

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

---

DEPARTAMENT D'ESTRUCTURES A L'ARQUITECTURA  
DEPARTAMENT D'ENGINYERIA DE LA CONSTRUCCIÓ

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO  
DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO  
DESCIMBRADAS A TEMPRANAS EDADES

**ISABEL SERRÀ MARTÍN**

Trabajo realizado como parte de los  
requisitos exigidos para optar al grado  
de Doctor.

---

Barcelona - Noviembre de 1994

## Capítulo 4

# DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Los distintos tipos de ensayo realizados, ya definidos en el capítulo anterior, pueden agruparse, básicamente, en dos grandes bloques:

- Ensayos de caracterización del hormigón.
- Ensayos sobre vigas.

De ellos, los primeros son ensayos que están regulados por normas y recomendaciones, y su realización tenía por objeto conocer la evolución de las propiedades del hormigón de las vigas ensayadas con el fin de contrastar los resultados experimentales con las predicciones analíticas sobre el comportamiento de las mismas. Estos ensayos se describen dentro del primer apartado de este capítulo (4.1), haciendo referencia a las normas y recomendaciones de aplicación.

Los ensayos sobre vigas merecen una especial atención puesto que son fundamentales en la investigación realizada. Básicamente pueden definirse dos tipos de ensayo: *Rotura* y *Fluencia*. Cada uno de ellos se describe, de forma detallada, en los apartados 4.2 y 4.3 respectivamente.

### 4.1.- ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN

Tal como se ha descrito en el apartado 3.2 del capítulo anterior, con el fin de caracterizar el hormigón de las vigas, se realizaron 2 campañas paralelas de ensayos diferenciadas por las condiciones ambientales de conservación de las probetas.

La campaña más exhaustiva se llevó a cabo en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras, sobre probetas conservadas en las mismas condiciones ambientales que las vigas, con el objetivo de conocer las propiedades reales del hormigón de éstas. Dichos ensayos, incluyendo la metodología, los equipos de carga y medición, y el tipo de probeta, se describen dentro de este apartado.

La segunda campaña de ensayos fue realizada por el Laboratorio de Control de Calidad INTECASA, sobre probetas conservadas en condiciones estándar de humedad y temperatura. Personal de dicho Laboratorio confeccionó las probetas

el día del hormigonado, procediendo al desmoldeo, traslado y entrada en cámara de las mismas a las 24 horas de su confección. En el Anejo III se incluyen los informes aportados por dicha empresa referentes a los resultados obtenidos.

#### **4.1.1.- Ensayo de rotura por compresión**

La resistencia a compresión del hormigón se determinó mediante el ensayo de rotura por compresión de probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Una vez realizado el examen visual de las probetas, éstas fueron refrentadas, por una o las dos caras, siguiendo las directrices de la norma UNE 83-303-84. Los ensayos se efectuaron de acuerdo con la norma UNE 83-304-84. El equipo utilizado fue una prensa IBERTEST, modelo HIB-1500-AUTO, con capacidad de 1500 kN.

Las edades de ensayo están definidas en la *Tabla 3.2*. Para cada edad fueron ensayadas 3 probetas.

#### **4.1.2.- Ensayo de rotura por tracción indirecta (Ensayo brasileño)**

La resistencia a tracción del hormigón se determinó mediante el ensayo de rotura por tracción indirecta (ensayo brasileño) de probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Los ensayos se realizaron de acuerdo con la norma UNE 83-306-85. El equipo utilizado fue una prensa IBERTEST, modelo HIB-1500-AUTO, con capacidad de 1500 kN.

Las edades de ensayo están definidas en la *Tabla 3.2*. Para cada edad fueron ensayadas 2 probetas.

#### **4.1.3.- Ensayo de módulo de deformación**

Para determinar el módulo de deformación del hormigón en compresión se utilizaron probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Una vez realizado el examen visual de las probetas, éstas fueron refrentadas, por una o ambas cara, siguiendo las directrices de la norma UNE 83-303-84. El equipo de carga utilizado en el ensayo fue una prensa IBERTEST, modelo HIB-1500-AUTO, con capacidad de 1500 kN.

