

Capítulo 6

REALIZACIÓN DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

6.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los ensayos experimentales llevados a cabo dentro del marco de la presente tesis.

Al plantear la realización del estudio experimental se definió un doble objetivo. Por una parte, se pretendía equipar el Laboratorio de Estructuras de la Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona (EPSG) con una dotación mínima capaz de permitir la continuación y el desarrollo de líneas de investigación estructural que requirieran el apoyo de la experimentación. Por otra parte, los ensayos debían servir para la contrastación del modelo desarrollado en la presente tesis y para otros trabajos de continuación que pudieran llevarse a cabo en el futuro.

Se partía de una situación en la que prácticamente sólo se disponía del local y de algunos elementos para el ensayo de probetas. Por tanto, de una manera paralela, hubo que definir e implantar el equipamiento que se describe en los apartados correspondientes.

De acuerdo con las potencialidades del programa de cálculo implementado se pensó en un elemento estructural hiperestático, con sección evolutiva y sometido a un proceso de carga y descarga. Para ello se plantearon dos ensayos de carga instantánea sobre una misma viga continua de hormigón armado de dos vanos. El primero sobre la viga sin reforzar y el segundo habiéndola reforzado. Este último se llevó hasta la rotura.

Como complemento se realizaron ensayos para la determinación de las propiedades mecánicas del hormigón.

En la exposición que sigue, en primer lugar se describen las características de la viga, del equipamiento, de las variables instrumentadas y de la preparación del elemento a ensayar. A continuación se detallan los ensayos realizados y se exponen los resultados obtenidos. Finalmente, se presenta la simulación de los ensayos mediante el uso del modelo descrito y se comparan los resultados numéricos obtenidos con los experimentales. En el segundo ensayo, la modelización sólo se lleva a cabo para niveles de carga en los que el comportamiento del hormigón en compresión pueda aproximarse por una ley lineal y el acero no llegue a su límite elástico.

6.2. DESCRIPCIÓN DE LA VIGA ENSAYADA

La elección del tipo de elementos a ensayar es siempre un punto importante en la planificación de los ensayos y debe adecuarse a los objetivos planteados en el proceso experimental. En este caso la finalidad básica consistía en la puesta a punto y contrastación del funcionamiento del equipamiento del laboratorio y la verificación del modelo numérico desarrollado. En la medida de lo posible se pretendía ensayar un elemento construido con materiales y geometrías usuales en edificación, con una disposición de armado similar a la utilizada en la práctica, susceptible de ser reforzado, y con alguna complejidad que forzara un poco más la puesta a prueba del equipo y del modelo, como por ejemplo un grado de hiperestaticidad, vanos asimétricos y proceso de carga y descarga con incorporación de refuerzo. La capacidad resistente y dimensiones debían adecuarse a las características de los equipos disponibles.

De acuerdo con lo comentado se eligió una viga continua de hormigón armado de 5.5 m de longitud, con vanos de 3.0 m y 2.5 m. Se adoptó una sección transversal rectangular de 20 cm de canto y 30 cm de anchura.

El hormigonado se realizó “in situ” con un hormigón de 35 MPa de resistencia característica y consistencia Blanda. Se utilizó acero de 500 MPa de límite elástico.

La composición del hormigón, de acuerdo con los datos facilitados por la planta, fue la siguiente:

- Cemento: Tipo I, clase resistente 42.5R
- Cantidad de cemento: 390 kg/m³
- Relación A/C: 0.55
- Árido: Calizo de cantera

El dimensionado de las armaduras se llevó a cabo teniendo en cuenta la geometría del elemento y las características de los materiales anteriormente citados, además de la tipología de las cargas, que consistieron en dos fuerzas de valor P aplicadas en el centro de cada vano.

Los valores de las cargas se tomaron de manera que fueran compatibles con las que podían aplicarse mediante el equipo disponible en el laboratorio. Se estableció un valor de $P = 75$ kN para la carga de diseño de la viga sin reforzar. A partir de los diagramas de esfuerzos correspondientes se procedió al dimensionamiento de las armaduras. Los coeficientes de mayoración y minoración se tomaron iguales a la unidad.

En la Figura 6.1 se presenta un esquema de la viga, la situación de las fuerzas aplicadas y los diagramas de momentos flectores y esfuerzos cortantes.

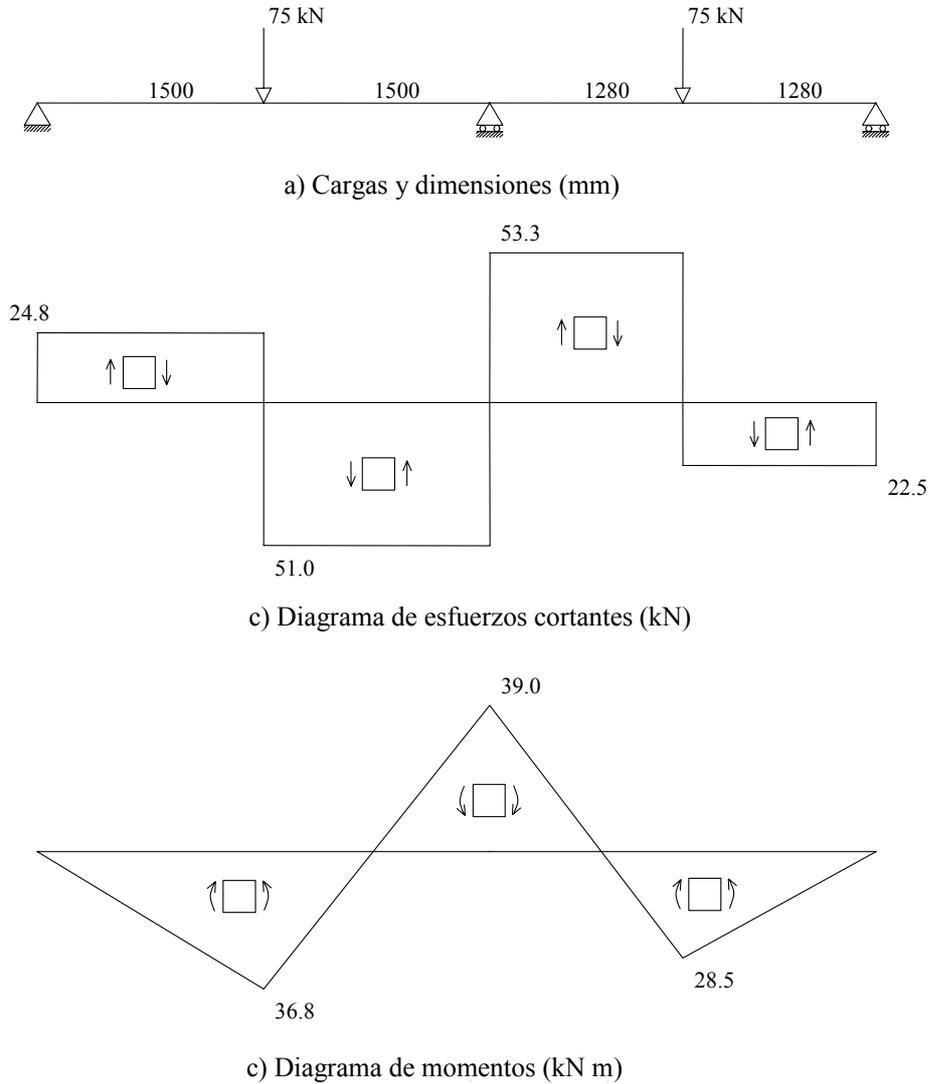


Figura 6.1 – Esquema de la viga y diagramas de esfuerzos

Para el armado longitudinal se dispusieron armaduras continuas de $2\varnothing 16$ mm en la parte inferior y $2\varnothing 10$ mm en la parte superior, añadiendo refuerzos de armadura con $\varnothing 16$ mm y $\varnothing 10$ mm en las zonas en que el valor del momento flector así lo requirió (Figura 6.2).

Como armadura transversal se colocaron cercos $\varnothing 6$ mm cada 0.10 m. Se adoptó un recubrimiento de esta armadura de 2 cm.

En la Figura 6.2 se presenta un esquema con la definición del armado y sus características básicas.

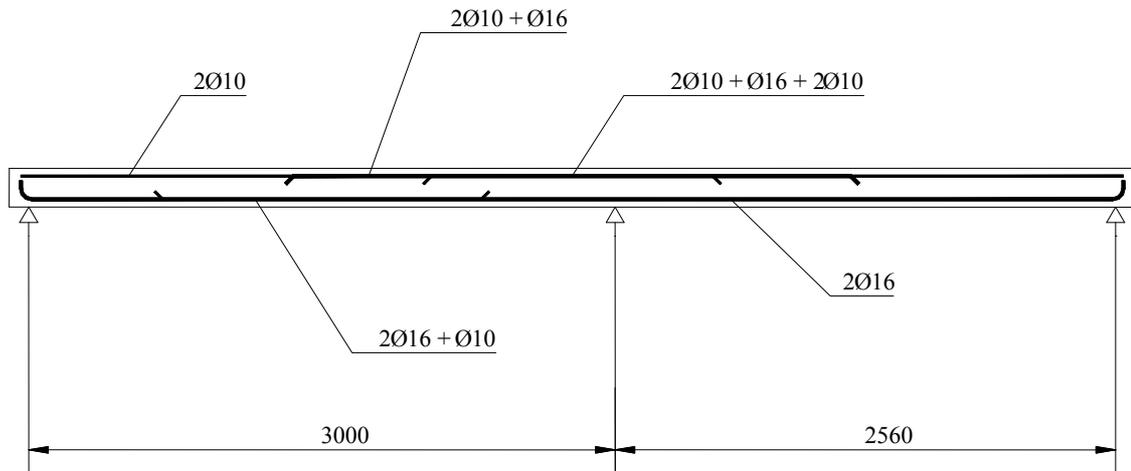


Figura 6.2 – Definición del armado de la viga a ensayar

Los refuerzos se llevaron a cabo con chapas encoladas de 3 mm de espesor y 300 mm de anchura de acero A42b, en las zonas sometidas a tracción del centro del primer vano y en el apoyo central de la viga, dejando el segundo vano sin reforzar. Como adhesivo se utilizó un producto de dos componentes a base de resinas epoxi y cargas especiales (*Sikadur 31 adhesivo*). El diseño se realizó teniendo en cuenta las características del equipamiento disponible y las recomendaciones constructivas para chapas encoladas (Fernández Cánovas [93,95]).

En la Figura 6.3 se muestra la disposición y dimensiones de los elementos de refuerzo.

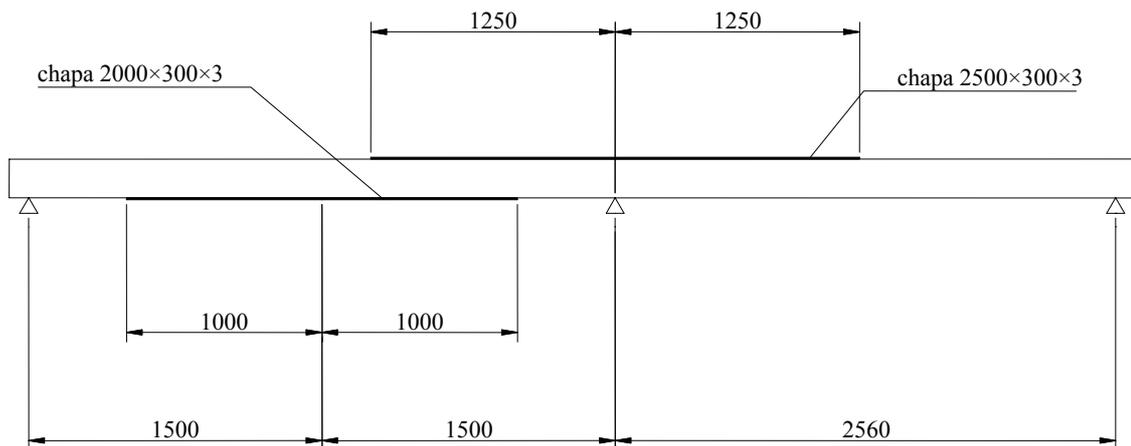
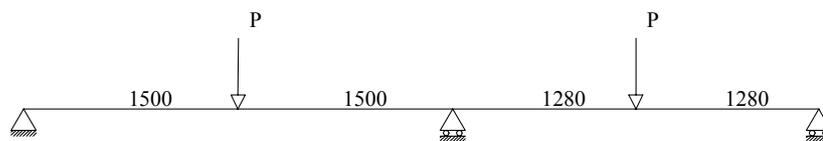


Figura 6.3 – Disposición de los refuerzos (segundo ensayo)

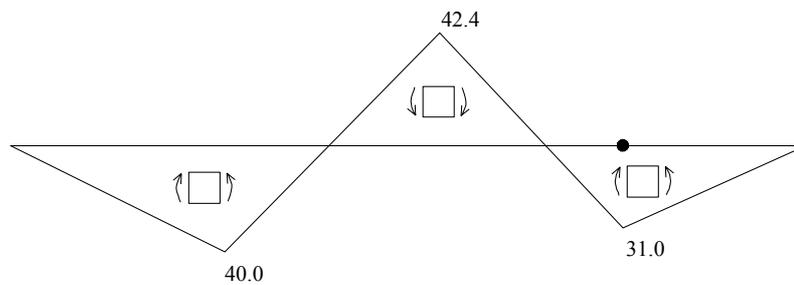
Puesto que en el ensayo de la viga reforzada se pretendía llegar hasta la carga última se realizó un cálculo estructural elastoplástico, con objeto de tener una idea de la capacidad resistente del elemento y de la secuencia de formación de rótulas.

Para la viga sin refuerzos, en las secciones centrales de los vanos y en el apoyo intermedio, se obtuvieron los siguientes momentos de agotamiento: $M_{vano1} = 37 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{apoyo} = 40 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{vano2} = 31 \text{ kN}\cdot\text{m}$. Para la viga reforzada los momentos fueron: $M_{vano1} = 76 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{apoyo} = 79 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{vano2} = 31 \text{ kN}\cdot\text{m}$.

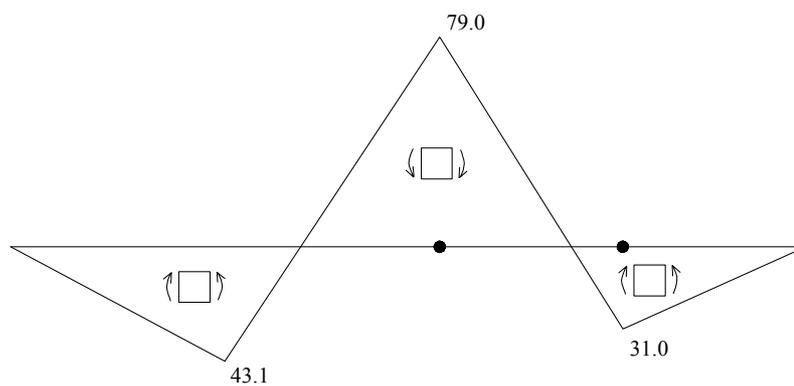
De acuerdo con ello se formaría una primera rótula en la sección central del segundo vano para una carga $P = 82 \text{ kN}$ y una segunda rótula en el apoyo central para una carga $P = 110 \text{ kN}$. En la Figura 6.4 se presentan los diagramas de momentos correspondientes.



a) Cargas y dimensiones (mm)



b) Diagrama de momentos primera rótula (kN·m)



c) Diagrama de momentos segunda rótula (kN·m)

Figura 6.4 – Viga reforzada: previsión de formación de rótulas con cálculo elastoplástico.

6.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS Y EQUIPAMIENTO

6.3.1. Descripción de los ensayos

Se planificaron dos ensayos sobre la viga y ensayos complementarios para la caracterización del hormigón.

El primer ensayo, efectuado con la viga continua sin reforzar, estaba orientado a reproducir el comportamiento instantáneo en servicio, mediante la aplicación de una carga creciente, hasta valores de la tensión en el hormigón de un 40-50% de su resistencia a la compresión. Mediante una modelización previa del ensayo usando el programa desarrollado se decidió llegar hasta un valor de $P = 37.5$ kN. En este ensayo se obtendrían valores de las flechas y deformaciones en acero y hormigón, así como la situación y evolución de la fisuración.

El segundo experimento estaba enfocado a estudiar el comportamiento de una viga hiperestática con refuerzos, teniendo en cuenta una situación de carga/descarga previa. En este caso se llegó hasta la rotura, lo cual además de permitir el estudio del comportamiento en servicio, posibilitó la verificación del modo de fallo de la viga y la obtención de datos adicionales para cargas superiores a las de servicio que pueden utilizarse en trabajos futuros.

Por otra parte, para la contrastación de los resultados experimentales con los obtenidos mediante la utilización del modelo implementado era recomendable disponer de datos reales de las propiedades del hormigón utilizado. Para ello se confeccionaron una serie de probetas, de las que algunas se conservaron en condiciones estándar de humedad y temperatura hasta 28 días y otras se mantuvieron en el laboratorio, en las mismas condiciones ambientales que la viga.

De acuerdo con lo expuesto, los ensayos finalmente realizados fueron los que se citan a continuación:

- Ensayos sobre la viga sin reforzar:
 - Carga de servicio

- Ensayos sobre la viga con refuerzos:
 - Carga de servicio
 - Carga de rotura

- Ensayos sobre probetas conservadas en condiciones estándar:
 - Resistencia a la compresión

- Ensayos realizados sobre probetas en las condiciones ambientales de laboratorio:
 - Resistencia a la compresión
 - Resistencia a la tracción indirecta
 - Módulo de deformación

Las cargas aplicadas sobre la viga consistieron en su peso propio y dos fuerzas puntuales en el centro de cada vano, aplicadas de manera cuasi-instantánea (aprox. 2 h). Debido a los trabajos de preparación, instrumentación, puesta a punto del sistema de adquisición, refuerzo, etc. transcurrió un cierto tiempo desde la construcción de la viga hasta la realización del primer ensayo, así como desde la realización del primer ensayo hasta la fecha en que se llevó a cabo el segundo. En la Tabla 6.1 se indica la edad y la carga aplicada en cada uno de ellos.

Por lo que respecta a los ensayos de caracterización del hormigón, en la Tabla 6.2 se muestra un resumen con indicación de las edades a las que se efectuaron.

Ensayo	Edad (días)	Carga P aplicada (kN)
Viga sin refuerzos	170	37.5
Viga con refuerzos	340	125.0

Tabla 6.1 – Ensayos en la viga

Ensayo	Edad (días)	
	Probetas en cond. ambientales	Probetas en cond. estándar
Resistencia a compresión	28	28
Resistencia a tracción	170, 340	---
Módulo de deformación	170, 340	---

Tabla 6.2 – Ensayos de caracterización del hormigón

6.3.2. Equipamiento disponible

Los experimentos se realizaron en el Laboratorio de Estructuras de la EPSG. A parte de los locales, instalaciones y elementos complementarios ya existentes (prensa para ensayos a tracción-compresión, puente grúa, carretillas elevadoras), los elementos básicos desarrollados o adaptados de manera paralela a la preparación de los ensayos fueron la losa de carga, el pórtico de carga, el equipo hidráulico para aplicación de las cargas y el sistema de adquisición de datos.

La losa de carga tiene unas dimensiones de 6 m de longitud y 4.5 m de anchura, con un canto de 0.60 m. Se construyó realizando una excavación en el laboratorio de manera que su superficie superior quedara al nivel del suelo del local. Se utilizó hormigón de 35 MPa de resistencia característica y acero de 500 MPa de límite elástico. Los armados superior e inferior son idénticos y constituidos por 1 \varnothing 16 mm cada 0.165 m en sentido longitudinal y 1 \varnothing 12 mm cada 0.165 m en el transversal. Para el anclaje de los elementos a utilizar en los ensayos la losa dispone de una cuadrícula de pernos roscados con separaciones de 0.50 m en las dos direcciones. La carga máxima admisible en cada uno de los anclajes es de 75 kN a tracción.

El pórtico de carga se diseñó de manera que pudiera incorporar un actuador de 300 kN trabajando en dos direcciones (“tracción” y “compresión”). Las dimensiones del pórtico son de 1.0 m \times 1.5 m entre ejes de pilares en planta y de 2.70 m de altura (1.80 m altura útil bajo actuador) y está constituido por perfiles laminados de acero A-42-b. El actuador se sujeta a una placa, con un agujero central para su alojamiento, la cual va atornillada a unas vigas que se unen a los pilares mediante tornillos de manera que se pueda conseguir la máxima versatilidad en cuanto a la altura de fijación.

En las Figuras 6.5 y 6.6 se muestran unos esquemas de la planta del laboratorio, con la losa y el pórtico de carga.

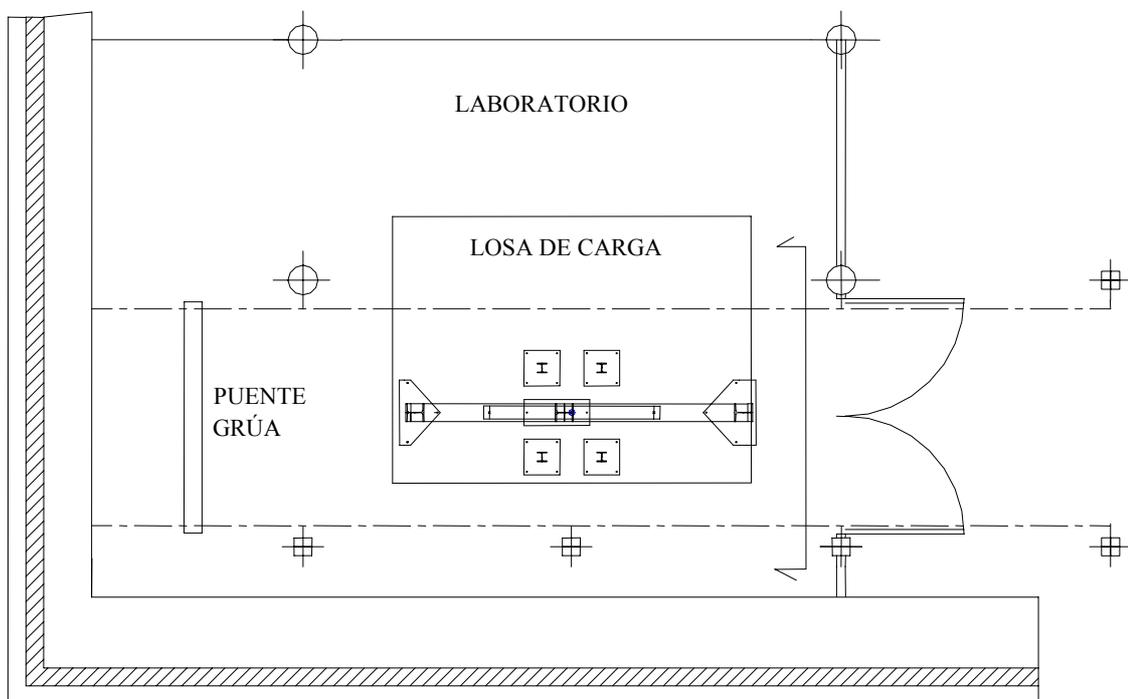


Figura 6.5 – Planta laboratorio y losa de carga

El equipo para la aplicación de las cargas estaba compuesto por un actuador hidráulico servocontrolado de doble efecto de 300 kN, servocontrolado equipado con célula de carga y transductor de desplazamiento. Los elementos de control estaban constituidos por módulos SERVOSIS MIC-102ME y MCH-102ME y permitían accionar el actuador mediante una rampa de fuerzas o de desplazamientos.

El sistema de adquisición de datos que se implementó para la realización del ensayo estaba compuesto de un equipo Dataloger CR10X y dos multiplexores AM416, (16 canales diferenciales), de *Campbell Scientific Ltd.* Se trata de un módulo de control y medida relativamente económico y muy versátil. El sistema así constituido tiene una capacidad global de 36 canales de entrada, 3 salidas de excitación, 8 puertos de control que pueden usarse para dar o recibir señales externas y dos entradas de pulsos para uso

como contadores. Dispone además de un puerto serie para la comunicación con dispositivos externos, así como para la transmisión de los datos almacenados. Es totalmente programable a partir del software facilitado por el fabricante (PC200), con memoria no volátil y una batería que mantiene los datos en caso de corte de la alimentación.

Al tratarse de un equipo muy universal, apto para múltiples aplicaciones, se tuvo que realizar la programación específica de acuerdo con el tipo de ensayos a efectuar y fue necesario construir y adaptarle una interficie constituida por un módulo de acondicionamiento de señal (placas con puentes de Wheatstone), cableado mallado y conectado a tierra y elementos de conexión. La programación permitía transferir los datos almacenados directamente al disco duro de un PC para su posterior tratamiento y análisis.

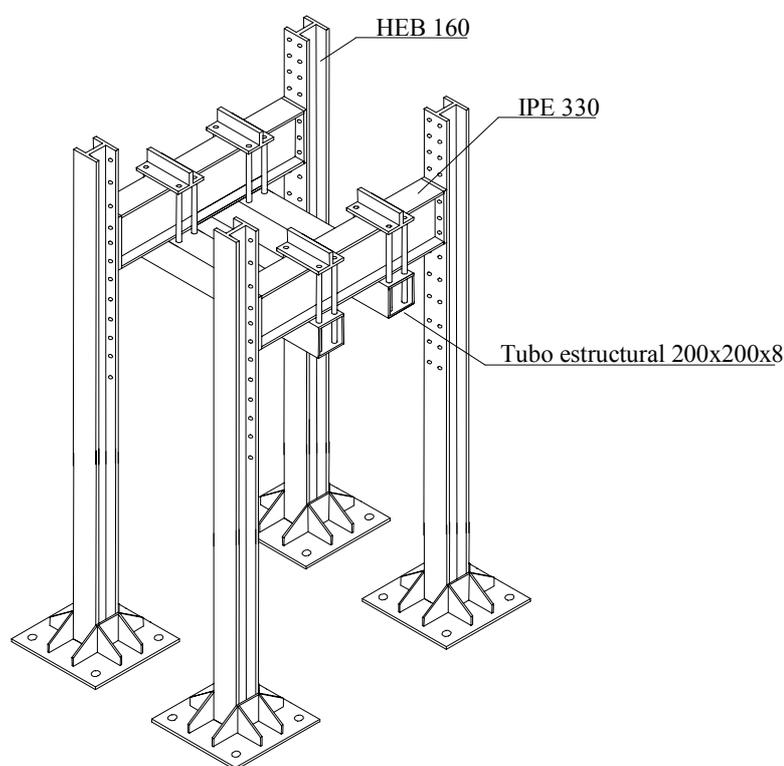


Figura 6.6 – Pórtico de carga

El análisis de los datos registrados, se realizó mediante hojas de cálculo (EXCEL), en las que a partir de los parámetros característicos de la instrumentación instalada y teniendo en cuenta los valores iniciales (offset) se transformaron los milivoltios a deformaciones unitarias o milímetros. Con los listados de valores así obtenidos, se usó el mismo paquete de software para la representación gráfica final de los resultados.

Con posterioridad a la realización de primer ensayo se cambiaron todos los elementos de conexión de la interficie ya que se detectaron repetidos problemas atribuibles a una mala conexión del cableado proveniente de las galgas con el sistema de compensación de las mismas.

Finalmente cabría añadir, que si bien, éste es un equipo que se ha mostrado adecuado para el tipo de ensayos efectuados, presenta una serie de incomodidades atribuibles a su gran universalidad (parámetros de control de cada ensayo, parámetros de cada instrumentación, sistema de conexión, etc), de las cuales ya se tenía conciencia previa y que se han puesto de manifiesto durante el desarrollo de la presente tesis y de otros trabajos efectuados con posterioridad. Como consecuencia de ello, debido, en gran parte, a la experiencia adquirida en estos ensayos y una vez que las disponibilidades presupuestarias lo han permitido, el Laboratorio de Estructuras de la EPSG ha procedido a la adquisición de un equipo enfocado específicamente a la adquisición de datos de bandas extensométricas y sensores afines (LVDT, transductores, termopares, etc.). Se trata de un “Sistema 5000” de la firma *VISHAY Measurements Group*, preparado para 40 canales extensométricos y 5 canales adicionales para señales entre 0 y 30 Voltios, equipado con un software y un sistema de conexión que facilitan en gran medida su manejo.

6.4. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA

6.4.1. Descripción general

De acuerdo con las disponibilidades de equipamiento para instrumentación, y teniendo en cuenta los objetivos propuestos, se resolvió instrumentar la viga y preparar el sistema de adquisición de datos de manera que pudiera obtenerse información sobre las siguientes variables:

- Carga aplicada
- Flechas en distintos puntos de los vanos
- Deformaciones unitarias en las armaduras longitudinales traccionadas
- Deformaciones unitarias en el hormigón, en la dirección longitudinal
- Deformaciones unitarias en las chapas de refuerzo
- Curvaturas a lo largo de la viga
- Reacciones en los apoyos (segundo ensayo)
- Fisuración
- Tiempo transcurrido

En general se adoptó el criterio de usar elementos de tipo electrónico, ya que permiten obtener un gran número de datos sobre variables distintas, de una manera rápida y simultánea, sin necesidad de tener que dedicar mucho tiempo a la lectura de datos, o acercarse a los elementos de aplicación de cargas, lo cual es aconsejable en ensayos de corta duración o en los que se llegue a la rotura. Además, este tipo de instrumentación permite el acceso a elementos interiores como las armaduras.

