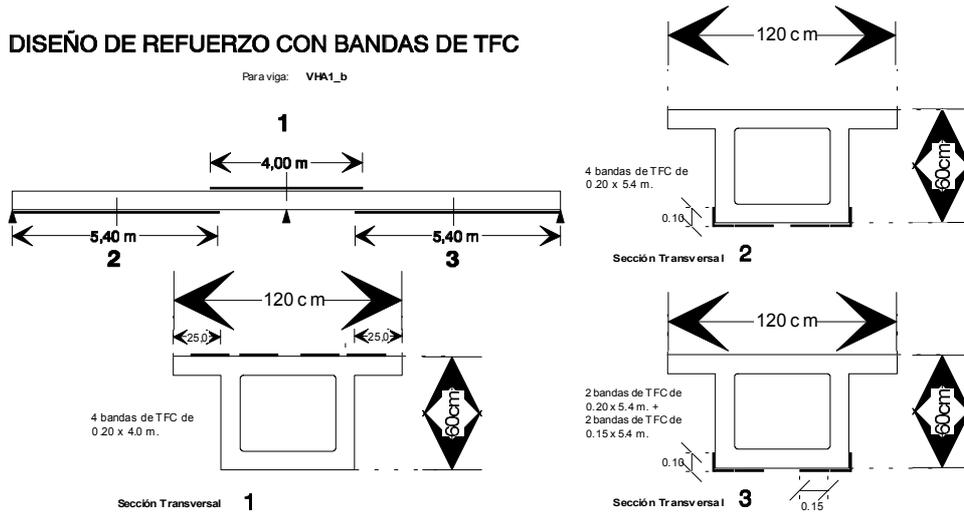


Figura 4.48 Distribución de las bandas de Tejido de Fibra de Carbono

4.4.6.4 - Medios de carga e Instrumentación

Como se ha dicho con anterioridad, la introducción de las cargas se realizó de manera similar al ensayo VHA1_a; es decir, con 2 pórticos de carga con el mismo sistema de gatos ENERPAC de 600kN. Las células de presión son las mismas que controlaron la magnitud de las cargas del ensayo anterior (ver figura 4.49).

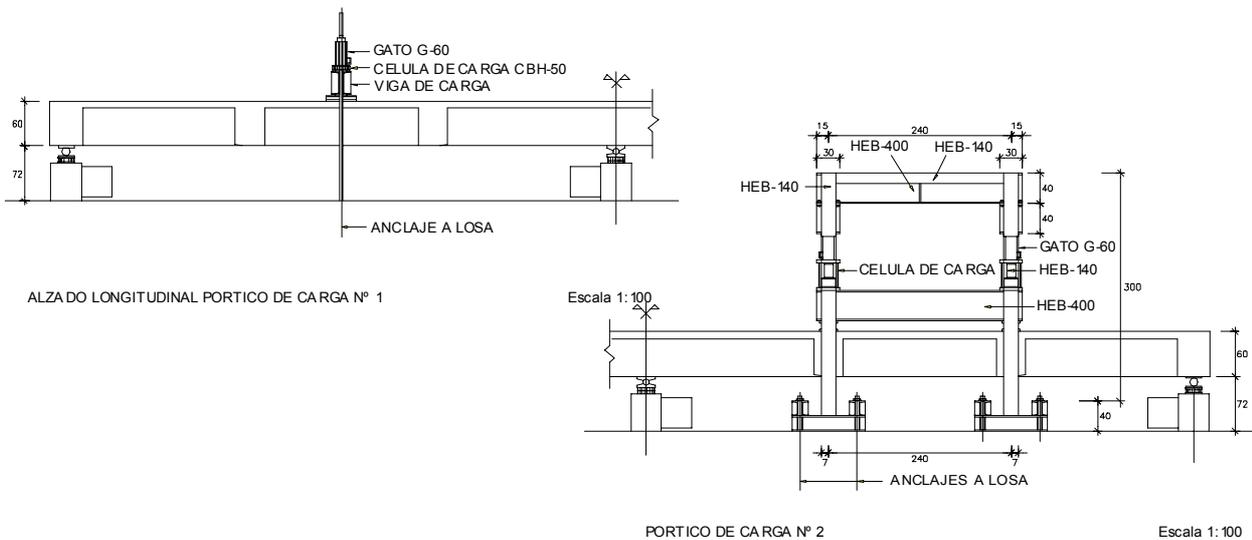


Figura 4.49 Pórticos de carga utilizados durante el ensayo VHA1_b

Instrumentación

Se repitió la instrumentación utilizada en la viga original y a la distribución de canales del ensayo anterior, se le agregaron los canales necesarios para la medición de las deformaciones de las fibras de carbono. A partir de esto se tienen:

DAU	MC	CODIGO	TIPO	USO	NOMBRE ARCHIVO	POSICIÓN
10	11	GP3	Gdga	Acero pasivo	@Gdgdga	C.L. Vano 1. fibraSup.
11	12	GP4	Gdga	Acero pasivo	@Gdgdga	C.L. Vano 1. fibraSup.
12	13	GP5	Gdga	Acero pasivo	@Gdgdgb	C.L. Vano 2. fibraInf.
13	14	GP6	Gdga	Acero pasivo	@Gdgdgb	C.L. Vano 2. fibraInf.
14	15	GP7	Gdga	Acero pasivo	@Gdgdgb	C.L. Vano 2. fibraSup.
15	16	GP8	Gdga	Acero pasivo	@Gdgdgb	C.L. Vano 2. fibraSup.
18	*	Volts.		Alimentación		M.C.
19	*	Volts.		Alimentación		M.C.
21	20	GC1	Gdga	Cortante	@Gdcco	Apoyo exterior L. visto
22	21	GC2	Gdga	Cortante	@Gdcco	Apoyo exterior L. Oculito
23	22	GC3	Gdga	Cortante	@Gdcco	Apoyo exterior L. visto
24	23	GC4	Gdga	Cortante	@Gdcco	Apoyo exterior L. Oculito
25	24	GH1	Gdga	Hormigón	@Gdgdga	C.L. Vano 1
26	25	GH2	Gdga	Hormigón	@Gdgdga	C.L. Vano 1
27	26	GH3	Gdga	Hormigón	@Gdgdga	C.L. Vano 1
28	27	GH4	Gdga	Hormigón	@Gdgdga	C.L. Vano 1
29	28	GH5	Gdga	Hormigón	@Gdgdga	C.L. Vano 1
30	29	GH6	Gdga	Hormigón	@Gdgdga	C.L. Vano 1
31	30	GH7	Gdga	Hormigón	@Gdgdgb	C.L. Vano 2
32	31	GH8	Gdga	Hormigón	@Gdgdgb	C.L. Vano 2
33	32	GH9	Gdga	Hormigón	@Gdgdgb	C.L. Vano 2
34	33	GH10	Gdga	Hormigón	@Gdgdgb	C.L. Vano 2
35	34	GH11	Gdga	Hormigón	@Gdgdgb	C.L. Vano 2
36	35	GH12	Gdga	Hormigón	@Gdgdgb	C.L. Vano 2
37	36	HE1	Embebida	Hormigón	@Gdgc_p y @Horem	Apoyo Intermedio
38	*	Volts.		Alimentación		M.C.
39	*	Volts.		Alimentación		M.C.
40	37	HE2	Embebida	Hormigón	@Gdgc_p y @Horem	Apoyo Intermedio
41	38	HE3	Embebida	Hormigón	@Gdgc_p y @Horem	Apoyo Intermedio
42	39	FC1	Gdga	En fibra	@Gdgifn	Apoyo Intermedio -Neg.
43	40	FC2	Gdga	En fibra	@Gdgifn	Apoyo Intermedio -Neg.
44	41	FC3	Gdga	En fibra	@Gdgifn	Apoyo Intermedio -Neg.
45	42	FC4	Gdga	En fibra	@Gdgifn	Apoyo Intermedio -Neg.
46	43	FC5	Gdga	En fibra	@Gdgifn	Apoyo Intermedio -Neg.
47	44	FC6	Gdga	En fibra	@Gdgifp	Centro luz vano 1 -Pos.
48	45	FC7	Gdga	En fibra	@Gdgifp	Centro luz vano 1 -Pos.
49	46	FC8	Gdga	En fibra	@Gdgifp	Centro luz vano 1 -Pos.
50	47	FC9	Gdga	En fibra	@Gdgifp	Centro luz vano 1 -Pos.
51	48	FC10	Gdga	En fibra	@Gdgifp	Centro luz vano 1 -Pos.
52	49	FC11	Gdga	En fibra	@Gdgifp	Centro luz vano 2 -Pos.
53	50	FC12	Gdga	En fibra	@Gdgifp	Centro luz vano 2 -Pos.
54	51	FC13	Gdga	En fibra	@Gdgifp	Centro luz vano 2 -Pos.
55	52	FC14	Gdga	En fibra	@Gdgifp	Centro luz vano 2 -Pos.
56	53	FC15	Gdga	En fibra	@Gdgifp	Centro luz vano 2 -Pos.
58	*	Volts.		Alimentación		M.C.
59	*	Volts.		Alimentación		M.C.
74	69	LC1	Célula	Gato	@C_cargg	Pórtico 2 -L. Izq.-
75	70	LC2	Célula	Gato	@C_cargg	Pórtico 2 -L. Der.-
76	71	LC3	Célula	Gato	@C_cargg	Pórtico 1 -L. visto
77	72	LC4	Célula	Gato	@C_cargg	Pórtico 1 -L. oculito
78	*	Volts.		Alimentación		
79	*	Volts.		Alimentación		
80	73	LC5	Célula	Carga	@C_carga	Apoyo 1 -L. visto
81	74	LC6	Célula	Carga	@C_carga	Apoyo 1 -L. oculito
82	75	LC7	Célula	Carga	@C_carga	Apoyo Inter. -L. visto
83	76	LC8	Célula	Carga	@C_carga	Apoyo Inter. -L. oculito
84	77	LC9	Célula	Carga	@C_carga	Apoyo 2 -L. visto
85	78	LC10	Célula	Carga	@C_carga	Apoyo 2 -L. oculito
88	15(81)	L1	Lvatf	Flecha	@Lvdf_f	Apoyo 1
89	16(82)	L2	Lvatf	Flecha	@Lvdf_f	C. L. Vano 1
90	17(83)	L3	Lvatf	Flecha	@Lvdf_f	Apoyo Intermedio V.1
91	18(84)	L4	Lvatf	Flecha	@Lvdf_f	Apoyo Intermedio V.2
92	19(85)	L5	Lvatf	Flecha	@Lvdf_f	C.L. Vano 2
93	20(86)	L6	Lvatf	Flecha	@Lvdf_f	Apoyo 2
98	*	Volts.		Alimentación		M.C.
99	*	Volts.		Alimentación		M.C.

Tabla 4.10

Distribución de los canales de adquisición de datos, nombre de los ficheros asignados y posición en la viga ensayada VHA1_b.

De la misma manera que en el ensayo anterior se agrupan los transductores y las galgas extensométricas en los bloques de: fuerzas externas, movimientos de la viga, deformaciones seccionales de la viga y como nueva agrupación las de deformaciones en fibras de carbono. La distribución de todos los grupos puede verse en las gráficas 4.36, 4.37, 4.38 y 4.50.

Deformaciones en fibras de carbono:

Se ubicaron galgas extensométricas tal como se muestra en la figura 4.50 para registrar las deformaciones que sufrieron las fibras, observando principalmente las que coincidían con el eje de apoyo intermedio y los centros de luz de vanos. Adicionalmente se distribuyeron galgas en otros puntos para observar el comportamiento del fenómeno de adherencia de las fibras. (ver la planta de la figura 4.50).

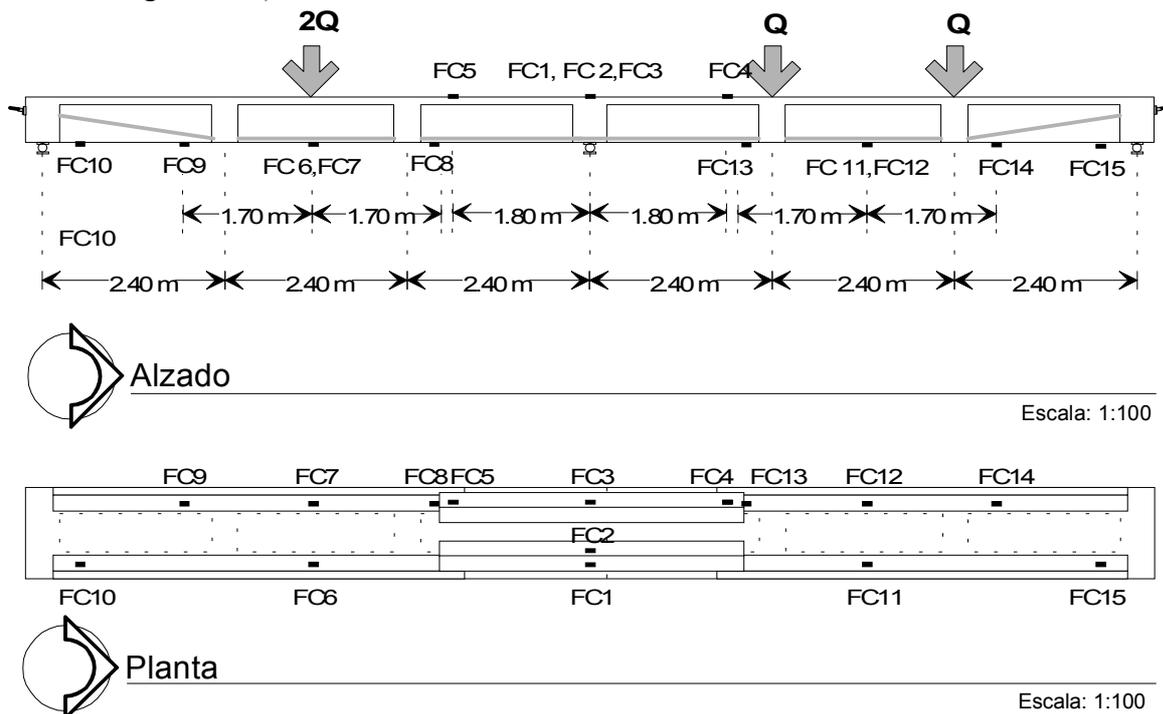


Figura 4.50 Distribución de galgas en el Tejido de Fibra de Carbono

4.4.6.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga

El ensayo se realizó en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras, el día 23 de marzo de 1998.

En este ensayo se realizó un solo ciclo de carga y descarga. El proceso de carga adoptado fue similar al del ensayo anterior. Se efectuó aplicando escalones de carga de 5 bares ($\approx 4,5$ kN) cada uno. Luego se efectuaban las lecturas de la instrumentación correspondiente, por medio del sistema de adquisición de datos. Durante el ensayo se fijaron algunos parámetros de control tales como: La carga aplicada, la deformación máxima en fibra de carbono en momentos negativos y hormigón del apoyo intermedio y la gráfica Carga - flecha del vano 1, también la deformación de la fibra de carbono en centro luz vano 1; los cuales fueron en todo momento observados para registrar cualquier incidencia en el desarrollo del ensayo. La fisuración fue apreciable a simple vista a partir de los 85 kN de carga por gato, valor muy superior al de la aparición de las fisuras en el ensayo anterior. Ya que se trataba de una viga de hormigón armado, y debido a la colocación de las fibras de carbono, dicha fisuración surgió primero en la zona de flexión

negativa y casi simultáneamente en zona de positivos en el vano 1. Es necesario mencionar que la apertura de fisuras fue muy bien controlada por la fibra de carbono.

Un instante antes de la rotura se apreció la delaminación del hormigón juntamente con la fibra. La rotura se produjo, por alargamiento del tejido de fibra de carbono y al efecto del punzonamiento debido al giro entre vanos, lo que generó un desnivel apreciable entre los bordes de la fisura en la parte superior de la sección de apoyo intermedio. Esta diferencia de nivel generó un empuje al vacío del tejido, provocando la aparición de tensiones normales perpendiculares al mismo que acabaron desgarrando horizontal el hormigón, juntamente con un efecto de cizalla en la fibra dado su poco espesor y rigidez (fotografías 4.40 y 4.41). Casi simultáneamente a la rotura por el apoyo intermedio, se produjo la rotura en el vano 1. En este caso debida a una longitud de anclaje insuficiente, que provocó la aparición de una gran fisura, empezando por la zona final del tejido y prolongándose por el alma de la viga, (fotografía 4.39). En la fotografía 4.39 puede verse también la enorme deformación del elemento antes de producirse la rotura.

Durante la aplicación de cada escalón de carga hasta la rotura de las fibras de carbono, la lectura de carga de los gatos se realizó por medio de un transductor de presión del sistema y las células de carga permitieron establecer el instante de la rotura; que se alcanzó a los 98,4 kN, siendo este límite superior al alcanzado en el ensayo en estado original que fue de 92,8 kN en su primer ciclo.



Fotografía 4.39 Aspecto general de la viga después del ensayo.



Fotografía 4.40 Vista de la rotura de la fibra de carbono.



Fotografía 4.41 Vista del apoyo central después del ensayo.

4.4.6.6 - Resultados

Los resultados figuran resumidos en los anejos en forma de los registros de datos. Los resultados más relevantes se presentan en las relaciones siguientes:

- i) Curva Carga - Flecha
- ii) Curva Carga - Reacciones en apoyos
- iii) Curva Carga - Deformación en apoyo intermedio
- iv) Curva Carga - Deformación en secciones de centro luz
- v) Evolución de la deformación de las secciones
- vi) Deformación en fibras de carbono

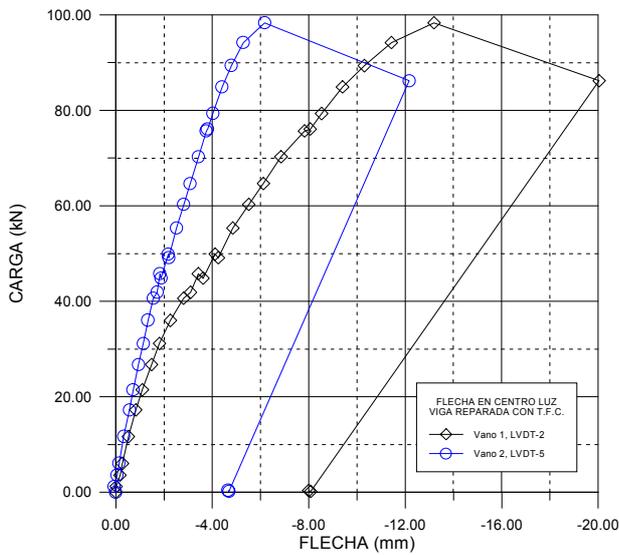


Figura 4.51 Evolución de la flecha en centro luz en vanos 1 y 2

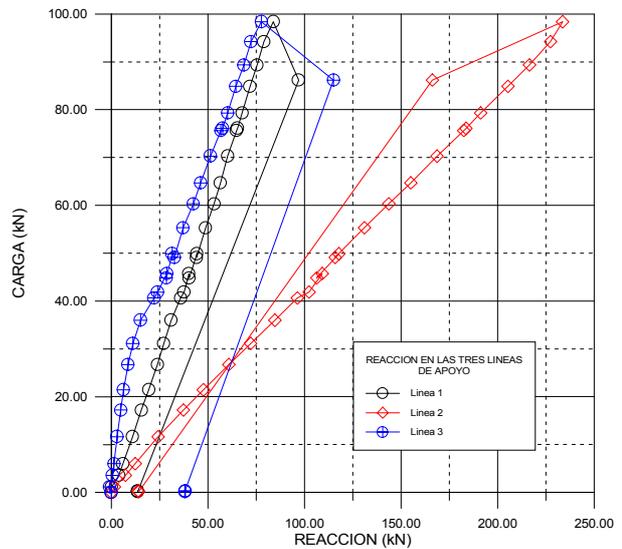


Figura 4.52 Evolución de las reacciones en las tres líneas de apoyo.