El equipo utilizado para la medición de las deformaciones estaba constituido por 2 anillos metálicos, fijados a la probeta en la zona central de la misma, entre los que se dispusieron 3 LVDT sujetos al anillo superior. La distancia entre los puntos de fijación de los anillos era de 14 cm. En la *Figura 4.1* se presenta un esquema del equipo descrito.



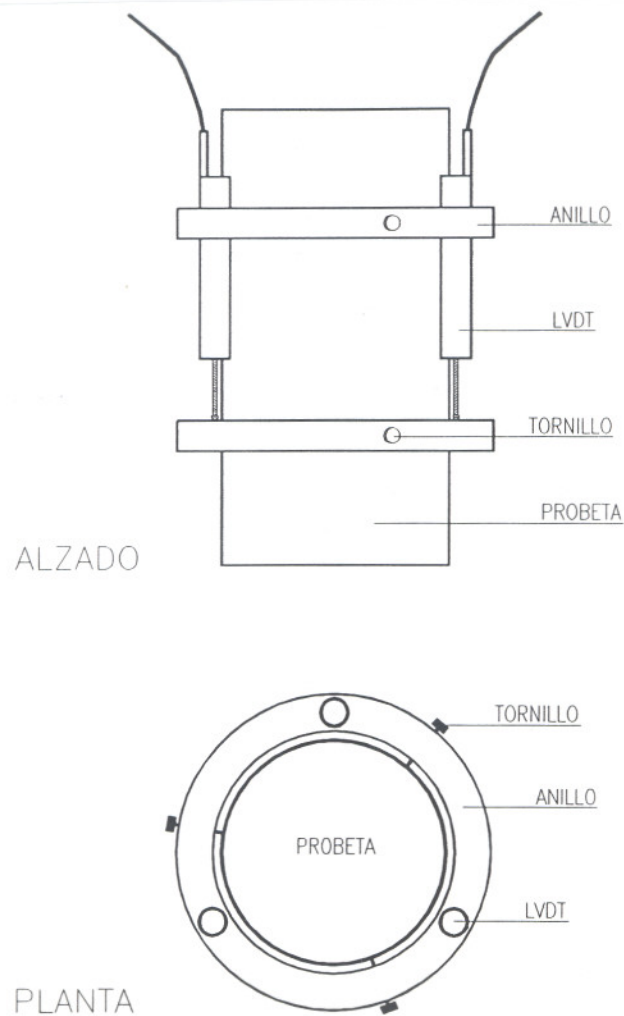


Figura 4.1.- Esquema del equipo de medición utilizado para el ensayo de módulo de deformación

El sistema de medición electrónico estaba configurado por una fuente de alimentación modelo HP-E3610A, un sistema de adquisición de datos modelo HP-3421-A y el ordenador de control HP-85, utilizado también en los ensayos de las vigas.

Una vez montado el equipo de medición en la probeta, ésta era colocada (perfectamente centrada) sobre el plato inferior de la prensa. La metodología de ensayo consistía en efectuar 3 ciclos consecutivos de carga-descarga, mediante escalones que correspondían al 10%, 20% y 30% de la carga de rotura (obtenida en el ensayo de rotura por compresión), más un último ciclo de carga, también mediante escalones con incrementos del 10% de la carga de rotura hasta alcanzar

el 80% de ésta (ya que no era posible llegar a la rotura de la probeta sin dañar el equipo de medición). Para cada escalón de carga o descarga se efectuaba lectura de cada uno de los aparatos que configuraban el equipo de medición, obteniendo así 3 registros de deformación (3 LVDT) asociados a la carga aplicada. La deformación unitaria media de la probeta se definió como el promedio de los registros citados.

Como base para el cálculo del módulo de deformación se tomaron las deformaciones medias obtenidas durante la rama de carga de los tres últimos ciclos. Con dichos registros se determinó el módulo secante [ASTM 469-87a] y también otro valor de módulo más cercano al módulo tangente. La descripción del cálculo de ambos valores se realiza con detalle en el capítulo de resultados.

Las edades de ensayo están definidas en la *Tabla 3.2*. Para cada edad fueron ensayadas 2 probetas.