Sin embargo, como complemento, y con la idea de obtener datos a lo largo de la viga que además pudieran utilizarse para contrastar el funcionamiento de los equipos electrónicos se decidió usar un extensómetro mecánico para medir manualmente deformaciones en fibras predeterminadas (a partir de las que se podría obtenerse la curvatura en distintas secciones). Puesto que se quería hacer un seguimiento de la evolución de la fisuración, se aprovecharían las mismas paradas para hacer estas mediciones.

6.4.2. Deformaciones en las armaduras longitudinales

Para la obtención de las deformaciones en las armaduras longitudinales se utilizaron galgas extensométricas pegadas a las barras y embebidas en el hormigón.

En el montaje y la selección de las características de las galgas y de los parámetros ligados a las mediciones extensométricas deben tenerse en cuenta los principios que rigen su funcionamiento y las condiciones del ensayo a efectuar [168] y [240].

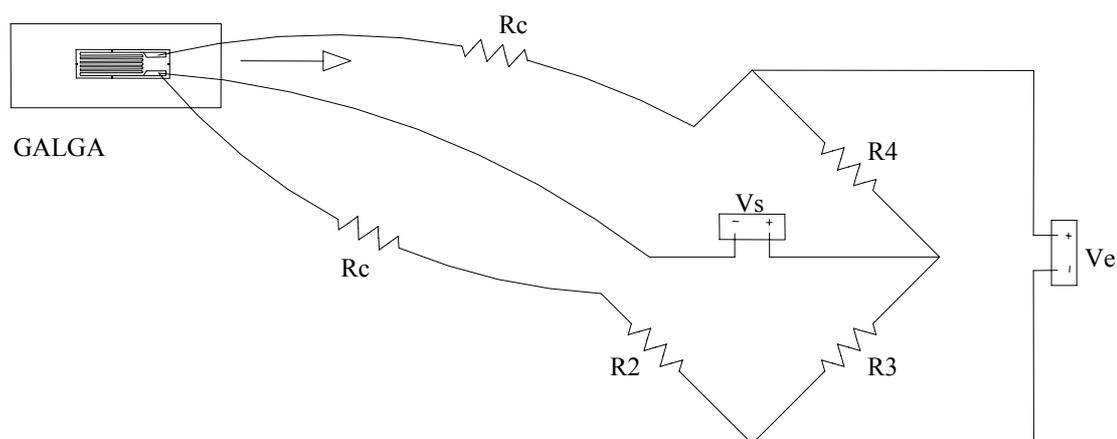


Figura 6.7 – Montaje de galgas en 1/4 de puente de Wheatstone

Las galgas extensométricas son resistencias eléctricas que experimentan una variación de su valor nominal en función del cambio de longitud del propio filamento cuando se produce una deformación en el material al cual están adheridas. Consisten en una rejilla filamentosa conductora colocada sobre una de las caras de un soporte plástico. El hilo conductor debe ser de un material que manifieste una relación lineal entre la variación de la resistencia y la deformación (constantan, niquel-cromo, etc.). Por otra parte el soporte es el encargado de proteger el filamento, de aislarlo eléctricamente del material al cual está adherido y de transmitirle las deformaciones del elemento solicitado de la manera más fidedigna posible. Si las galgas se incorporan a un circuito con configuración en puente de Wheatstone puede relacionarse su deformación unitaria (ϵ) con la variación en la tensión de salida ($V_s - V_0$), sabiendo la tensión de

alimentación (V_e) y el denominado factor de galga (K). Para el caso de un montaje en $\frac{1}{4}$ de puente de tres hilos según el esquema de la Figura 6.7, la deformación unitaria vendrá dada por

$$\varepsilon = \frac{4(V_s - V_0)}{K V_e} \quad (6.1)$$

Es recomendable escoger galgas compensadas que contrarresten los efectos de la dilatación térmica del material. Asimismo el montaje en $\frac{1}{4}$ de puente con tres hilos sitúa las resistencias de los cables en ramas opuestas del puente evitando desequilibrios debidos a las variaciones de temperatura sobre ellos.

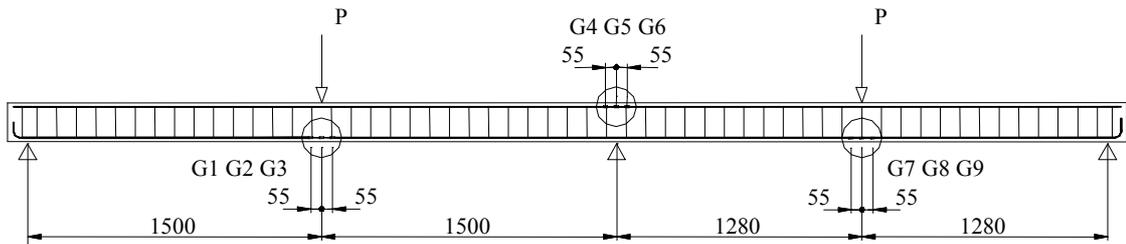
Las dimensiones de la galga se deben escoger en función de la heterogeneidad del material en el que se va a pegar (importante en el caso del hormigón), el espacio disponible y el gradiente de tensiones, puesto que la galga mide la media de los valores a lo largo de su longitud.

Las condiciones en las que se va a desarrollar el ensayo incidirán de manera directa sobre las características que debe tener la galga. Así tendrán importancia las deformaciones máximas que va a sufrir, el rango de temperaturas a que se verá sometida, la exposición a agentes exteriores y si la carga puede considerarse estática o dinámica, en cuyo caso tendría importancia el número de ciclos.

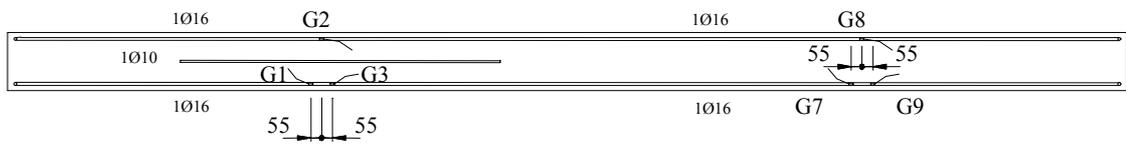
Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, en este caso se usaron galgas autocompensadas del tipo CEA-06-375UW-120 de la firma *Measurements Group Inc.*, de material constantan, con rejilla de longitud de 10 mm y de una resistencia eléctrica de $120 \Omega \pm 0.3 \%$, con una deformación máxima admisible del 5 %. El factor de galga era de $2.065 \pm 0.5 \%$ y la sensibilidad transversal de $-0.1 \pm 0.2 \%$. La tensión de alimentación se fijó en 2.5 V.

Se instalaron en las secciones en las que se daban los valores máximos de los momentos flectores (cargas exteriores y apoyo central). Con el fin de intentar minimizar el efecto en el comportamiento seccional que pudiera tener su instalación, pero al mismo tiempo intentar que suministraran información del entorno de las secciones elegidas, se decidió colocar tres galgas en cada sección, con una separación que no sobrepasara la distancia teórica entre fisuras. Se realizó una estimación de la separación media entre fisuras, de acuerdo con la expresión propuesta en EH-91, obteniéndose valores de 113 mm (primer vano), 99 mm (apoyo central), 118 mm (segundo vano), siendo el promedio de 110 mm. De acuerdo con el criterio mencionado se instalaron tres galgas en cada sección, una centrada y las otras a 55 mm de ella.

La posición de estos elementos y la nomenclatura utilizada para su identificación quedan reflejadas en la Figura 6.8.



PLANTA ARMADO INFERIOR



PLANTA ARMADO SUPERIOR

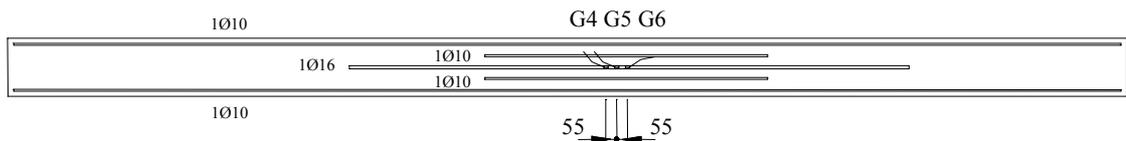


Figura 6.8 – Galgas extensométricas en las armaduras

La instalación y pegado de las galgas sobre las barras corrugadas es una operación delicada de la que depende su correcto funcionamiento posterior. El procedimiento seguido se basó en recomendaciones del fabricante y de bibliografía especializada [168,240] y se describe a continuación.

Preparación de la superficie

La superficie sobre la que se tiene que encolar la galga debe recibir una serie de tratamientos mecánicos y químicos para conseguir un funcionamiento correcto del adhesivo.

Con el fin de alterar en la menor medida posible las características mecánicas y adherentes de la barra, las galgas se instalaron, intentando rebajar al mínimo las corrugas en el proceso de pulido. A continuación se procedió a una limpieza y desengrase con disolvente CSM-1 Desengrasante y se pulió cuidadosamente la superficie usando sucesivamente tamaños menores de grano y mojando la superficie con el Acondicionador de Metal MCA.

Finalmente se aplicó el Neutralizador 5 A, para evitar la presencia de residuos ácidos que pudieran afectar al endurecimiento del adhesivo utilizado.

Preparación y pegado de las galgas

Después de instalar los terminales y situar las galgas sobre las superficies preparadas, en las que se habían marcado sus alineaciones, se procedió al pegado.

Se utilizó un adhesivo del tipo cianocrilato M-Bond 200 que proporciona obtener un endurecimiento rápido y fiable. Se aplicó el catalizador en la galga y terminal en una capa fina dejando secar durante un minuto en condiciones ambientales. A continuación se aplicó el adhesivo presionando ligeramente la galga para obtener una capa uniforme. Se debe ejercer una presión sobre la banda y terminal durante uno o dos minutos para asegurar el pegado final.

Preparación de los cables y conexiones eléctricas

Se utilizaron cables de tres hilos de 0.25 mm² para montaje en ¼ de puente y provistos de malla con conexión a tierra, para evitar problemas de ruidos eléctricos.

Debe comprobarse la inexistencia de poros o defectos de aislamiento que provocarían problemas al entrar en contacto con el agua del hormigón. A tal efecto se midió la resistencia de los cables sumergiéndolos en un cubo de agua y verificando que el valor coincidiera con el obtenido antes de sumergirlos.

Se realizaron dos tipos de conexiones en cada una de las galgas: la unión entre los bornes de la galga y el terminal y la unión del cable al terminal. Se utilizó estaño del tipo “plata”, usualmente empleado en electrónica ya que tiene incorpora un mínimo de resinas y funde a temperaturas bajas.

Comprobaciones

Después de la instalación de cada galga se procedió a la realización de las siguientes comprobaciones:

- a) Se comprobó la resistencia nominal de la galga con un ohmímetro de 0.1Ω, midiendo sobre los bornes de la galga y comparando con los valores obtenidos midiendo en los extremos del cable.
- b) Se comprobó la inexistencia de burbujas de aire y la firmeza y separación de las soldaduras.

Protección de las galgas

Las galgas pegadas a las armaduras deben protegerse de las condiciones ambientales a las que se verán sometidas (humedad, ataque químico, etc.) y de las condiciones mecánicas (rozamiento, golpes durante el hormigonado, etc.).



Figura 6.9 – Protección de las galgas en armaduras

Las galgas embebidas se protegieron mediante el kit M-COAT F recomendado por el suministrador. Para su aplicación primeramente se cortó un trozo de cinta adhesiva de Teflon, que sobrepasara al menos 1.5 mm todas las conexiones eléctricas y a continuación se aplicó un tramo de goma de butilo adhesiva que recubriera la galga y terminal. La protección mecánica del conjunto se realizó colocando encima de la goma de butilo un trozo de lámina de neopreno M-COAT FN, que se cubrió y fijo mediante cinta de aluminio adhesivo. Finalmente se aplicaron dos capas de goma de nitrilo M-COAT B prestando especial atención a la zona de salida de los cables, ya que es un punto por donde puede penetrar el agua.

6.4.3. Deformaciones en el hormigón

Para la medición de las deformaciones en el hormigón se usaron procedimientos electrónicos (galgas extensométricas) y manuales (extensómetro mecánico).

La medición electrónica de las deformaciones en el hormigón se realizó mediante galgas pegadas a la superficie de la viga en las mismas tres secciones en que se instrumentaron las armaduras.

La medición manual se implementó con objeto de tener datos adicionales que permitieran corroborar el correcto funcionamiento de las mediciones electrónicas, básicamente de las flechas, aunque también de las deformaciones, y para ello se tomaron las lecturas solamente para unos valores concretos de la carga aplicada. Se instrumentó toda la longitud del elemento obteniéndose las curvaturas a lo largo de la viga, a partir de las cuales se pudo hallar la flecha en los puntos deseados.

El funcionamiento de las galgas extensométricas y los procedimientos de instalación para el caso de galgas en armaduras ya han sido descritos en el apartado anterior, comentándose a continuación aquellos aspectos específicos para las galgas en la superficie del hormigón.

En la elección de las dimensiones de las galgas debe tenerse en cuenta que el error en la medida se ve influenciado por la relación entre la longitud de la galga y el tamaño máximo del árido tal como indica Hoffmann [132] (Figura 6.10),

recomendándose el uso de galgas con longitudes mayores a 4 veces al tamaño máximo del árido. En este caso se usaron galgas de 50 mm al ser el tamaño máximo del árido de 12 mm.

De acuerdo con todo lo mencionado y siguiendo las recomendaciones del fabricante (*Measurements Group Inc.*), se usaron galgas autocompensadas del tipo N2A-06-20CBW-120, material constantan, con rejilla de longitud de 50 mm y de una resistencia eléctrica de $120 \Omega \pm 0.2 \%$. La deformación máxima admisible era del 3 %, el factor de galga de $2.085 \pm 0.5 \%$ y la sensibilidad transversal de $-2.2 \pm 0.2 \%$. La tensión de alimentación se fijó en 2.5 V.

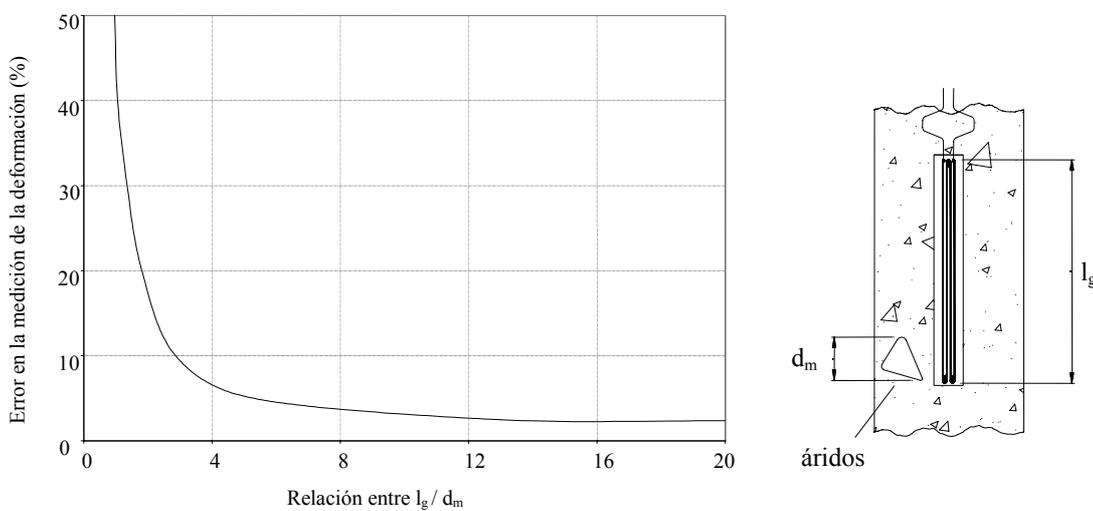


Figura 6.10 – Error debido a la relación “longitud galga/tamaño del árido” [132]

Se instalaron en la zona comprimida de las tres secciones mencionadas anteriormente, colocando dos unidades en cada sección. Una de ellas en la fibra extrema, en la cara superior o inferior de la viga, y otra en la cara lateral a 2 cm del borde, puesto que el cálculo teórico de la posición de la línea neutra para sección totalmente fisurada en servicio dio valores en torno a los 5 cm.

Las operaciones de preparación de la superficie fueron similares a las descritas anteriormente, variando las características de algunos productos para adaptarlos al material y añadiendo una operación de relleno y nivelación para evitar la presencia de poros. Inicialmente se realizó una limpieza y eliminación de irregularidades con cepillo, seguida de la aplicación del desengrasante CSM-1, la aplicación del acondicionador ligeramente ácido MCA, el uso del neutralizador N5-A, la limpieza con agua destilada y el secado de la superficie. Para la eliminación de irregularidades se usó un adhesivo epoxi del tipo AE-10, reduciendo su espesor tras el curado mediante papel abrasivo de grano 320 hasta llegar prácticamente al material base.

Las operaciones de preparación de galgas y cables, colocación, comprobación, y soldadura, fueron similares a las descritas para el caso de las armaduras. Para el pegado se usó un adhesivo de curado más lento, como el M-Bond AE-10, con objeto de facilitar una aplicación precisa del mismo y el correcto alineamiento de las bandas.

La posición de las galgas y su identificación quedan reflejadas en la Figura 6.11. En la Figura 6.12 se muestra un detalle de las galgas G10-G11.

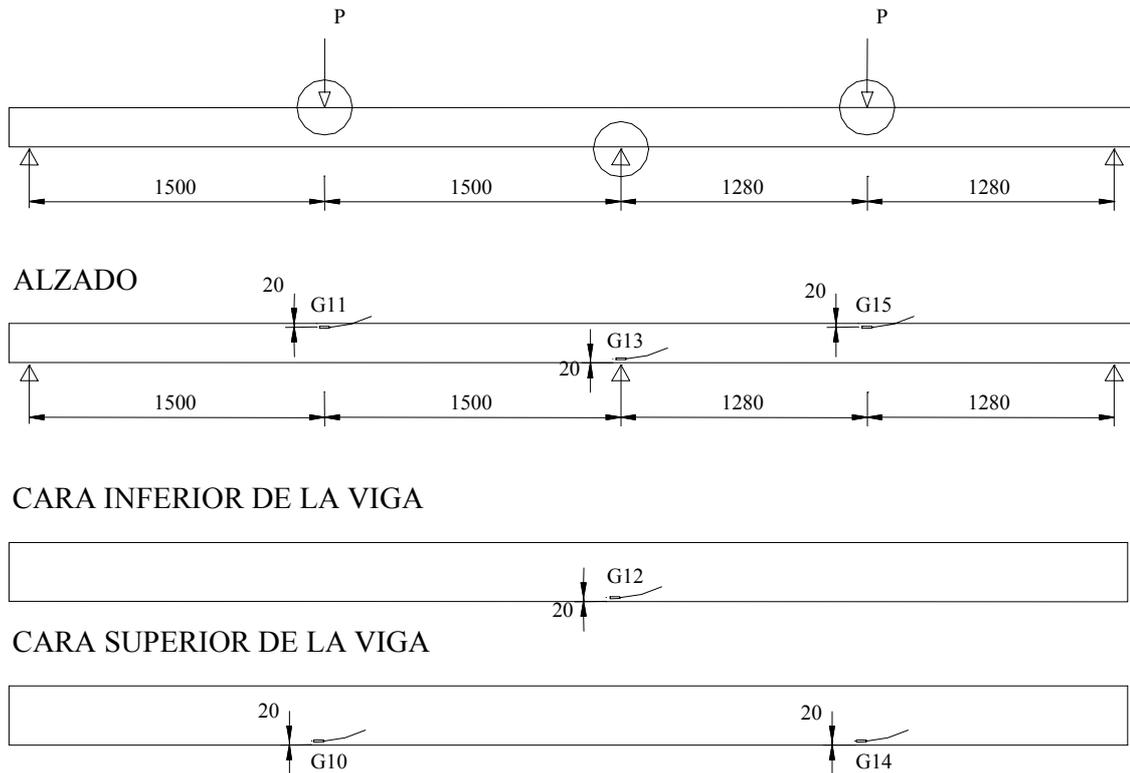


Figura 6.11 – Galgas extensométricas en el hormigón

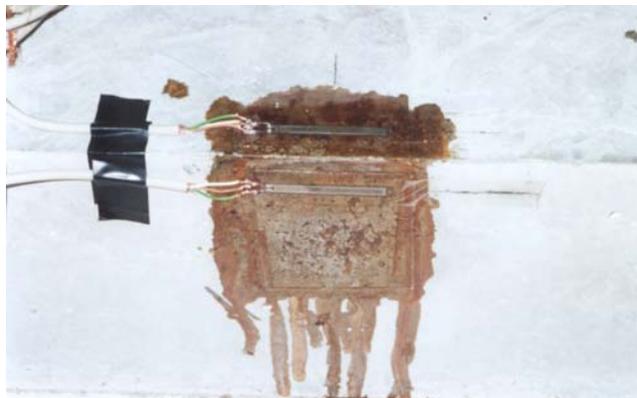


Figura 6.12 – Detalle de galgas en el hormigón

Las mediciones manuales se realizaron con un extensómetro mecánico DEMEC, con capacidad para medir deformaciones de 1.07×10^{-5} . Con este aparato se mide la distancia existente entre dos puntos de referencia constituidos por dos pequeños discos metálicos adheridos con anterioridad al hormigón en los que se han practicado unos pequeños agujeros ciegos que permiten la introducción de las puntas del aparato. Los discos se colocan a una distancia inicial conocida, mediante una barra de referencia calibrada que acompaña al extensómetro, que en este caso fue de 150 mm. A las lecturas obtenidas mediante el reloj incorporado se les debe aplicar un factor de escala, que para el caso del aparato utilizado era de 16.0.

Para obtener los valores de las deformaciones unitarias, se deben tomar dos lecturas entre los puntos de referencia, una anterior a la deformación y otra posterior, de manera que el alargamiento vendrá dado por la diferencia de valores. Conocida la distancia de referencia entre los puntos podrá calcularse la deformación unitaria

$$\Delta L = L_f - L_i \quad (6.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_r} \quad (6.3)$$

donde ΔL es el alargamiento total, L_f y L_i son las longitudes final e inicial entre puntos, L_r es la distancia de referencia y ε es la deformación unitaria.

La posición de los discos y su identificación quedan reflejadas en la Figura 6.13.

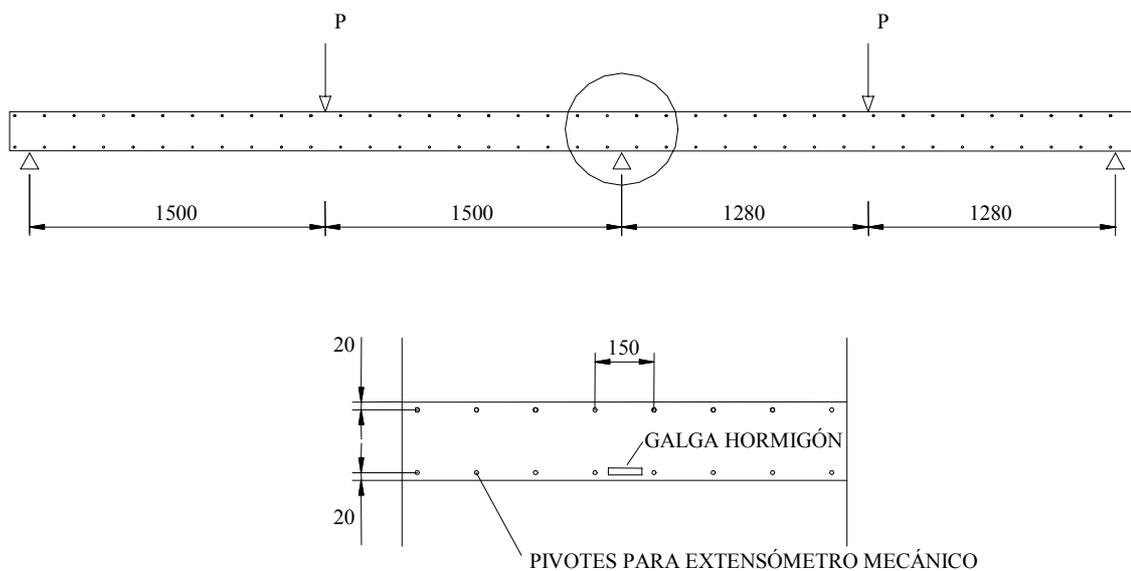


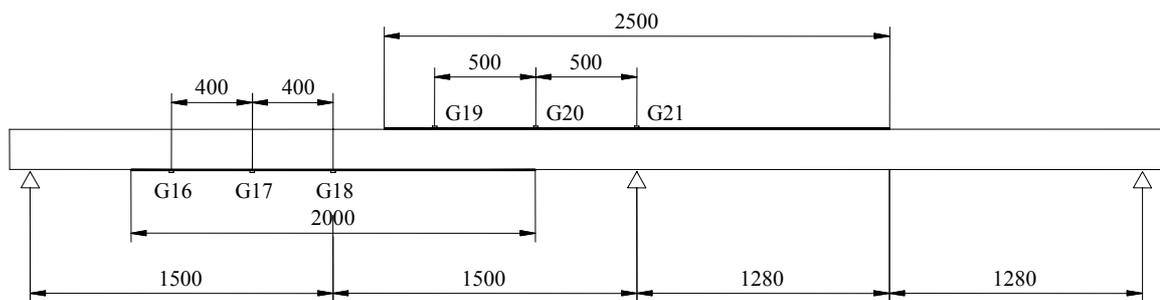
Figura 6.13 – Discos para extensómetro mecánico

6.4.4. Deformaciones en las chapas de refuerzo

La instrumentación de las chapas de refuerzo se realizó asimismo con galgas extensométricas.

Teniendo en cuenta las recomendaciones del fabricante (*Measurements Group Inc.*), las características del elemento a instrumentar y las solicitaciones previstas, se instalaron galgas autocompensadas del tipo EP-08-250BG-120, material constantan, con rejilla de longitud 6.35 mm y de una resistencia eléctrica de $120 \Omega \pm 0.15 \%$. La deformación máxima admisible era del 20 %, el factor de galga de $2.055 \pm 0.5 \%$ y la sensibilidad transversal de $-0.9 \pm 0.2 \%$. Igualmente que en los otros casos la tensión de alimentación se fijó en 2.5 V.

Se instrumentaron las chapas con tres galgas cada una, desde el centro de su longitud hasta uno de los extremos, tal como puede verse en la Figura 6.14.



CARA INFERIOR DE LA VIGA

	G16	G17	G18	
--	-----	-----	-----	--

CARA SUPERIOR DE LA VIGA

	G19	G20	G21	
--	-----	-----	-----	--

Figura 6.14 – Galgas extensométricas en los refuerzos

La instalación de las galgas se realizó de manera similar a las galgas en armaduras, teniendo en cuenta que en este caso no se requería la protección para galgas embebidas. En la Figura 6.15 se muestra una de dichas galgas instalada.

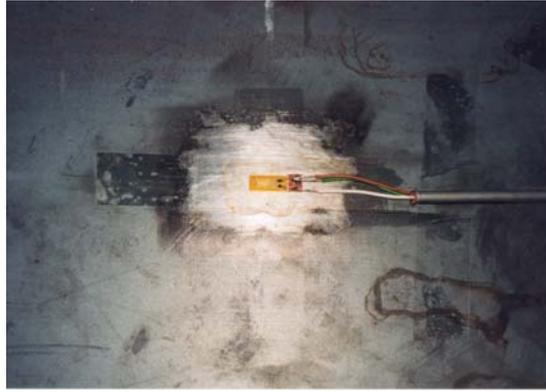


Figura 6.15 – Galgas en chapa de refuerzo

6.4.5. Flechas en distintos puntos de la viga

La instrumentación utilizada para la medición de las flechas también fue de tipo electrónico.

Los elementos disponibles en el Laboratorio de Estructuras para este tipo de mediciones eran transductores de desplazamiento del tipo LSC (*Linear Strain Conversion*), basados en la conversión lineal a unidades de desplazamiento de la deformación de un elemento sensible, instrumentado con puentes extensométricos de galgas. Estos elementos se caracterizan por su buena resolución (sobre todo para cargas estáticas o de baja frecuencia), los bajos errores de no linealidad y su coste relativamente menor que dispositivos tales como LVDT, de tipo inductivo.

Su principio de funcionamiento es análogo al de las galgas extensométricas, ya que incorporan un montaje en puente de Wheatstone completo que detecta las deformaciones que se producen en el vástago central y proporciona una tensión eléctrica de salida.

Para obtener el valor del desplazamiento a partir del registro de la variación de la tensión de salida $V_s - V_0$, el fabricante debe proporcionar el factor de galga (K) y el factor de sensibilidad de deformaciones (F), que indica la deformación unitaria detectada para cada unidad de desplazamiento. Los valores del desplazamiento (d) se obtendrán de acuerdo con la siguiente expresión:

$$d = \frac{4(V_s - V_0)}{K V_e F} \quad (6.4)$$

Considerando los desplazamientos y tipo de carga previstos para el ensayo y teniendo en cuenta las especificaciones dadas por el fabricante, se usaron transductores de la firma APEK, tipo HKS25B y HLS10B. Sus características principales eran: factor de galga de valor 2.0, resistencias de puente de 350 Ω y error de no linealidad de $\pm 0.05\%$. Los del tipo HLS25B son aptos para un desplazamiento máximo de 26 mm, sensibilidad de 6.7 mV/V y los que se utilizaron tenían un factor F comprendido entre

515 y 524 mm^{-1} (el valor concreto de cada uno venía especificado en la hoja que acompañaba a cada elemento), mientras que en los del tipo HLS10B el desplazamiento máximo era de 11 mm, la sensibilidad de 4.9 mV/V y el factor F estaba comprendido entre 887 y 914 mm^{-1} . La tensión de alimentación se suministró mediante el equipo de adquisición de datos y fue de un valor de 2.5 V de corriente continua.