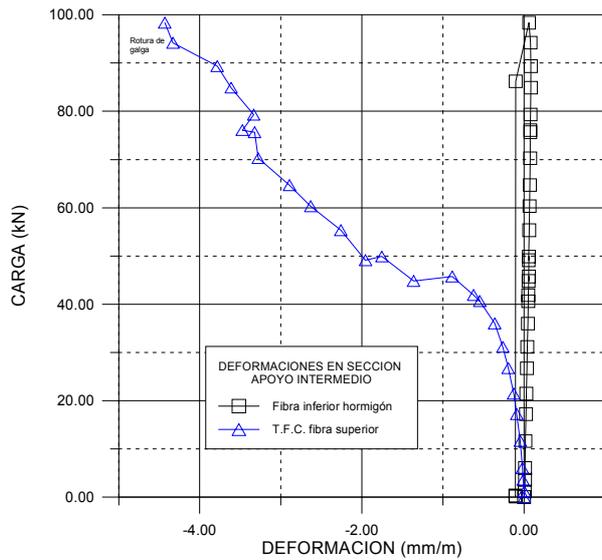


Figura 4.53 Evolución de la deformación de la sección en apoyo intermedio. (TFC = tejido de fibra de carbono)

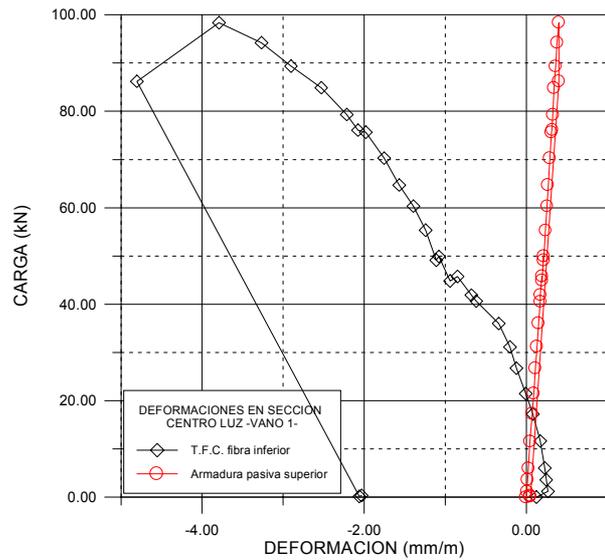


Figura 4.54 Evolución de la deformación en centro luz vano 1.

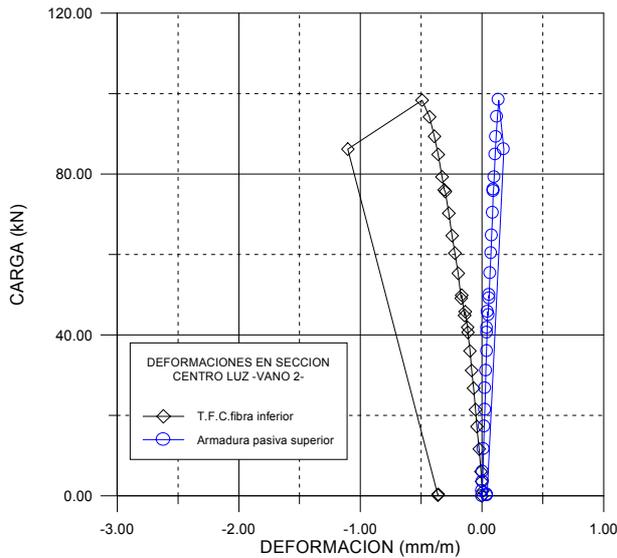


Figura 4.55 Evolución de la deformación de la sección centro luz vano 2.

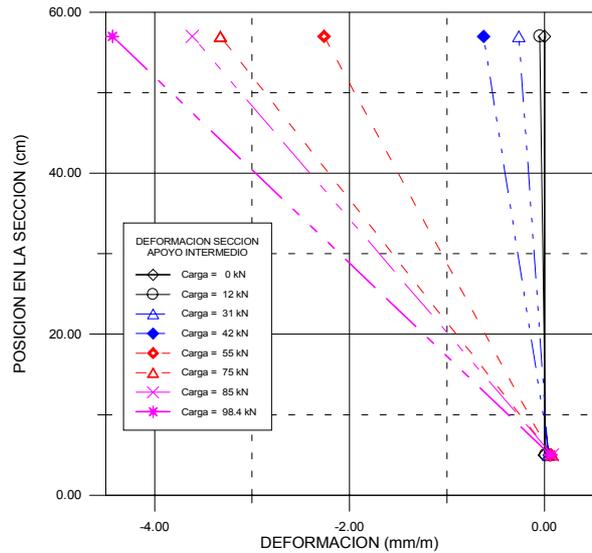


Figura 4.56 Evolución de la deformación en el apoyo central.

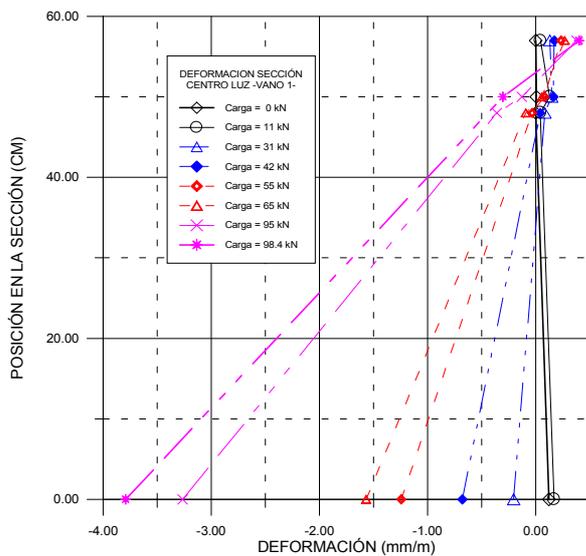


Figura 4.57 Evolución de la deformación de la sección centro luz vano 1.

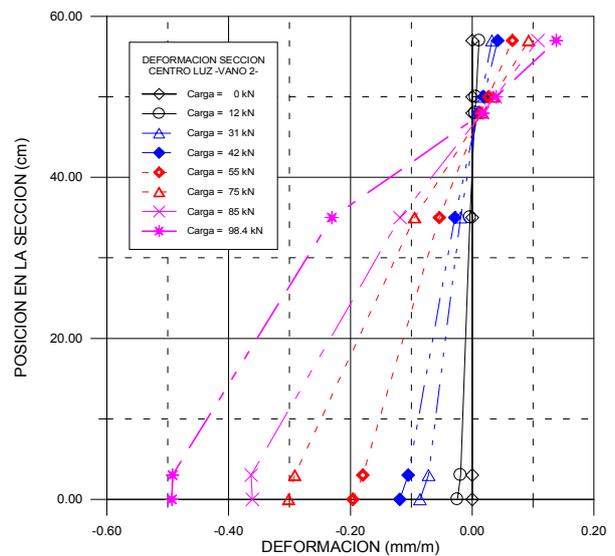


Figura 4.58 Evolución de la deformación en centro luz vano 2.

En la figura 4.58 es destacable el hecho de que a pesar de que las deformaciones se mantienen en un plano para niveles bajos de la carga, esto ya no es así para una carga de aproximadamente 60kN, es decir, aproximadamente un 60% de la carga última. Parece pues que, para estados de carga cercanos a la rotura sería discutible la hipótesis de un plano de deformaciones que se mantiene plano, y por tanto la hipótesis de compatibilidad de deformaciones entre hormigón y material de refuerzo. Parece pues que a nivel del interfase hormigón – material compuesto, la fibra tiene una deformación menor que la que le correspondería suponiendo que las secciones planas se mantienen planas en rotura. Este es un hecho que volveremos a ver repetido en el ensayo siguiente, en el cual, gracias a la utilización de sensores de fibra óptica, pudo medirse el estado de deformaciones longitudinales en el interfase hormigón-fibra de refuerzo (ver figura 4.110). En la figura 4.57, correspondiente al vano 1, no

es observable dicho fenómeno ya que no esta instrumentada ninguna armadura en la zona inferior de la sección central, puesto que la misma se cortó tal como se ha comentado en 4.4.6.3.i (ver fotografía 4.33).

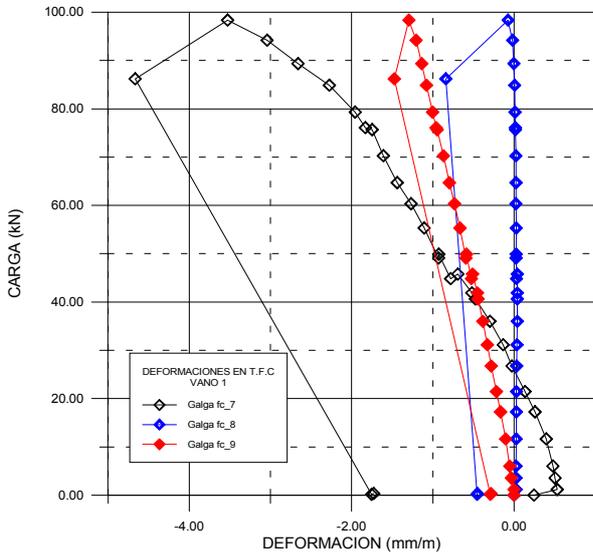


Figura 4.59 Evolución de la deformación del T.F.C. en vano 1 (ver figura 4.50).

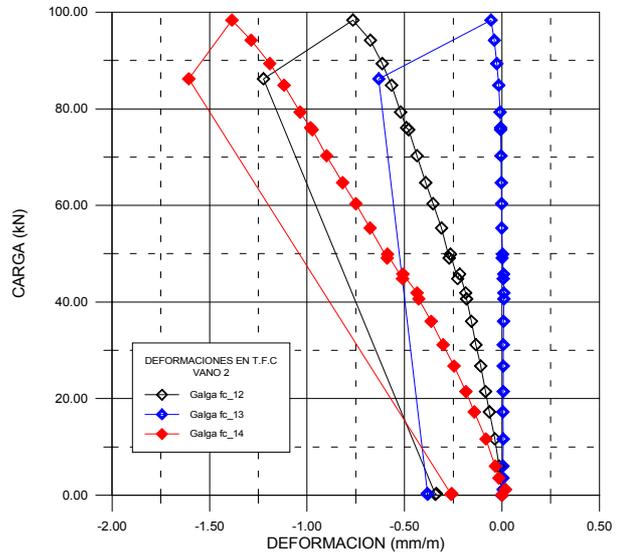


Figura 4.60 Evolución de la deformación del T.F.C. en vano 2 (ver figura 4.50).

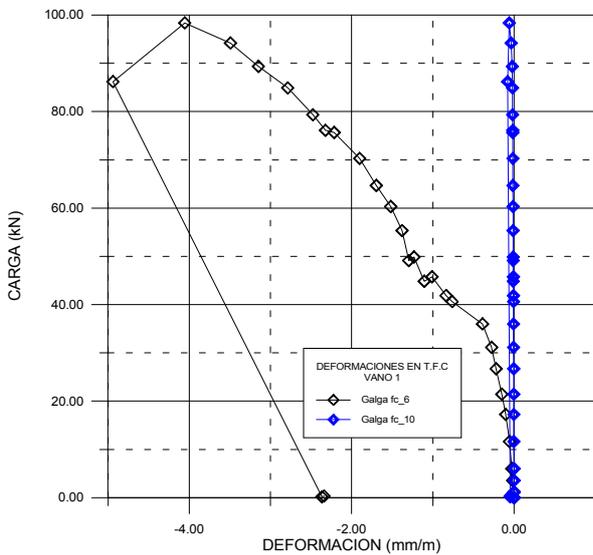


Figura 4.61 Evolución de la deformación del T.F.C. en el vano 1. (ver figura 4.50)

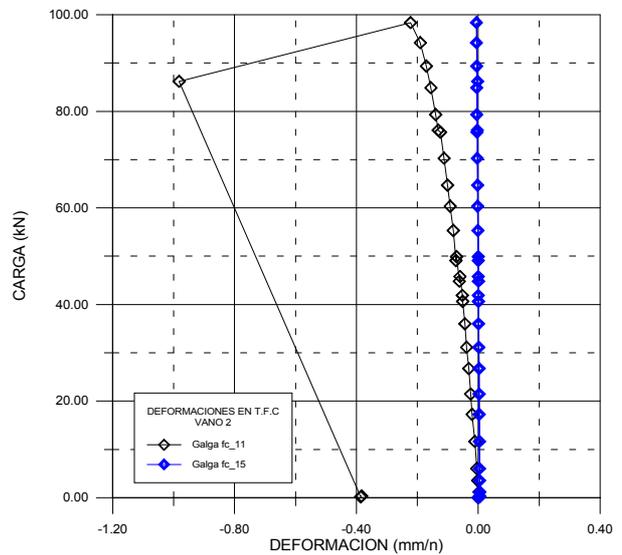


Figura 4.62 Evolución de la deformación del T.F.C. en el vano 2. (ver figura 4.50)

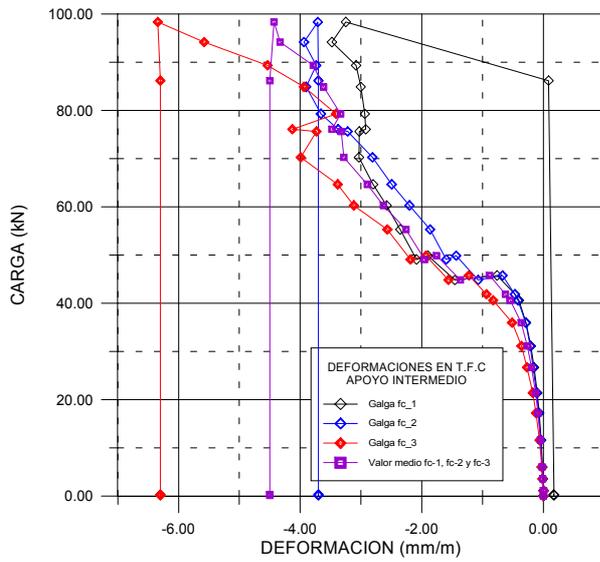


Figura 4.63 Evolución de la deformación del T.F.C. en apoyo intermedio.

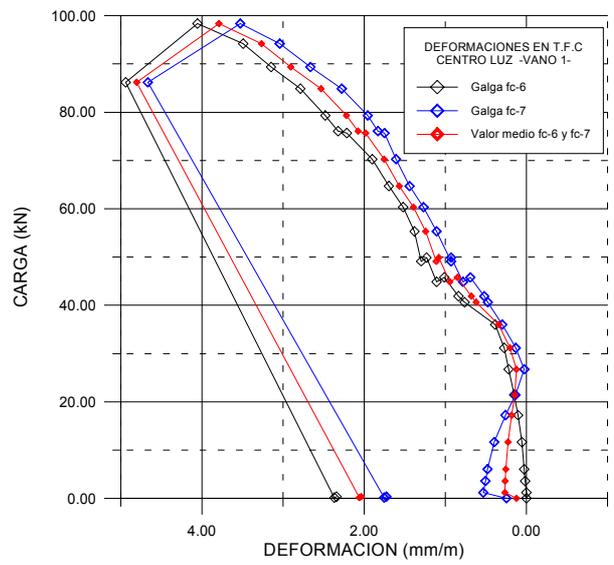


Figura 4.64 Evolución de la deformación del T.F.C. en centro luz del vano 1

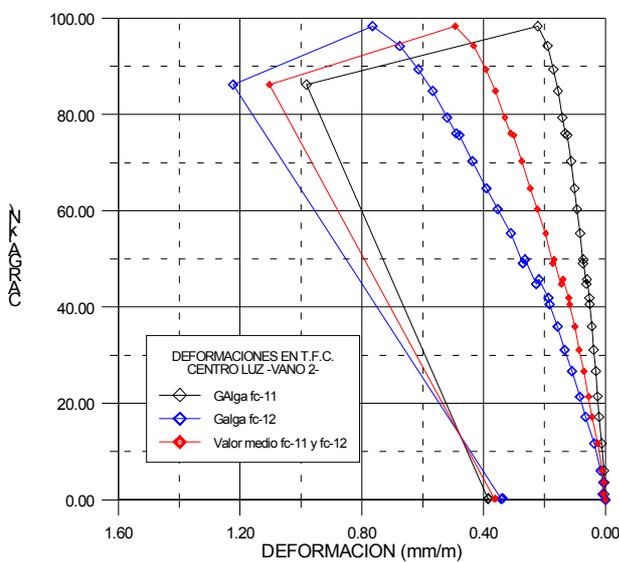


Figura 4.65 Evolución de la deformación del T.F.C. en centro luz del vano 2.