#### **4.1.4.- Ensayo de Fluencia**

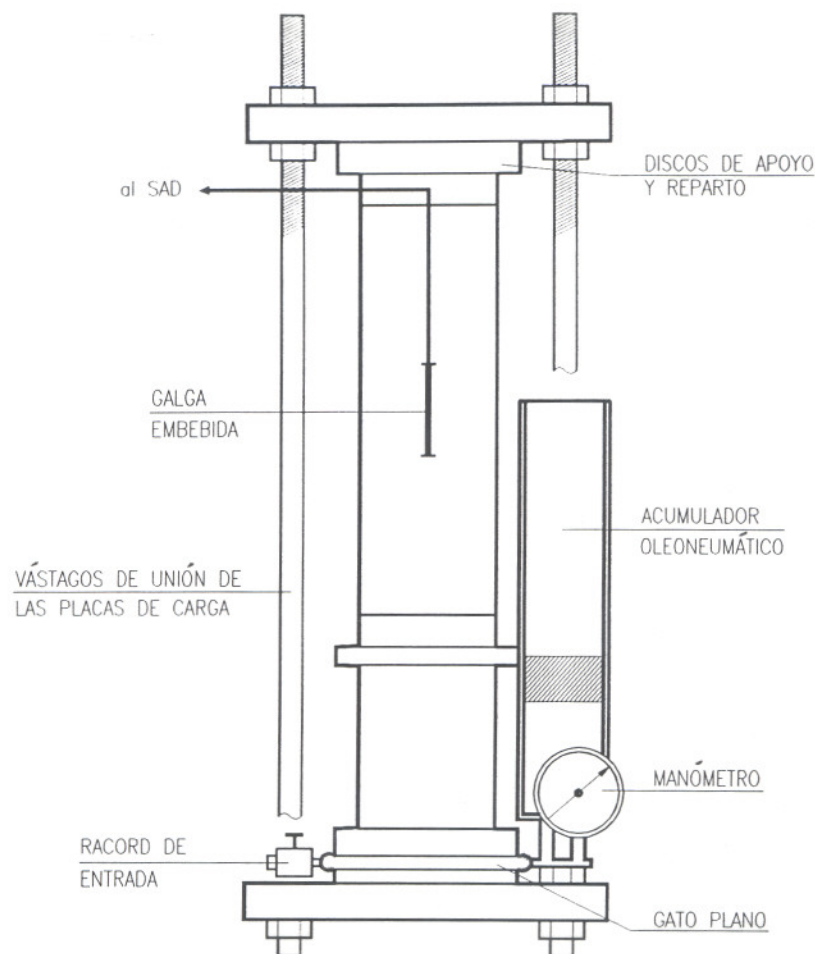
Con el fin de caracterizar la fluencia del hormigón en compresión se utilizaron probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 45 cm de altura y provistas de una galga embebida en su interior, situada sobre su eje y en los 10 cm centrales, para la medición de deformaciones. Los ensayos consistieron en mantener cargada cada probeta durante un cierto período de tiempo, midiendo periódicamente las deformaciones producidas [ASTM C-512-87].

Las probetas fueron confeccionadas utilizando moldes metálicos a los que, previamente al hormigonado, fueron sujetadas las galgas mediante alambres de "nylon" garantizando así la situación de aquéllas durante y después del hormigonado. Las galgas empleadas eran de la marca TML, modelo KM-100A.

Previamente a la puesta en carga de las probetas, se procedió al refrentado de la cara superior de las mismas con un compuesto de resina epoxi autonivelante, utilizándose para ello un pequeño encofrado como elemento auxiliar y manteniéndose éste durante 48 horas [ASTM C-617-87]. Posteriormente se colocó, en cada una de las caras, una placa circular de acero del mismo diámetro de la probeta y de 35 mm de espesor a fin de conservar el perfecto paralelismo de las caras así como la ortogonalidad con las generatrices de la probeta. La placa colocada en la cara superior disponía de un orificio en el centro y un canal radial que permitía la salida del cable de conexión de la galga embebida hacia un lado.