Se instalaron ocho transductores a lo largo de los dos vanos de la viga, colocados en los apoyos, en el centro y en los cuartos de la luz del primer vano y en el centro y el tercer cuarto de la luz del segundo vano. Los tres aparatos situados en los apoyos fueron del tipo HLS10B, mientras que el resto lo fueron del tipo HLS25B.

En la Figura 6.16 se indica la posición de los transductores y la nomenclatura utilizada para su identificación.

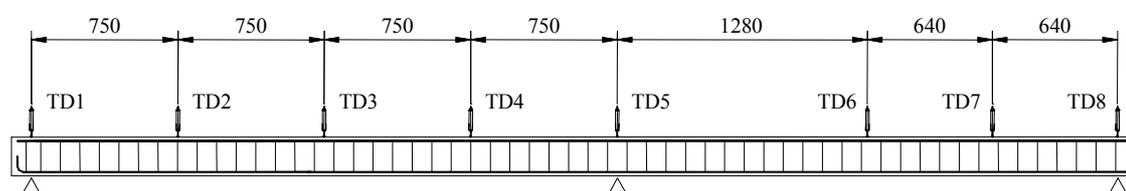


Figura 6.16 – Transductores de desplazamiento para medición de flechas

Para la sujeción de los transductores se utilizaron unas pinzas suministradas por el mismo fabricante, las cuales se unieron a unos soportes que se atornillaron en el suelo. En la Figura 6.17 se puede observar la colocación de un transductor.

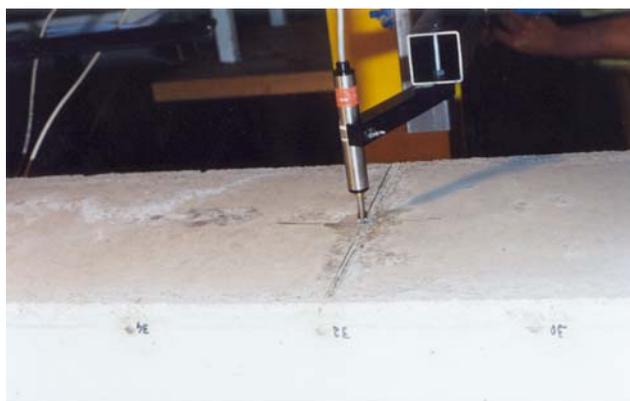


Figura 6.17 – Transductor de desplazamiento instalado

6.4.6. Carga aplicada

La carga fue aplicada mediante un actuador con capacidad de 300 kN, conectado a una bomba hidráulica de 250 bar, controlados mediante un equipo electrónico.

El control se podía realizar sobre carga o desplazamiento y el actuador llevaba incorporados una célula de carga y un transductor de desplazamiento capaces de medir con errores inferiores al 0.1 %. Los datos eran contrastados por el equipo que actuaba en consecuencia sobre el sistema hidráulico.

Se tomó la señal eléctrica de salida correspondiente a la carga aplicada en cada momento por el actuador ($2P$) y se registró con el sistema de adquisición de datos general de manera que la carga P se obtuvo mediante la expresión siguiente:

$$P = \frac{1}{2}(V_s - V_0)0.1 \quad (6.5)$$

En la ec.(6.5), V_s es la tensión de salida, V_0 la tensión de offset y el factor 0.1 es un coeficiente multiplicativo propio del equipo, para obtener el resultado en kN.

Para la aplicación de la carga puntual en el centro de cada vano se construyó una viga repartidora constituida por un perfil HEB-220 con rigidizadores en los puntos sometidos a la acción de fuerzas concentradas. Este elemento repartidor constituía un sistema isostático con una carga central $2P$ y fuerzas en sus extremos de valor P , tal como se aprecia en la Figura 6.18.

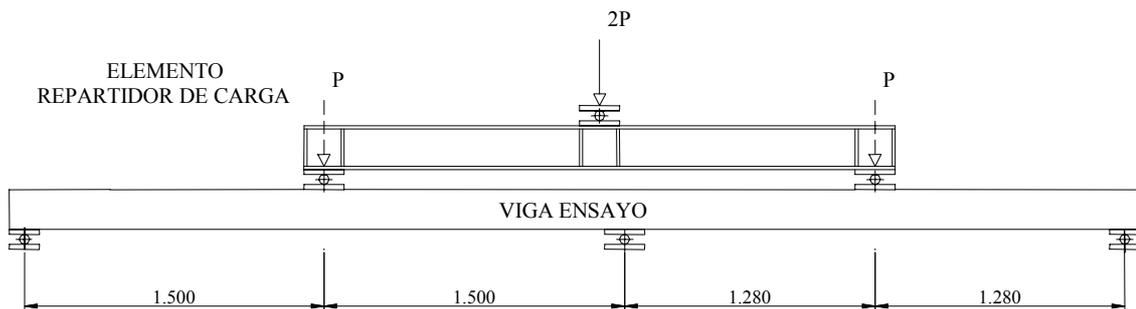


Figura 6.18 – Esquema de aplicación de la carga

6.4.7. Reacciones en los apoyos

Al tener el elemento ensayado un grado de hiperestaticidad, la determinación de una de las reacciones permite conocer el valor de las otras y la distribución de esfuerzos a lo largo de la viga.

Para la medición de este parámetro debía usarse una célula de carga de unos 15 kN, elemento de un coste relativamente alto y del cual no se pudo disponer hasta la realización del segundo ensayo, de manera que durante el primero no se efectuó el registro de esta variable.

El principio de funcionamiento de la célula se basaba en un cuerpo cilíndrico que actuaba como un resorte de medida en el interior del cual estaban adheridas ocho galgas extensométricas, de las cuales cuatro medían las deformaciones en un sentido y

las otras cuatro en el otro. En la parte superior disponía de un elemento esférico para la recepción de las cargas y se acompañaba de un soporte de rodamientos de bolas para impedir la aparición de cargas descentradas.

El aparato utilizado fue del tipo C2 de la firma HBM, cedido por el Laboratorio de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, con una capacidad de carga nominal de 200 kN, sensibilidad de 2 mV/V y error en compresión inferior al 0.03%. La tensión de alimentación utilizada fue de 2.5 V en corriente continua.

La carga C en kN, a partir de las señales eléctricas registradas en mV se obtiene de

$$C = (V_s - V_0) \frac{200}{2500 \times 2} \quad (6.6)$$

donde V_s es la tensión de salida y V_0 es la tensión de offset.

El montaje de la célula estuvo orientado en todo momento a garantizar que no se viera sometida a esfuerzos transversales que pudieran dañarla. Para ello se consideró que lo más conveniente era instalarla en el apoyo central y colocar una lámina de teflon de 2 mm entre la viga y el aparato de apoyo situado sobre la célula. De esta manera si en algún momento del ensayo aparecía una reacción horizontal importante se podría producir el deslizamiento con un peligro mínimo para el aparato.

6.4.8. Curvaturas a lo largo de la viga

Tal como se ha indicado en 6.4.3 uno de los objetivos de la instrumentación con extensometría mecánica era la obtención de las curvaturas a lo largo de la viga, de manera que mediante su integración se pudieran obtener las flechas y pudiera servir como contrastación de los datos obtenidos mediante los transductores.

Los aspectos generales de los aparatos utilizados y su instalación ya se han comentado anteriormente. En este apartado se incidirá solamente en la determinación de las curvaturas y el cálculo de las flechas a partir de ellas.

Tomando en consideración un tramo de viga como el indicado en la Figura 6.19, se ha estimado la curvatura C en la sección intermedia entre dos pares de pivotes consecutivos a partir de la deformación unitaria ε_s entre los discos superiores, la deformación unitaria ε_i entre los discos inferiores y la separación media vertical entre ellos d_m

$$C = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_s}{d_m} \quad (6.7)$$

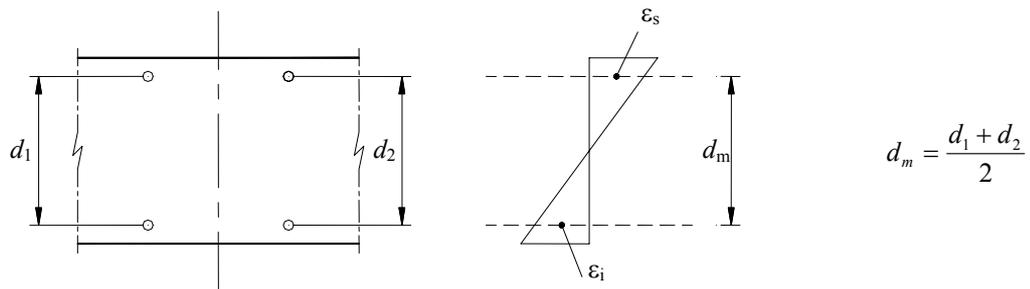


Figura 6.19 – Diagrama de deformaciones en una sección entre discos

Para la determinación de las curvaturas según la ec.(6.7), se midieron las distancias verticales reales entre pivotes de una misma sección, que si bien se colocaron a una distancia nominal de 160 mm, presentaban pequeñas variaciones que oscilaban entre 0.5 i 3 .0 mm.

Se efectuaron las lecturas con el extensómetro realizando las paradas correspondientes en la aplicación de la carga y se obtuvieron las curvaturas para unos ciertos valores de la fuerza aplicada. Para el cálculo de las flechas en las secciones instrumentadas con los transductores de desplazamiento se utilizó el procedimiento de la viga conjugada, calculando las áreas del diagrama de curvaturas por integración numérica utilizando el método de Simpson. Todo el proceso fue implementado mediante el uso de una hoja de cálculo.

6.4.9. Fisuración

Durante la ejecución de los ensayos se realizó un control visual de la fisuración. Después de cada escalón de carga se marcaron las fisuras utilizando trazados y colores distintos. Se recopiló abundante información fotográfica, con la finalidad de que con posterioridad al ensayo fuese posible el seguimiento de su evolución en cada escalón de carga.

6.4.10. Tiempo transcurrido

Si bien en un ensayo de corta duración el tiempo no parece que sea, en principio, un parámetro fundamental se creyó conveniente tener un registro del instante al que correspondía cada lectura, para tener constancia de la duración de cada intervalo de carga, de las paradas y del tiempo total del ensayo.

El equipo de adquisición permitía tomar las lecturas electrónicas de manera automática según una cadencia programada. De acuerdo con ello se entraron las instrucciones para realizar lecturas de todas las variables cada 8 segundos en el primer ensayo y cada 10 segundos en el segundo.

6.5. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA VIGA Y DE LOS REFUERZOS

Los trabajos de construcción de la viga, la instalación de la instrumentación y el montaje de los accesorios se llevaron a cabo en dos fases, la primera para el ensayo de la viga sin refuerzos y la segunda para la viga reforzada.

De forma paralela a la construcción e instrumentación de la viga para el primer ensayo, se realizaban las operaciones de acabado y montaje del pórtico de carga, preparación de elementos auxiliares (soportes, apoyos, puntales) y puesta a punto del equipo de adquisición de datos.

Puesto que para la colocación del refuerzo necesariamente había que mover y levantar la viga se ideó un sistema para su traslado para que ésta se viera sometida a esfuerzos prácticamente nulos. En el momento de preparar la armadura se dispusieron unas barras de anclaje en forma de U, de tal forma que sus dos extremos roscados sobresalieran por la parte superior de la viga una vez hormigonada. Para mover la viga se colocó un perfil metálico HEB-220 de su misma longitud y solidarizado con ella mediante perfiles atornillados a las barras roscadas. El movimiento del conjunto se efectuó mediante el puente grúa situado en la zona de construcción y ensayo. El elemento constituido por la viga y el perfil poseía una gran rigidez y el cálculo de las tensiones debidas solamente al peso propio dio valores prácticamente despreciables. En la Figura 6.20 puede verse un esquema del montaje indicado.

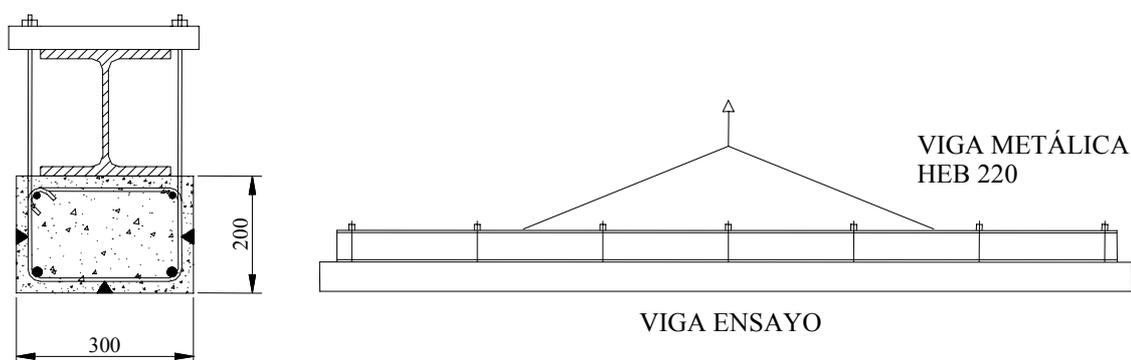


Figura 6.20 – Sistema para la manipulación de la viga

El proceso de construcción de la viga se llevó a cabo en el mismo laboratorio. Mientras se construían los encofrados, se procedió a realizar la instrumentación de las armaduras, las cuáles se colocaron con posterioridad en el interior de aquéllos, instalando unos separadores para conseguir los recubrimientos especificados. Antes de efectuar el hormigonado se comprobó la longitud de las armaduras y la situación correcta de las galgas.

El hormigón se encargó a planta con las características indicadas en 6.2 y el hormigonado se efectuó el día 15 de enero de 1998. Se transportó con camión hormigonera y fue puesto en obra mediante cubilote, prestándose una especial atención al proceso de compactación. Durante el curado se cubrió la viga con una lámina de

plástico y se procedió a su riego un par de veces al día, efectuándose el desencofrado y la retirada de la lámina pasados siete días de la fecha de hormigonado.

Se construyeron probetas, las cuáles se desmoldearon al día siguiente, quedando alojadas en cámara húmeda las destinadas a ensayos en condiciones estándar y en el mismo laboratorio las destinadas a ensayos en condiciones ambientales.

Mientras se acababan los trabajos de construcción, preparación y montaje del pórtico de carga y del equipo de adquisición de datos se pegaron las galgas en el hormigón, permaneciendo la viga en el suelo hasta haber efectuado una prueba de funcionamiento de los elementos de aplicación de cargas y toma de datos. Pasados ciento veinte días desde el hormigonado, la viga se colocó en su posición definitiva y se procedió a su apuntalamiento. Una vez instalada el resto de la instrumentación se llevó a cabo el ensayo a los ciento setenta días.

Realizado el primer ensayo se colocaron nuevamente los puntales a lo largo del elemento y se efectuaron las operaciones de preparación de las superficies para la aplicación del adhesivo, la instrumentación de las chapas de refuerzo y la modificación de las dimensiones de los apoyos para la correcta instalación de la célula de carga en el apoyo central.

Como elemento de unión para el pegado de las chapas se usó el producto *Sikadur 31 Adhesivo*, que es un preparado de dos componentes a base de resinas epoxi y cargas especiales recomendado por el fabricante para refuerzos metálicos en el hormigón, entre otros usos. Se aplicó una capa no superior a 5 mm mediante espátula, se colocaron las chapas y se procedió a su apriete hasta el endurecimiento. Durante la operación de encolado de la chapa inferior se tuvo que levantar ligeramente la viga sobre su posición de ensayo mediante el sistema descrito previamente. Una vez situada la viga en su posición definitiva para el segundo ensayo se colocó el refuerzo superior en el que se practicaron unos agujeros para que pasaran las varillas roscadas utilizadas para la sujeción del perfil metálico usado en los movimientos de la viga, de manera que se tuvo un anclaje mecánico adicional al proporcionado por la resina.

Realizadas todas las operaciones y modificado el sistema de conexiones del equipo de adquisición, que había presentado algunos problemas durante el primer ensayo, se realizó el segundo experimento a los trescientos cuarenta días del hormigonado.

6.6. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN

6.6.1. Introducción

Con el fin de obtener datos sobre el comportamiento del hormigón utilizado en la construcción de la viga se programaron unos ensayos de caracterización del mismo, preparando una serie de probetas conservadas en condiciones estándar y en condiciones ambientales.

Algunos de los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras de la EPS y otros en el Laboratorio del CECAM (Centre d'Estudis de la Construcció i Anàlisi de Materials), que disponía de una prensa con una capacidad de carga más adecuada para las características de las probetas a ensayar.

6.6.2. Resistencia a la compresión

El ensayo se realizó de acuerdo con la norma UNE 83.304/84, sobre probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Las probetas se prepararon y refrentaron siguiendo las directrices de las normas UNE 83300/84, 83301/91 y 83303/84.

Se utilizó una prensa del mencionado Laboratorio del CECAM de la marca SERVOSIS, modelo MES 250, con una capacidad de 2500 kN.

Se realizaron cuatro ensayos: probetas en condiciones estándar a 28 días y probetas en condiciones ambientales a 28, 170 y 340 días.

Para cada uno de ellos se llevo a cabo la rotura de tres probetas. La resistencia media del hormigón a la edad de j días, según las condiciones de conservación, se tomó como el promedio de los tres valores obtenidos. Los resultados individuales y el valor medio se muestran en la Tabla 6.3.

Edad j (días)	Condiciones estándar (MPa)				Condiciones ambientales (MPa)			
	f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}	$f_{c,m}$	f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}	$f_{c,m}$
28	38.0	37.4	35.3	36.9	37.8	34.3	33.8	35.3
170	-	-	-	-	44.1	43.9	41.0	43.0
340	-	-	-	-	45.2	44.4	43.9	44.5

Tabla 6.3 – Ensayos de resistencia media a compresión

En la Tabla 6.4 se comparan los resultados del ensayo con los valores teóricos de la evolución temporal proporcionados por MC-90 [61] (concordantes con EHE [57]), observándose un buen ajuste.

Edad j (días)	Ensayo (MPa)	MC-90 (MPa)	EHE (MPa)
28	35.3	35.3	35.3
170	43.0	41.0	41.1
340	44.5	42.2	42.2

Tabla 6.4 – Comparación de valores de la resistencia compresión

6.6.3. Resistencia a la tracción indirecta

La resistencia a la tracción indirecta del hormigón (ensayo brasileño) se determinó de acuerdo con la norma UNE 83.306/85, sobre probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Las probetas se prepararon siguiendo las directrices de las normas UNE 83300/84 y 83301/91.

Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio del CECAM con la prensa indicada en 6.6.2.

Se realizaron dos ensayos: probetas en condiciones ambientales a 170 días y probetas en condiciones ambientales a 340 días. Para cada uno de ellos se utilizaron dos probetas, tomándose la resistencia a tracción a la edad de j días, como el promedio de los dos valores obtenidos.

De acuerdo con la norma citada el valor de la tensión de tracción se determina mediante la siguiente expresión:

$$f_{cti} = \frac{2P}{\pi l d} \quad (6.8)$$

en la que P es la carga aplicada por la prensa, l la longitud de la probeta y d su diámetro.

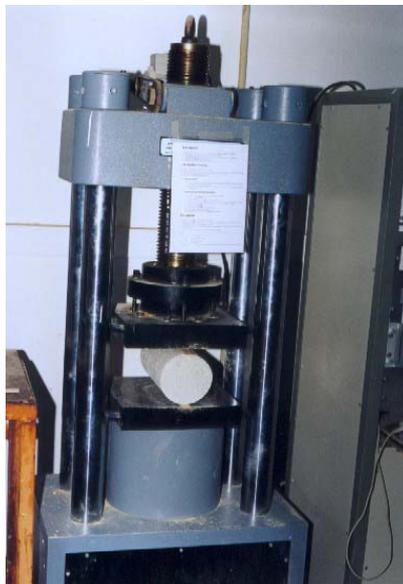


Figura 6.21 – Equipo utilizado en la determinación de la resistencia a tracción indirecta

Los valores obtenidos en cada probeta y el valor medio se indican en la Tabla 6.5.

Edad j (días)	P_1 (kN)	P_2 (kN)	f_{cti1} (MPa)	f_{cti2} (MPa)	$f_{cti,m}$ (MPa)
170	229.0	287.0	3.24	4.06	3.65
340	248.1	292.6	3.51	4.14	3.82

Tabla 6.5 – Ensayos de resistencia a tracción indirecta

En la Tabla 6.6 se presentan los resultados del ensayo y se comparan con los que se obtendrían con MC-90 [61] (o EHE [57]) de acuerdo con

$$f_{cm} = 1.40 \left(\frac{f_{ck}}{10} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (6.9)$$

teniendo en cuenta que se establece el valor de la resistencia característica f_{ck} en función de la resistencia media f_{cm} como

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (6.10)$$

y que la relación entre la resistencia media a tracción f_{cm} y la resistencia a tracción indirecta f_{cti} se define mediante:

$$f_{cm} = 0.90 f_{cti} \quad (6.11)$$

En las expresiones anteriores todos los valores están expresados en MPa.

Edad j (días)	Ensayo (MPa)	MC-90 (MPa)
170	3.30	3.23
340	3.45	3.32

Tabla 6.6 – Comparación de valores de resistencia a tracción f_{cm}

Se observa un buen ajuste del valor proporcionado por MC-90 con el promedio de los resultados obtenidos en cada ensayo. No obstante, en ambos casos, hay que destacar la gran dispersión de los valores obtenidos en las probetas con respecto de la media. Ello no hace más que poner de manifiesto la gran variabilidad asociada a este parámetro y la dificultad de estimar un valor medio representativo del comportamiento en cada una de las secciones.

6.6.4. Módulo de deformación longitudinal

El módulo de deformación longitudinal se determinó siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C 469/87, sobre probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Igualmente que en los demás casos las probetas se prepararon según las normas UNE 83300/84, 83301/91 y 83303/84.

La caracterización se llevó a cabo en el Laboratorio de Estructuras de la EPS mediante una máquina universal SERVOSIS, modelo MUE-60, con una capacidad de carga de 600 kN.

Se realizaron dos ensayos: probetas en condiciones ambientales a 170 y probetas en condiciones ambientales a 340 días.

El procedimiento de ensayo consiste en la realización de tres ciclos de carga de compresión hasta valores de un 40 % de la tensión de rotura del hormigón estudiado, siendo necesario, por tanto la determinación previa de la resistencia a la compresión.

Para la determinación del módulo de deformación se toma la media de las lecturas de los transductores en los dos últimos ciclos de carga, utilizando la siguiente expresión:

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (6.12)$$

donde ε_1 tiene un valor de 50×10^{-6} , ε_2 es la deformación unitaria que se corresponde con el 40 % de la carga de rotura y σ_1 , σ_2 son las tensiones correspondientes a las deformaciones anteriores, respectivamente.

El equipo utilizado para la medición de las deformaciones estaba constituido por dos anillos metálicos, fijados a la probeta mediante el apriete de unos tornillos. La distancia de fijación entre los anillos era de 15 cm y entre ellos se colocaron dos transductores de desplazamiento del tipo HLS 10B, cuyas características se detallaron en el Apartado 6.4.5. En la Figura 6.22 se muestra un esquema del montaje utilizado.

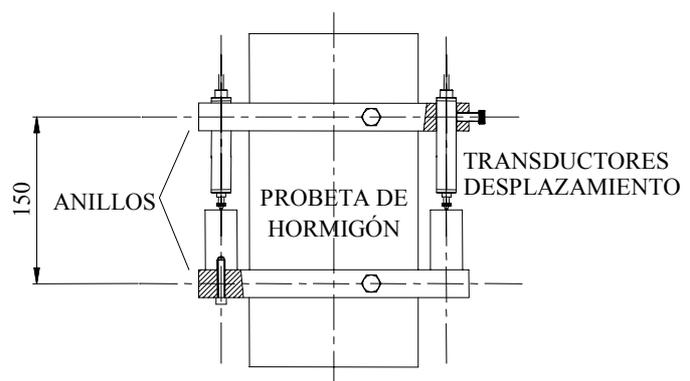


Figura 6.22 – Equipo utilizado en la determinación del módulo de elasticidad

Los resultados que se obtuvieron en cada uno de los ensayos se resumen en la Tabla 6.7.

Edad j (días)	E_{c1} (MPa)	E_{c2} (MPa)	$E_{c,m}$ (MPa)
170	35650	34250	34950
340	36300	36000	36150

Tabla 6.7 – Ensayos del módulo de deformación

Igual que en los casos anteriores los resultados se comparan con los que se obtendrían mediante las expresiones de MC-90 [61] y EHE [57], en este último caso a partir de las resistencias a compresión a los j días.

Edad j (días)	Ensayo (MPa)	MC-90 (MPa)	EHE (MPa)
170	34950	35260	35034
340	36150	35806	35436

Tabla 6.8 – Comparación de valores del módulo de deformación

6.7. RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.7.1. Desarrollo de los ensayos

Tal como se ha comentado anteriormente se llevaron a cabo dos ensayos: viga continua sin refuerzos a los 170 días del hormigonado y viga continua con refuerzos a los 340 días del hormigonado.

La disposición definitiva de los equipos y del elemento a ensayar, una vez realizados los montajes y preparaciones que se han ido detallando en apartados anteriores, fue la que se muestra en la Figuras 6.23 y 6.24.

El primero de los ensayos, correspondiente a la viga sin refuerzos, se realizó de manera que el equipo efectuaba el control en el valor de la carga aplicada (carga controlada).

La primera operación consistió en desapuntalar la viga quedando inicialmente sometida a su peso propio (1.5 kN/m) y a continuación se aplicó en el centro de cada vano una carga puntual creciente desde cero hasta 37.50 kN.

Durante el transcurso de la prueba se produjeron siete breves interrupciones del proceso con objeto de medir las deformaciones con el extensómetro mecánico y comprobar el desarrollo de la fisuración, quedando definidos los escalones de carga entre los siguientes valores expresados en kN: 0 - 6 - 12 - 18.5 - 24 - 30 - 36 - 37.5.

Una vez alcanzada la carga prevista se procedió a la descarga y apuntalamiento con la finalidad de realizar el refuerzo de la viga y otras operaciones descritas en 6.5.

El segundo ensayo, correspondiente a la viga reforzada, se realizó con el equipo efectuando el control en el valor del desplazamiento del actuador (desplazamiento controlado), lo cual pareció más prudente para la integridad de los equipos, ya que se llevaba el ensayo hasta la rotura.

Se procedió a desapuntalar la estructura y se aplicó una carga puntual creciente desde cero hasta 128 kN en el centro de cada vano. En este valor de la carga se produjo el despegue de la chapa superior del refuerzo, que se manifestó con un descenso brusco de la carga, acompañado de un aumento considerable de las deformaciones.

La carga total se aplicó mediante seis escalones consecutivos definidos por los valores siguientes en kN: 0 - 27.5 - 50 - 75 - 100 - 125 - 128. En esta ocasión se efectuaron solamente dos registros de lecturas con extensometría mecánica (50 kN y 100 kN), estando el resto de las paradas destinadas únicamente al seguimiento de la fisuración.