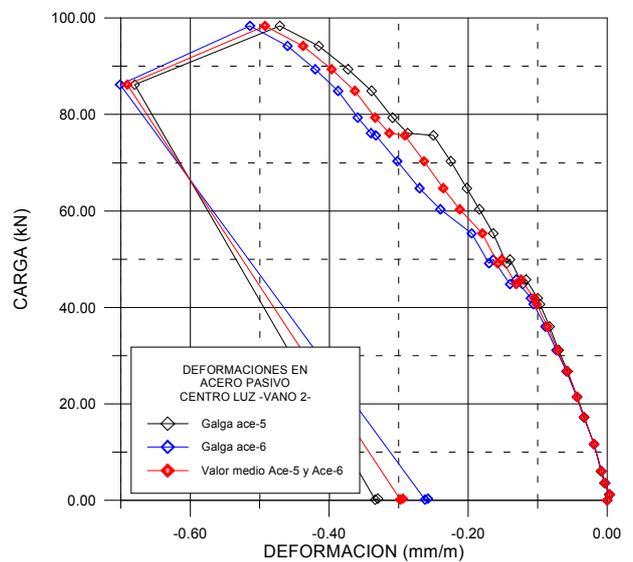


Figura 4.66 Evolución de la deformación del acero pasivo inferior en vano 2

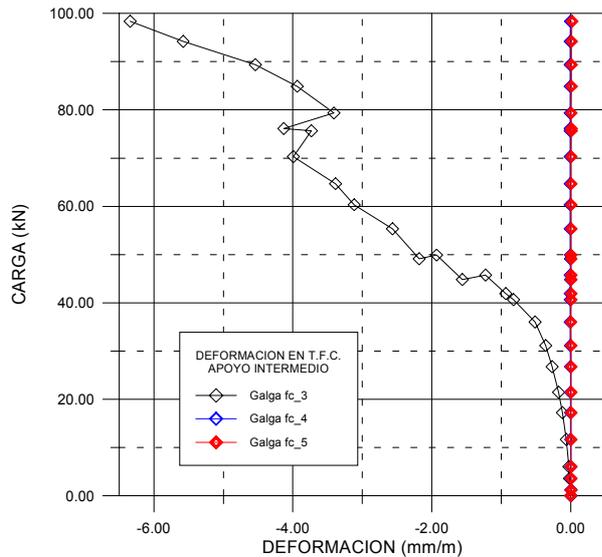


Figura 4.67 Evolución de la deformación del T.F.C. en centro luz del vano 2.

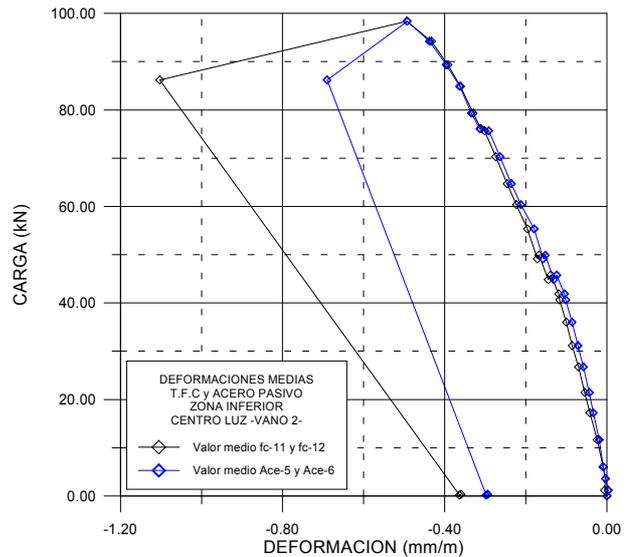


Figura 4.68 Comparativa entre T.F.C. y acero pasivo inferior en vano 2 (ver figuras 4.65 y 4.66)

En las figuras 4.63 a 4.65, es de destacar el hecho de que si bien hay una correcta simetría de deformaciones en el apoyo intermedio y el vano 1, ello no es así en el vano 2, lo cual puede ser debido a una aplicación no perfectamente centrada de las cargas en dicho vano, introduciendo efectos de torsión en el mismo.

4.4.7 Ensayos sobre modelo de puente: **VHA1_c** 2 vanos casi isostáticos (vanos 1 y 2)

4.4.7.1 - Antecedentes

Después del primer ensayo sobre la viga VHA1_b y aprovechando que prácticamente toda la instrumentación estaba en buen estado y los dos vanos del puente no presentaban daños de excesiva consideración se optó por hacer un segundo ensayo a rotura.

4.4.7.2 - Objetivo del plan de Ensayo

El objetivo de este ensayo es determinar, tras la rotura en la sección de apoyo central, la capacidad última en rotura de las secciones de centro luz de los vanos 1 y 2; por medio del estudio de la respuesta estructural a flexión. Asumiendo que la viga ya ha perdido parcialmente su hiperestaticidad, se trata por lo tanto, del ensayo de dos vanos isostáticos reforzados con fibra de carbono en su zona inferior del vano central.

El posicionamiento de las cargas “2Q” y “Q” es el mismo que en el ensayo VHA1_b, de manera que se cargan los dos vanos a la vez.

4.4.7.3 - Planteamiento y descripción del ensayo

Descripción del modelo ensayado:

La viga, de longitud igual a 14.40 m fisurada en la zona de apoyo central, presenta unas deformaciones remanentes importantes debidas al ensayo anterior, por ejemplo, las flechas residuales son de 8 mm en vano 1 y 4 mm en vano 2.

4.4.7.3.i Trabajos preliminares

Prácticamente no se desarrollaron trabajos preliminares, simplemente se preparó el sistema de adquisición de datos para el nuevo ensayo.

4.4.7.3.ii Preparación del modelo

Se determinó la posición de algunas galgas extensométricas rotas durante el ensayo previo, para no ser tenidas en cuenta en la lectura de deformaciones.

4.4.7.4 - Medios de carga e Instrumentación

Como se ha dicho con anterioridad, la introducción de las cargas se realizó de manera similar al ensayo VHA1_b; con 2 pórticos de carga con el mismo sistema de gatos ENERPAC de 600kN. Las células de presión son las mismas que controlaron la magnitud de las cargas del ensayo anterior. (ver figura 4.69)

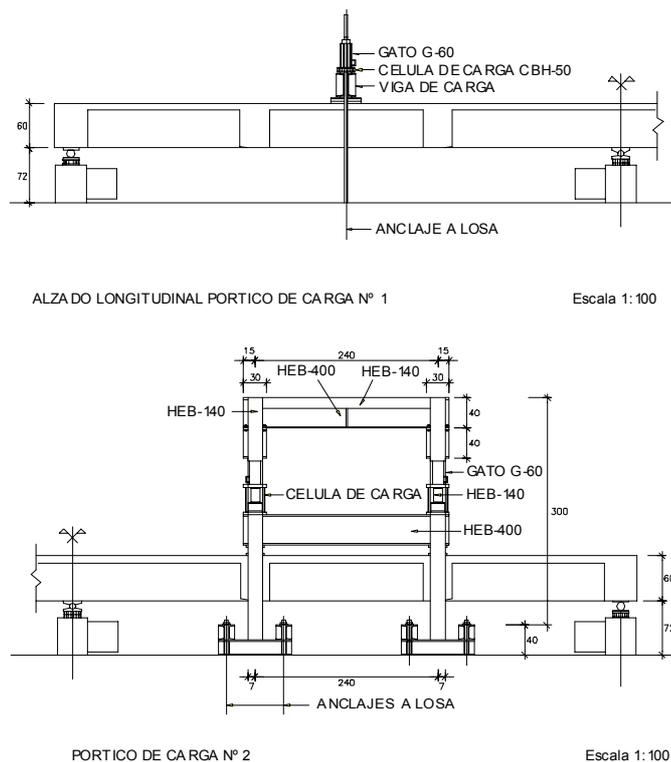


Figura 4.69 Pórticos de carga utilizados en el ensayo VHA1_c

De la misma manera que en el ensayo ya apuntado se mantienen las agrupaciones de los transductores y las galgas extensométricas en bloques de: Fuerzas externas, Movimientos de la viga, Deformaciones seccionales de la viga y las Deformaciones en fibras de carbono.

La distribución de todos los grupos puede verse en las gráficas 4.36, 4.37 y 4.38.

Deformaciones en fibras de carbono:

Se dejaron las galgas extensométricas tal como se muestra en la figura 4.50 para registrar las deformaciones que sufrieron las fibras, observando principalmente las que coincidían con el eje de los centros de luz de vanos y no considerando las de la zona superior del apoyo, que habían quedado dañadas..

4.4.7.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga.

El ensayo se realizó en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras, el día 23 de marzo de 1998, inmediatamente después de haber realizado el ensayo VHA1_b.

En este ensayo se ejecutó un único ciclo de carga y descarga. El proceso adoptado fue similar al del ensayo anterior, efectuándose escalones de carga de 5 bares ($\approx 4,5$ kN) cada uno. Luego se realizaron las lecturas de la instrumentación correspondiente, por medio del sistema de adquisición de datos. Durante el ensayo se mantuvieron algunos parámetros de control tales como: La carga aplicada, la gráfica Carga - flecha del vano 1, también la deformación de la fibra de carbono en centro luz vano 1. Al tratarse de elementos de hormigón armado y debido a la colocación de las fibras de carbono, se observó que la fisuración fue bien controlada por las fibras de carbono. Dicha fisuración siguió incrementándose de manera leve en la zona de flexión positiva en el vano 1. En la zona de momentos positivos de vano 2, y debido al refuerzo en dicha sección, no se presentó ninguna fisura visible.

La rotura se produjo, por alargamiento del tejido de fibra de carbono en la sección centro luz del vano uno, donde se pudo apreciar la pérdida de parte apreciable de hormigón que quedaba adherida a las bandas de fibra. En este caso, no se presentó el efecto del punzonamiento debido al giro entre vanos tal como ocurrió en VHA1_b o por desnivelación entre labios de fisura, ya que la fisuración se encontraba bien controlada. Al tiempo que se aplicaron los escalones de carga hasta la rotura se mantuvo en observación las fibras de carbono. La lectura por medio de un transductor de presión del sistema de carga y las células de carga permitieron establecer el instante de la rotura que se alcanzó a los 96,97 kN, siendo éste límite inferior al alcanzado en el ensayo VHA1_b que fue de 98,4 kN, y superior al ensayo VHA1_a de la viga original..



Fotografía 4.42 Vista de la sección centro luz del vano 1 después del ensayo.



Fotografía 4.43 Vista de la rotura de la fibra de carbono en vano 1.



Fotografía 4.44 Vista de la sección de apoyo central después del ensayo.



Fotografía 4.45 Vista general de la deformada de la viga después del ensayo.

Las fotografías 4.42 a 4.45 muestran algunos momentos del ensayo. Las fotos 4.42 y 4.43 muestran el tipo de rotura por delaminación, fisurando horizontalmente el hormigón. A la vista de la foto 4.44 parece evidente que la hipótesis de ensayo en 2 vanos isostáticos es prácticamente correcta.

4.4.7.6 - Resultados

Los resultados figuran resumidos en los anejos en forma de los registros de datos y, los resultados más relevantes se presentan en las relaciones siguientes:

- i) Curva Carga - Flecha
- ii) Curva Carga - Reacciones en apoyos
- iii) Curva Carga - Deformación en apoyo intermedio
- iv) Curva Carga - Deformación en secciones de centro luz
- v) Evolución de la deformación de las secciones
- vi) Deformación en fibras de carbono

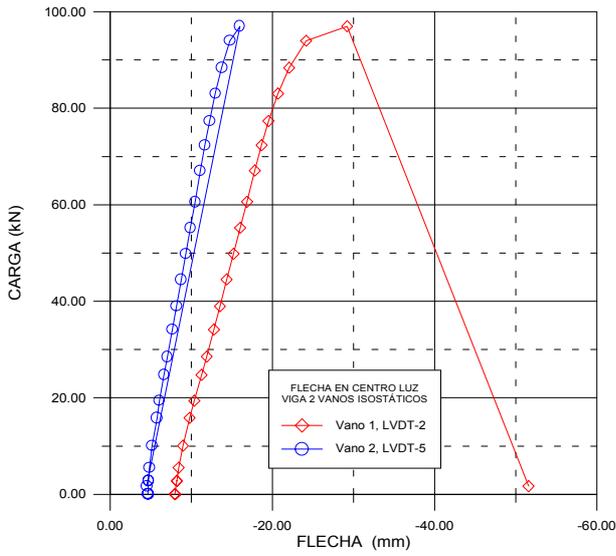


Figura 4.70 Evolución de la flecha en centro luz vanos 1 y 2.

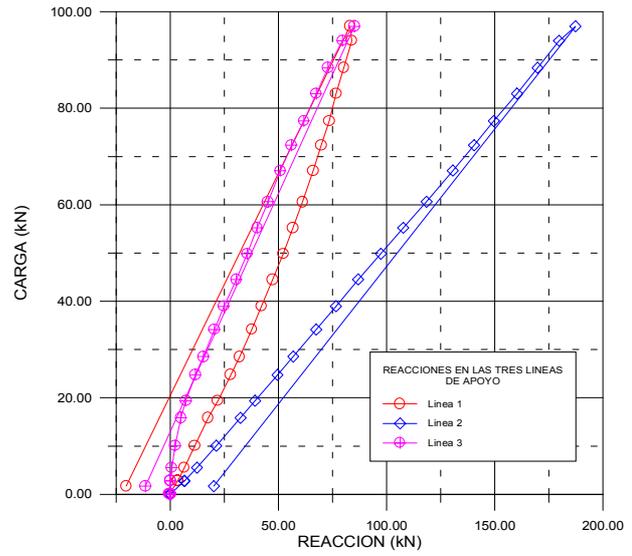


Figura 4.71 Evolución de las reacciones en las tres líneas de apoyo.

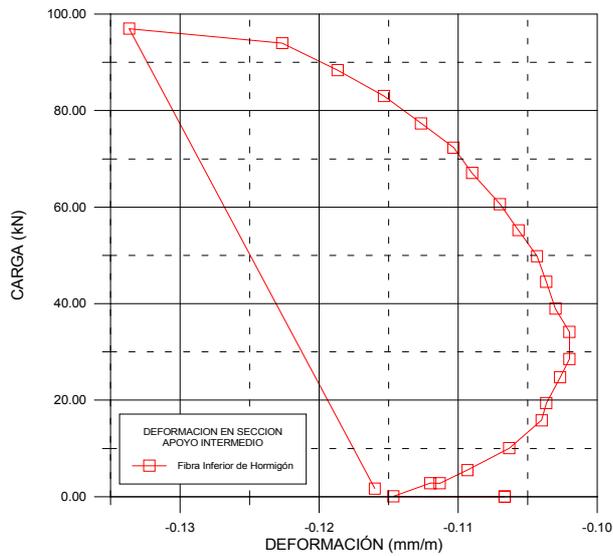


Figura 4.72 Evolución de la deformación de la fibra inferior en apoyo intermedio.

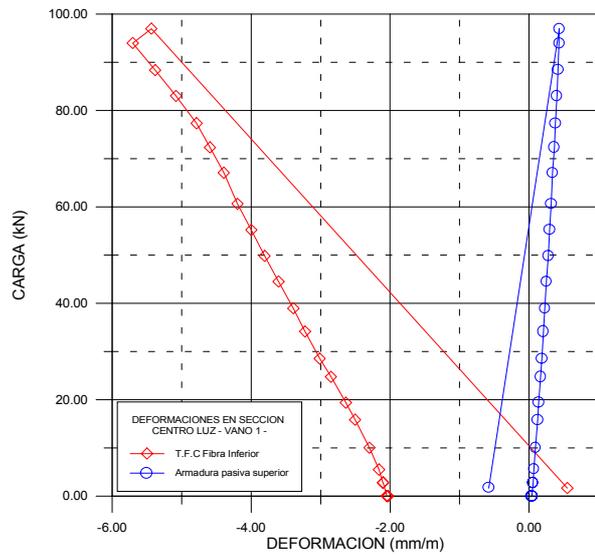


Figura 4.73 Evolución de la deformación en centro luz vano 1.

En las figuras 6.70, 4.74 y 4.78 puede verse como el vano 2 tiene un comportamiento prácticamente elástico y lineal durante todo el ensayo.

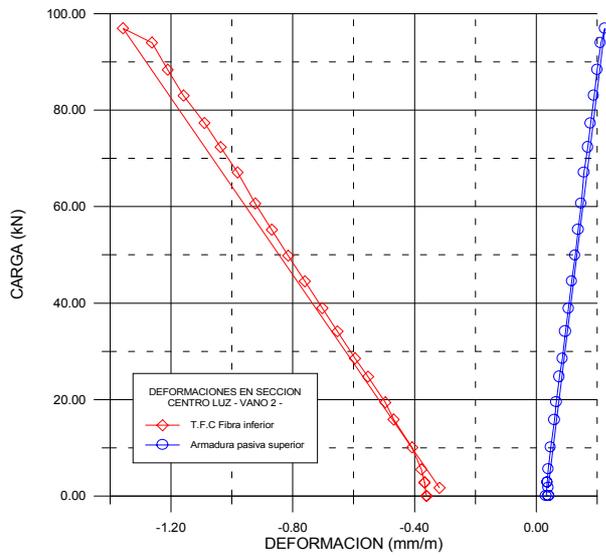


Figura 4.74 Evolución de la deformación de la sección centro luz vano 2.

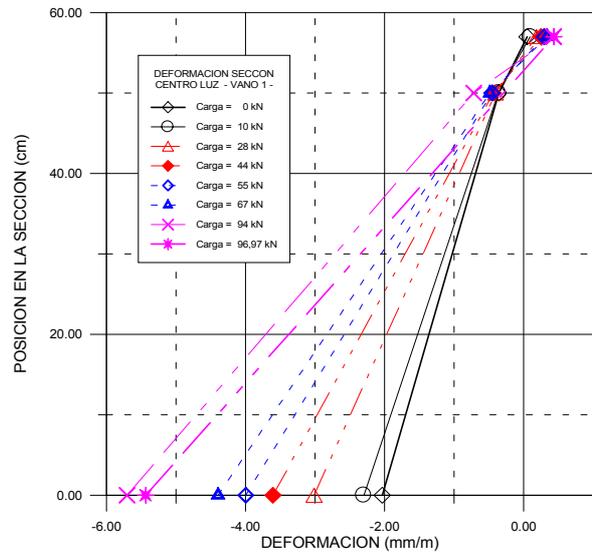


Figura 4.75 Evolución de la deformación de la sección centro luz vano 1.