El equipo de carga estaba configurado por un bastidor, diseñado y construido especialmente para el ensayo de fluencia. Este bastidor está formado por 2 placas de 6 cm de espesor unidas por 4 tirantes roscados. Sobre la placa inferior se asienta un disco de acero pulimentado y sobre éste un gato plano FREYSSINET de 250 kN de capacidad y 20 cm de diámetro útil, capaz de

proporcionar una tensión máxima de 15 MPa. Otro disco se sitúa sobre el gato con la finalidad de que transmita uniformemente las tensiones a la probeta de hormigón. El gato tiene 2 orificios: uno de ellos está unido a la entrada de aceite y el otro a un acumulador oleoneumático marca HIDRACAR de 5 l de capacidad y tipo pistón, modelo PE5 A21N10. Un manómetro indicador de presión tipo BOURDON está conectado al circuito de aceite. El acumulador mantiene la presión constante ante las deformaciones del hormigón. En la *Figura 4.2* se presenta un esquema del bastidor de carga utilizado.



*Figura 4.2.- Esquema del bastidor de carga para ensayo de Fluencia*

La medición de deformaciones se realizó con el mismo equipo electrónico utilizado en los ensayos de las vigas, es decir, las galgas embebidas fueron conectadas al Sistema de Adquisición de Datos (HP-3497-A) a través del Módulo de Conexión (MC) y el ensayo fue controlado por el ordenador HP-85 mediante



el programa "CREEP". Este programa, especialmente elaborado, permitía el control automático, simultáneamente, de los ensayos de fluencia, tanto de probetas como de vigas y del ensayo de retracción. La descripción de este programa se realiza en el apartado 4.3.3 de este mismo capítulo.

De las 4 probetas sometidas a ensayo de fluencia, una fue puesta en carga a la edad de 2 días, otra a la edad de 4 días, otra a la edad de 7 días y la última a la edad de 28 días. El nivel de tensión aplicado a cada probeta fue el 40% de la tensión de rotura correspondiente a la edad de carga. Todas las probetas permanecieron cargadas hasta la edad de 277 días.

La medición de deformaciones se realizó según las siguientes frecuencias:

- 1 lectura inmediatamente antes de la puesta en carga.
- 1 lectura inmediatamente después de la puesta en carga.
- 1 lectura cada 6 minutos durante la 1ª hora.
- Pasada 1 hora de la puesta en carga de la probeta, las lecturas se realizaron según la función logarítmica:

$$L = 10 + 10 \log T$$

donde  $T$  es el tiempo transcurrido, en horas, desde la aplicación de la carga y  $L$  es el número de lecturas realizadas.

#### 4.1.5.- Ensayo de Retracción

Para caracterizar la retracción del hormigón se utilizó una probeta prismática de 15x15x60 *cm* provista de una galga embebida en su interior, situada en la parte central de su eje longitudinal, para la medición de deformaciones. El ensayo consistió en el registro periódico de las deformaciones desde el hormigonado hasta la finalización de los ensayos de la serie.

Para confeccionar la probeta se utilizó un molde metálico al que, previamente al hormigonado, se sujetó la galga mediante alambres de "nylon" garantizando así su localización en el interior de la probeta. La galga empleada era de la marca TML, modelo KM-100A. Durante el proceso de hormigonado de la probeta se introdujo en ella una sonda con el fin de registrar las variaciones de temperatura del hormigón. Esta sonda era de tipo K (doble hilo).

La medición de deformaciones se realizó con el mismo equipo electrónico utilizado en los ensayos de las vigas, es decir, la galga embebida fue conectada al Sistema de Adquisición de Datos (HP-3497-A) a través del Módulo de Conexión (MC) y el ensayo fue controlado por el ordenador HP-85 mediante el programa "CREEP". El registro de temperaturas se llevó a cabo electrónicamente mediante la conexión de la sonda a un squirrel de la marca GRANT, serie 1200.

Tanto la medición de deformaciones como de temperaturas se inició 6 horas después de finalizado el hormigonado, según las frecuencias siguientes:

Medición de deformaciones:

- 1 lectura cada 6 minutos durante la 1ª hora.
- Pasada esta 1ª hora, según la función logarítmica:

$$L = 10 + 10 \log T$$

donde  $T$  es el tiempo transcurrido, en horas, desde la 1ª lectura y  $L$  es el número de lecturas realizadas.