Figura 6.23 – Vista de la disposición del ensayo

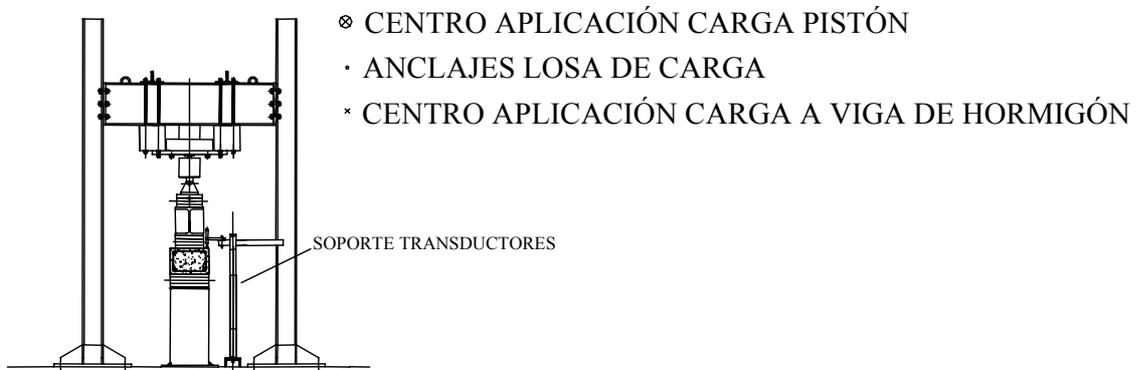
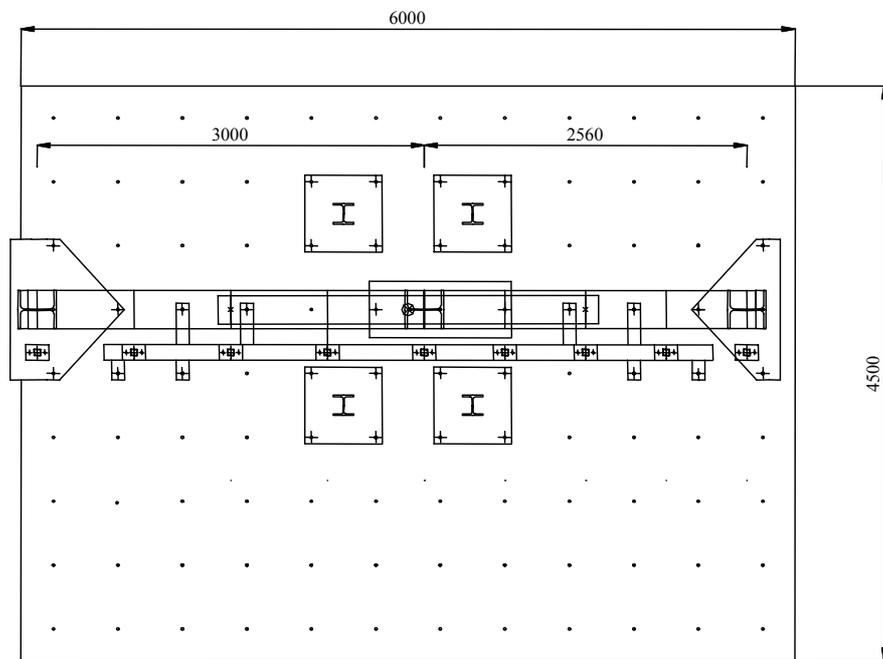
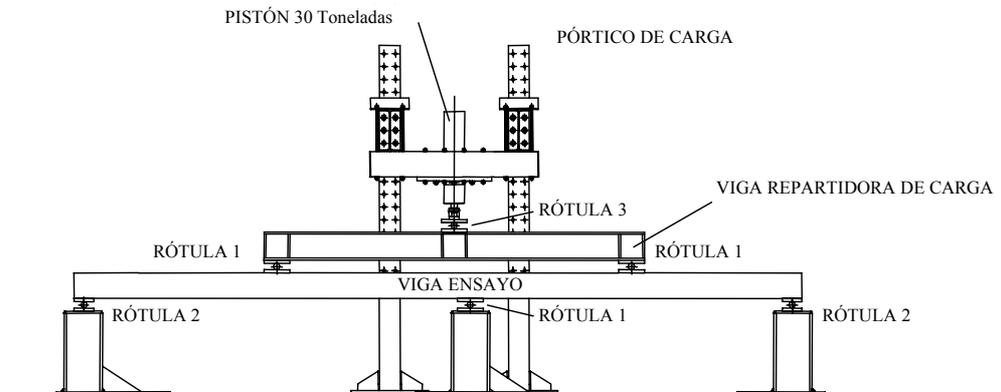


Figura 6.24 – Montaje de los elementos del ensayo

En la Figura 6.25 se muestran dos vistas de la viga en los instantes inmediatamente anteriores al colapso.



Figura 6.25 – Instantes anteriores al colapso: (a) Segundo vano; (b) perspectiva

6.7.2. Ensayo de la viga sin refuerzos

En este apartado se presentan y analizan los resultados experimentales del ensayo efectuado sobre la viga sin refuerzos.

En primer lugar se muestran los resultados de las flechas medidas por los transductores de desplazamiento. Los valores registrados electrónicamente se comparan con los calculados a partir de las lecturas efectuadas por extensometría mecánica.

Seguidamente se presentan los gráficos con las medidas de las deformaciones en las armaduras, agrupadas por secciones.

A continuación se muestran los resultados de las deformaciones correspondientes a las galgas en el hormigón, que en el caso de las laterales se comparan con los valores registrados con la extensometría mecánica.

En el Anejo III se incluye un montaje fotográfico con la fisuración registrada en la viga durante el ensayo.

Ensayo sin refuerzos: Resultados experimentales correspondientes a flechas

En las Figuras 6.26 a 6.30 se presentan los resultados experimentales de flechas registrados por los transductores de desplazamiento colocados en los vanos, según la nomenclatura utilizada en la Figura 6.16. En las mismas gráficas se han representado los valores de la flecha obtenidos mediante la doble integración de las curvaturas (extensómetro mecánico).

Para todos los parámetros correspondientes al primer ensayo, el valor cero en desplazamientos y deformaciones corresponde a la viga apuntalada y el valor de la carga corresponde a la del actuador. Esta característica queda reflejada en los gráficos

con la presencia de una pequeña flecha inicial debida al peso propio, que se produce al desapuntalar la viga. Los valores representados ya están compensados descontando los desplazamientos registrados por los transductores colocados en los apoyos.

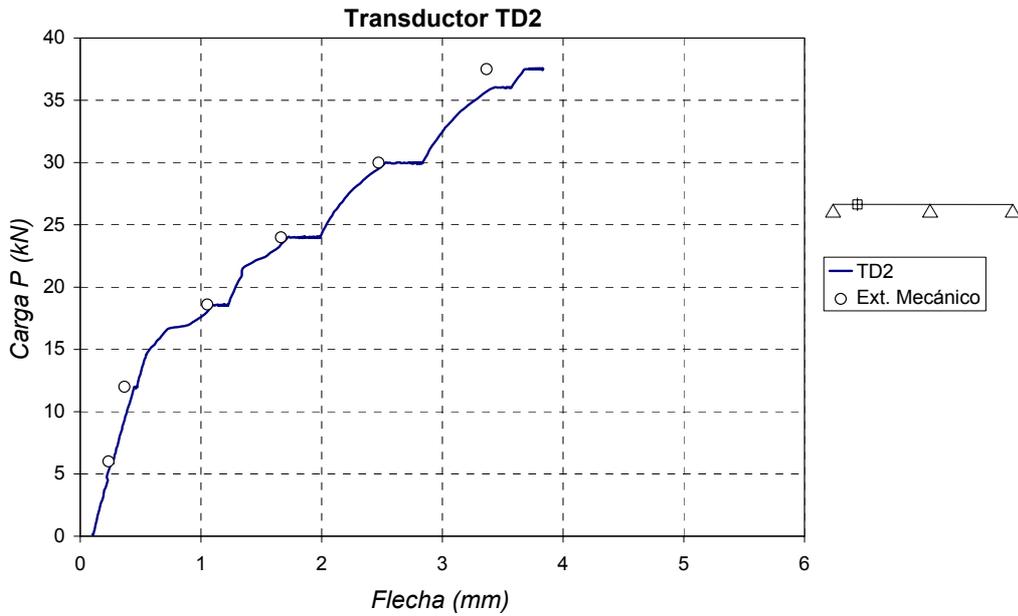


Figura 6.26 – Ensayo sin refuerzos: flecha transductor TD2

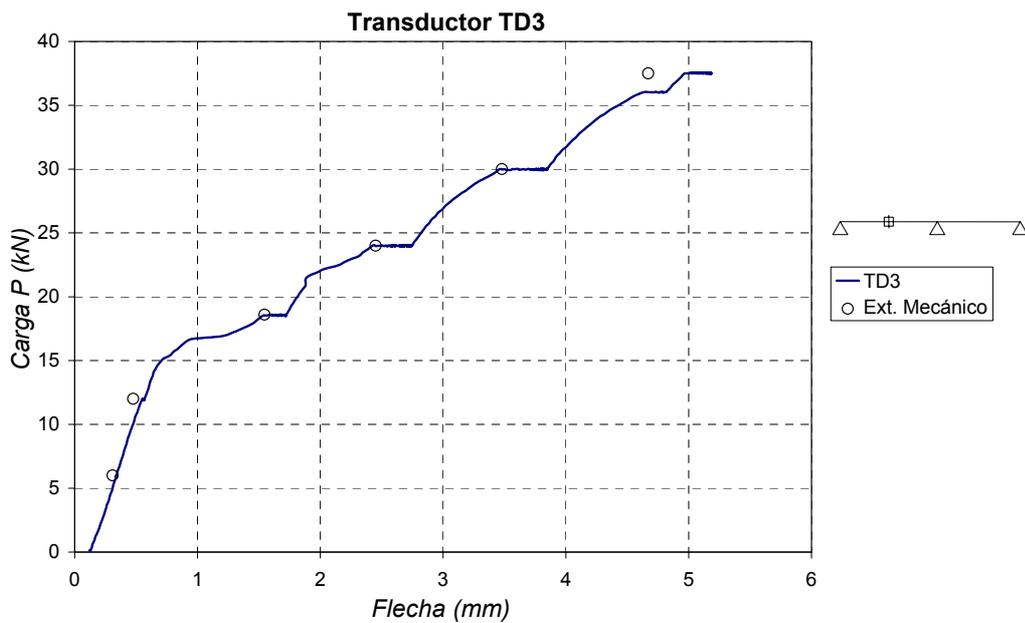


Figura 6.27 – Ensayo sin refuerzos: flecha transductor TD3

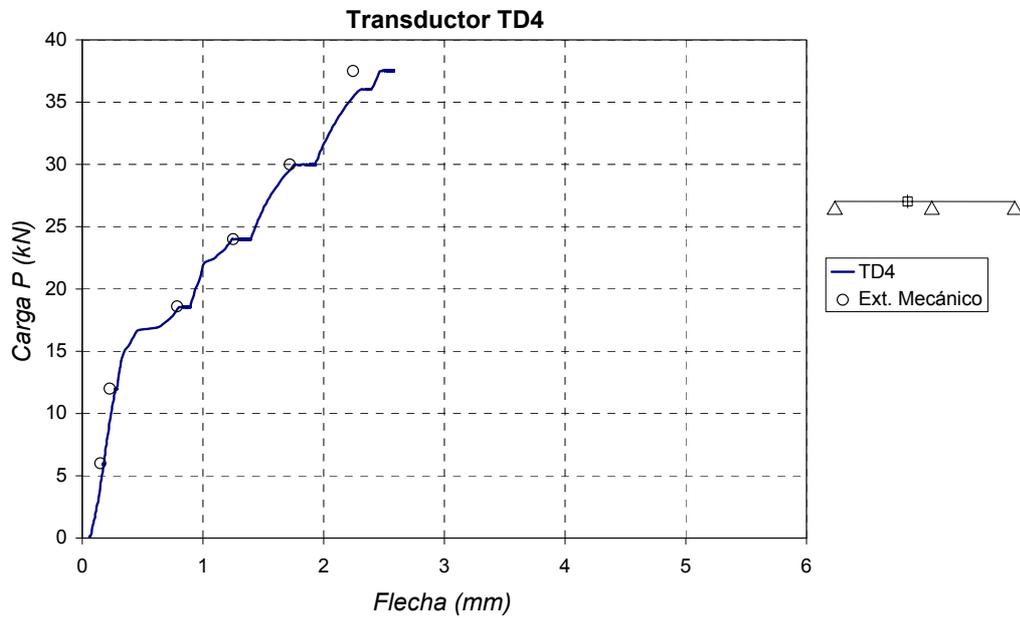


Figura 6.28 – Ensayo sin refuerzos: flecha transductor TD4

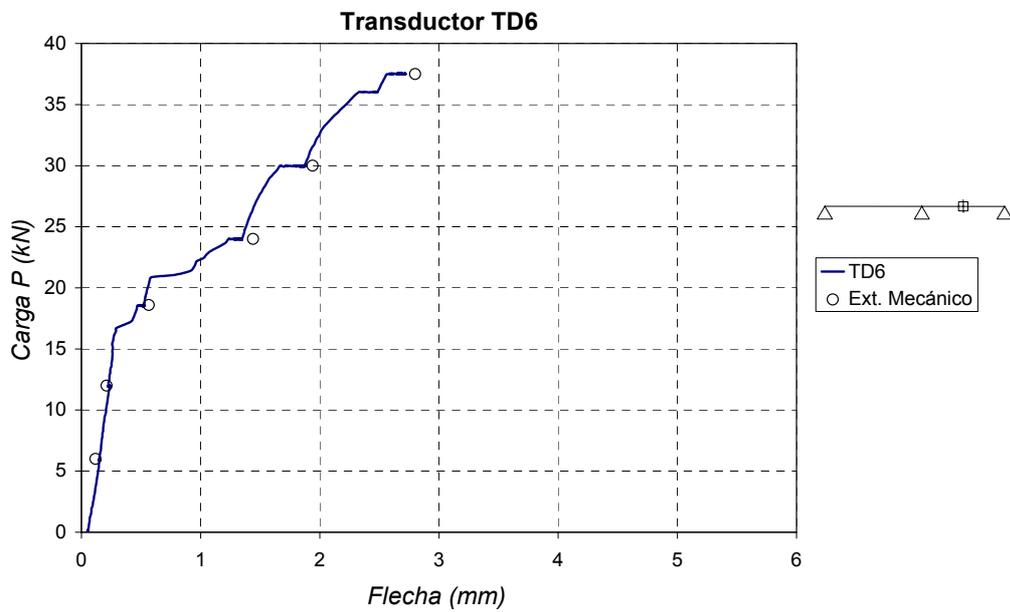


Figura 6.29 – Ensayo sin refuerzos: flecha transductor TD6

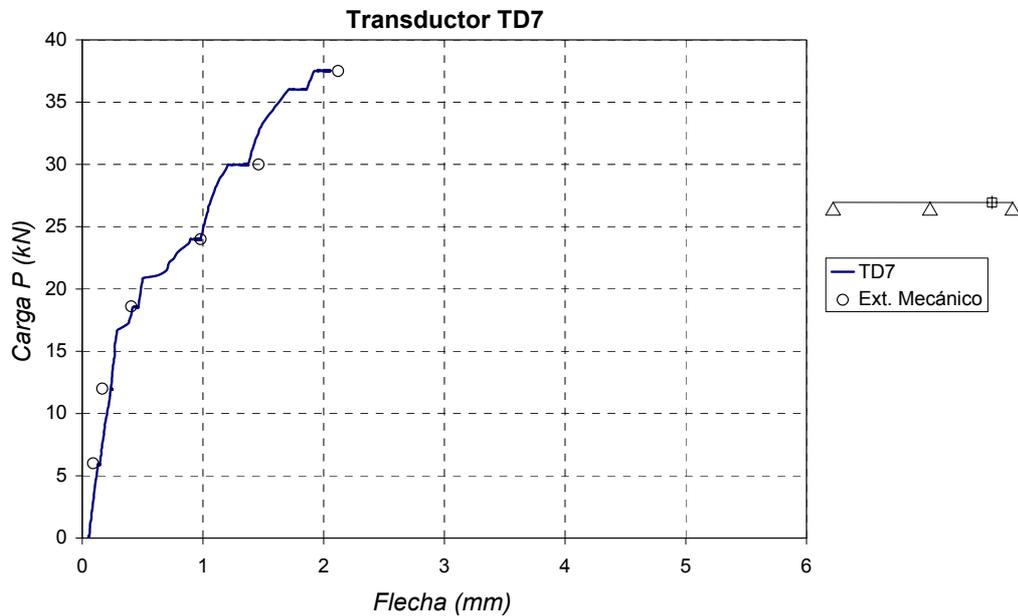


Figura 6.30 – Ensayo sin refuerzos: flecha transductor TD7

Para todos los parámetros correspondientes al primer ensayo, el valor cero en desplazamientos y deformaciones corresponde a la viga apuntalada y el valor de la carga corresponde a la del actuador. Esta característica queda reflejada en los gráficos con la presencia de una pequeña flecha inicial debida al peso propio, que se produce al desapuntalar la viga. Debe tenerse en cuenta que los valores representados ya están compensados descontando los desplazamientos registrados por los transductores colocados en los apoyos.

En todas las figuras se observa claramente una zona lineal inicial, en la que todavía no se ha llegado a la fisuración, y a partir de un cierto punto, otra zona de pendiente menor en la que la viga ya se ha fisurado. Es coincidente, también en todas las gráficas, el inicio de la fisuración en el escalón de carga de 12.0 kN a 18.5 kN concretamente en el entorno de 15 a 17 kN.

Los pequeños tramos de trazado horizontal que se aprecian en las curvas corresponden a los instantes de parada entre escalones de carga, en los que se procedía a las lecturas con el extensómetro mecánico y al seguimiento de la fisuración. Este aumento de la flecha con mantenimiento de la carga obedece al mismo fenómeno que ocasiona que se den deformaciones mayores en los ensayos de mayor duración, que en los que la carga se aplica más rápidamente [137]. La causa de esta deformación adicional debería buscarse en el efecto combinado de la fluencia y del progresivo deslizamiento de las armaduras que tiene lugar al producirse la fisuración.

Analizando con un poco más de detalle los gráficos de flechas correspondientes al primer vano (TD2, TD3, TD4) puede observarse un primer cambio en la pendiente para una carga de 15 kN (o incluso un poco menor para TD3), que coincidió con la aparición de las primeras fisuras en la zona central del tramo. Para un valor de la carga de unos 17 kN se aprecia un nuevo descenso de la pendiente, éste ya muy pronunciado, que se correspondió con la aparición de la fisuración en la sección del apoyo central. En los siguientes escalones de carga se fueron formando nuevas fisuras y aumentando la longitud y la abertura de las existentes.

En cuanto a la evolución de las flechas en el segundo vano (TD6, TD7), el efecto de la fisuración no se aprecia hasta los 17 kN que es cuando se produce en la sección del apoyo intermedio. Posteriormente para un valor de unos 23 kN se observa un incremento de la pendiente de las curvas, que se corresponde con la aparición de fisuras en el centro del vano.

Por otra parte, por lo que respecta a las flechas deducidas a partir de las curvaturas puede apreciarse que hay una buena concordancia tanto en la evolución como en los mismos valores, lo cual es indicativo de la bondad de los mismos.

Ensayo sin refuerzos: Resultados experimentales correspondientes a deformaciones en armaduras

Los resultados de las deformaciones unitarias registradas en las armaduras instrumentadas se reflejan en las Figuras 6.31 a 6.33. La identificación de cada galga se corresponde con la Figura 6.8.

Puede observarse que no se han representado los resultados obtenidos para las galgas G7 y G9, instaladas en el centro del segundo vano. Ello ha sido debido a que los valores registrados fueron totalmente anómalos, comprobándose que fue motivado por un fallo en la conexión del cableado proveniente de las galgas con el módulo que incorporaba los puentes de Wheatstone. Como ya se ha comentado en 6.3.2, este problema se subsanó para el segundo ensayo cambiándose todo el equipo de conexión.

En este caso se ha optado por representar conjuntamente en el mismo gráfico las curvas correspondientes a las galgas colocadas en el entorno de una misma sección. Ello permite poner de manifiesto un comportamiento similar en la evolución de las deformaciones con la carga y la coincidencia en el punto a partir del que se observa la fisuración. Por otra parte, también se puede observar que al producirse la fisuración, hay una cierta variabilidad en los resultados obtenidos. Esta variabilidad es inherente a cualquier ensayo de este tipo y en ella inciden múltiples factores como pueden ser las heterogeneidades del material, diferencias en la instalación y pegado de las galgas, el hecho de que la fisuración es un fenómeno discreto, y por tanto la armadura tendrá más deformación en unos puntos que en otros, etc.

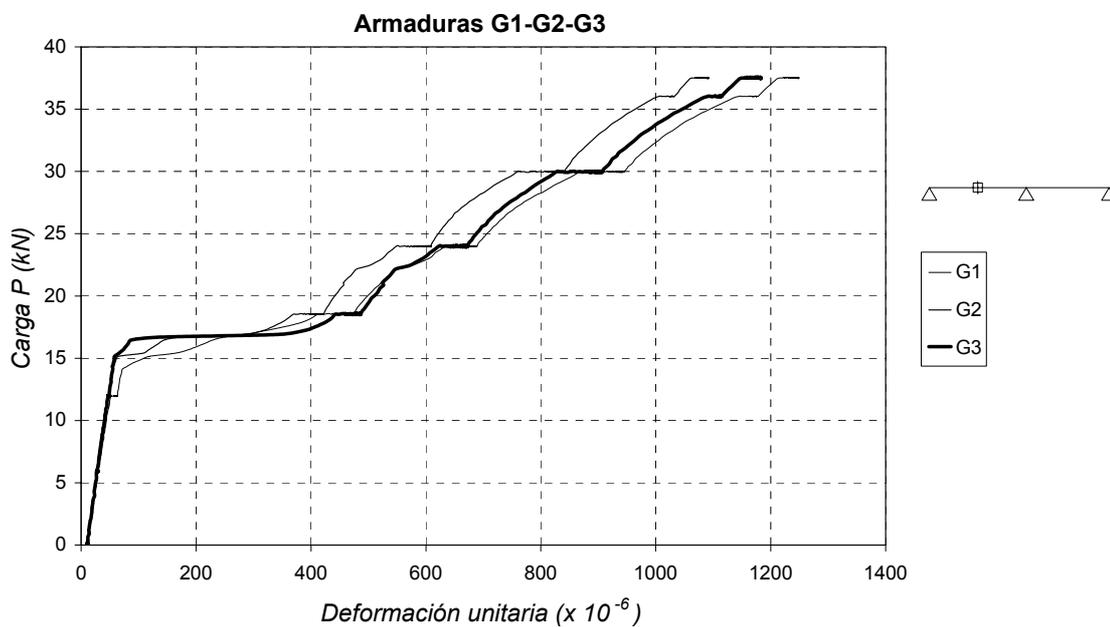


Figura 6.31 – Ensayo sin refuerzos: deformación de armaduras en el centro del primer vano

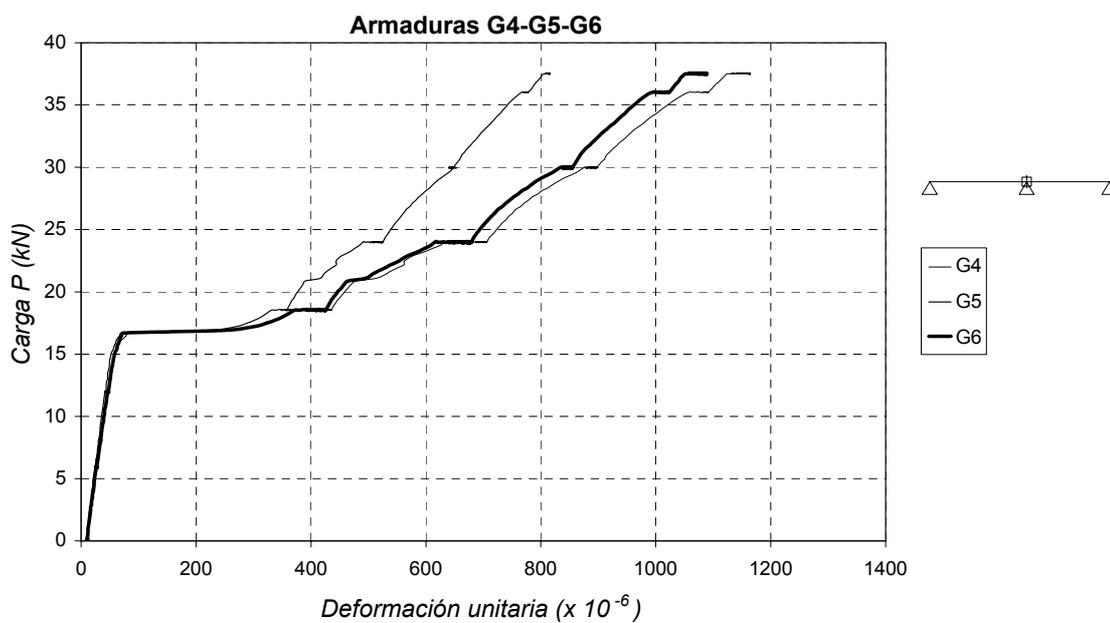


Figura 6.32 – Ensayo sin refuerzos: deformación de armaduras en la sección del apoyo central

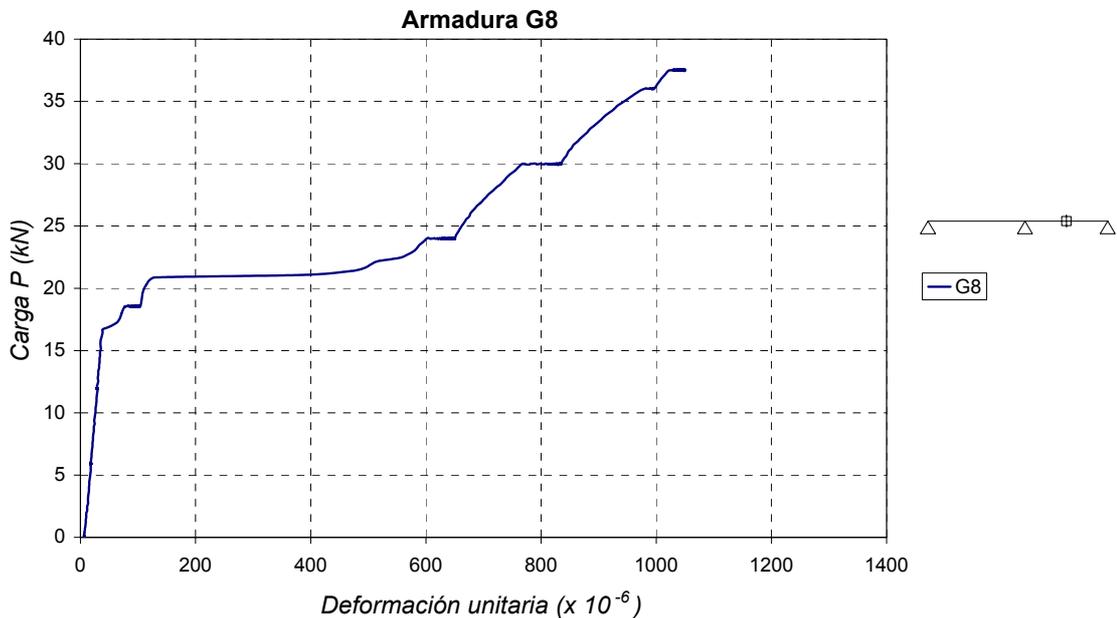


Figura 6.33 – Ensayo sin refuerzos: deformación de armaduras en el centro del segundo vano

El análisis más detallado de las curvas conduce a las mismas conclusiones que en el caso anterior con los transductores. En la sección central del primer vano (G1, G2, G3) podemos ver que se aprecia la fisuración en torno a 15 kN, e incluso antes en una de las galgas, teniendo lugar el aumento más notable de las deformaciones para 17 kN, con aparición de fisuración en el apoyo intermedio. Para las galgas en la sección del apoyo, observamos el efecto de la fisuración para unos 17 kN. Finalmente para la galga en el centro del segundo vano (G8) vemos un primer cambio de pendiente en los 17 kN para continuar con un aumento brusco de deformación en torno a los 22 kN.

Ensayo sin refuerzos: Resultados experimentales correspondientes a deformaciones en el hormigón

En las Figuras 6.34 a 6.36 se presentan los gráficos correspondientes a los valores registrados para las deformaciones unitarias en el hormigón en las secciones instrumentadas a tal efecto según la Figura 6.11.

Se han representado en una misma figura los resultados referidos a una misma sección. Así en cada gráfico de esta serie hay una curva que corresponde a la deformación en la cara superior o inferior, dependiendo de la sección, y otra curva referida a las deformaciones en las caras laterales de la viga. Se han incluido las mediciones de las deformaciones registradas a partir del extensómetro mecánico, con objeto de compararlas con los valores de las galgas de las caras laterales.

Las conclusiones a las que se llega analizando las curvas obtenidas en este caso son similares a las de los apartados anteriores.