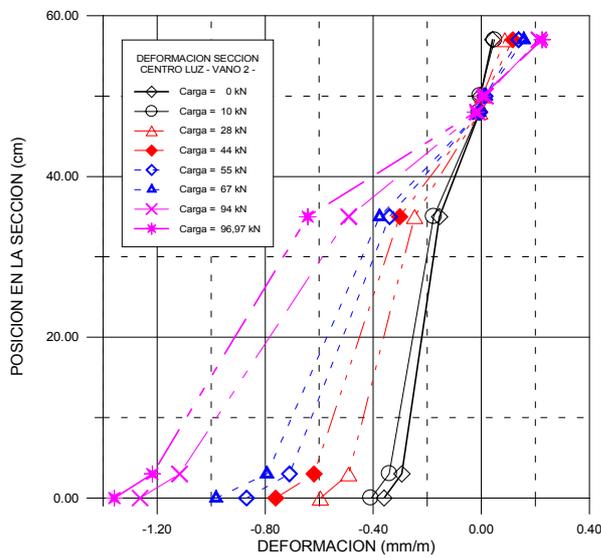


Figura 4.76 Evolución de la deformación de la sección centro luz vano 2.

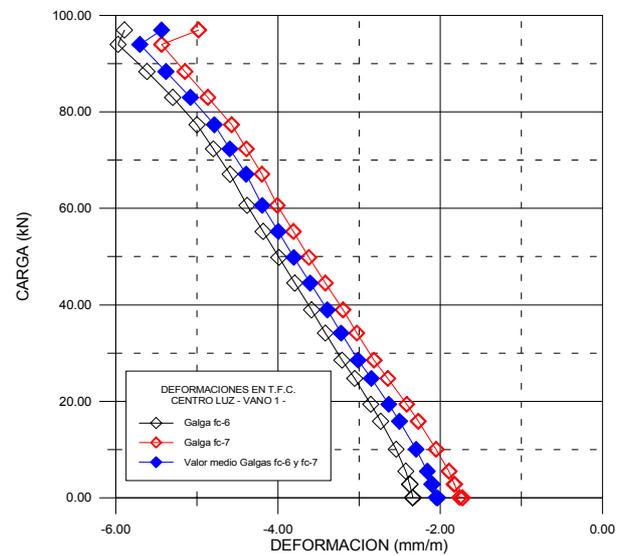


Figura 4.77 Evolución de la deformación del T.F.C. en centro luz vano 1.

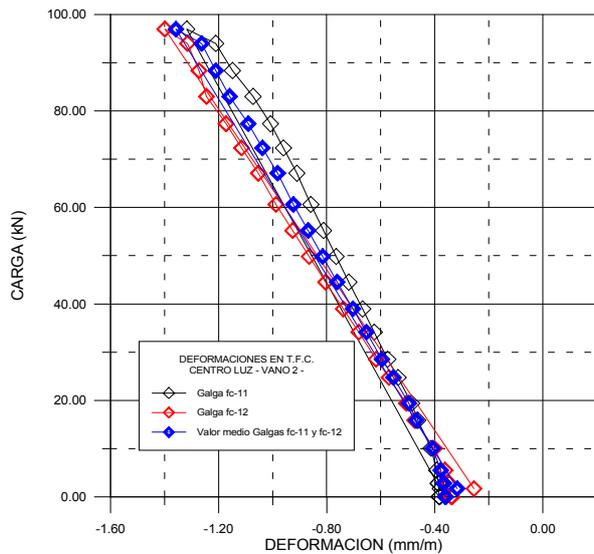


Figura 4.78 Evolución de la deformación del T.F.C. en centro luz vano 2.

Obsérvese como en este caso, en el vano 2 no se introducen efectos indeseados de torsión como ocurría en el ensayo anterior (compárese la figura 7.78 con la 4.65). También puede verse que los valores iniciales de las deformaciones en vano 1 y 2 y en apoyo intermedio incluyen las deformaciones remanentes del ensayo anterior VHA1_b; dicha representación permite observar el comportamiento de la estructura bajo distintos ciclos acumulados de carga.

4.4.8 Ensayos sobre modelo de puente: VHA1_d 1 vano isostático (vano 2)

4.4.8.1 - Antecedentes

Después del ensayo sobre la viga VHA1_c y utilizando prácticamente toda la instrumentación que estaba en buen estado se optó por hacer un tercer ensayo sobre el modelo de puente. Correspondiente al vano 2, que se encontraba todavía en bastante buen estado. En efecto, las figuras 4.7, 4.74 y 4.78 muestran como al retirar las cargas, el elemento correspondiente al vano 2 recupera elásticamente sus deformaciones y flechas.

4.4.8.2 - Objetivo del plan de Ensayo

El objetivo de este ensayo es determinar, tras las roturas anteriores en la sección de apoyo central y la sección de centro luz del vano 1, la capacidad última en rotura de la sección de centro luz del vano 2; por medio del estudio de su respuesta estructural a flexión. Asumiendo que la viga ya ha perdido prácticamente su hiperstaticidad, se trata del ensayo de un vano isostático reforzado con fibras de carbono, adicionalmente contando con el acero pasivo en dicha sección, lo que le permite contar con alguna capacidad adicional.

La distribución de las cargas corresponde al esquema de cargas mostrado en la figura 4.69; buscando la flexión positiva de una viga isostática, posicionando para ello dos cargas “Q” a 2.40 m de los apoyos en el vano, de manera que se carga un solo vano.

4.4.8.3 - Planteamiento y descripción del ensayo

Descripción del modelo ensayado:

La viga, de longitud 14.40 m fisurada en la zona de apoyo central y sección centro luz del vano 1, presenta unas deformaciones remanentes debidas al ensayo anterior muy importantes, por ejemplo, las flechas residuales son de más de 50mm en vano 1 y 5 mm en vano 2.

4.4.8.3.i Trabajos preliminares

De la misma manera que en el ensayo anterior, básicamente no se desarrollaron trabajos preliminares, sencillamente se preparó el sistema de adquisición de datos para el nuevo ensayo, poniendo a punto el programa informático para descartar los canales de las galgas extensométricas dañadas.

4.4.8.3.ii Preparación del modelo

Establecida la posición de las galgas extensométricas rotas, para no ser tenidas en cuenta en las lecturas de deformaciones; se colocaron elementos de seguridad debajo del vano 2, debido a la posibilidad de la aparición de flechas excesivas y evitar el daño de los equipos ubicados en la parte inferior de la sección.

4.4.8.4 - Medios de carga e Instrumentación

Como ya se ha dicho, la introducción de las cargas se realizó utilizando un pórtico de carga (se utilizó el pórtico de carga número dos), con el mismo sistema de gatos ENERPAC de 600kN, habiéndose desconectado el sistema hidráulico de los gatos del pórtico número uno. Las células de presión son las mismas que controlaron la magnitud de las cargas del ensayo anterior.

De la misma manera que en los ensayos ya apuntados, se mantienen las agrupaciones de los transductores y las galgas extensométricas en bloques de: Fuerzas externas, Movimientos de la viga, Deformaciones seccionales de la viga y la agrupación de las Deformaciones en fibras de carbono.

La distribución de todos los grupos puede verse en las gráficas 4.36, 4.37 y 4.38.

Deformaciones en fibras de carbono:

Se siguieron midiendo deformaciones de las galgas extensométricas únicamente en el vano número dos, ya que las otras galgas, tanto de las secciones de centro luz vano uno y de apoyo central en su mayoría ya estaban rotas. (ver figura 4.50)

4.4.8.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga

El ensayo se realizó en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras, el día 23 de marzo de 1998, tras haber realizado los ensayos VHA1_b y VHA1_c desarrollando también en este ensayo un solo ciclo de carga y descarga.

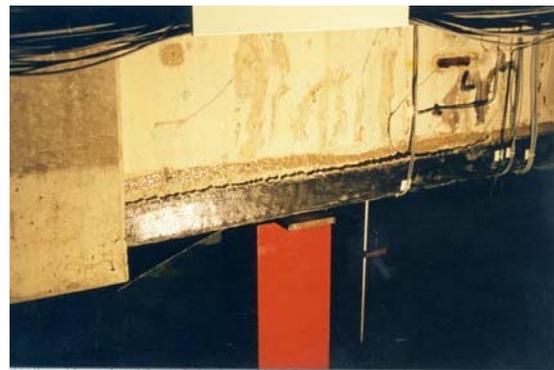
El proceso fue similar al de los ensayos anteriores; y se efectuó aplicando escalones de carga de 10 bares (≈ 9 kN) cada uno. Luego se efectuaban las lecturas de la instrumentación correspondiente, por medio del sistema de adquisición de datos.

Durante el ensayo se mantuvieron algunos parámetros de control tales como: La carga aplicada, la gráfica Carga - flecha del vano 2, también la deformación de la fibra de carbono en centro luz vano 2. Al tratarse de una viga de hormigón armado y debido a la colocación de las fibras de carbono, la fisuración siguió incrementándose en la zona de flexión positiva en el vano 2. La rotura se produjo por deformación excesiva del acero pasivo y el desprendimiento del hormigón por delaminación en zona de desviador a nivel de la armadura pasiva. Dicha rotura se produjo en la zona circundante al extremo de las fibras de carbono y cerca de uno de los desviadores (ver fotografía 4.46 y 4.47). Se trata de una rotura típica de delaminación por fisuras de flexión y rotura progresiva de la adherencia hormigón - material de refuerzo.

La lectura de la presión del sistema hidráulico por medio de un transductor y las células de carga en gatos, así como también, la rotura repentina del forjado inferior de la sección en zona de desviador intermedio, permitieron establecer el instante de la rotura; la que se alcanzó a los 165,55 kN siendo éste límite muy superior al alcanzado en el ensayo VHA1_b que fue de 98,4 kN y al ensayo VHA1_c que fue de 96,97 kN. La explicación de ello es que, en este caso la existencia de armadura pasiva controla mejor la delaminación por fisuras de flexión, no siendo hasta que plastifica la armadura pasiva, perdiendo por tanto la capacidad de redistribuir cargas procedentes de delaminaciones locales pequeñas (ver figura 4.82), que se produce una rotura por delaminación general (foto 4.47). En los ensayos anteriores, la falta de armadura pasiva provoca mayores aperturas de fisuras incluso para cargas pequeñas, que acaban produciendo la cizalla y delaminación del compuesto para niveles bajos de carga. La flecha alcanzada en el ensayo resulta evidente (foto 4.48 y figura 4.79).



Fotografía 4.46 Vista de la sección de desviador después del ensayo.



Fotografía 4.47 Vista general de la fibra en centro luz después del ensayo.



Fotografía 4.48 Vista general después del ensayo.

4.4.8.6 - Resultados

Los resultados figuran sintetizados en los anejos en forma de los registros de datos. Los resultados más relevantes se presentan en las relaciones siguientes:

- i) Curva Carga – Flecha vano 2
- ii) Curva Carga - Reacciones en apoyos
- iii) Curva Carga - Deformación en secciones de centro luz
- iv) Evolución de la deformación de la sección centro luz vano 2
- v) Deformación en fibras de carbono vano 2

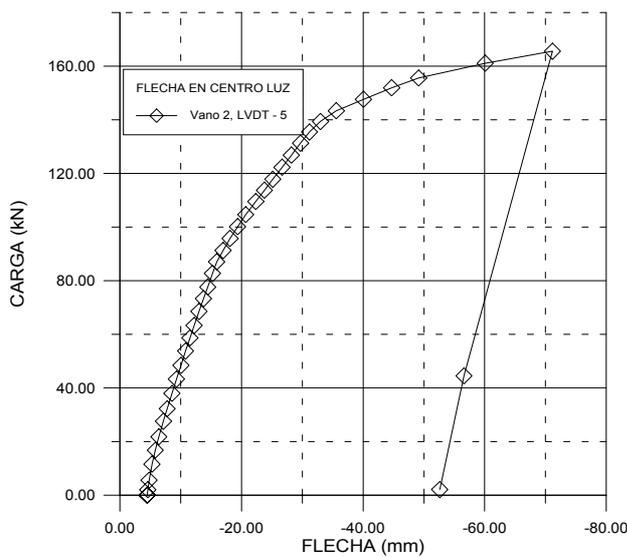


Figura 4.79 Evolución de la flecha en centro luz vano 2

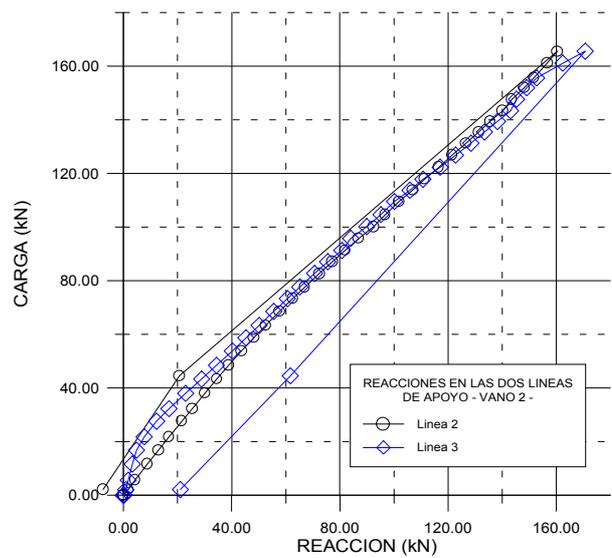


Figura 4.80 Evolución de las reacciones en las dos líneas de apoyo.

La figura 4.80 corrobora que se trata del ensayo de una viga simplemente apoyada

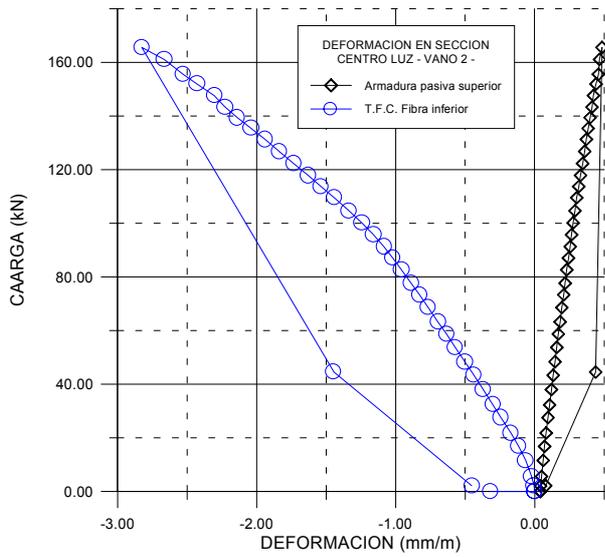


Figura 4.81 Evolución de la deformación en centro luz vano 2.

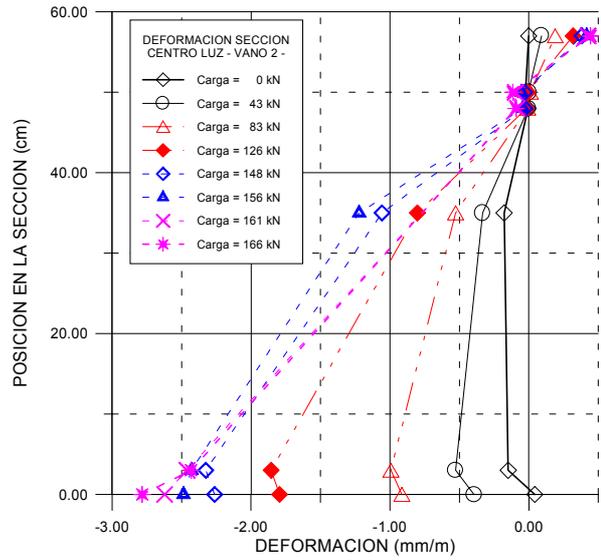


Figura 4.82 Evolución de la deformación en sección de centro luz.

En la figura 4.82 puede verse como el acero, al llegar a una deformación aproximada de 2.5×10^{-3} , correspondiente al límite elástico, lo cual ocurre para una carga de 148 kN ($\pm 90\%$ de la carga última) pierde capacidad de redistribuir carga.

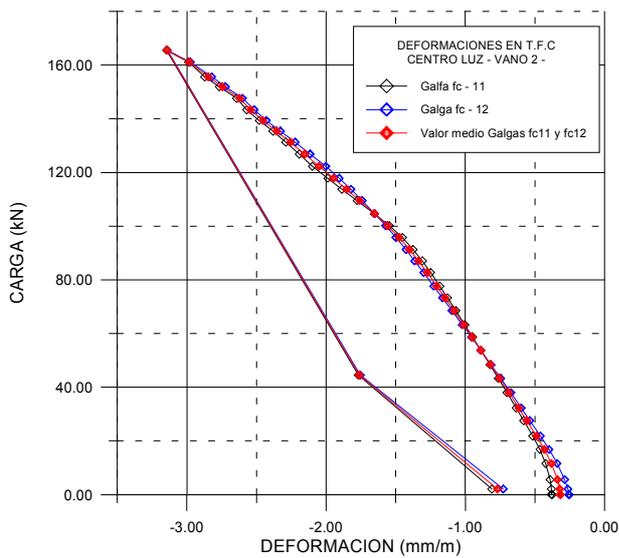


Figura 4.83 Evolución de la deformación del T.F.C. En la sección centro luz vano 2.

4.4.9 Ensayos sobre modelo de puente :VHA_PE_a

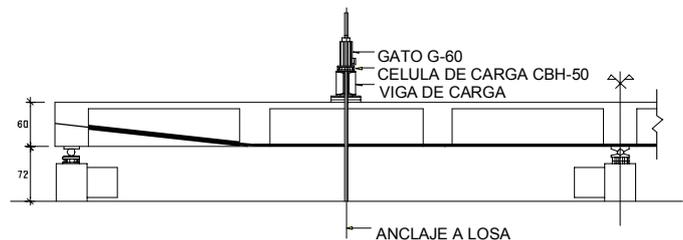
4.4.9.1 - Antecedentes

A continuación se plantea el tercer ensayo en un modelo para ser reparado sustituyendo el acero pasivo por fibras de carbono y, también como parte del plan, se hace un refuerzo con pretensado exterior.

4.4.9.2-Objetivo del plan de Ensayo

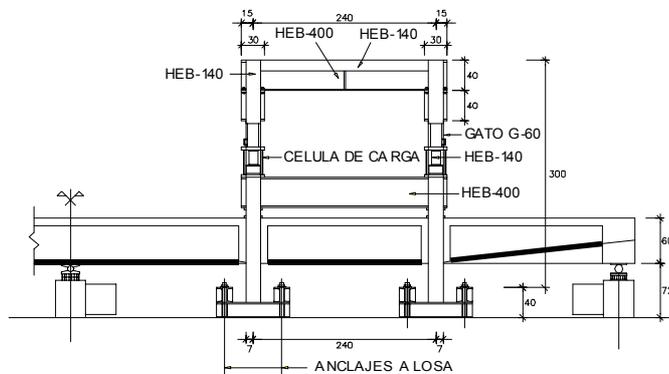
Esta fase tiene por objeto determinar la capacidad última en rotura de las diferentes secciones del modelo de puente reparado y reforzado con pretensado exterior. Se trata mismo modelo de hormigón armado utilizado en el ensayo VHA1 mediante el estudio de la respuesta estructural a flexión. Se trata, pues, de ver que a pesar de que la viga se encontraba seriamente dañada, la aplicación de las fibras de carbono, juntamente con un pretensado exterior, después de reparar e inyectar el hormigón dañado, pueden llevar a la estructura a niveles de servicio incluso superiores a los del estado inicial.