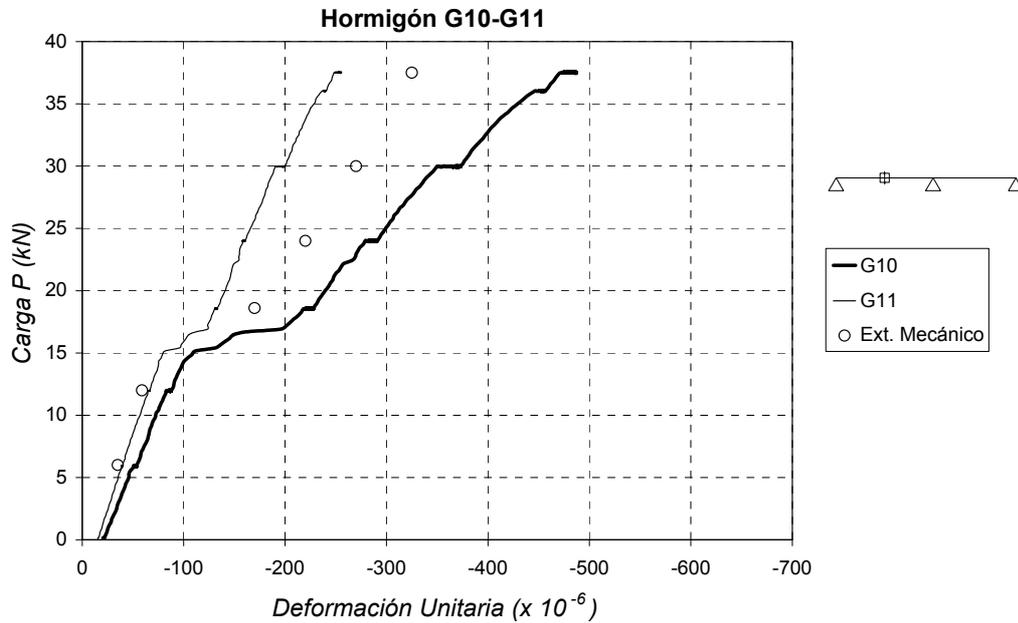


Figura 6.34 – Ensayo sin refuerzos: deformaciones en el hormigón en el centro del primer vano

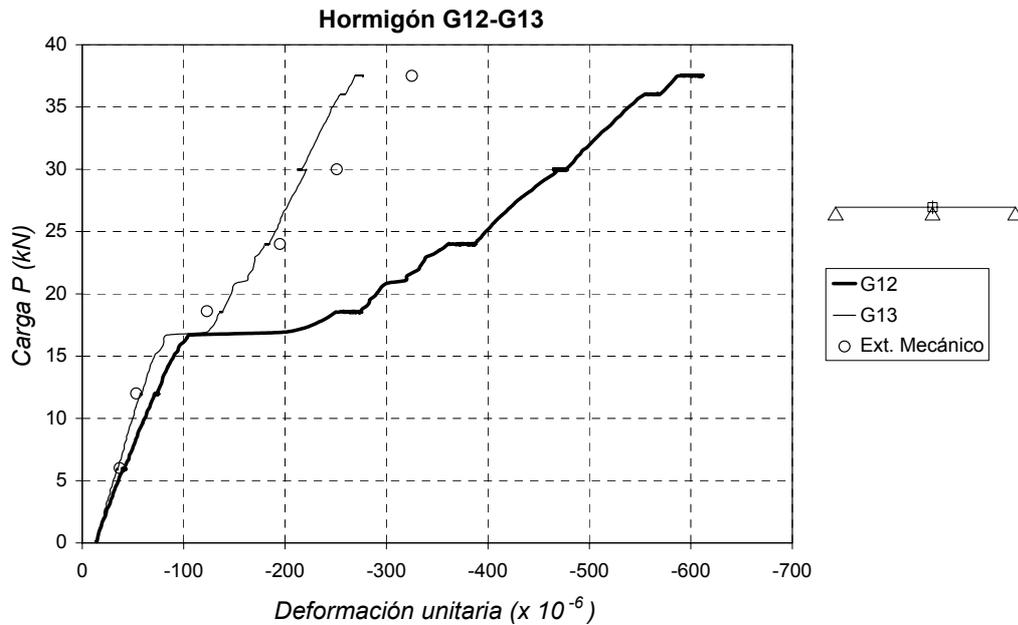


Figura 6.35 – Ensayo sin refuerzos: deformaciones en el hormigón en la sección del apoyo central

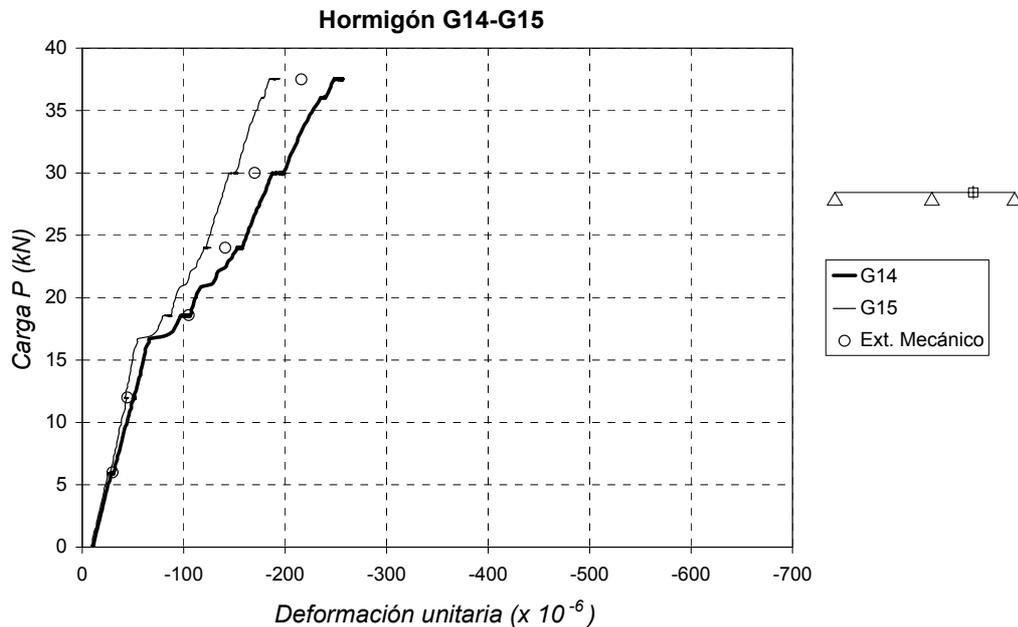


Figura 6.36 – Ensayo sin refuerzos: deformaciones en el hormigón en el centro del segundo vano

Puede observarse que para las galgas instaladas en una misma sección, la forma y evolución de las curvas es muy parecida, presentándose, lógicamente, las deformaciones mayores en las fibras extremas.

En la comparación entre los resultados obtenidos mediante las galgas y los del extensómetro mecánico, aún manteniendo la misma tendencia, se presentan mayores diferencias que en los casos anteriores, sobre todo en la galga G11. El hecho de que con el extensómetro se mida la deformación media en una zona más extensa que con la galga puede ser motivo de diferencias entre los dos registros. Podría haber otras posibles causas como, por ejemplo, problemas en la correcta transmisión de la señal eléctrica, similares a los detectados para otros elementos durante el ensayo, o al hecho de que los posibles errores inherentes a la instrumentación son mayores para este tipo de galgas. Tal como se mencionó en 6.4.3, además de problemas de funcionamiento debidos a una mala instalación o pegado, puede haber un error debido a la relación longitud galga/tamaño del árido.

6.7.3. Ensayo de la viga reforzada

Similarmente a lo que se ha hecho en el apartado anterior se van a presentar los resultados experimentales del ensayo efectuado sobre la viga reforzada, siguiendo un esquema parecido y añadiendo los valores de las deformaciones unitarias en las chapas de refuerzo y de la reacción en el apoyo central.

La carga también se ha aplicado mediante una serie de escalones con paradas intermedias. Habiéndose puesto de manifiesto en el ensayo anterior la gran similitud entre los resultados de las medidas electrónicas y las manuales y con objeto de agilizar la toma de datos, solamente se efectuaron medidas con el extensómetro en dos de las cinco paradas efectuadas para el seguimiento de la fisuración.

En el Anejo III se incluye información fotográfica referente a la fisuración a lo largo de la viga.

Ensayo con refuerzos: Resultados experimentales correspondientes a flechas

En las Figuras 6.37 a 6.41 se presentan los resultados experimentales de flechas registrados por los transductores de desplazamiento. Se incluyen los valores obtenidos a partir de la integración de curvaturas.

En este segundo ensayo, al haber sufrido la viga diversas manipulaciones se creyó más conveniente trasladar el valor cero en flechas y deformaciones al inicio de aplicación de las cargas puntuales.

Al efectuarse el control sobre el desplazamiento del actuador, en los gráficos aparecen unos pequeños escalones verticales correspondientes a las paradas intermedias (desplazamiento fijo) en lugar de los tramos horizontales que se dieron en el primer ensayo (carga fija).

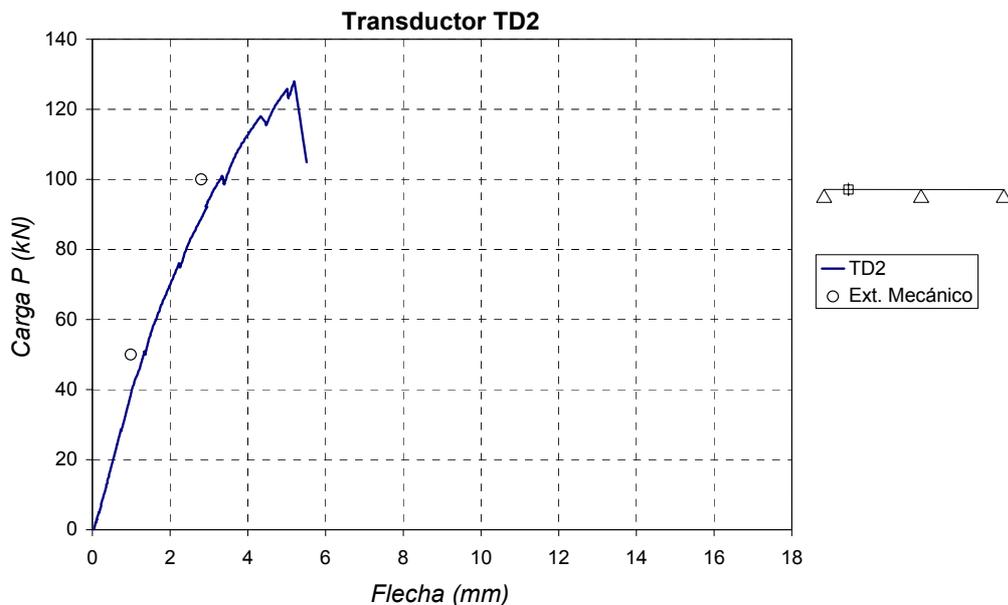


Figura 6.37 –Ensayo con refuerzos: flecha transductor TD2

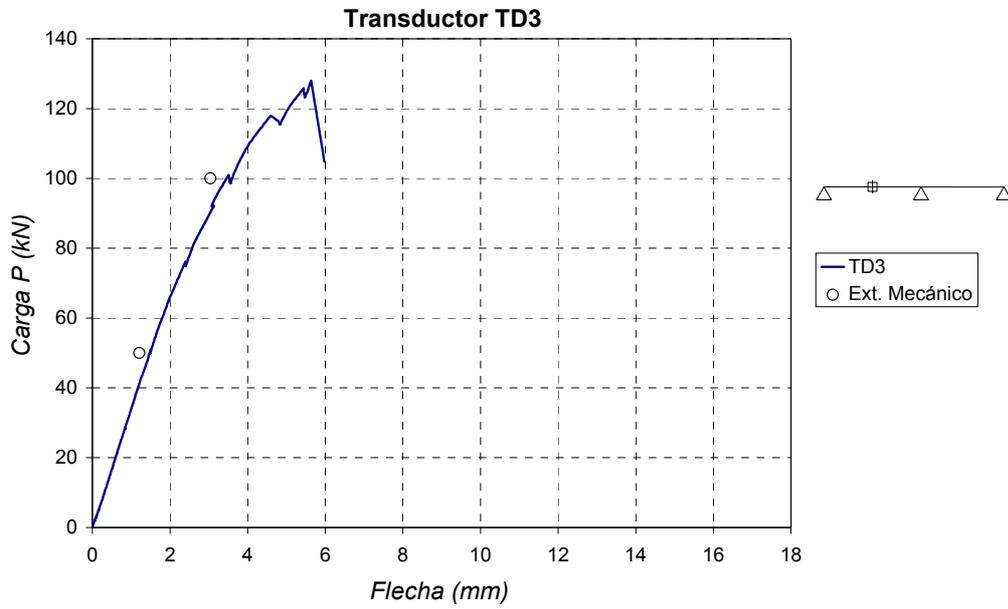


Figura 6.38 –Ensayo con refuerzos: flecha transductor TD3

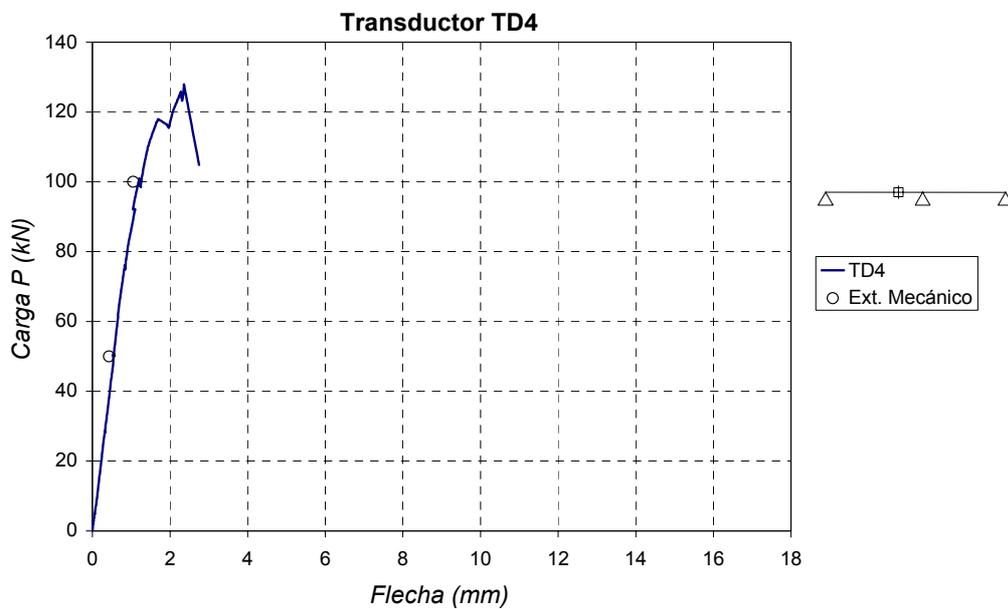


Figura 6.39 –Ensayo con refuerzos: flecha transductor TD4

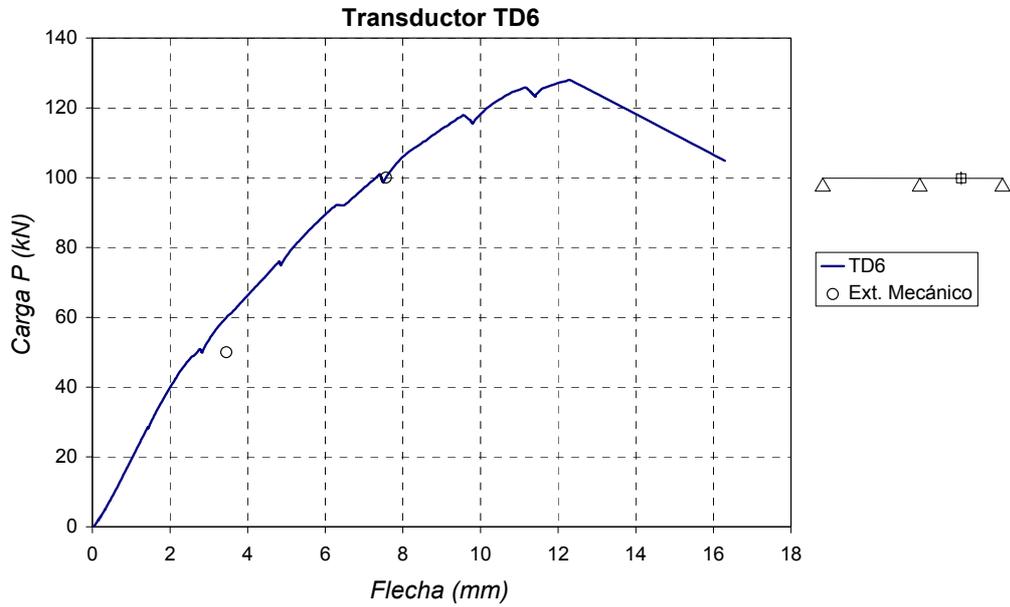


Figura 6.40 –Ensayo con refuerzos: flecha transductor TD6

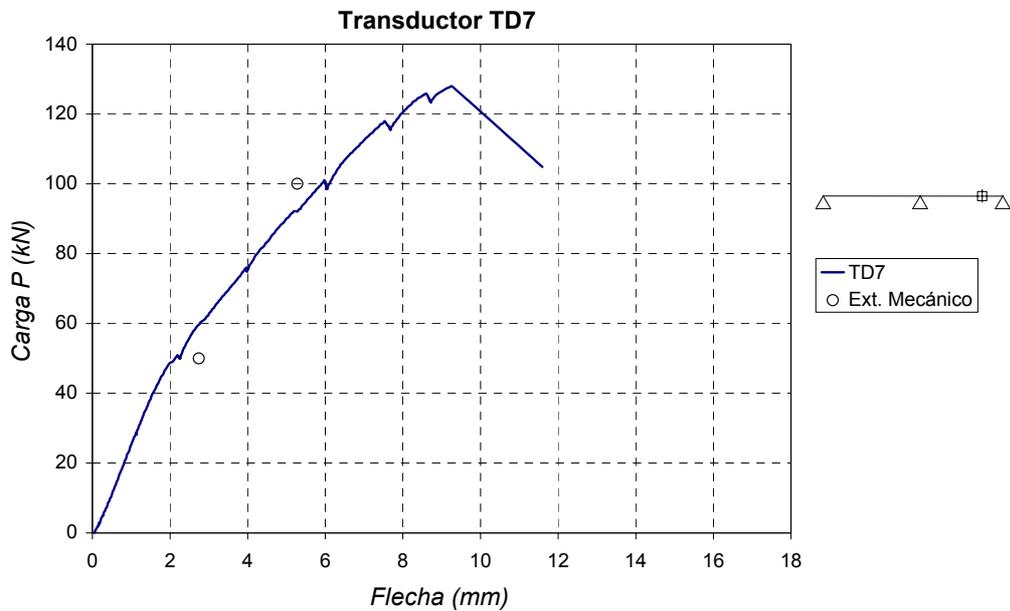


Figura 6.41 –Ensayo con refuerzos: flecha transductor TD7

En todas las curvas se observa una zona inicial lineal, hasta un valor de la carga de unos 50 kN. La explicación de ello hay que buscarla en el hecho de que al añadir el refuerzo, la fisuración existente en el hormigón prácticamente se mantiene, con un comportamiento lineal del hormigón fisurado, al que hay que añadir el comportamiento también lineal de los refuerzos de acero y del hormigón en compresión, que para estas cargas trabaja en la zona cuasi lineal de su diagrama tensión-deformación.

A partir de los 50 kN hay una reducción paulatina de la pendiente de las curvas, por un aumento del efecto de la fisuración hasta llegar a los 128 kN, momento en el que se produce el despegue brusco de la chapa superior de refuerzo, en la zona del apoyo central, que se manifiesta con un rápido descenso de la carga según aumenta el desplazamiento.

Se puede también apreciar que los valores de las flechas en el segundo vano son de una magnitud considerablemente mayor que las del primero, como consecuencia de la ausencia de refuerzo en este tramo. Puede verse, además, que a partir de los 120÷125 kN los desplazamientos aumentan muy rápidamente sin apenas variación de la carga (acompañado de la presencia de fisuras importantes) y que una vez producido el despegue de la chapa el aumento de flecha en este segundo vano es mucho mayor que el primero. Todo ello viene a corroborar la conclusión que se extrae del análisis de las galgas en el siguiente apartado, en el sentido de que la sección central de este vano estaba prácticamente agotada.

Se observa que las flechas deducidas a partir de las mediciones manuales de las curvaturas para los valores de la carga en que se realizó su lectura (50 kN y 100 kN) concuerdan de manera satisfactoria con los resultados de los transductores.

Ensayo con refuerzos: Resultados experimentales correspondientes a deformaciones en armaduras

Los resultados de las deformaciones unitarias en las armaduras se presentan en las Figuras 6.42 a 6.44.

En este caso no se han podido representar los valores correspondientes a las galgas G2 y G9, que han dado una señal anómala, debido quizás a algún golpe, roce o despegue parcial en el proceso de manipulación y trabajo sobre la viga durante la colocación del refuerzo.

En el análisis de estas gráficas vemos que pueden aplicarse razonamientos parecidos al caso de las flechas.

Igual que en el caso de la viga sin refuerzos se aprecia una cierta variabilidad en los valores correspondientes a galgas en el entorno de una misma sección, indicativos de la influencia del comportamiento local en cada una de ellas.

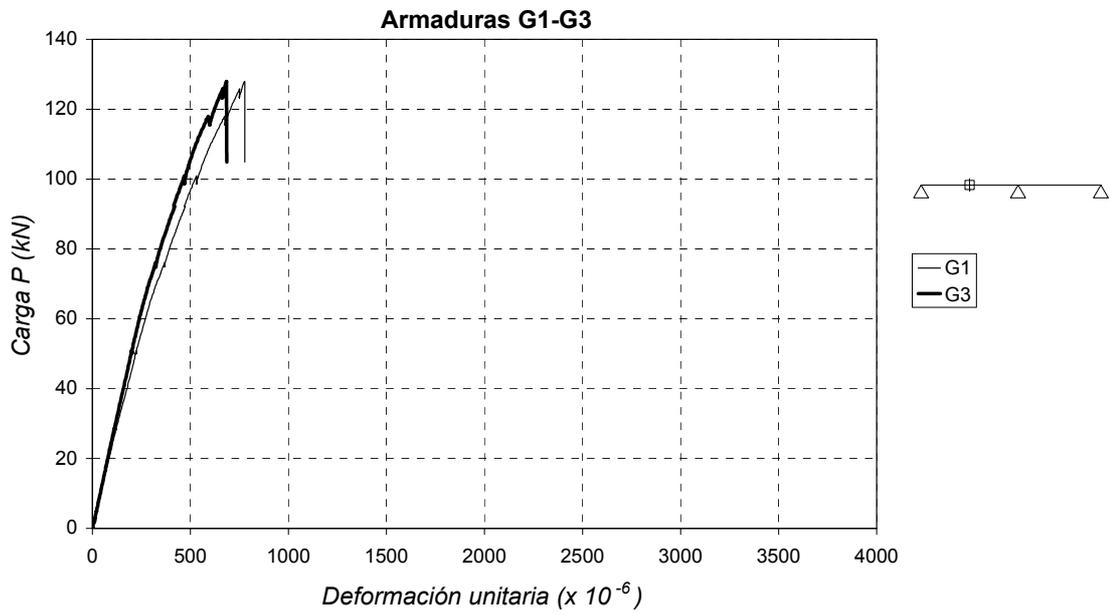


Figura 6.42 – Ensayo con refuerzos: deformación de armaduras en el centro del primer vano

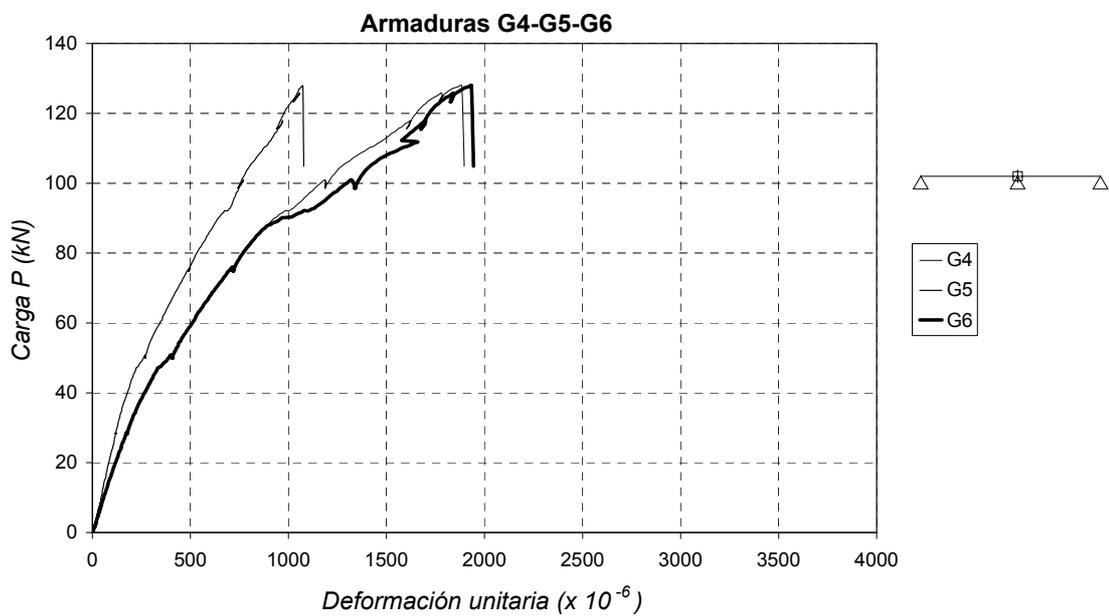


Figura 6.43 – Ensayo con refuerzos: deformación de armaduras en la sección del apoyo central

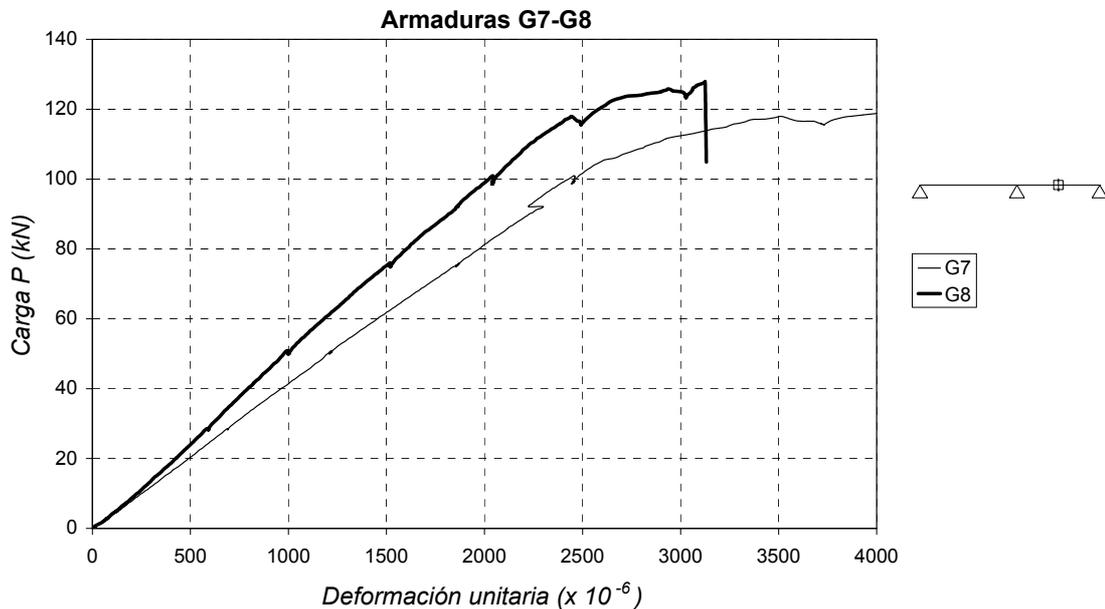


Figura 6.44 – Ensayo con refuerzos: deformación de armaduras en el centro del segundo vano

Puede verse una curva prácticamente horizontal en la zona final de las galgas G7 y G8, ya por encima de la deformación teórica del límite elástico del acero utilizado (2500×10^{-6}). Esto pondría de manifiesto un aumento importante de la deformación en las armaduras, y por tanto de la curvatura en la sección, con muy poca variación de la carga sobre la viga indicando que se habría agotado prácticamente la capacidad resistente de la sección. Obsérvese que el fenómeno aparece un poco antes en G7, destacándose otra vez la influencia del comportamiento local.

Ensayo con refuerzos: Resultados experimentales correspondientes a deformaciones en el hormigón

En las Figuras 6.45 a 6.47 se presentan los gráficos de los valores registrados para las deformaciones unitarias en las galgas en el hormigón y los correspondientes registros del extensómetro mecánico.

También en esta ocasión ha habido algunos valores que no han sido medidos correctamente, debido seguramente a los mismos motivos indicados en el caso anterior. Se trata de las galgas G13 y G 14.

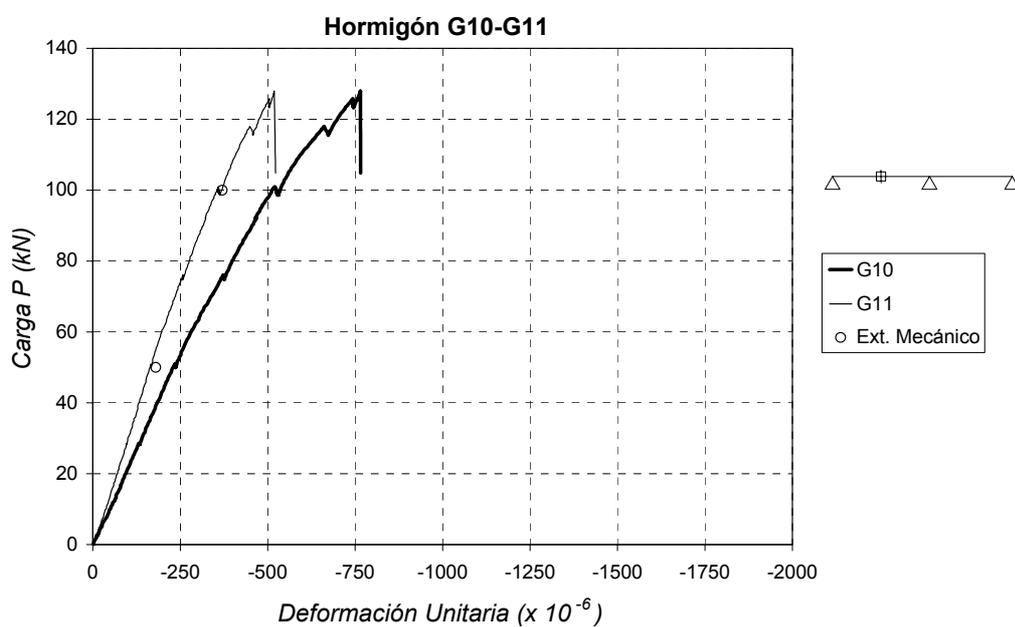


Figura 6.45 – Ensayo con refuerzos: deformaciones en el hormigón en el centro del primer vano

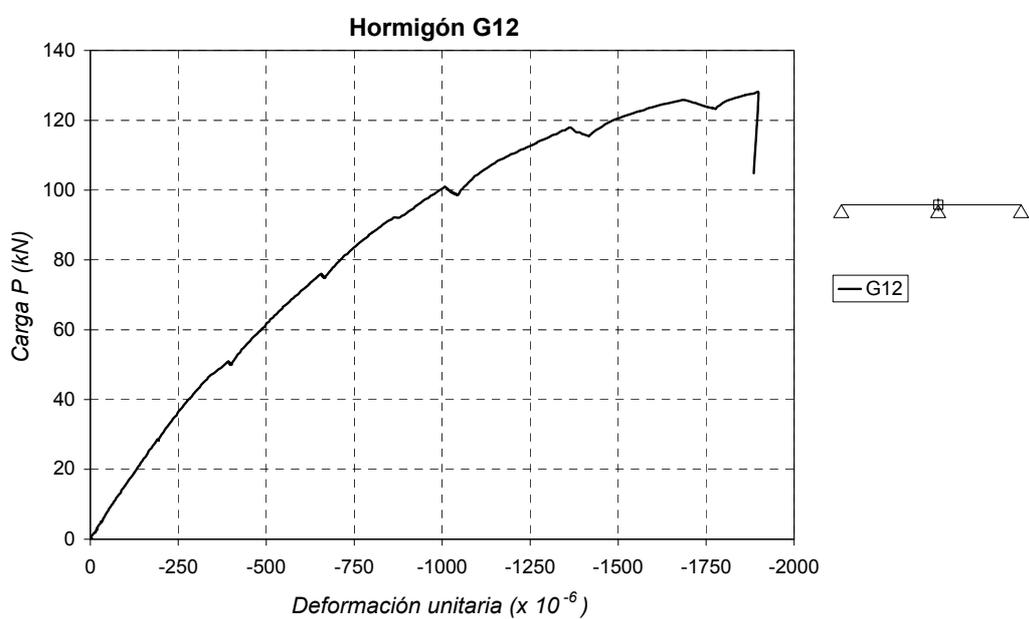


Figura 6.46 – Ensayo con refuerzos: deformaciones en el hormigón en la sección del apoyo central

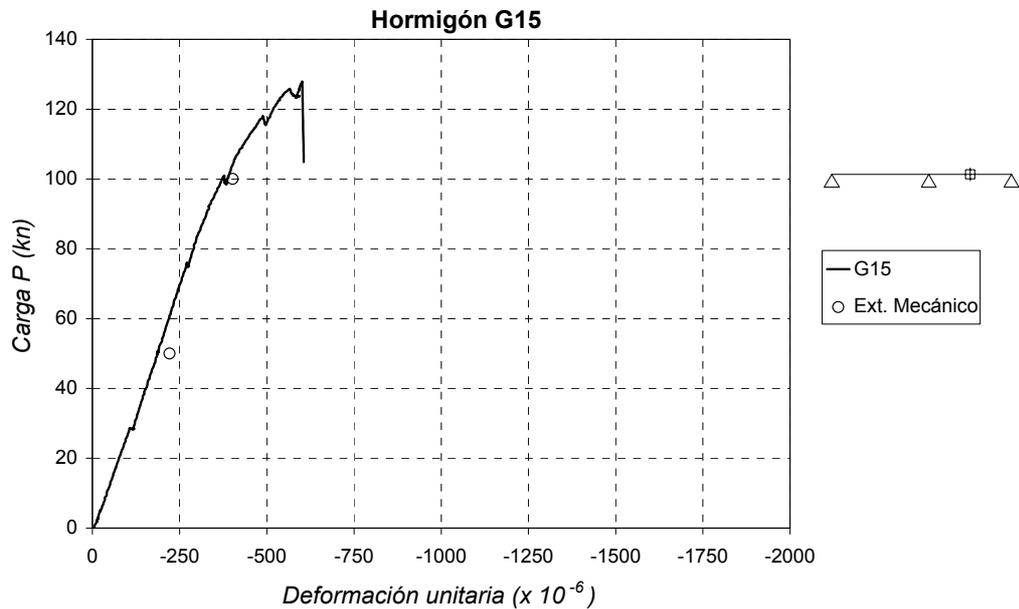


Figura 6.47 – Ensayo con refuerzos: deformaciones en el hormigón en el centro del segundo vano

En el análisis de los gráficos vemos que pueden aplicarse razonamientos parecidos al caso de las flechas. Cabría resaltar que la galga G12 correspondiente a la sección del apoyo central manifiesta en su tramo final un comportamiento bastante plano, que indicaría que el hormigón estaba llegando a su capacidad máxima de colaboración dentro de la sección.

Finalmente, podemos ver que como en los otros casos hay una buena coincidencia entre los resultados obtenidos mediante las galgas y los obtenidos con el extensómetro mecánico.

Ensayo con refuerzos: Resultados experimentales correspondientes a deformaciones en las chapas de refuerzos

En las Figuras 6.48 y 6.52 se muestran los gráficos correspondientes a los valores registrados para las deformaciones unitarias en las galgas pegadas a las chapas de refuerzo.

En este caso no ha sido posible obtener los valores de la galga G20, colocada en la chapa de refuerzo superior, debido a una desconexión accidental del cable durante la realización del ensayo.

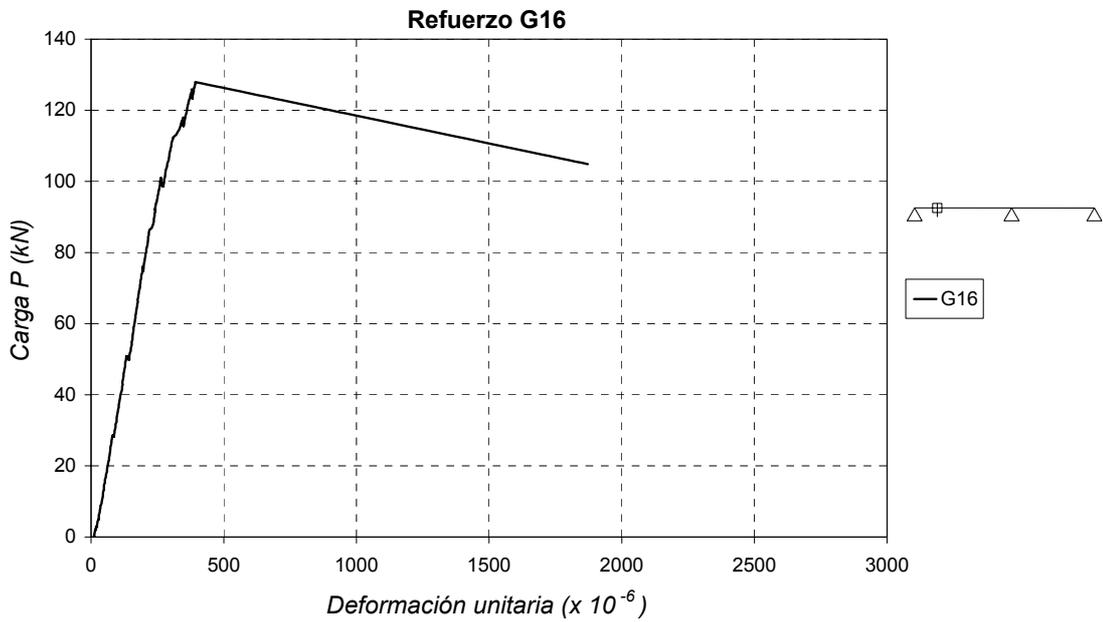


Figura 6.48 – Ensayo con refuerzos: deformaciones en la chapa inferior. Galga G16

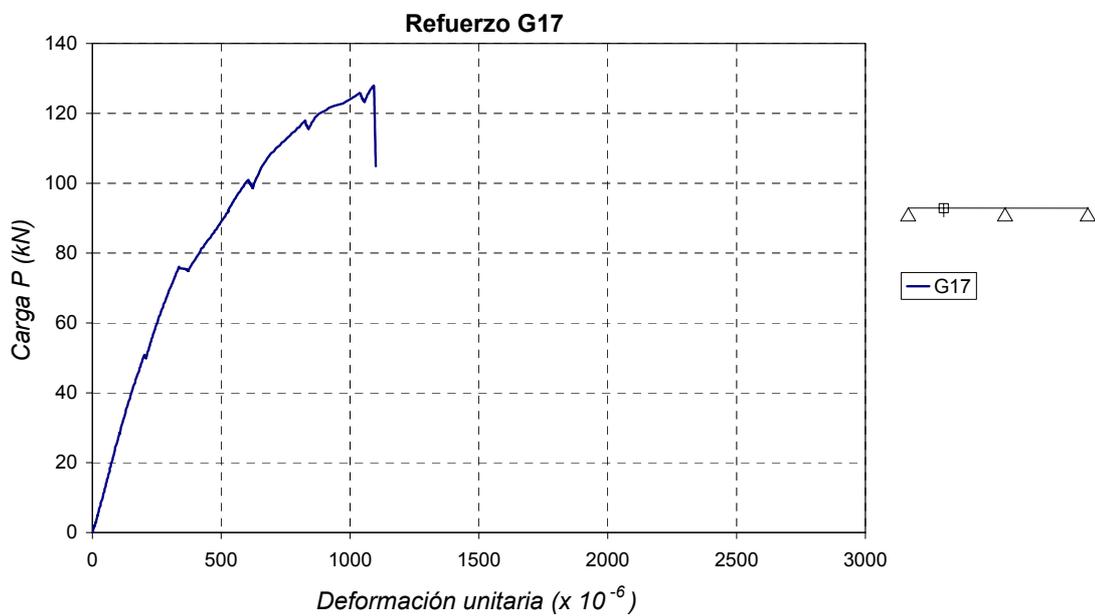


Figura 6.49 – Ensayo con refuerzos: deformaciones en la chapa inferior. Galga G17

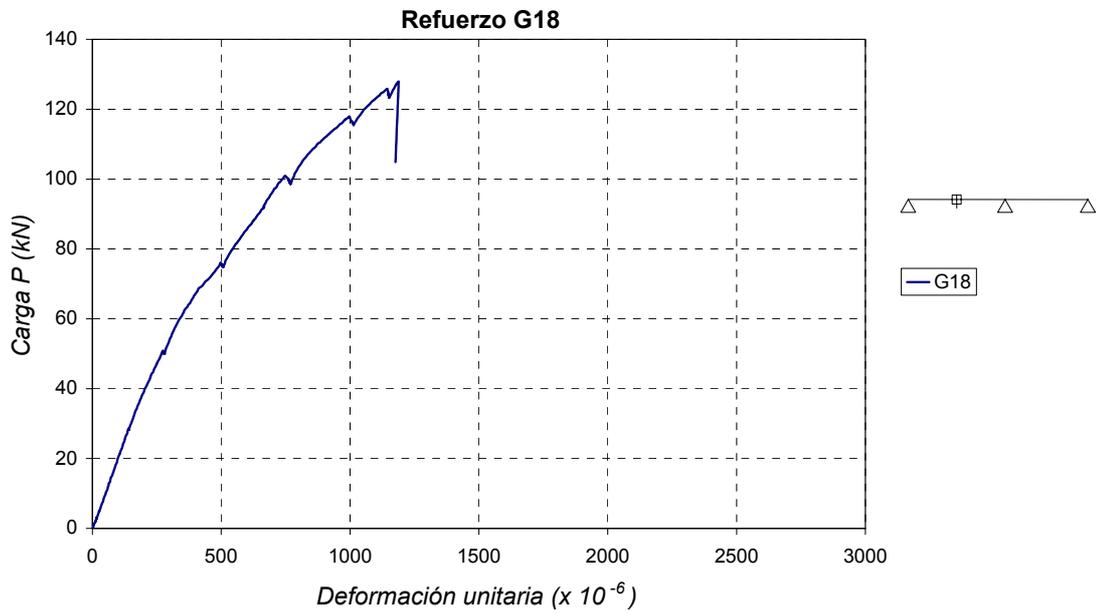


Figura 6.50 – Ensayo con refuerzos: deformaciones en la chapa inferior. Galga G18

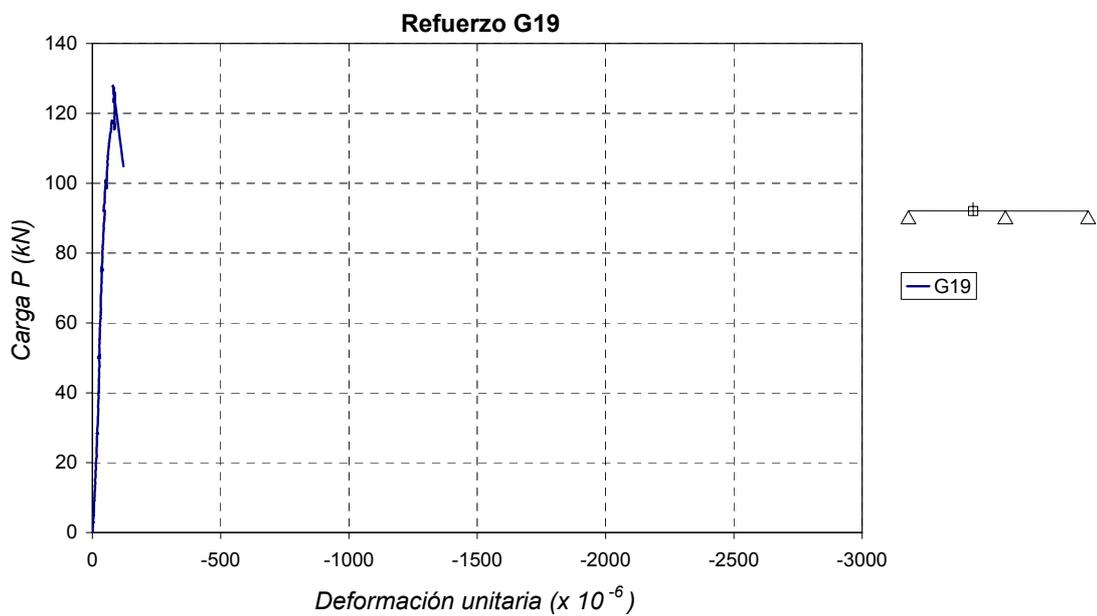


Figura 6.51 – Ensayo con refuerzos: deformaciones en la chapa superior. Galga G19

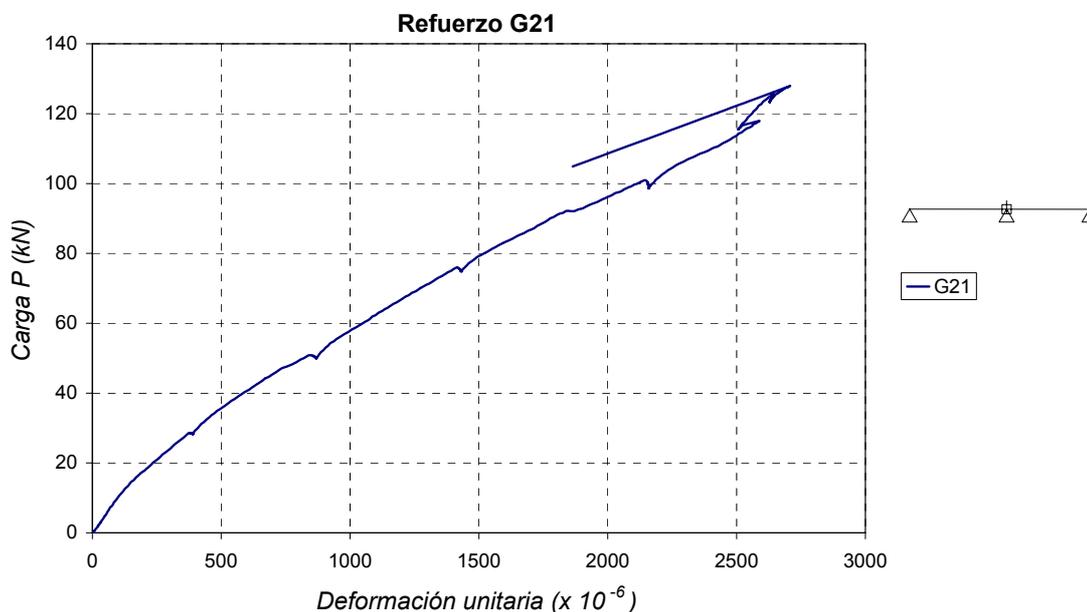


Figura 6.52 – Ensayo con refuerzos: deformaciones en la chapa superior. Galga G21

En el análisis de las curvas correspondientes a las galgas colocadas en la chapa inferior observamos una forma y evolución parecidas a las de las armaduras descritas anteriormente, con un comportamiento prácticamente lineal para la galga G16 que es la menos solicitada, en una zona con escaso incremento de la fisuración.

Las dos galgas de la chapa de refuerzo superior presentan una respuesta muy distinta. La G19 es la única en la que aparecen deformaciones con signo negativo, lo cual concuerda con el análisis, como se verá posteriormente. La galga G21 es la que está en la sección sometida a mayor esfuerzo y la que presenta las deformaciones mayores. Vemos que se sobrepasa sobradamente la deformación unitaria teórica correspondiente al límite elástico para el acero utilizado A42 (1250×10^{-6}), aunque la sección en su conjunto no presenta síntomas de empezar a acercarse a su capacidad resistente hasta el final del ensayo.

Ensayo con refuerzos: Resultados experimentales correspondientes a la reacción central

En la Figura 6.53 se presentan los valores medidos en la célula de carga colocada en el apoyo intermedio.

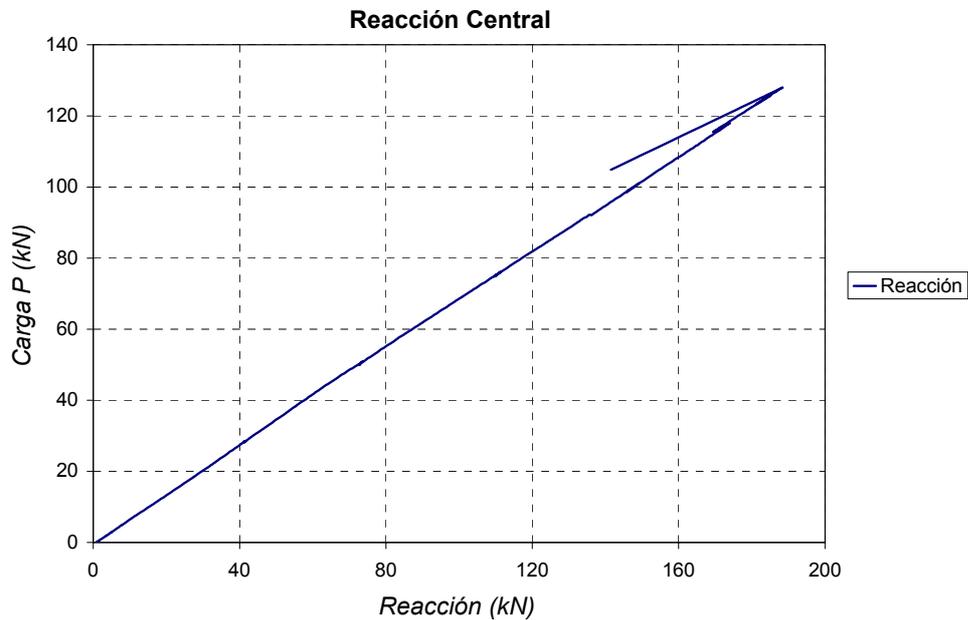


Figura 6.53 – Ensayo con refuerzos: reacción central

La característica prácticamente lineal del gráfico indicaría que durante el ensayo de la viga con refuerzos no ha habido una redistribución de esfuerzos apreciable. Además en el gráfico no se detecta la formación clara de una rótula en el centro del segundo vano que debería provocar un cambio pronunciado de pendiente del mismo.

De todas formas cabría hacer algunas matizaciones sobre las anteriores consideraciones.

La formación de una rótula en el centro del segundo vano no se produciría de una forma repentina sino paulatinamente, pudiendo estar la sección muy cerca de su agotamiento y no obstante contribuir todavía con una cierta rigidez al funcionamiento estructural. La posible influencia del efecto mencionado sería un aumento de la reacción central con respecto a la carga aplicada (disminución de la pendiente de la gráfica), pero ello podría quedar compensado por una disminución también gradual de rigidez de la sección del apoyo central que tendría el efecto contrario.

Se observa que el valor de la reacción es ligeramente superior que el obtenido en un análisis lineal como el efectuado en 6.2, que era prácticamente coincidente con el que se obtiene en el análisis de la viga sin refuerzos. Esto es debido al efecto combinado de la fisuración y de los refuerzos en la distribución de rigidez a lo largo de la viga. La variación de aproximadamente un 6% en la reacción, provoca cambios del 25% y del 17% en los momentos flectores, con lo cual los momentos teóricos de agotamiento de 31 kN·m y 79 kN·m para la sección central del segundo vano y del apoyo central no se producen para las cargas calculadas en 6.2 (82 kN, 110 kN) sino para 97 kN y 120 kN.

Todo ello estaría de acuerdo con la aparición de importantes fisuras en la sección del apoyo central en los 118 kN y con los valores de la deformación del hormigón al final del ensayo (128 kN) del orden del 2 ‰, con una pendiente muy horizontal y con la chapa de refuerzo habiendo sobrepasado el límite elástico, denotando que quedaría ya muy cerca el límite de capacidad resistente de la sección. El cálculo de esta sección indicaba un agotamiento en el dominio 2, aunque ya muy cerca del 3.

Asimismo estaría en concordancia con el hecho de que al final del ensayo prácticamente ya se podía considerar agotada la sección central del segundo vano, tal como indican las elevadas flechas en esta zona y las deformaciones de las armaduras (G7), que aumentan muy rápidamente a partir de los 100 kN, aunque no se disponen de datos de la deformación del hormigón en las fibras extremas. El cálculo seccional predecía un agotamiento en el dominio 2.

6.8. CONTRASTACIÓN DE RESULTADOS CON EL MODELO NUMÉRICO

6.8.1. Criterios seguidos en la modelización

La modelización de los elementos resistentes y de los estados de carga constituye un aspecto de la mayor importancia en el análisis estructural. Toda modelización conlleva la asunción de una serie de simplificaciones del caso real, que en general van a depender de la información disponible y de los datos que requiera el modelo a usar.

La información de la que se disponía en este caso era muy exhaustiva: desde las características geométricas precisas del elemento y de las armaduras, pasando por las características resistentes del material, hasta la secuencia exacta de aplicación de las cargas.

Puesto que no se trata tanto de usar el modelo para el diseño, sino para simular un caso concreto, se ha optado por utilizar esa información al máximo, de acuerdo con las posibilidades que permite la entrada de datos del programa implementado.

De acuerdo con lo expuesto se ha introducido la información referente a nueve tipos de secciones distintas, en las que varían la sección de armadura o de refuerzo, teniendo en cuenta que para modelizar la longitud de las armaduras se ha descontado el equivalente a una mitad de la longitud de anclaje correspondiente según el diámetro.

La modelización de las secciones reforzadas se ha efectuado considerando las chapas simplemente superpuestas (sin deslizamiento) a la sección de hormigón preexistente. Debido al procedimiento de aplicación del adhesivo usado para pegar los refuerzos, es probable que se produjera una rigidización de las capas extremas de la sección, motivado por la penetración de adhesivo en las fisuras y en el mismo material entre fisuras (por el abujardado) y que incluso quedara una pequeña capa de unos milímetros entre sección inicial y chapa. Al no disponer de datos fiables de las características resistentes del adhesivo y de su trabajo conjunto con el hormigón, ni de los grosores finales, se ha optado por prescindir de este aspecto.

Para simular el proceso de carga creciente y tener un número de puntos suficiente para obtener la forma correcta de las curvas, la carga se ha introducido por etapas, con escalones más pequeños en el primer ensayo (variables entre 0.5÷3 kN), sobre todo en las proximidades de la zona de fisuración, que en el segundo (7.÷28 kN).

En el ensayo con refuerzos se ha optado por representar los resultados numéricos hasta un valor de la carga de 62.5 kN (intermedio en el escalón 50÷75 kN), que es cuando las tensiones en el hormigón han llegado a valores superiores al 40% de la resistencia del hormigón y, por tanto, se puede considerar que éste empieza a tener un comportamiento no lineal.

Aunque no era estrictamente necesario, puesto que se disponía de la información referente a los tiempos de aplicación de la carga y el programa lo permitía, se ha introducido la fluencia empleando la formulación de MC-90 [61], que para intervalos de tiempo tan reducidos ha dado valores del orden de 0.15.

6.8.2.Comparación de resultados

En este apartado se presenta en forma gráfica una comparación de los resultados experimentales expuestos anteriormente en 6.7 con los de la simulación numérica mediante el modelo desarrollado. Asimismo se realiza una comparación entre el estado de fisuración proporcionado por el modelo y el observado experimentalmente.

Para una mayor claridad la exposición se divide en dos subapartados correspondientes a los dos ensayos realizados.

Ensayo sin refuerzos

En las Figuras 6.54 a 6.58 se muestran los gráficos comparativos entre los valores numéricos y los experimentales correspondientes a las flechas.

A la vista de las figuras se observa una buena concordancia de los resultados, sobre todo los pertenecientes al primer vano. Tanto la carga a la que se produce el cambio de pendiente debido a la aparición de los efectos de la fisuración así como las pendientes en la zona no fisurada y en la fisurada, concuerdan de manera satisfactoria.

Todo ello indicaría que la modelización de la viga y del efecto del hormigón traccionado entre fisuras, teniendo en cuenta la variación de armado en distintas secciones, y los valores obtenidos en los ensayos de caracterización del hormigón han sido adecuados para la simulación del comportamiento global de la estructura.