Se mantiene para el efecto, el esquema de cargas ya utilizado, el cual permite reproducir ésta situación particular de esfuerzos; buscando la flexión máxima negativa en el apoyo central, posicionando para ello, una carga “2Q” en centro luz del vano uno, y dos cargas “Q” a 2.40 m de los apoyos en el vano dos.(ver figura 4.84)



ALZADO LONGITUDINAL PORTICO DE CARGA Nº 1

Escala 1:100



PORTICO DE CARGA Nº 2

Escala 1:100

Figura 4.84 Alzado de los pórticos de carga utilizados durante el ensayo

4.4.9.3 - Planteamiento y descripción del ensayo

Descripción del modelo ensayado:

La viga, de longitud igual a 14.40 m esta compuesta por una viga continua de dos vanos de 7.20 m de luz cada uno. La sección es de tipo Cajón, y con canto constante de 0.60 m., es la misma que la del ensayo anterior (ver figura 4.32 y 4.33)

4.3.4.9.i Trabajos preliminares

Para la preparación de este ensayo inicialmente y utilizando gatos ENERPAC de 900 kN se recuperaron las flechas remanentes en los ensayos anteriores (serie de vigas VHA1); se situaron también los apeos provisionales para los dos tramos de la viga previo a la reparación. De la misma manera se procedió a quitar el hormigón en mal estado y cortar las zonas dañadas de las fibras de carbono tanto en apoyo intermedio como en fibras inferiores en secciones de centro luz de ambos vanos; quedando en dichas zonas bloques a hormigonar "in situ". Estos trabajos se muestran en las fotografías 4.49, 4.50, 4.51 y 4.52.



Fotografía 4.49 Vista de la sección de apoyo central después de quitar las fibras dañadas.



Fotografía 4.50 Vista de zona de desviador a sanear. (vano 2)



Fotografía 4.51 Vista de la sección de apoyo central



Fotografía 4.52 Vista de los trabajos cercanos al desviador nº 4.

Las Galgas Extensométricas embebidas en la parte inferior de la sección de hormigón de apoyo intermedio se siguieron utilizando, ya que su funcionamiento era correcto.

4.4.9.3.ii Preparación del modelo

Una vez recuperadas las flechas de la viga, se procedió a hormigonar y reparar las zonas dañadas, también se colocaron los inyectores, se sellaron y posteriormente se inyectaron las fisuras con resina epoxi. (ver fotografías 4.53 y 4.54)



Fotografía 4.53 Encofrado y hormigonado de zonas dañadas.



Fotografía 4.54 Sellado e inyección de las fisuras.

En las zonas de momento negativo y positivos máximos donde se rompieron las bandas de fibra de carbono, se abujardó la superficie de hormigón previo al pegado de los nuevos trozos de fibra. (ver fotografía 4.55)



Fotografía 4.55 Encofrado y hormigonado de zonas dañadas.



Fotografía 4.55a Vista general de la preparación del modelo. Puede verse el trazado del pretensado exterior.

4.4.9.3.iii Reparación del puente.

Posteriormente se procedió a verter microhormigón de reparación autonivelante y sin retracción en las tres secciones de la viga (secciones centrales de vano y apoyo intermedio). También se prepararon las zonas donde se rompieron algunas galgas extensométricas, principalmente galgas de hormigón PL-90 1I. Así mismo, se prepararon las superficies de las fisuras para su posterior inyección con resina epoxi.

Para la reparación de las secciones de vano 1 y 2, se utilizó un mortero de reparación tixotrópico reforzado con fibras (ver fotografía 4.53).

Por último se restituyeron las bandas de fibra que se cortaron. La técnica de pegado fue similar a la ya realizada con anterioridad, dichos trozos de banda se solaparon con la fibra existente en 20 cm a cada lado (ver fotografías 4.56 y 4.57). El procedimiento de pegado y cálculo del refuerzo puede verse en el anejo ___.



Fotografía 4.56 Vista de la sección de apoyo central **Fotografía 4.57** Vista de los trabajos cercanos al desviador nº 4.

4.4.9.4 - Medios de carga e Instrumentación.

Como ya se ha dicho, la introducción de las cargas se realizó de igual manera que en los ensayos de las vigas VHA1_a y VHA1_b; con dos pórticos de carga y el mismo sistema de gatos ENERPAC de 600 kN. Las células de presión son las mismas que controlaron la magnitud de las cargas de los ensayos anteriores. (ver figura 4.85).

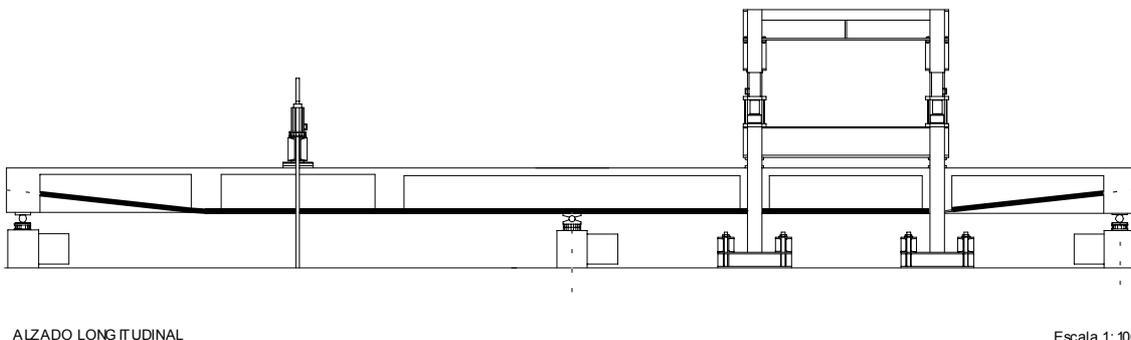


Figura 4.85 Alzado general del ensayo VHA_PE_a

En la figura 4.85 puede apreciarse también el trazado del pretensado exterior que se introdujo como refuerzo.

Instrumentación:

A la distribución de canales de adquisición de datos de los ensayos anteriores se le agregaron los canales necesarios para la medición de los deslizamientos entre cordón y desviador y de las deformaciones de los cordones de pretensado. También se agregaron 5 canales para la medida de deformaciones por medio de fibra óptica, los cuales requirieron de una instrumentación especial (ver anejo 10). Algunos de los sensores de fibra óptica se colocaron pegados directamente encima de la fibra y cerca de galgas extensométricas pegadas también en la fibra (fibras ópticas B y C y galga FC2, y fibra óptica D y galga FC6 de la figura 4.88). El objetivo era verificar que con ambos sistemas de medida se obtenían los mismos resultados. La utilización de sensores de fibra óptica viene justificada por el hecho de que se quería verificar si existía diferencia de deformación entre el hormigón y la fibra pegada encima del mismo. Tal como se ha comentado que se observó en algunos de los ensayos (figuras 4.58 y 4.82). Esta diferencia de deformación puede ser debida a un deslizamiento relativo entre hormigón y tejido. Para ello era necesario dejar un sensor pegado sobre el hormigón (sensor A de la figura 4.88), pegar encima del mismo el tejido y a continuación pegar un sensor sobre el tejido (Sensor B de la figura 4.88). Es evidente que con galgas extensométricas no se habría podido llevar a cabo la medida del sensor A.

En las fotografías 4.58 y 4.59 pueden verse algunos de los detalles de la instrumentación con sensores de fibra óptica. En las figuras 4.86 a 4.88 se esquematiza la ubicación de la instrumentación adicional utilizada para los cordones de pretensado. El resto de instrumentación fue la ya comentada para los otros ensayos, tal como se recoge en la tabla 4.11.



Fotografía 4.58 Vista de la sección de apoyo central con la fibra óptica colocada (cables amarillos)



Fotografía 4.59 Sistema de adquisición del datos de las fibras ópticas.

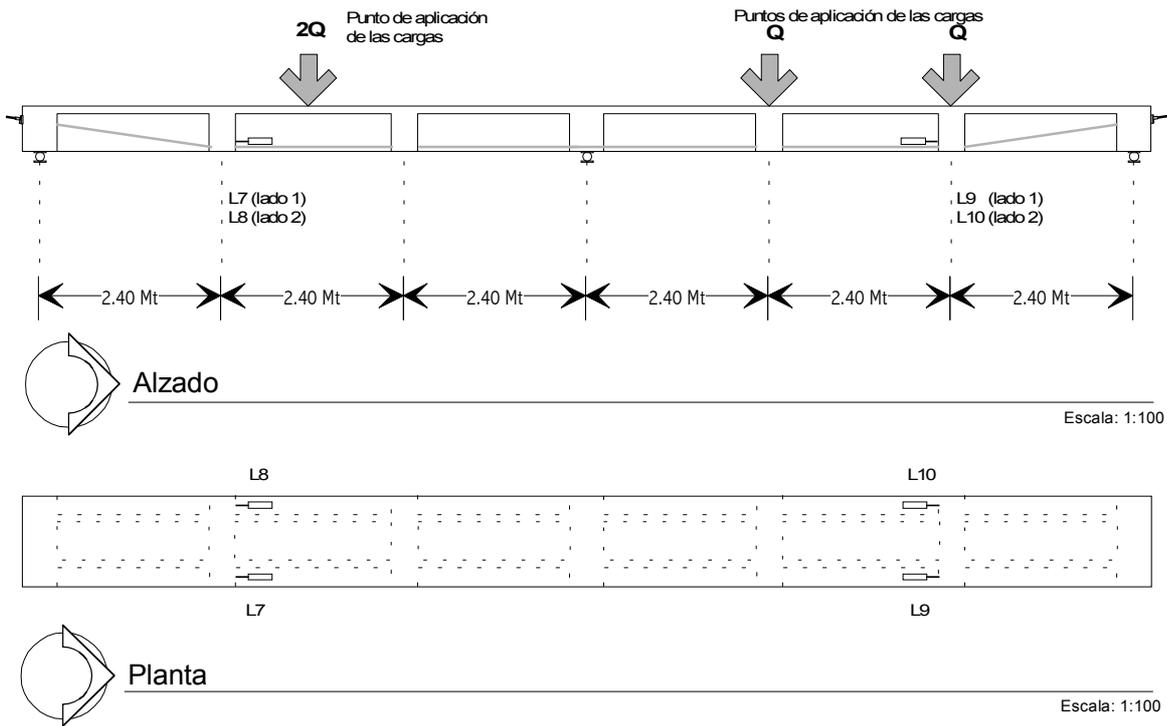


Figura 4.86 Ubicación de los LVDT's de medición de deslizamientos entre cordones de pretensado y desviador.

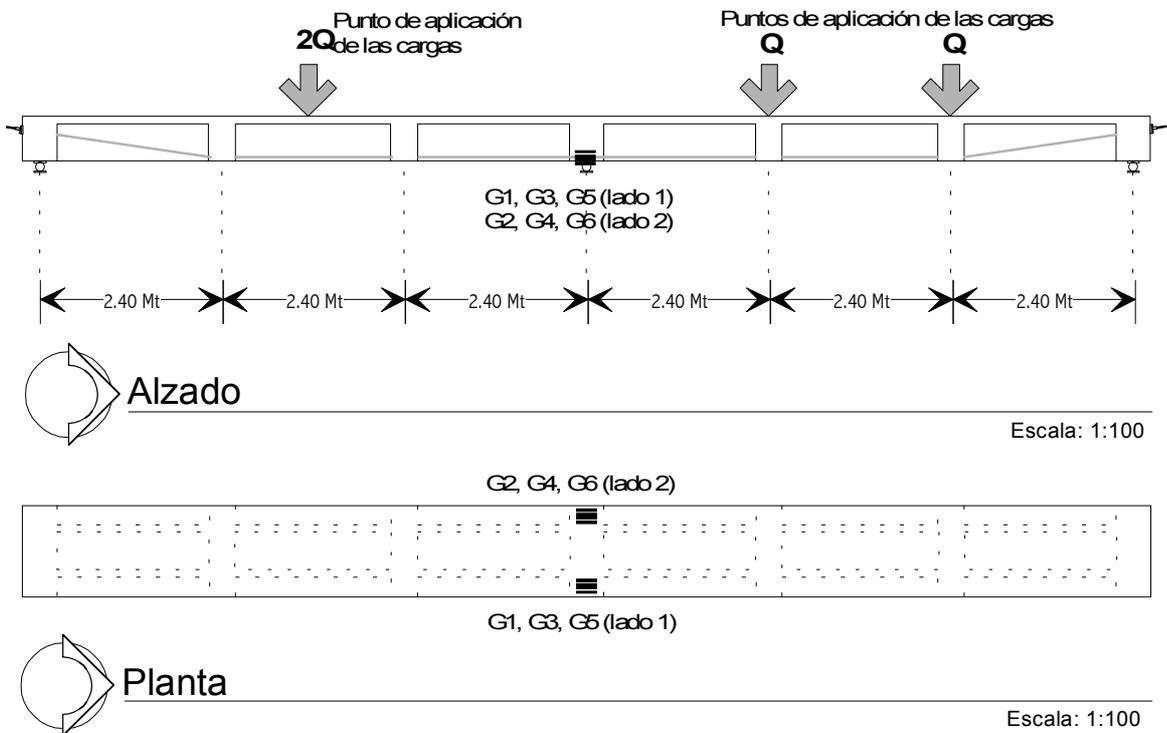


Figura 4.87 Ubicación de las galgas extensométricas en los cordones de pretensado

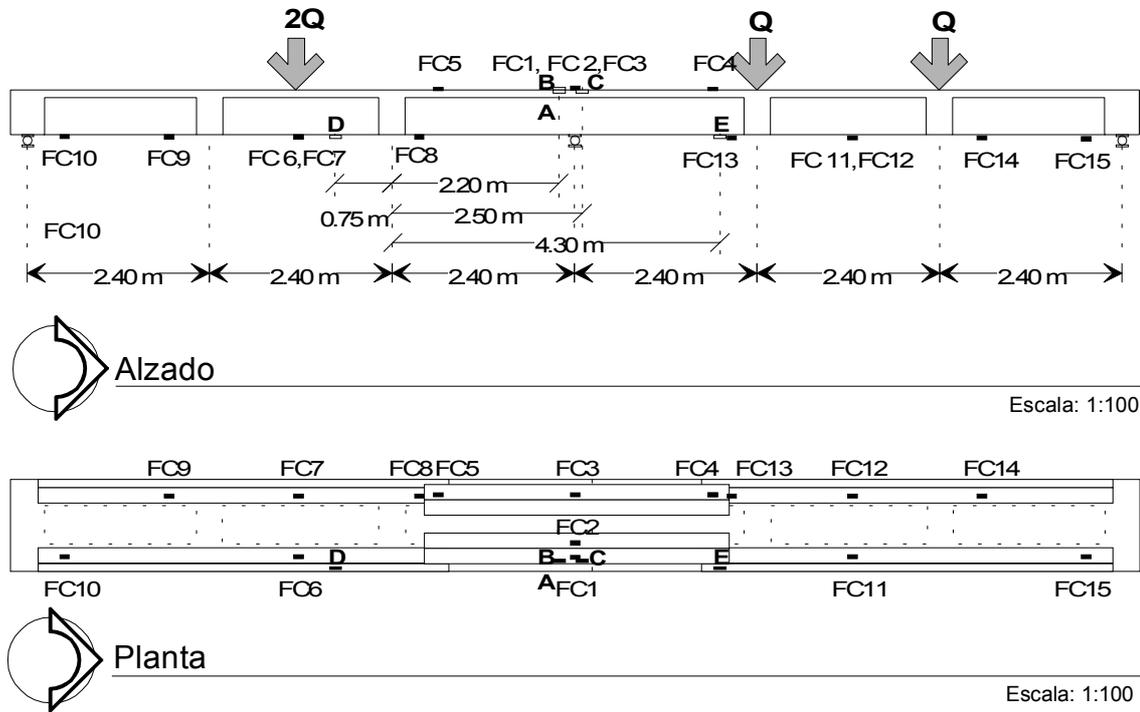


Figura 4.88 Ubicación de las galgas extensométricas y sensores de fibra óptica sobre el tejido de fibra de carbono (B, C, D, E) y sobre hormigón (A)

REGISTRO DE DISTRIBUCION DE CANALES DE LA D.A.U. Y M.C.						
DAU	MC	CODIGO	TIPO	USO	NOMBRE ARCHIVO	POSICIÓN
0	1	GA1	Galga	Aceero activo	@Galga_pv	Centro cordón visto
1	2	GA2	Galga	Aceero activo	@Galga_po	Centro cordón oculto
2	3	GA3	Galga	Aceero activo	@Galga_pv	Centro cordón visto
3	4	GA4	Galga	Aceero activo	@Galga_po	Centro cordón oculto
4	5	GA5	Galga	Aceero activo	@Galga_pv	Centro cordón visto
5	6	GA6	Galga	Aceero activo	@Galga_po	Centro cordón oculto
10	11	GP3	Galga	Aceero pasivo	@Galga	C.L. Vano 1. fibraSup.
11	12	GP4	Galga	Aceero pasivo	@Galga	C.L. Vano 1. fibraSup.
12	13	GP5	Galga	Aceero pasivo	@Galgab	C.L. Vano 2. fibraInf.
13	14	GP6	Galga	Aceero pasivo	@Galgab	C.L. Vano 2. fibraInf.
14	15	GP7	Galga	Aceero pasivo	@Galgab	C.L. Vano 2. fibraSup.
15	16	GP8	Galga	Aceero pasivo	@Galgab	C.L. Vano 2. fibraSup.
18	*	Volts.		Alimentación		M.C.
19	*	Volts.		Alimentación		M.C.
21	20	GC1	Galga	Cortante	@Galco	Apoyo exterior L. visto
22	21	GC2	Galga	Cortante	@Galco	Apoyo exterior L. Oculto
23	22	GC3	Galga	Cortante	@Galco	Apoyo exterior L. visto
24	23	GC4	Galga	Cortante	@Galco	Apoyo exterior L. Oculto
25	24	GH1	Galga	Hormigón	@Galga	C.L. Vano 1
26	25	GH2	Galga	Hormigón	@Galga	C.L. Vano 1
27	26	GH3	Galga	Hormigón	@Galga	C.L. Vano 1
28	27	GH4	Galga	Hormigón	@Galga	C.L. Vano 1
29	28	GH5	Galga	Hormigón	@Galga	C.L. Vano 1
30	29	GH6	Galga	Hormigón	@Galga	C.L. Vano 1
31	30	GH7	Galga	Hormigón	@Galgab	C.L. Vano 2
32	31	GH8	Galga	Hormigón	@Galgab	C.L. Vano 2
33	32	GH9	Galga	Hormigón	@Galgab	C.L. Vano 2
34	33	GH10	Galga	Hormigón	@Galgab	C.L. Vano 2
35	34	GH11	Galga	Hormigón	@Galgab	C.L. Vano 2
36	35	GH12	Galga	Hormigón	@Galgab	C.L. Vano 2
37	36	HE1	Embebida	Hormigón	@Galga_py @ Horem	Apoyo Intermedio
38	*	Volts.		Alimentación		M.C.
39	*	Volts.		Alimentación		M.C.
40	37	HE2	Embebida	Hormigón	@Galga_py @ Horem	Apoyo Intermedio
41	38	HE3	Embebida	Hormigón	@Galga_py @ Horem	Apoyo Intermedio
42	39	FC1	Galga	En fibra	@Galfin	Apoyo Intermedio -Neg.
43	40	FC2	Galga	En fibra	@Galfin	Apoyo Intermedio -Neg.
44	41	FC3	Galga	En fibra	@Galfin	Apoyo Intermedio -Neg.
45	42	FC4	Galga	En fibra	@Galfin	Apoyo Intermedio -Neg.
46	43	FC5	Galga	En fibra	@Galfin	Apoyo Intermedio -Neg.
47	44	FC6	Galga	En fibra	@Galpip	Centro luz vano 1 -Pos.
48	45	FC7	Galga	En fibra	@Galpip	Centro luz vano 1 -Pos.
49	46	FC8	Galga	En fibra	@Galpip	Centro luz vano 1 -Pos.
50	47	FC9	Galga	En fibra	@Galpip	Centro luz vano 1 -Pos.
51	48	FC10	Galga	En fibra	@Galpip	Centro luz vano 1 -Pos.
52	49	FC11	Galga	En fibra	@Galpip	Centro luz vano 2 -Pos.
53	50	FC12	Galga	En fibra	@Galpip	Centro luz vano 2 -Pos.
54	51	FC13	Galga	En fibra	@Galpip	Centro luz vano 2 -Pos.
55	52	FC14	Galga	En fibra	@Galpip	Centro luz vano 2 -Pos.
56	53	FC15	Galga	En fibra	@Galpip	Centro luz vano 2 -Pos.
58	*	Volts.		Alimentación		M.C.
59	*	Volts.		Alimentación		M.C.
72	1(67)	LC13	Célula	Cordón Pret.	@C_cargp	Apoyo 2 -L. visto-
73	2(68)	LC14	Célula	Cordón Pret.	@C_cargp	Apoyo 2 -L. oculto-
74	3(69)	LC1	Célula	Gato	@C_cargg	Pórtico 2 -L. Izq.-
75	4(70)	LC2	Célula	Gato	@C_cargg	Pórtico 2 -L. Der.-
76	5(71)	LC3	Célula	Gato	@C_cargg	Pórtico 1 -L. visto-
77	6(72)	LC4	Célula	Gato	@C_cargg	Pórtico 1 -L. oculto-
78	*					
79	*					
80	7(73)	LC5	Célula	Carga	@C_carga	Apoyo 1 -L. visto-
81	8(74)	LC6	Célula	Carga	@C_carga	Apoyo 1 -L. oculto-
82	9(75)	LC7	Célula	Carga	@C_carga	Apoyo Inter. -L. visto-
83	10(76)	LC8	Célula	Carga	@C_carga	Apoyo Inter. -L. oculto-
84	11(77)	LC9	Célula	Carga	@C_carga	Apoyo 2 -L. visto-
85	12(78)	LC10	Célula	Carga	@C_carga	Apoyo 2 -L. oculto-
86	13(79)	LC11	Célula	Cordón Pret.	@C_cargp	Apoyo 1 -L. visto-
87	14(80)	LC12	Célula	Cordón Pret.	@C_cargp	Apoyo 1 -L. oculto-
88	15(81)	L1	Lvaf	Flecha	@Lvaf_f	Apoyo 1
89	16(82)	L2	Lvaf	Flecha	@Lvaf_f	C. L. Vano 1
90	17(83)	L3	Lvaf	Flecha	@Lvaf_f	Apoyo Intermedio V.1
91	18(84)	L4	Lvaf	Flecha	@Lvaf_f	Apoyo Intermedio V.2
92	19(85)	L5	Lvaf	Flecha	@Lvaf_f	C.L. Vano 2
93	20(86)	L6	Lvaf	Flecha	@Lvaf_f	Apoyo 2
94	21(87)	L7	Lvaf	Cordón Pret.	@Lvaf_c	Apoyo 1 -L. visto-
95	22(88)	L8	Lvaf	Cordón Pret.	@Lvaf_c	Apoyo 1 -L. oculto-
96	23(89)	L9	Lvaf	Cordón Pret.	@Lvaf_c	Apoyo 2 -L. visto-
97	24(90)	L10	Lvaf	Cordón Pret.	@Lvaf_c	Apoyo 2 -L. oculto-
98	*	Volts.		Alimentación		M.C.

Tabla 4.11 Distribución de los canales de adquisición de datos, los canales asignados, los ficheros correspondientes y la situación dentro de la viga (ensayo VHA_PE_a)

Dentro de las agrupaciones de instrumentación adoptadas, se hizo necesario agregar el bloque de instrumentación de fibras ópticas, para medir y comparar los valores de deformaciones en las fibras de carbono con las de las bandas extensométricas.

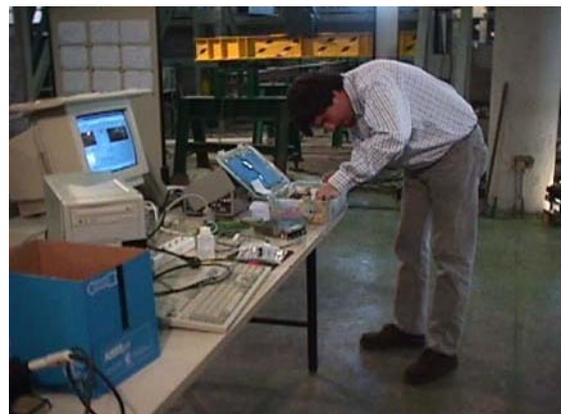
4.4.9.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga.

El ensayo se realizó en el laboratorio de Tecnología de Estructuras, el día 21 de mayo de 1998.

El proceso de carga adoptado fue similar al de los ensayos anteriores, se efectuó aplicando escalones de carga de 5 bares $\approx 4,5$ kN cada uno. Durante el ensayo se fijaron algunos parámetros de control ya determinados como: La carga aplicada, la deformación máxima en fibra de carbono en momentos negativos y positivos y, la gráfica Carga – Flecha del vano 1, también la deformación de la fibra de carbono en centro luz del vano 1 y por último las deformaciones de los cordones de pretensado, estos valores se visualizaron en tiempo real en todo momento para registrar cualquier incidencia en el desarrollo del ensayo.

La fisuración fue apreciable a simple vista a partir de los 145 kN de carga por gato. Dicha fisuración surgió en la zona de flexión negativa y casi simultáneamente en zona de momentos positivos en el vano 1. La rotura se produjo de forma repentina, debido a la rotura del tejido de fibra de carbono en la parte superior de la sección de apoyo; rotura también influenciada por el giro generado por el deslizamiento del hormigón de la fisura central. Simultáneamente se produjo también la rotura en zona de centro luz del vano uno.

La lectura de carga de los gatos por medio de un transductor de presión del sistema y las células de carga permitieron establecer el instante de rotura, la que se alcanzó a los 156,6 kN, siendo este límite muy superior al alcanzado en los ensayos anteriores que fueron de 92,8 kN y 98,4 kN respectivamente (ver fotografías 4.60, 4.61, 4.62 y 4.63). El incremento adicional de carga se debe al refuerzo con pretensado exterior.



Fotografía 4.60 Vista de la sección de apoyo central con la fibra óptica colocada

Fotografía 4.61 Sistema de adquisición de datos de las fibras ópticas.



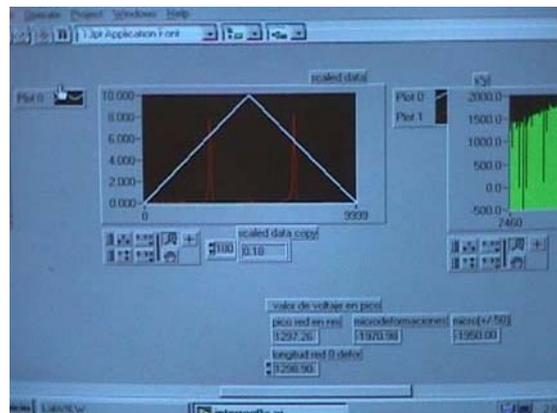
Fotografía 4.62 Vista de la sección de apoyo central con la fibra óptica colocada.



Fotografía 4.63 Vista final del estado de las bandas de TFC en vano 1 tras el ensayo.



Fotografía 4.64 Vista de la sección de centro luz con la fibra óptica colocada



Fotografía 4.65 Sistema de adquisición de datos en las fibras ópticas.

4.4.9.6 - Resultados

Los resultados figuran resumidos en los anejos en forma de registros de datos. Los resultados más relevantes se presentan en las relaciones siguientes:

- i) Curva Carga - Flecha
- ii) Curva Carga - Reacciones en apoyos
- iii) Curva Carga - Deformación en apoyo intermedio
- iv) Curva Carga - Deformación en secciones de centro luz
- v) Evolución de la deformación de las diferentes secciones
- vi) Deformación en fibras de carbono
- vii) Deslizamiento de los cordones de pretensado
- viii) Incrementos de tensión y deformaciones en los cordones de pretensado

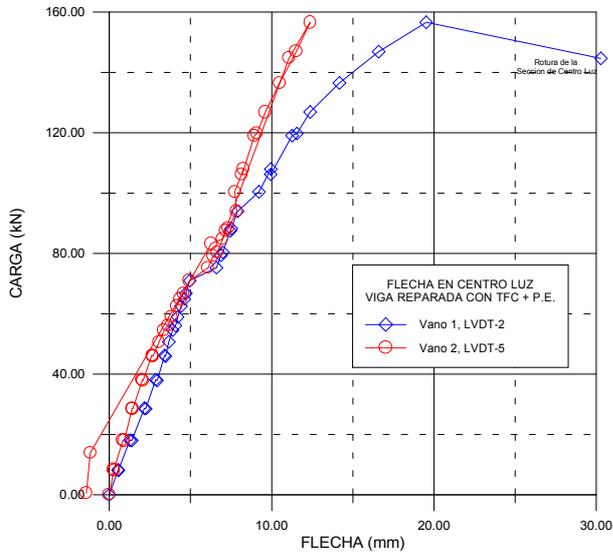


Figura 4.89 Evolución de la flecha en centro luz en vano 1 y 2.

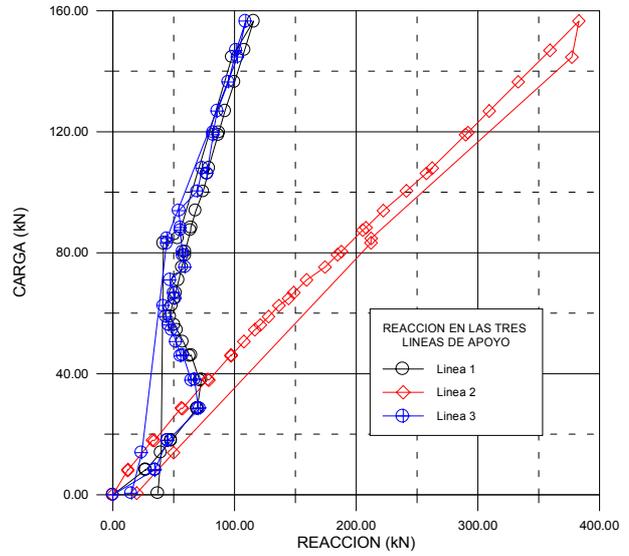


Figura 4.90 Evolución de las reacciones en las tres líneas de apoyo.

En las figuras 4.89 y 4.93 puede observarse como el vano 2 tiene un comportamiento prácticamente elástico y lineal, recuperando la flecha tras la descarga, lo que indica que el mismo prácticamente no se había dañado

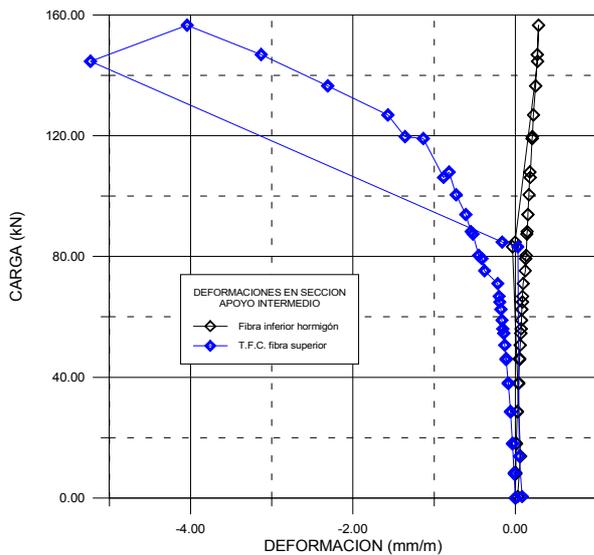


Figura 4.91 Evolución de la deformación de la sección en apoyo intermedio.

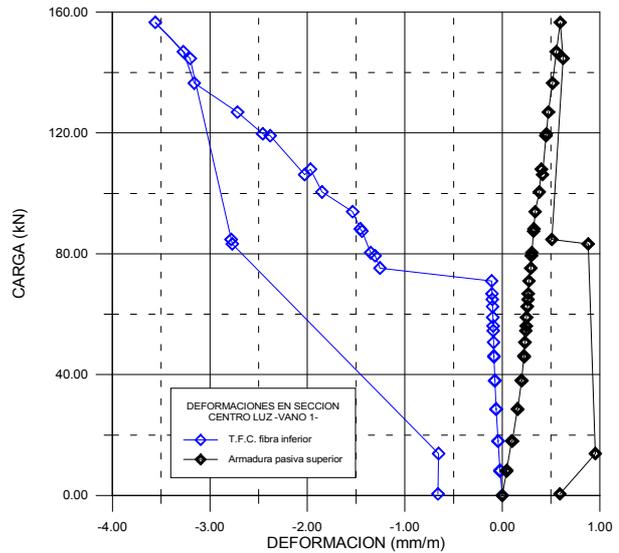


Figura 4.92 Evolución de la deformación en centro luz vano 1.

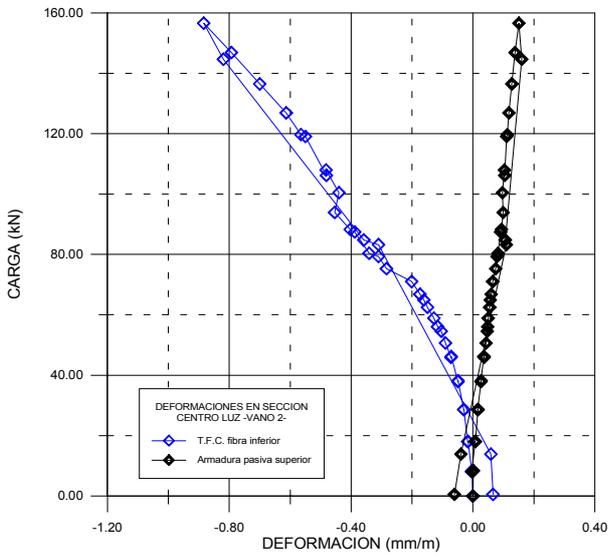


Figura 4.93 Evolución de la deformación de la sección centro luz vano 2.

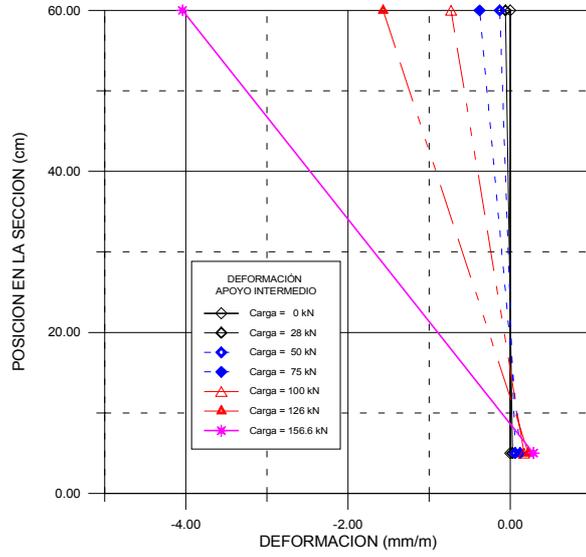


Figura 4.94 Evolución de la deformación en el apoyo central.

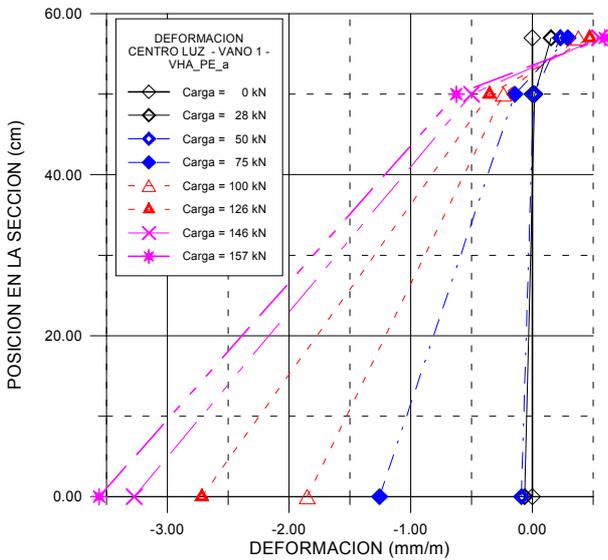


Figura 4.95 Evolución de la deformación de la sección centro luz vano 1.