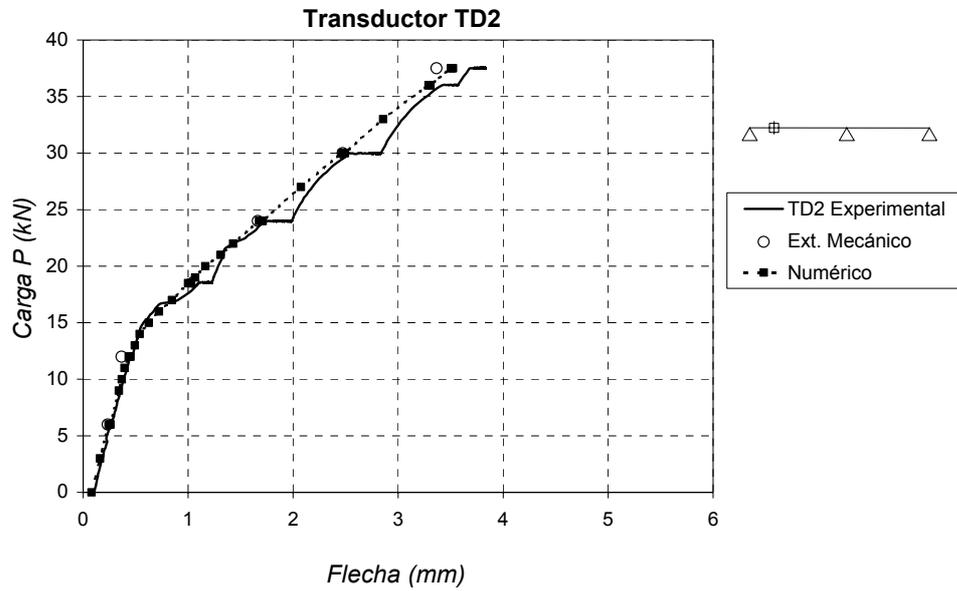


Figura 6.54 – Contrastación ensayo sin refuerzos: flecha transductor TD2

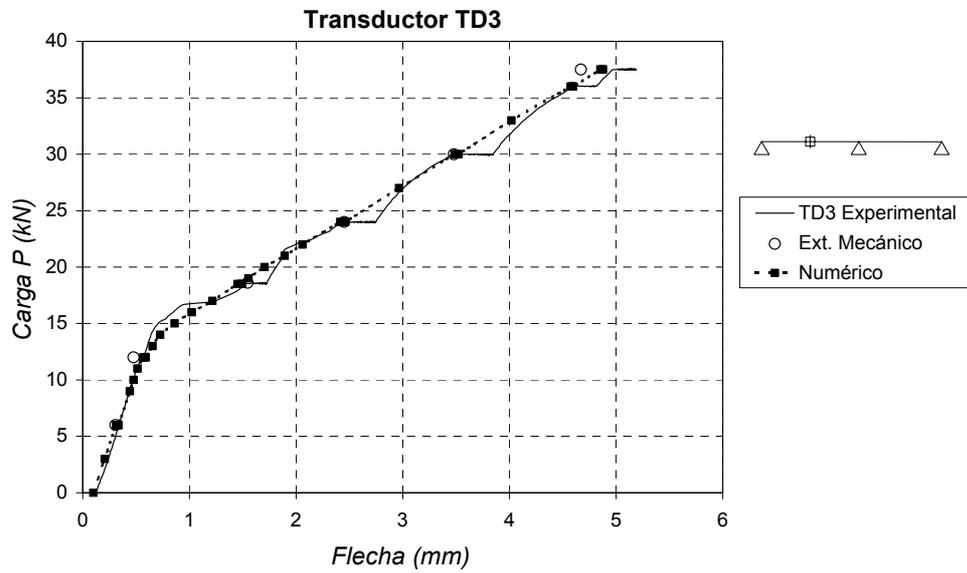


Figura 6.55 – Contrastación ensayo sin refuerzos: flecha transductor TD3

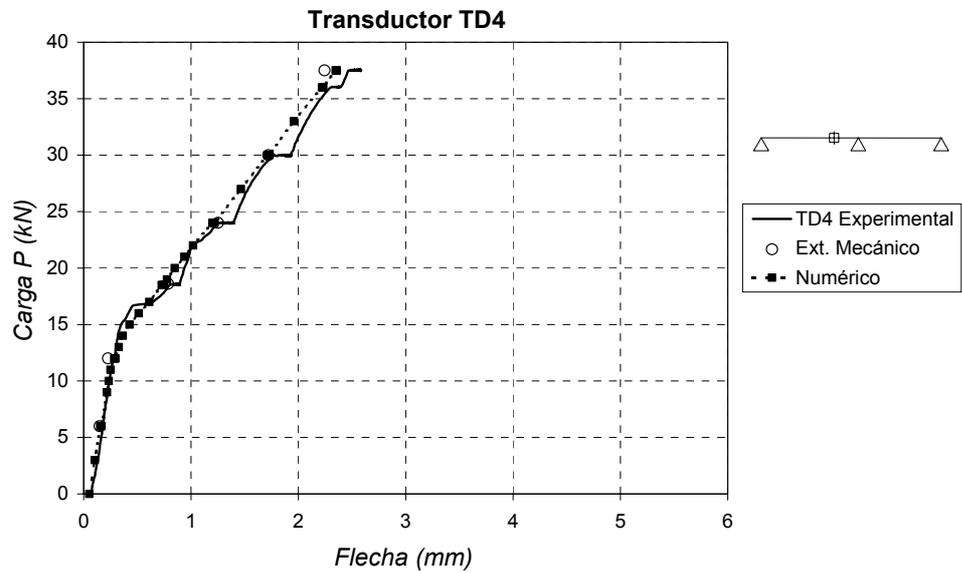


Figura 6.56 – Contrastación ensayo sin refuerzos: flecha transductor TD4

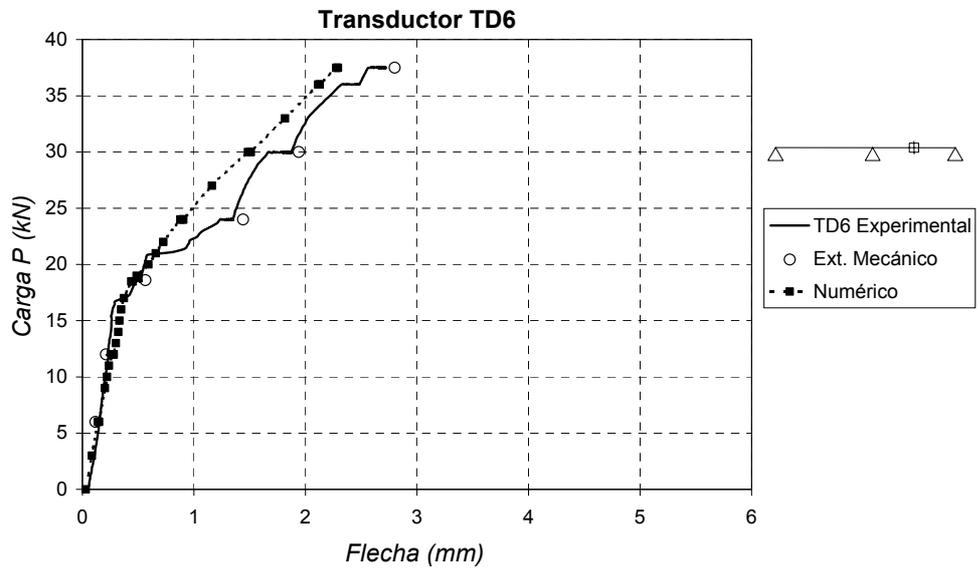


Figura 6.57 – Contrastación ensayo sin refuerzos: flecha transductor TD6

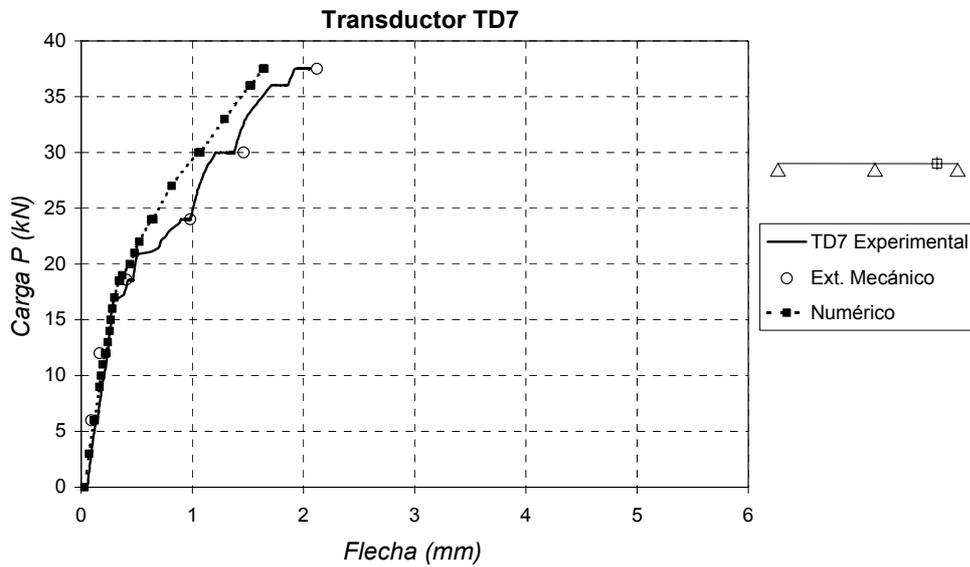


Figura 6.58 – Contrastación ensayo sin refuerzos: flecha transductor TD7

A continuación, en las Figuras 6.59 a 6.61 se presentan las curvas correspondientes a las deformaciones en las armaduras instrumentadas.

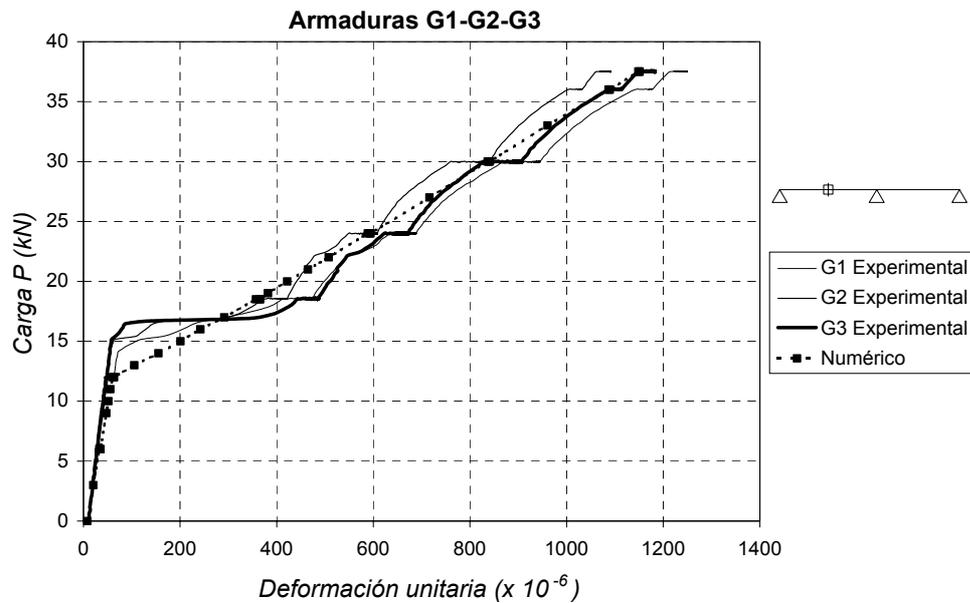


Figura 6.59 – Contrastación ensayo sin refuerzos: deformación de armaduras en el centro del primer vano

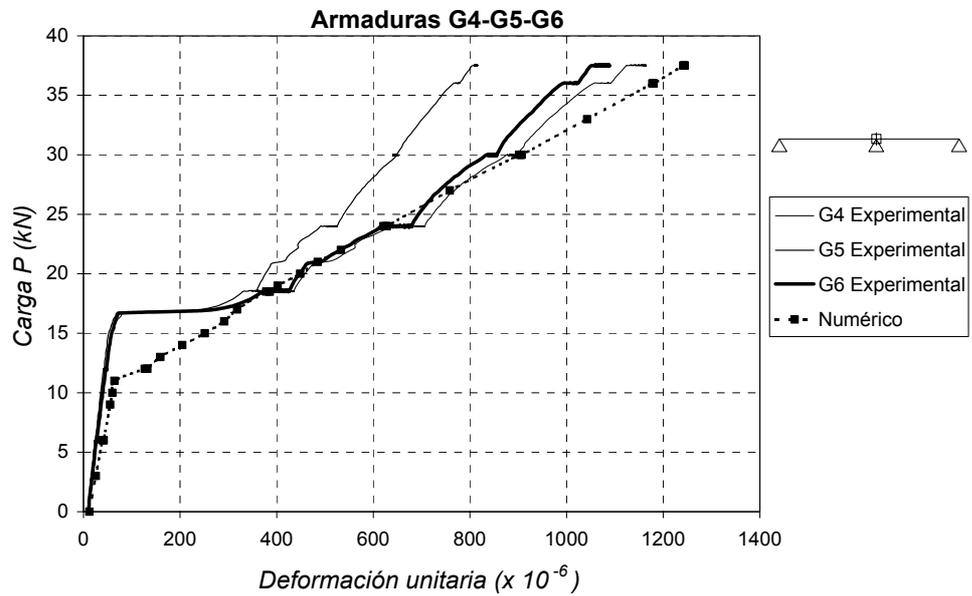


Figura 6.60 – Contrastación ensayo sin refuerzos: deformación de armaduras en la sección del apoyo central

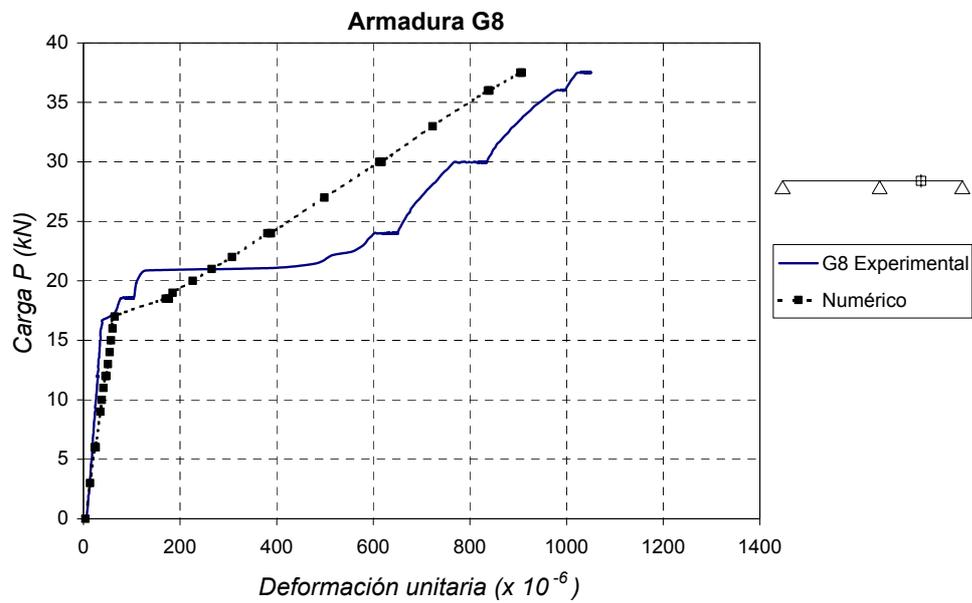


Figura 6.61 – Contrastación ensayo sin refuerzos: deformación de armaduras en el centro del segundo vano

En general, se aprecia una similitud bastante aceptable entre los valores numéricos y los experimentales. Puede considerarse que las desviaciones están dentro de límites razonables, teniendo en cuenta la propia precisión de las mediciones y la variabilidad inherente al comportamiento seccional. Véase, por ejemplo, que las deformaciones en las galgas colocadas en armaduras en el entorno de una misma sección ya dan resultados con una cierta dispersión entre ellas (p.e. G4-G5-G6), o que la carga en la que se aprecia la fisuración varía entre las galgas de una misma sección (p.e. G1 y G3).

No hay que olvidar que el modelo contempla la fisuración distribuida y por tanto es más adecuado para variables en las que influya el comportamiento medio, como las flechas, mientras que para las deformaciones unitarias los resultados experimentales se ven influenciados por fenómenos locales (fisuras, adherencia, discontinuidades de armado, etc.).

Por lo que respecta a las deformaciones unitarias en el hormigón, la comparación de valores viene reflejada en las Figuras 6.62 a 6.64.

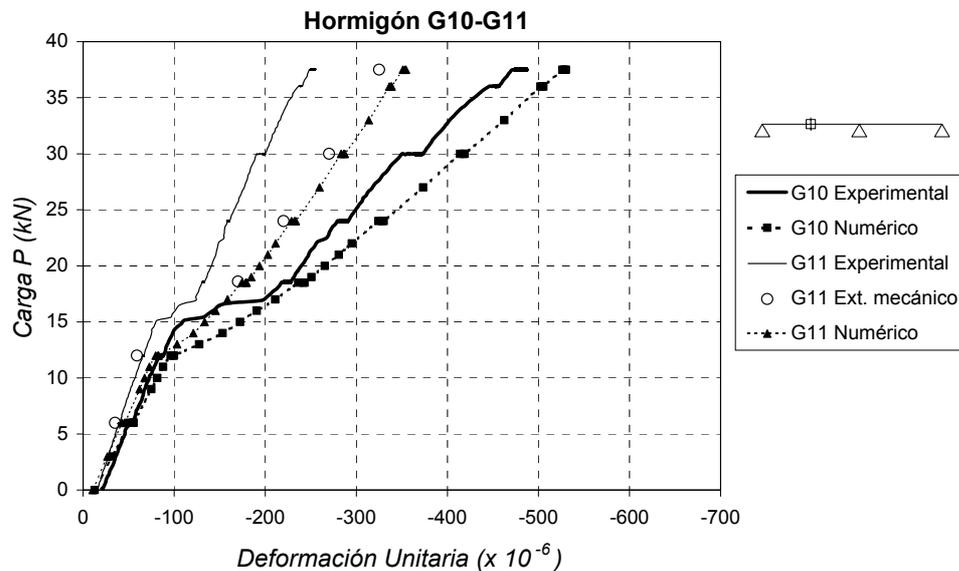


Figura 6.62 – Contrastación ensayo sin refuerzos: deformaciones en el hormigón en el centro del primer vano

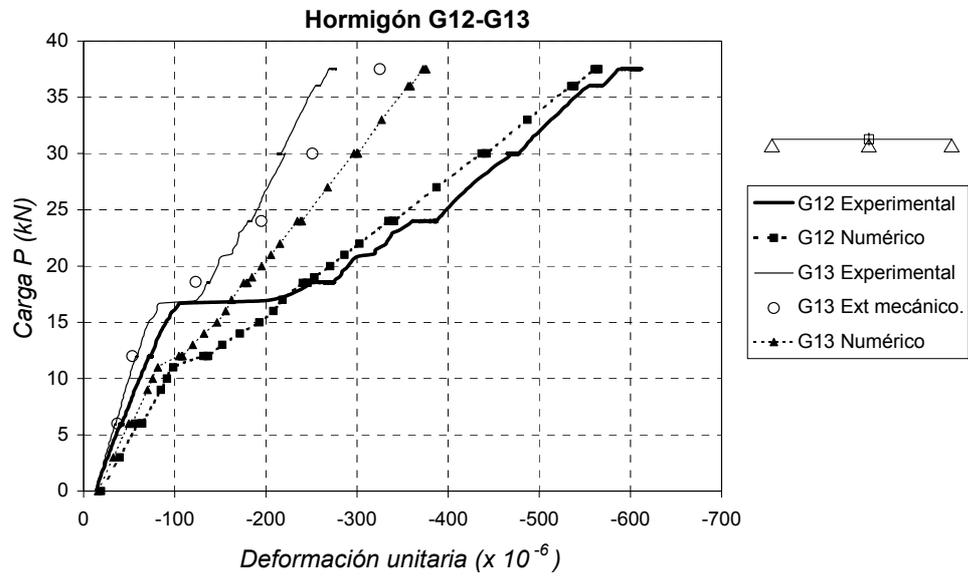


Figura 6.63 – Contrastación ensayo sin refuerzos: deformaciones en el hormigón en la sección del apoyo central

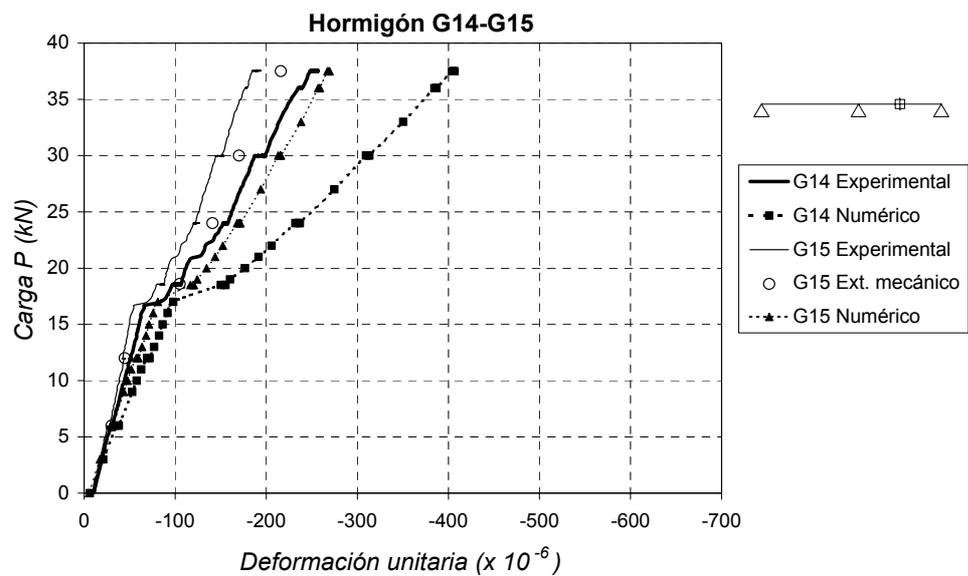


Figura 6.64 – Contrastación ensayo sin refuerzos: deformaciones en el hormigón en el centro del segundo vano

En este caso deberían hacerse las mismas matizaciones que en el anterior por lo que se refiere a la modelización del comportamiento seccional. De acuerdo con ello se observa que el modelo reproduce bien la evolución de los resultados experimentales, aunque se aprecia una tendencia de los resultados numéricos a sobrepasar los valores experimentales obtenidos mediante las galgas (excepto en G12) y en cambio hay una mejor concordancia con los obtenidos mediante el extensómetro mecánico. Ya se comentó en 6.7.2, que el examen de las gráficas del ensayo ponía de manifiesto la diferencia entre los dos registros y se indicaron las posibles causas de las desviaciones en los valores de las galgas.

Finalmente, en la Figura 6.65 se indica el estado de fisuración obtenido mediante el modelo y el observado experimentalmente.

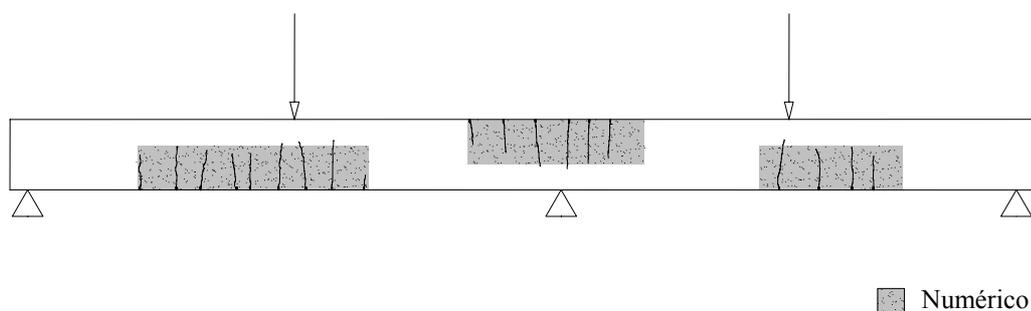


Figura 6.65 – Contrastación ensayo sin refuerzos: zona fisurada

Se distinguen tres zonas de fisuración: centro del primer vano, zona del apoyo central y centro del segundo vano. Las zonas sombreadas indican la fisuración distribuida detectada por el modelo numérico. Se puede apreciar una buena concordancia entre el estado de fisuración obtenido numéricamente y el experimental. Aquí debe tenerse en cuenta que el modelo, además de contemplar la fisuración como un fenómeno distribuido, se ha implementado en un programa que proporciona los resultados en unas determinadas secciones de control y que, por tanto, los resultados no se obtienen de un modo continuo a lo largo de la viga.

Ensayo con refuerzos

Las gráficas que siguen se limitan a una carga de 62.5 kN. Para este valor, las tensiones de compresión en el hormigón en la sección central del segundo vano y en el apoyo intermedio han superado el 40 % de la resistencia del hormigón.

Siguiendo el mismo esquema que en el caso anterior, en primer lugar se presentan los resultados correspondientes a las flechas, los cuales se indican en las Figuras 6.66 a 6.70.

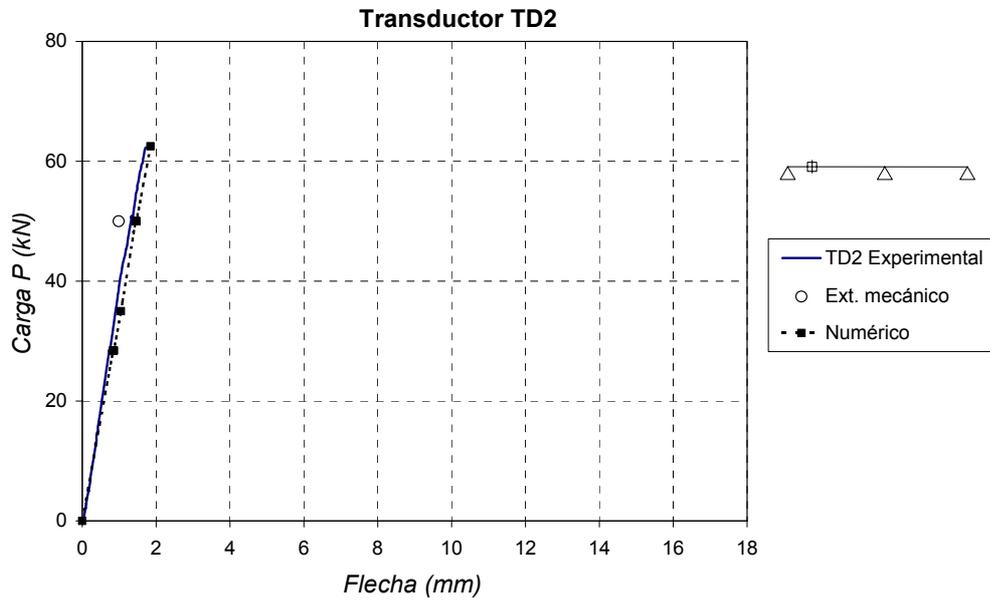


Figura 6.66 – Contrastación ensayo con refuerzos: flecha transductor TD2

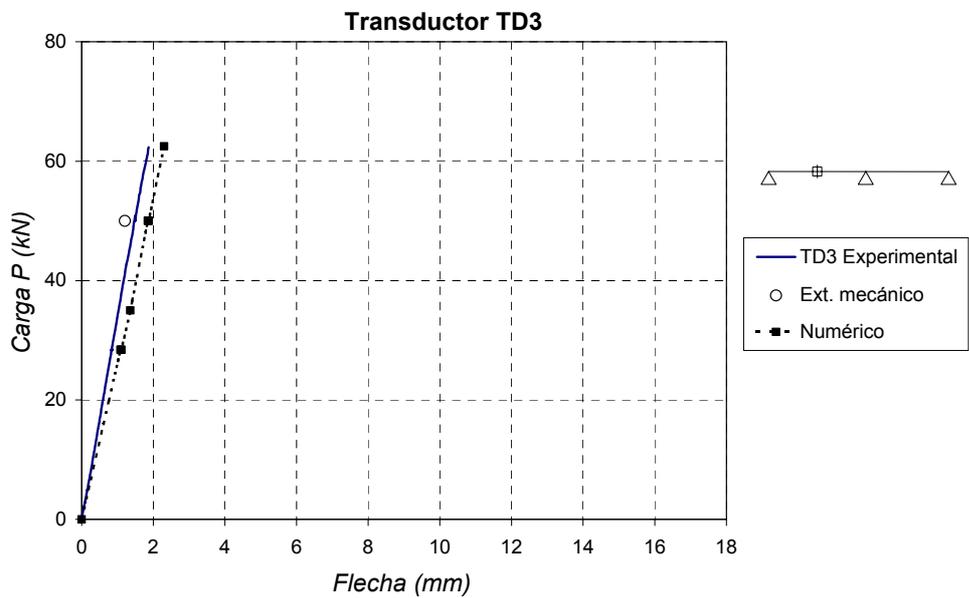


Figura 6.67 – Contrastación ensayo con refuerzos: flecha transductor TD3

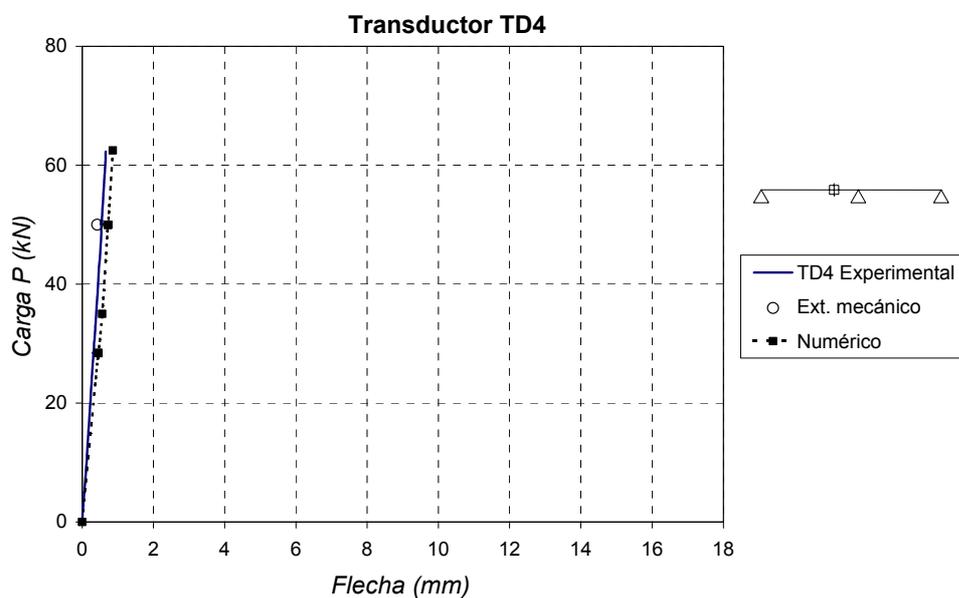


Figura 6.68 – Contrastación ensayo con refuerzos: flecha transductor TD4

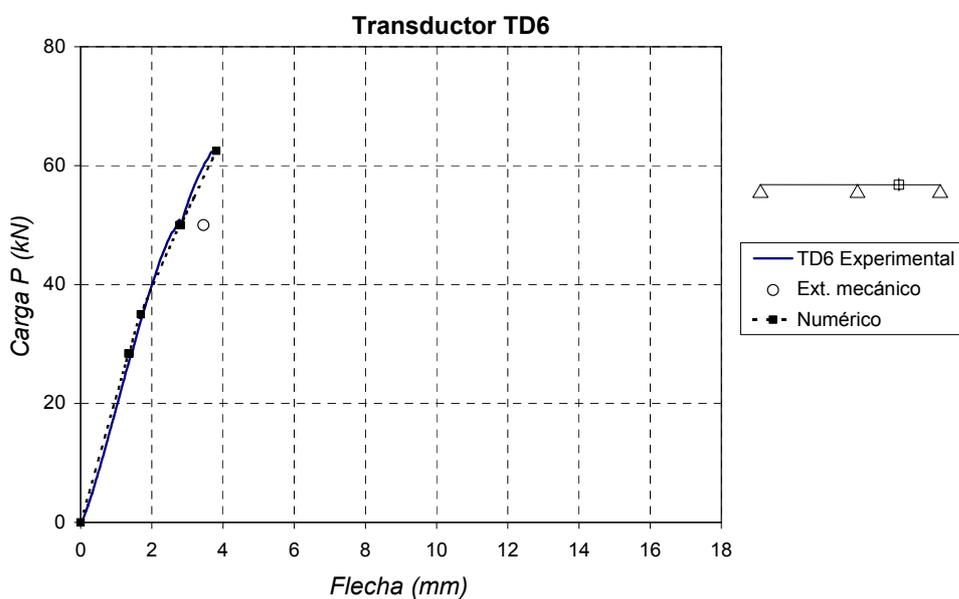


Figura 6.69 – Contrastación ensayo con refuerzos: flecha transductor TD6

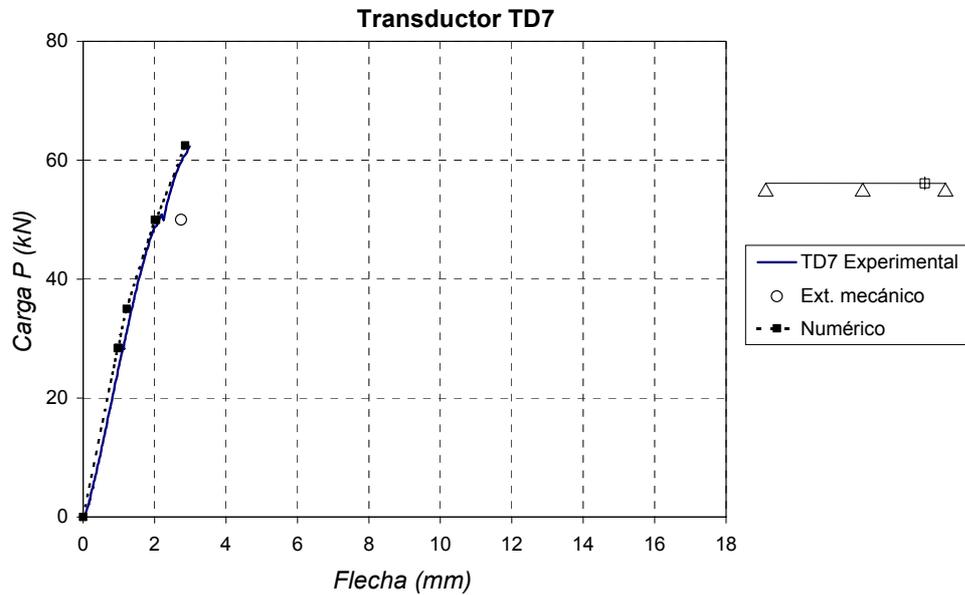


Figura 6.70 – Contrastación ensayo con refuerzos: flecha transductor TD7

Nuevamente, en el caso de las flechas, se observa una buena concordancia entre los valores numéricos y los experimentales. Podemos ver que en el segundo vano se reproduce bien el cambio de pendiente debido al aumento de fisuración que se da principalmente en este tramo. Para el primer vano se aprecia una ligera sobreestimación de las flechas con el modelo numérico, cosa que ocurre también para otros parámetros en este caso del ensayo con refuerzos. Ello parece indicar que el ajuste sería aun mejor si se hubiera introducido una rigidización adicional en las zonas reforzadas, por el efecto del adhesivo epoxy, del cual se ha prescindido por no disponer de datos fiables para su modelización, tal como se ha indicado en 6.8.1.

La comparación de resultados para las deformaciones en las armaduras se refleja en las Figuras 6.71 a 6.73.

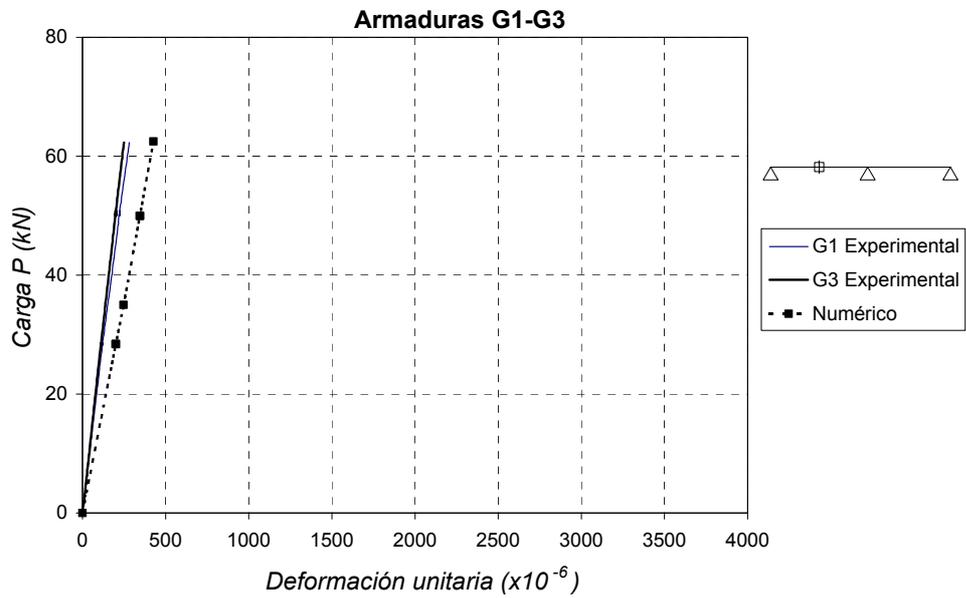


Figura 6.71 – Contrastación ensayo con refuerzos: deformación de armaduras en el centro del primer vano

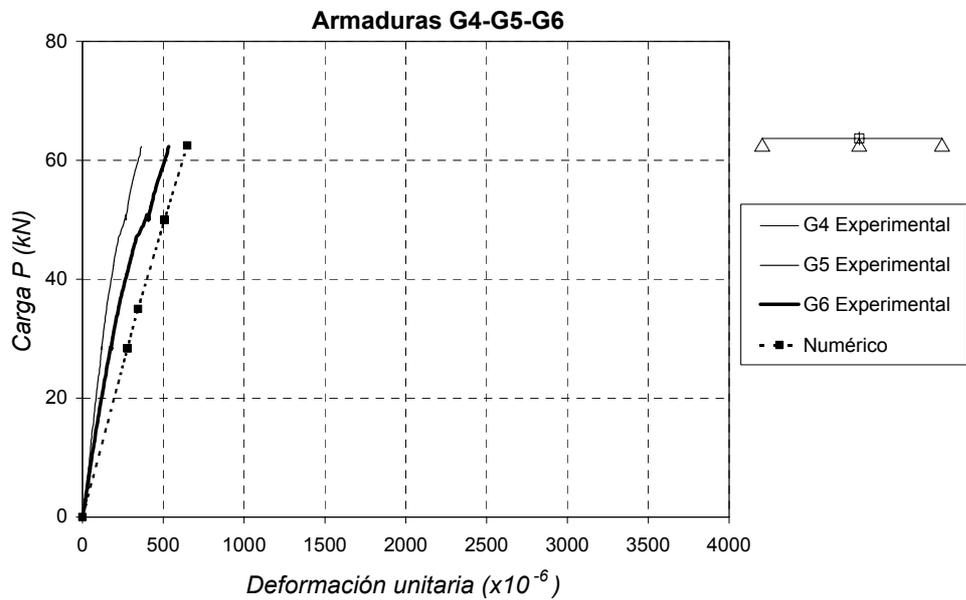


Figura 6.72 – Contrastación ensayo con refuerzos: deformación de armaduras en la sección del apoyo central

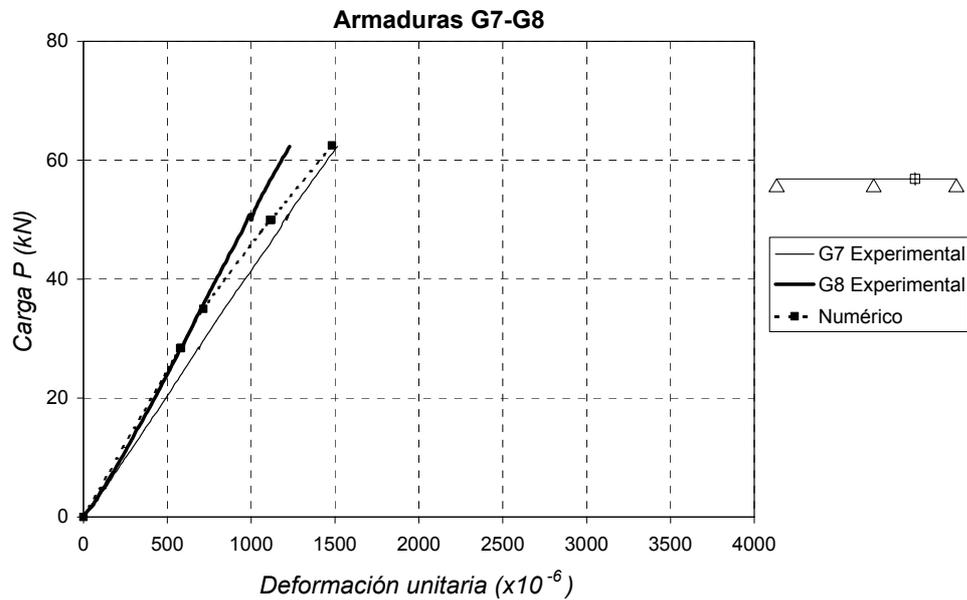


Figura 6.73 – Contraste ensayo con refuerzos: deformación de armaduras en el centro del segundo vano

Igualmente que en el caso del ensayo sin refuerzos habría que hacer notar la variabilidad dentro de una misma sección y la influencia del carácter “discreto” de la fisuración en el comportamiento individual de cada sección.

Similarmente a lo observado en las flechas se observa una tendencia de los resultados numéricos a sobrevalorar las deformaciones, sobre todo en el primer vano, y también en la zona del apoyo intermedio, que son las reforzadas. Parece, pues, que también se mejoraría el ajuste si se considerara una rigidización adicional en estas zonas.

En las Figuras 6.74 a 6.76 se muestran los valores de las deformaciones en el hormigón.

Son válidos los mismos comentarios que en otros casos por lo que respecta al comportamiento seccional.

Igualmente que en el caso del ensayo sin refuerzos el ajuste es mejor con los valores obtenidos con el extensómetro mecánico que con los de las galgas extensométricas, habiéndose ya mencionado las posibles causas.

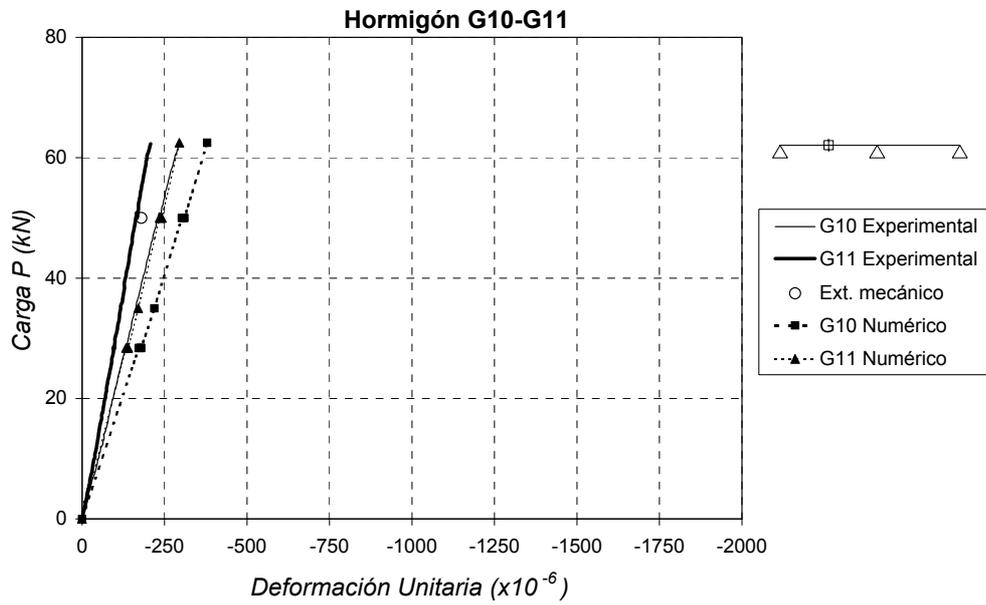


Figura 6.74 – Contrastación ensayo con refuerzos: deformaciones en el hormigón en el centro del primer vano

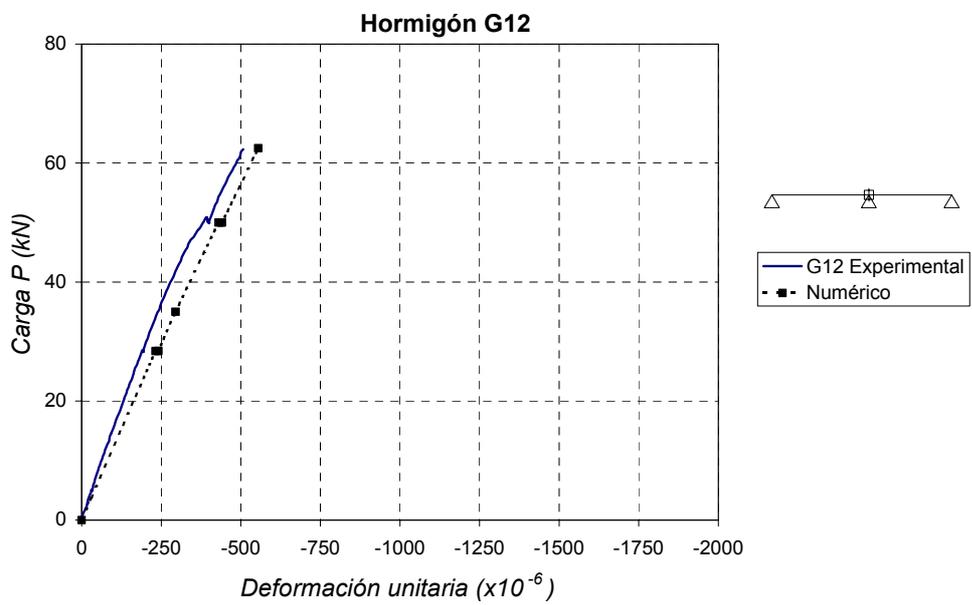


Figura 6.75 – Contrastación ensayo con refuerzos: deformaciones en el hormigón en la sección del apoyo central

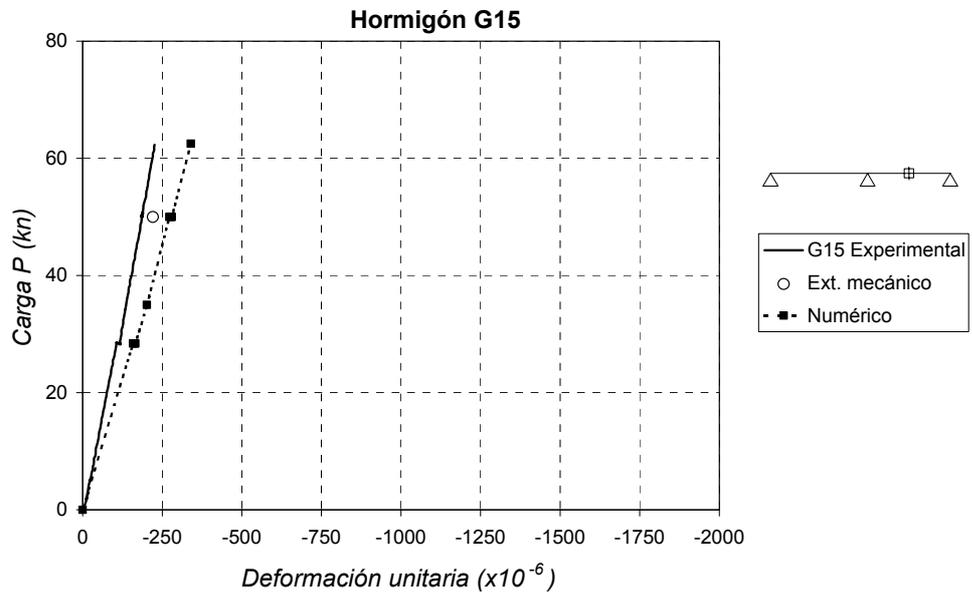


Figura 6.76 – Contrastación ensayo con refuerzos: deformaciones en el hormigón en el centro del segundo vano

Continuando con el esquema propuesto, en las Figuras 6.77 a 6.81 se indican los resultados correspondientes a las deformaciones en las chapas metálicas de refuerzo.

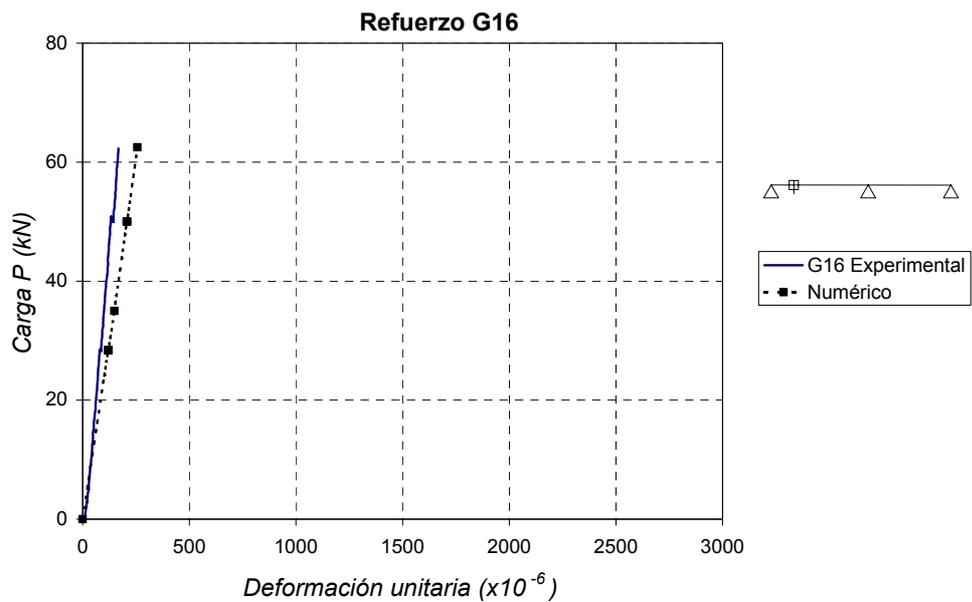


Figura 6.77 – Contrastación ensayo con refuerzos: deformaciones en la chapa inferior. Galga G16

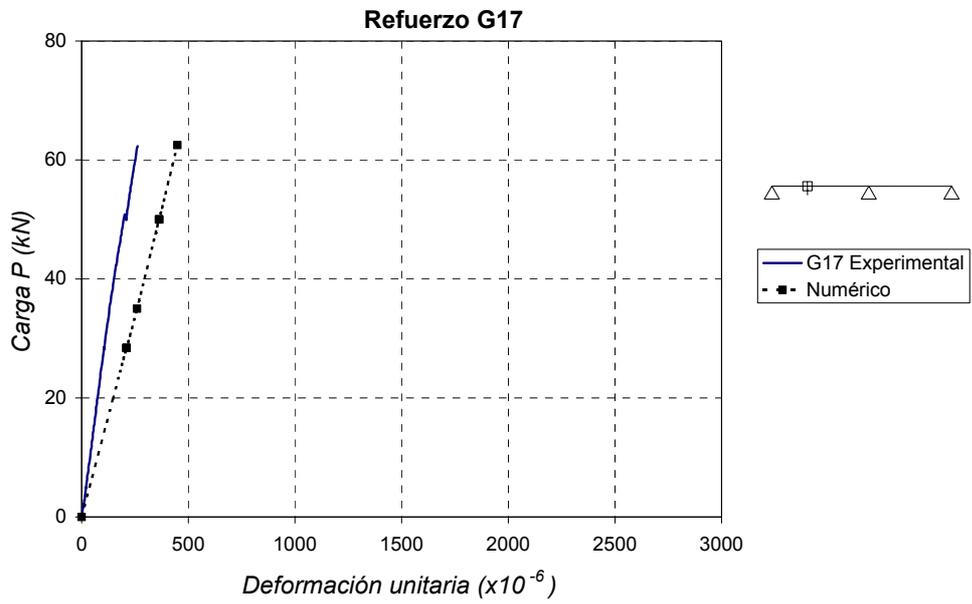


Figura 6.78 – Contrastación ensayo con refuerzos: deformaciones en la chapa inferior. Galga G17

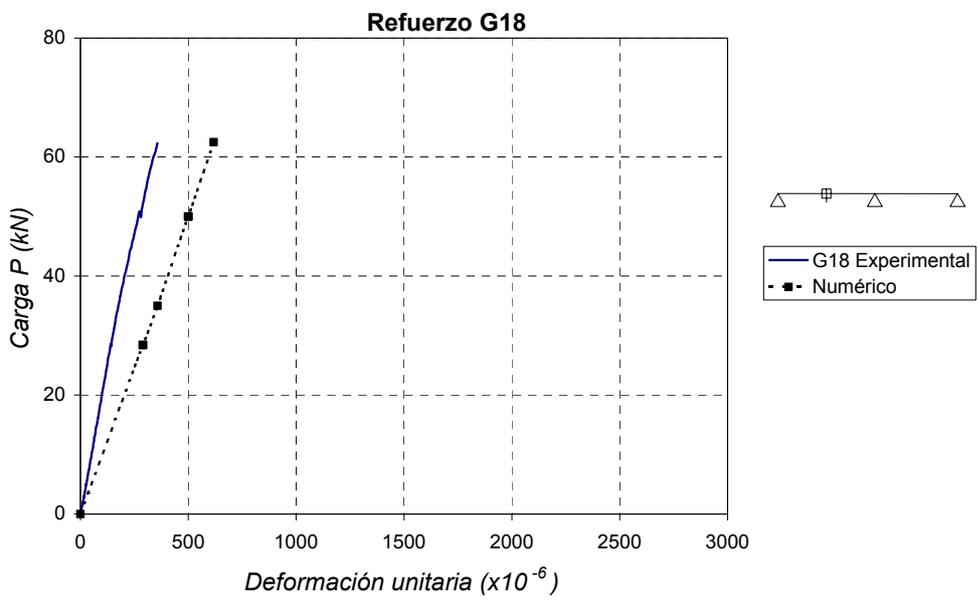


Figura 6.79 – Ensayo con refuerzos: deformaciones en la chapa inferior. Galga G18

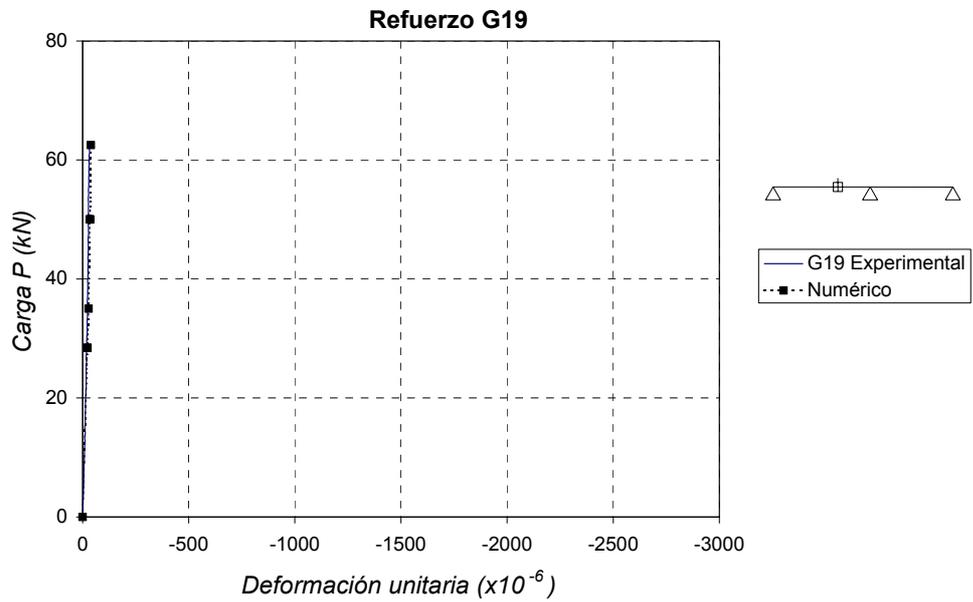


Figura 6.80 – Contrastación ensayo con refuerzos: deformaciones en la chapa inferior. Galga G19

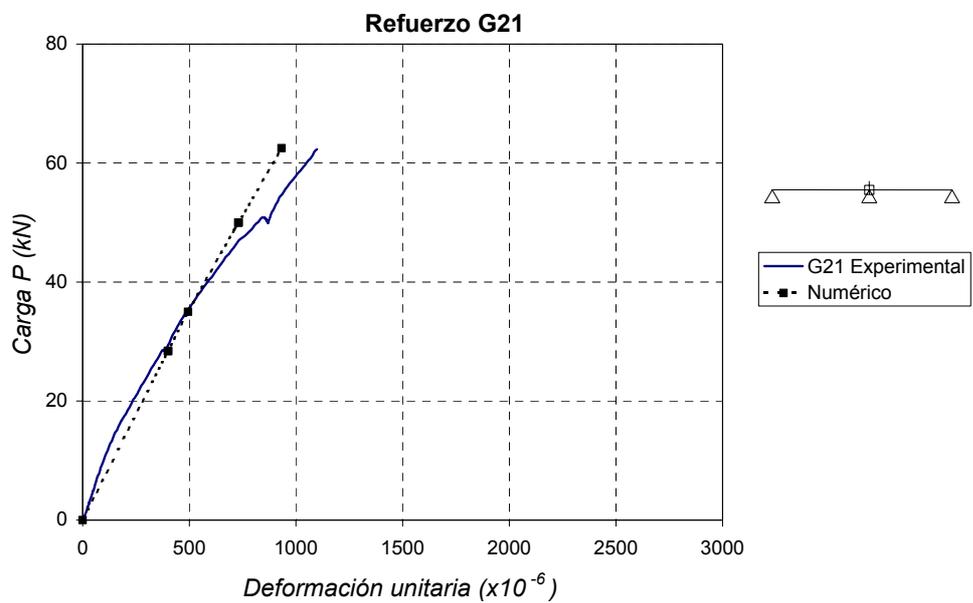


Figura 6.81 – Contrastación ensayo con refuerzos: deformaciones en la chapa inferior. Galga G21

En general, se observa una tendencia a sobrevalorar las deformaciones, lo cual ya ha sido comentado con anterioridad.

Se destaca la galga G19 de la chapa superior, situada en la zona de cambio de signo del momento flector, que es la única en la que se presentan deformaciones de signo negativo, aunque muy pequeñas. Se puede apreciar que su comportamiento ha sido bien reproducido por el modelo numérico.

La gráfica indicativa de los valores de la reacción central se muestra en la Figura 6.82.

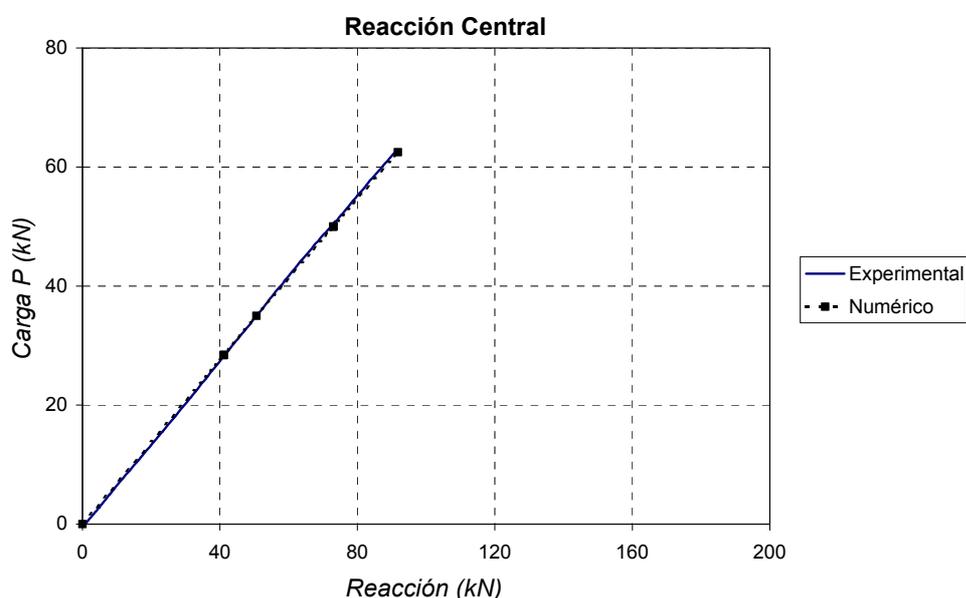


Figura 6.82 – Contrastación ensayo con refuerzos: reacción central

Como se puede apreciar hay una buena concordancia entre los valores experimentales y los numéricos. Ya se indicó en 6.7.3, al comentar los resultados experimentales, que se presentan valores ligeramente superiores a los que se obtendrían de un análisis lineal, sin fisuración y sin cambios de sección. Vemos que este efecto ha sido bien reproducido por el modelo y ello indica que el análisis numérico se ha efectuado teniendo en cuenta la distribución correcta de momentos flectores a lo largo de la viga.

Por último, en la Figura 6.83 se presenta la comparación entre el estado de fisuración obtenido mediante el modelo y el observado experimentalmente.

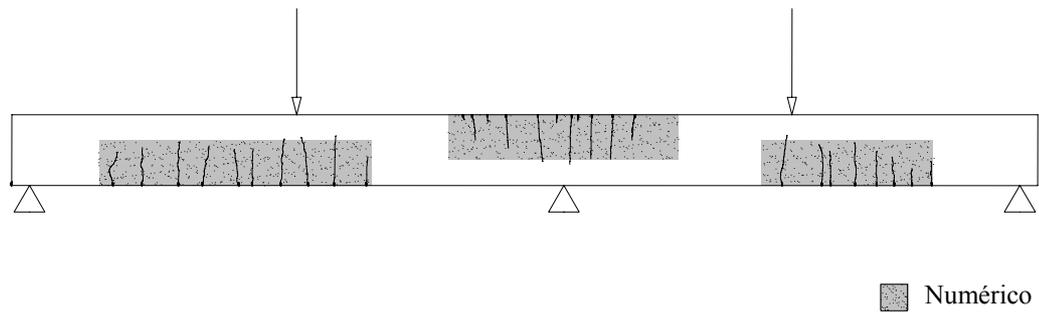


Figura 6.83 – Contrastación ensayo con refuerzos: zona fisurada

La comparación con la fisuración manifestada en el ensayo sin refuerzos permite observar un ligero aumento de la fisuración, con incremento de longitud de fisuras en el primer vano y aparición de nuevas fisuras en la zona del apoyo intermedio y sobretodo en el segundo vano (debido a la ausencia de refuerzo en esta zona). Se puede apreciar que el modelo numérico reproduce de forma satisfactoria el estado de fisuración en la viga.