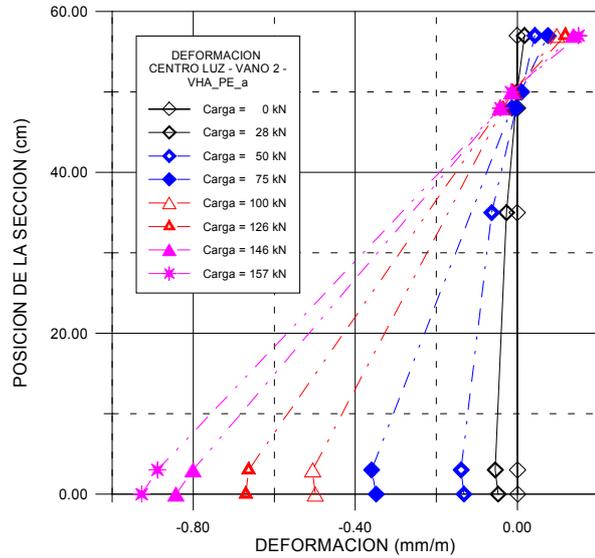


Figura 4.96 Evolución de la deformación en centro luz vano 2.

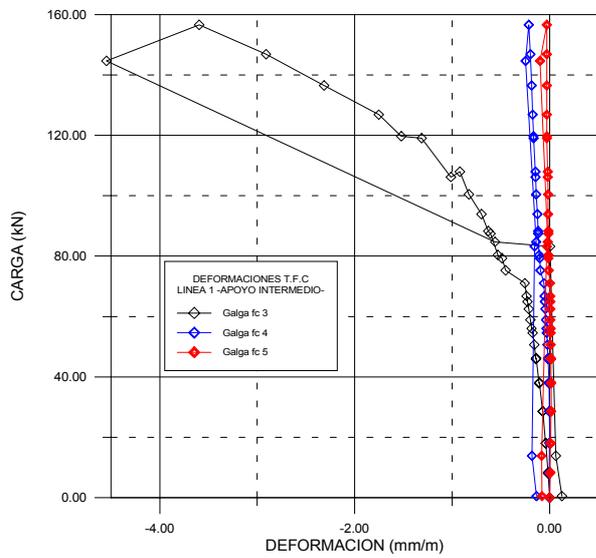


Figura 4.97 Evolución de la deformación del T.F.C. en la línea 1 del apoyo central.

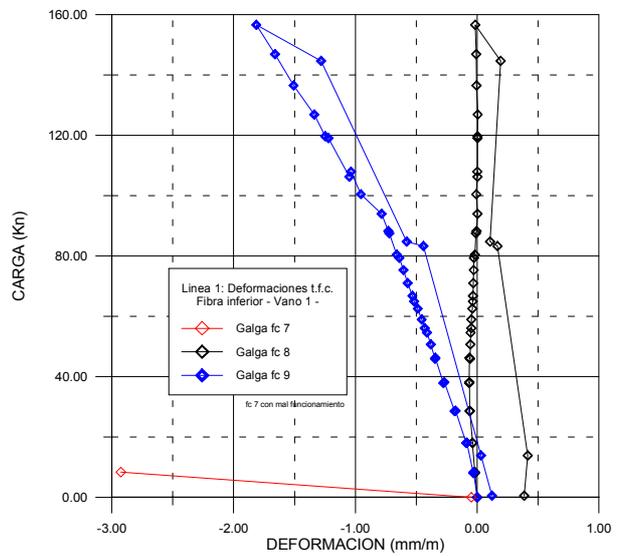


Figura 4.98 Evolución de la deformación del T.F.C. en la línea 1 del vano 1.

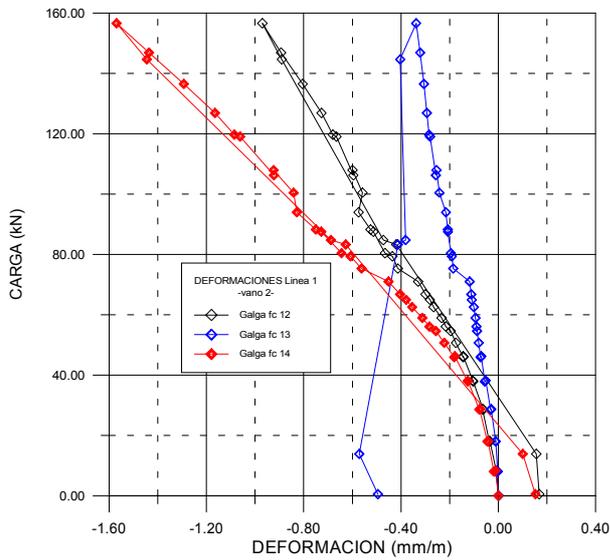


Figura 4.99 Evolución de la deformación del T.F.C. en la línea 1 del vano 2.

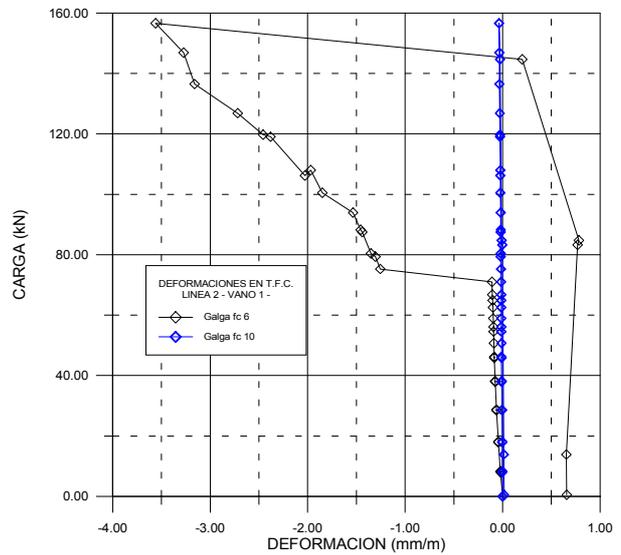


Figura 4.100 Evolución de la deformación del T.F.C. en la línea 2 vano 1.

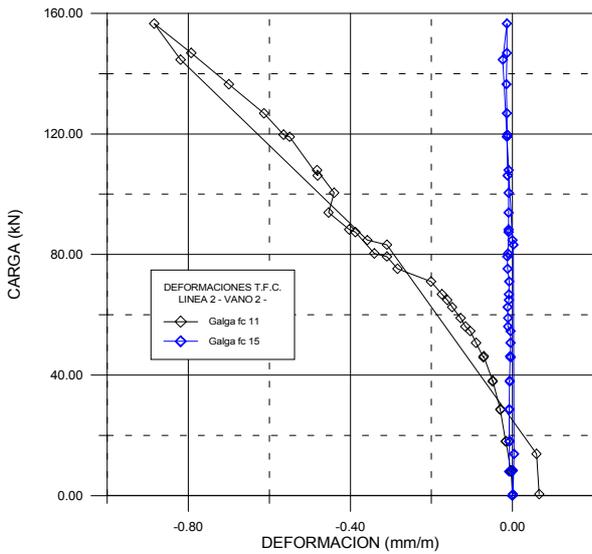


Figura 4.101 Evolución de la deformación del T.F.C. en la línea 2 del vano 2.

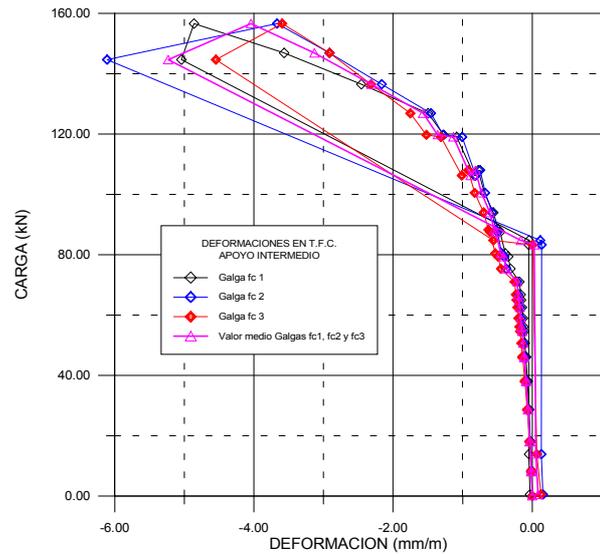


Figura 4.102 Evolución de la deformación del T.F.C. en el apoyo intermedio.

Tal como se aprecia en la figura 4.102, la rotura se produce para una deformación en el tejido de fibra del 0.4%, es decir, para una cuarta parte de la deformación última de la misma, estimada en el 1.6%. En consecuencia, en el momento de la delaminación, la fibra sólo aporta un 25% de su capacidad máxima.

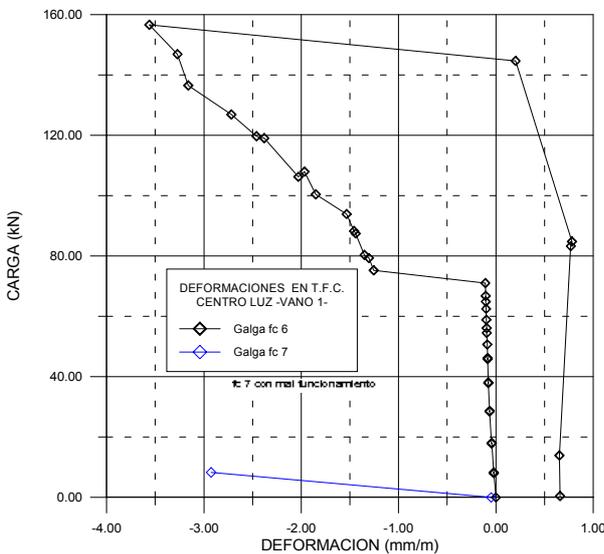


Figura 4.103 Evolución de la deformación del T.F.C. en centro luz vano 1.

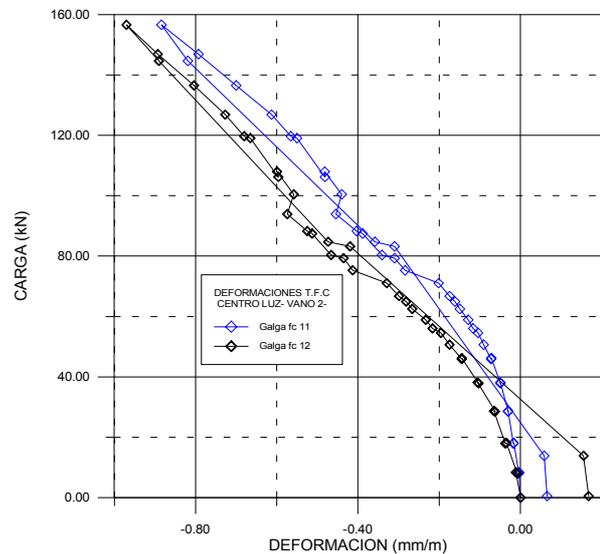


Figura 4.104 Evolución de la deformación del T.F.C. en centro luz vano 2.

Tal como se aprecia en la figura 4.104, en este caso no se presentaron problemas de simetría en el vano 2 tal como sucedió en el ensayo VHA1.

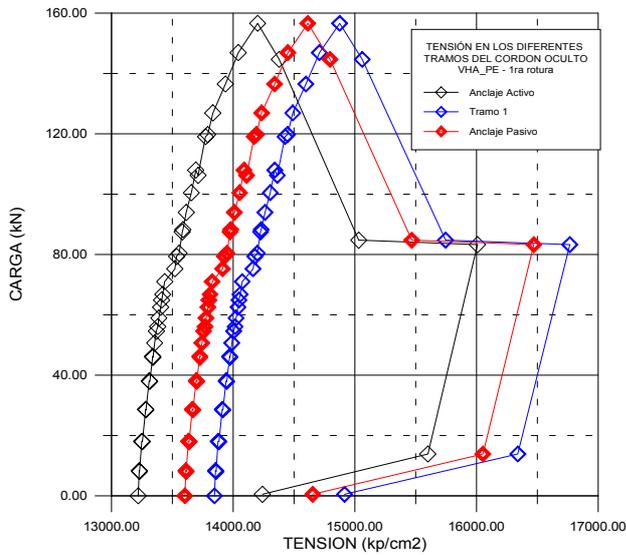


Figura 4.105 Evolución de la tensión en los diferentes tramos - tendón oculto-.

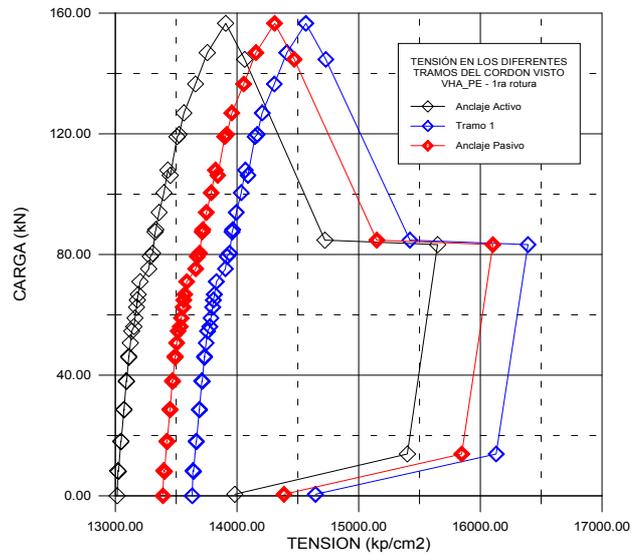


Figura 4.106 Evolución de la tensión en los diferentes tramos - tendón visto-.

En las figuras 4.105 a 4.108, el tramo 1 se refiere al tramo de cordón entre desviadores. Como puede observarse, el incremento de tensión es el mismo en los 3 tramos del cordón, lo cual indica un deslizamiento perfecto en la zona del desviador.

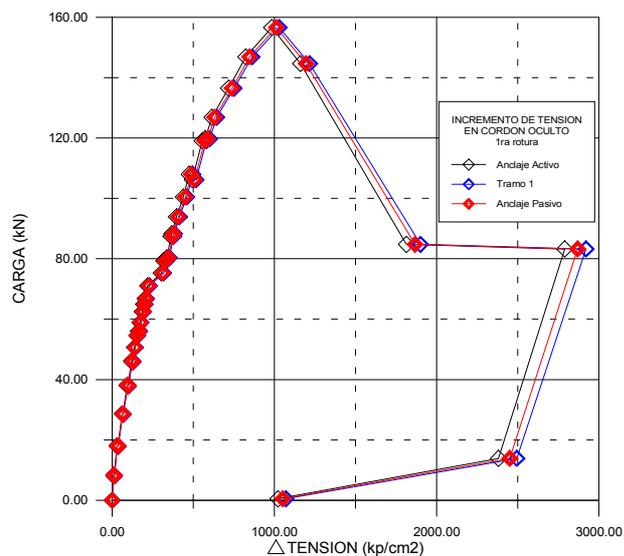


Figura 4.107 Evolución del incremento de tensión en los diferentes tramos - tendón oculto-.

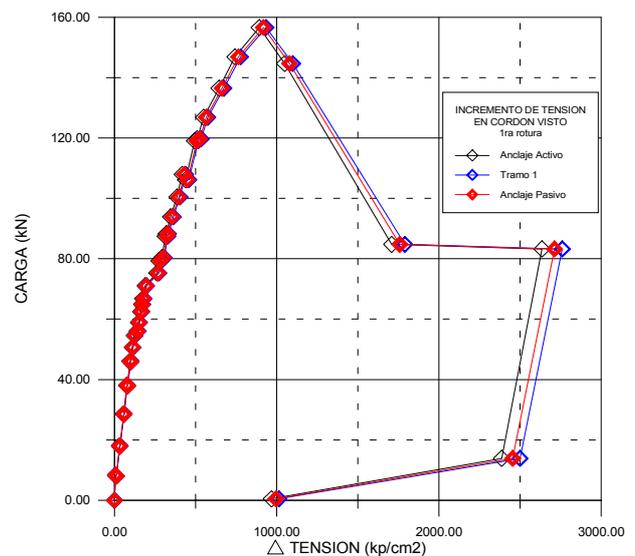


Figura 4.108 Evolución del incremento de tensión en los diferentes tramos - tendón visto-.

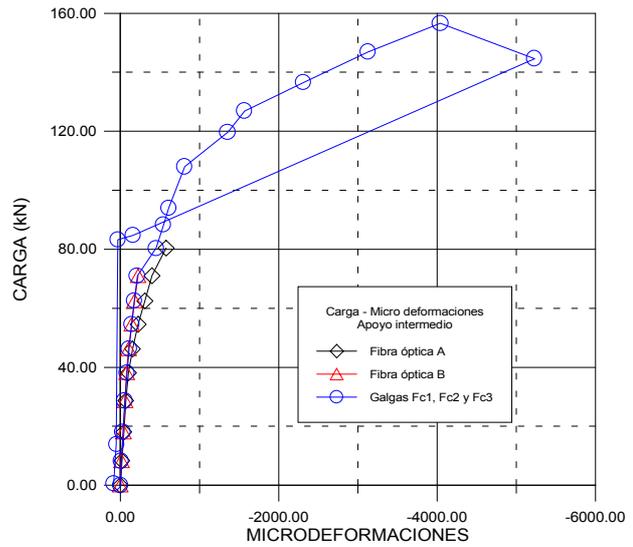
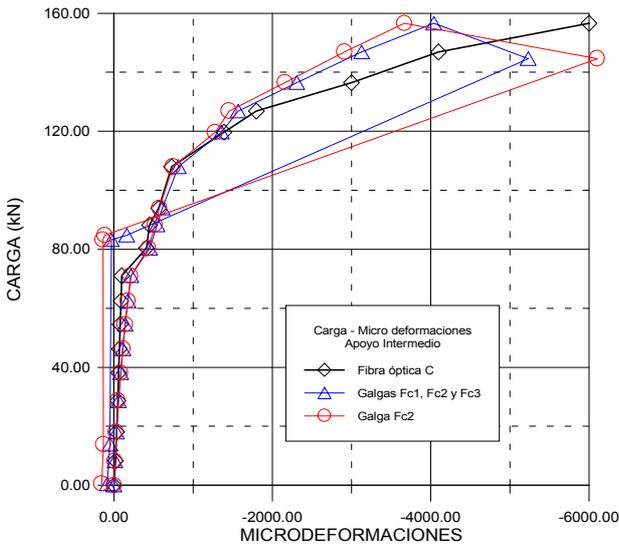


Figura 4.109 Comparación valores experimentales fibra óptica y galgas en T.F.C.

Figura 4.110 Comparación valores experimentales fibra óptica y galgas en T.F.C.

Las figuras 4.109, 4.110 y 4.111 nos dan idea de la bondad de las mediciones efectuadas con los sensores de fibra óptica. Obsérvese como fibra óptica y galgas situadas en el mismo punto dan medidas prácticamente iguales. La figura 4.110 nos indica como, efectivamente, las deformaciones en el hormigón (fibra óptica A) son mayores que en refuerzo de fibra colocado encima mismo (fibra óptica B y galgas FC1, FC2 y FC3). Las fibras ópticas A y B sólo fueron operativas hasta una carga aproximada de 80 kN por gato.

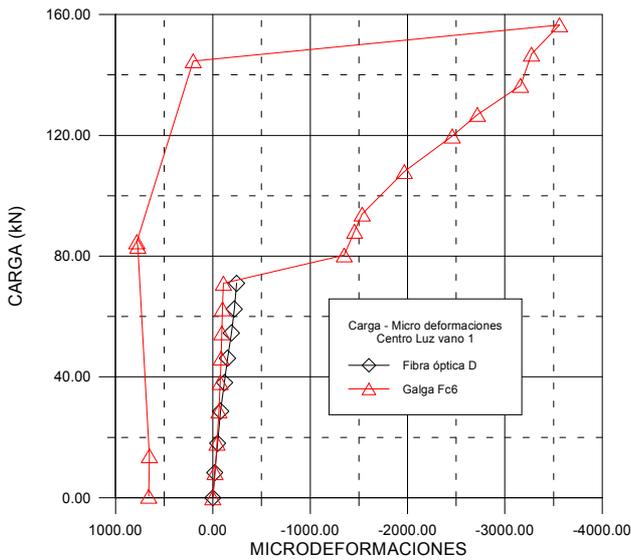


Figura 4.111 Comparación valores experimentales fibra óptica y galgas en T.F.C.

4.4.10 Ensayos sobre modelo de puente: **VHA_PE_b** 1 vano isostático (vano 2)

4.4.10.1 - Antecedentes

Después del ensayo sobre la viga VHA_PE_a y aprovechando que la mayor parte de la instrumentación estaba en buen estado así como el vano 2, tal como ya se ha apuntado a la vista de las figuras 4.89 y 4.93 se optó por hacer un segundo ensayo a rotura, en este caso cargando únicamente el vano 2 como viga biapoyada.

4.4.10.2 - Objetivo del plan de Ensayo

Con la misma filosofía que los ensayos anteriores, ésta fase tiene por objeto determinar la capacidad última en rotura de la sección de centro luz del vano 2, mediante el estudio de la respuesta estructural a flexión. En el presente caso el mismo modelo de hormigón con pretensado exterior utilizado en el ensayo VHA_PE_a; ya que en el anterior ensayo llegaron a rotura las secciones de apoyo central y de centro luz del vano 1 estando el vano 2 todavía en buen estado y aprovechando que el acero activo no llegó a alcanzar la plastificación, tal como se desprende de las figuras 4.105 y 4.106.

Se mantiene para el efecto, parte del esquema de cargas ya utilizado; buscando la flexión máxima positiva en el centro de la luz del Vano 2, manteniendo el posicionado de las dos cargas “Q” del ensayo anterior, a 2.40 m de los apoyos en el vano dos.(ver figura 4.84)

4.4.10.3 - Planteamiento y descripción del ensayo

Descripción del modelo ensayado:

Como todos los modelos ensayados, la longitud era igual a 14.40 m y estaba compuesta por una viga continua de dos vanos de 7.20 m de luz cada uno, la sección de tipo Cajón, y con canto constante de 0.60 m. La diferencia principal radicó en la presencia de fisuración y la pérdida del refuerzo de fibras de carbono en las secciones de apoyo central y de centro luz del vano 1. (ver figura 4.32 y 4.33)

4.4.10.3.i Trabajos preliminares

Debido a las características del ensayo anterior, básicamente no se desarrollaron trabajos preliminares, únicamente se preparó el sistema de adquisición de datos para el nuevo ensayo, poniendo a punto el programa informático para descartar los canales de las galgas extensométricas dañadas; también se colocaron soportes para evitar una caída del modelo ensayado sobre la instrumentación ubicada debajo de las secciones de centro luz de ambos vanos.

4.4.10.3.ii Preparación del modelo

Establecida la posición de las galgas extensométricas rotas, para no ser tomadas en cuenta en las lecturas de deformaciones y descartados los LVDT's del vano 1; se colocaron elementos

de seguridad debajo del vano 2, debido a la posibilidad de la aparición de flechas excesivas y evitar el daño de los equipos ubicados en la parte inferior de la sección.

4.4.10.4 - Medios de carga e Instrumentación

Como ya se ha dicho, la introducción de las cargas se realizó utilizando uno de los dos pórticos de carga sobre la viga (se utilizó el pórtico de carga número dos), con el mismo sistema de gatos ENERPAC de 600kN. Habiéndose desconectado el sistema hidráulico de los gatos del pórtico número uno. Las células de presión son las mismas que controlaron la magnitud de las cargas de los ensayos anteriores.

De la misma manera que en los ensayos ya apuntados, se mantienen las agrupaciones de los transductores y las galgas extensométricas en bloques de: Fuerzas externas, Movimientos de la viga, Deformaciones seccionales de la viga y la agrupación de las Deformaciones en fibras de carbono. En el presente ensayo ya no se realizaron lecturas con la fibras ópticas ya que dichas fibras estaban localizadas en las secciones ya dañadas.

La distribución de todos los grupos de adquisición de datos puede verse en las gráficas 4.86, 4.87 y 4.88.

Deformaciones en el tejido de fibras de carbono:

Se siguieron midiendo deformaciones de las galgas extensométricas únicamente en el vano número dos, ya que las otras galgas, tanto de las secciones de centro luz vano uno y de apoyo central en su mayoría ya estaban rotas. El sensor de fibra óptica del vano 2 estaba ya inutilizado.

4.4.10.5 - Realización del ensayo y Puesta en carga

El ensayo se realizó en el laboratorio de Tecnología de Estructuras, el día 21 de mayo de 1998, después de haber realizado el ensayo: VHA_PE_a.

El proceso de carga fue parecido al de los ensayos anteriores; y se efectuó aplicando escalones de carga de 10 bares (≈ 9 kN) cada uno. Durante el ensayo se mantuvieron algunos parámetros de control tales como: La carga aplicada, la gráfica Carga - flecha del vano 2, también la deformación de la fibra de carbono en centro luz vano 2. Al tratarse de una viga de hormigón pretensado y debido a la colocación de las fibras de carbono, la fisuración siguió incrementándose en la zona de flexión positiva en el vano 2. La rotura se produjo, por deformación excesiva del acero pasivo y el desprendimiento del hormigón en zona de desviador. En las fotos 4.65 y 4.66 pueden verse en que modo se produjo la rotura.

La lectura de la presión del sistema hidráulico por medio de un transductor y las células de carga en gatos; así como también la rotura repentina del forjado inferior de la sección en zona de desviador intermedio; permitieron establecer el instante de la rotura, la que se alcanzó a los 193,55 kN, siendo este límite superior al alcanzado en el ensayo VHA_PE_a que fue de 156,60 kN; y a los ensayos anteriores: VHA1_b que fue de 98,4 kN, al ensayo VHA1_c que fue de 96,97 kN. y al ensayo VHA1_d que fue de 165,55 kN



Fotografía 4.66 Vista del desprendimiento del hormigón en desviador.



Fotografía 4.67 Vista inferior de la sección después del ensayo.

4.4.10.6 – Resultados

Los resultados figuran resumidos en los anejos en forma de los registros de datos. Los resultados más relevantes se presentan en las relaciones siguientes:

- i) Curva Carga – Flecha vano 2
- ii) Curva Carga - Reacciones en apoyos
- iii) Curva Carga - Deformación en secciones de centro luz
- iv) Deformación en fibras de carbono
- v) Deslizamiento de los cordones de pretensado
- vi) Incrementos de tensión y deformaciones en los cordones de pretensado

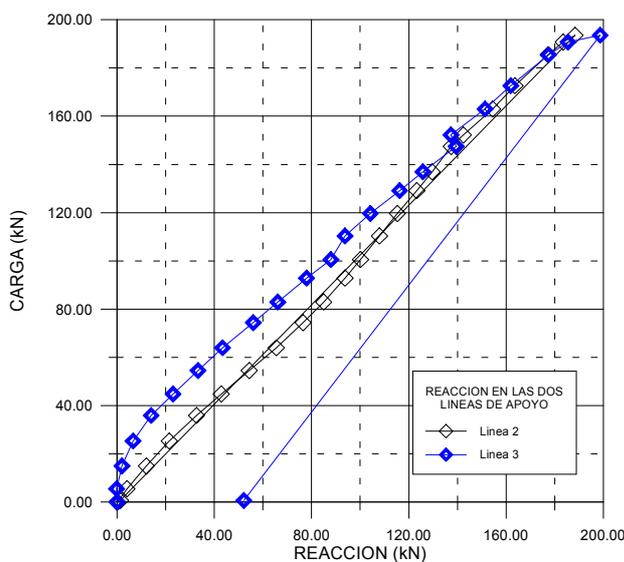


Figura 4.112 Evolución de las reacciones en las diferentes líneas de apoyo.

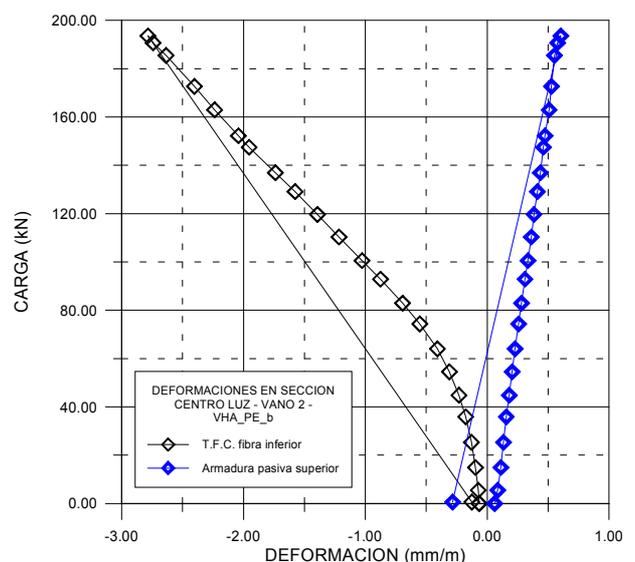


Figura 4.113 Evolución de la deformación en Centro luz vano 2.

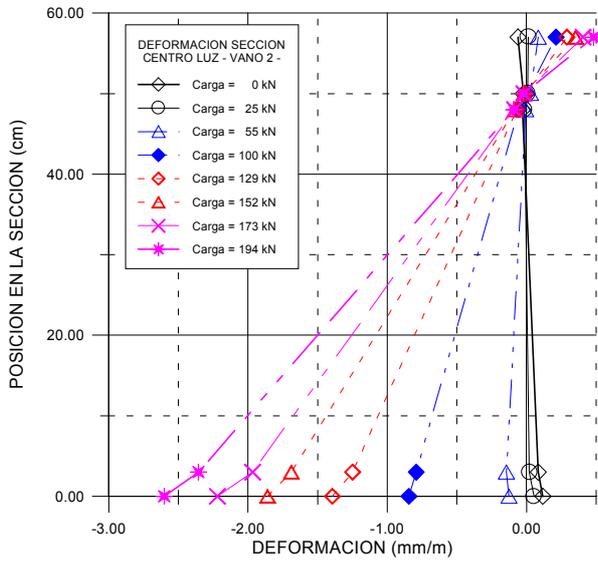


Figura 4.114 Evolución de la deformación en la sección centro luz vano 2.

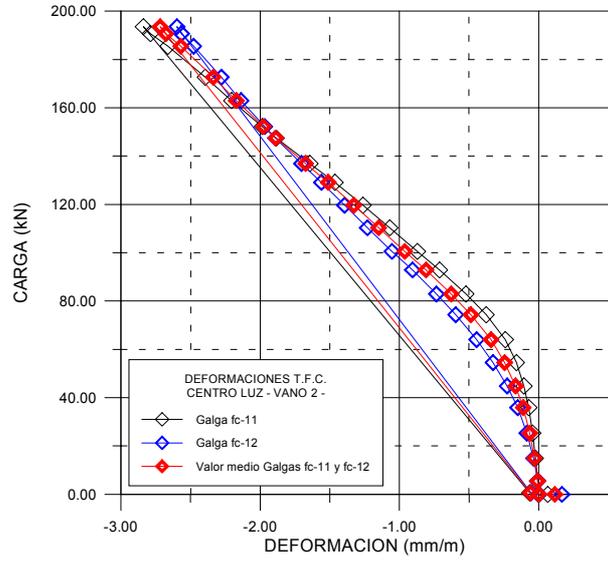


Figura 4.115 Evolución de la deformación en sección centro luz vano 2.

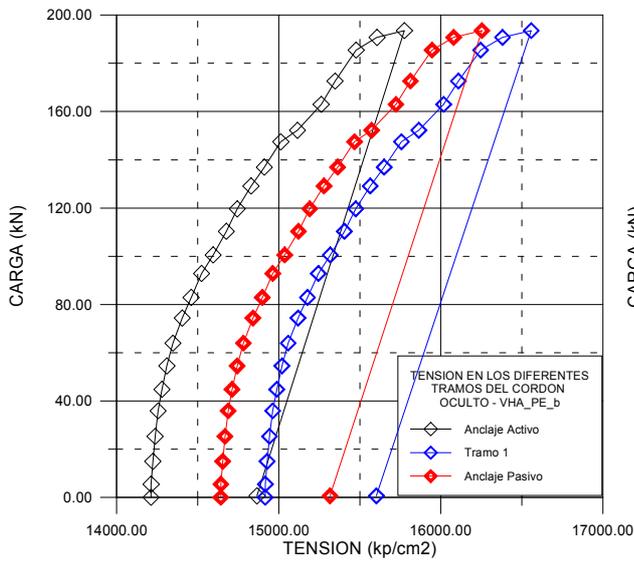


Figura 4.116 Evolución de la tensión en los diferentes tramos –tendón oculto-.

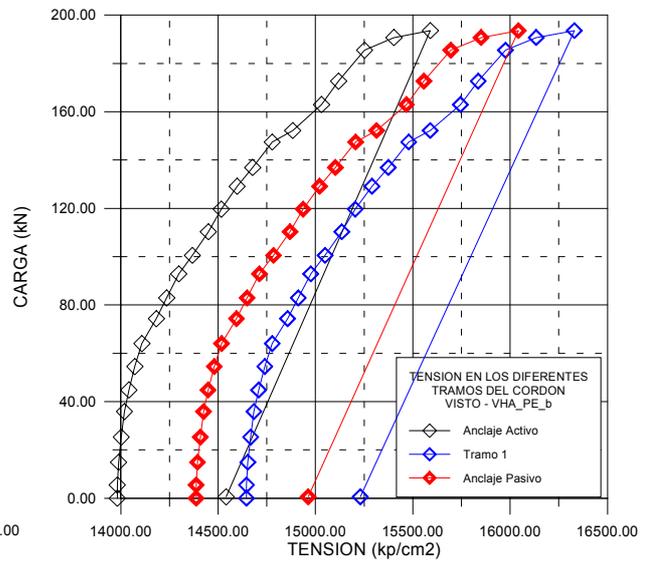


Figura 4.117 Evolución de la tensión en los diferentes tramos –tendón visto-.

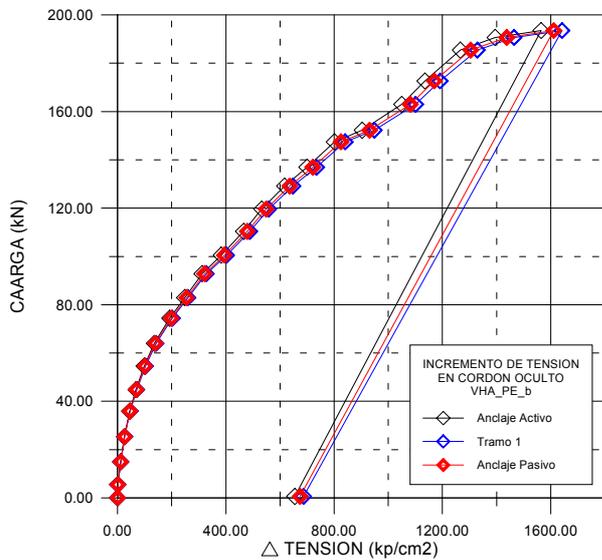


Figura 4.118 Incremento de la tensión en los diferentes tramos –tendón oculto-.

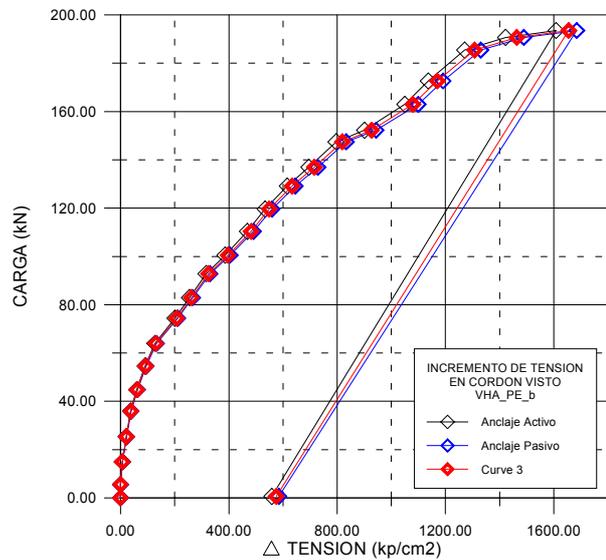


Figura 4.119 Incremento de la tensión en los diferentes tramos –tendón visto-.

4.5 RESUMEN DE RESULTADOS SOBRE MODELOS DE PUENTE

N ^a	Ensayo	Rotura Experimental kN	Flecha Máxima mm	Tipo de Ensayo	Distribución de Cargas Q
4.4.2	VPE_1	395	60	Hiperestático	Q + Q vano 1
4.4.3	VPE_2	410	80	Hiperestático	Q + Q vano 1
4.4.4	VPE_3	360	60	Hiperestático	Q + Q vano 1
4.4.5	VHA1_a	92.8	10	Hiperestático	2Q vano 1 y Q + Q vano 2
4.4.6	VHA1_b	98.4	14	Hiperestático	2Q vano 1 y Q + Q vano 2
4.4.7	VHA1_c	96.97	21	Isostático	2Q vano 1 y Q + Q vano 2
4.4.8	VHA1_d	165.55	70	Isostático	Q + Q vano 2
4.4.9	VHA_PE_a	156.6	20	Hiperestático	2Q vano 1 y Q + Q vano 2
4.4.10	VHA_PE_b	193.55	--	Isostático	Q + Q vano 2