Medición de temperaturas:

- 1 lectura cada 30 minutos, durante los primeros 3 meses.
- 1 lectura cada 4 horas, a partir de los 3 meses y hasta el final del ensayo.

#### **4.1.6.- Control de la temperatura y humedad ambiente en el laboratorio**

Con el fin de conocer la influencia de las condiciones ambientales en que fueron conservadas tanto las vigas como las probetas, antes y durante los ensayos, en la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón, se realizaron controles periódicos de temperatura y humedad ambiente en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras. Estos controles se iniciaron el día del hormigonado y finalizaron una vez completada cada serie.

Durante los ensayos correspondientes a la primera serie, el control se realizó mediante un psicómetro que fue colocado junto a las vigas. Los datos fueron tomados manualmente y anotados en un estadillo, según las siguientes frecuencias:

- 2 lecturas diarias, durante la primera semana.
- 1 lectura diaria, a partir de la segunda semana y hasta la finalización de la serie.

Durante los ensayos correspondientes a la segunda serie, el control de la temperatura ambiente del Laboratorio se realizó mediante una sonda conectada a un squirrel (el mismo utilizado para registrar la temperatura interna de la probeta de retracción). Este squirrel tomaba las lecturas y las almacenaba automáticamente según las siguientes frecuencias:

- 1 lectura cada 30 minutos, durante los primeros 3 meses.
- 1 lectura cada 4 horas, a partir de los 3 meses y hasta la finalización de la serie.



## 4.2.- ENSAYO DE VIGAS A ROTURA

Si bien en el capítulo anterior se han definido varios tipos de ensayo a rotura, la diferencia entre ellos estriba en las condiciones de las vigas (unas ensayadas justo después del descimbrado y otras después de haber permanecido cargadas un cierto tiempo) o bien en el punto de aplicación de las cargas (a 1/3 de la luz en la primera serie y a 1/4 de la luz en la segunda), pero no en la forma de llevar a cabo el ensayo, la cual fue idéntica en todos los casos.

El ensayo, propiamente dicho, consistió en someter una viga a sucesivos incrementos de carga hasta alcanzar su rotura. El equipo de carga utilizado así como las operaciones que se debieron llevar a cabo previamente al ensayo, el proceso de realización del mismo y el sistema de control empleado, descritos a continuación, son comunes a todos los tipos de ensayo definidos.

### 4.2.1.- Descripción del sistema de carga

Para llevar a cabo los ensayos de rotura fue necesario diseñar y construir un pórtico de carga ya que en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras no se disponía de un sistema de carga apto para dichos ensayos. Para su diseño se fijaron las siguientes premisas:

- Aprovechamiento de la dotación del Laboratorio.
- Adaptabilidad del pórtico ante futuros ensayos.

Por un lado, el piso de dicho Laboratorio, en la zona reservada a carga, está constituido por una losa de hormigón de 1.20 m de canto, y se encuentra atravesada por numerosos huecos cilíndricos que permiten la aplicación de cargas puntuales de hasta 800 kN. Se decidió, por tanto, aprovechar la losa para anclar el pórtico de carga.

Por otro lado, se optó por construir un pórtico doble, es decir, dos pórticos unidos en su parte superior. Con ello se mejoraba la estabilidad del conjunto además de posibilitar la utilización de dos gatos hidráulicos, simultáneamente, aumentando así la capacidad de carga del pórtico ante futuros ensayos.

Cada pórtico estaba constituido por 2 pilares-tirantes y una viga superior. Los pilares estaban formados por perfiles metálicos HEB-100 y su función era soportar el peso del pórtico en vacío. Los tirantes estaban formados por barras roscadas, tipo MACALLOY, de 32 mm de diámetro. Estas barras atravesaban la losa de carga del Laboratorio y su función era el anclaje del pórtico a la misma. La viga superior estaba formada por 2 UPN-300, de 300 cm de longitud, separados 5 cm y unidos mediante dos platabandas de 800x220x10 mm soldadas en la zona central. La unión de los dos pórticos se realizó mediante dos perfiles cuadrados huecos de 160x160x6 mm y 120 cm de longitud.

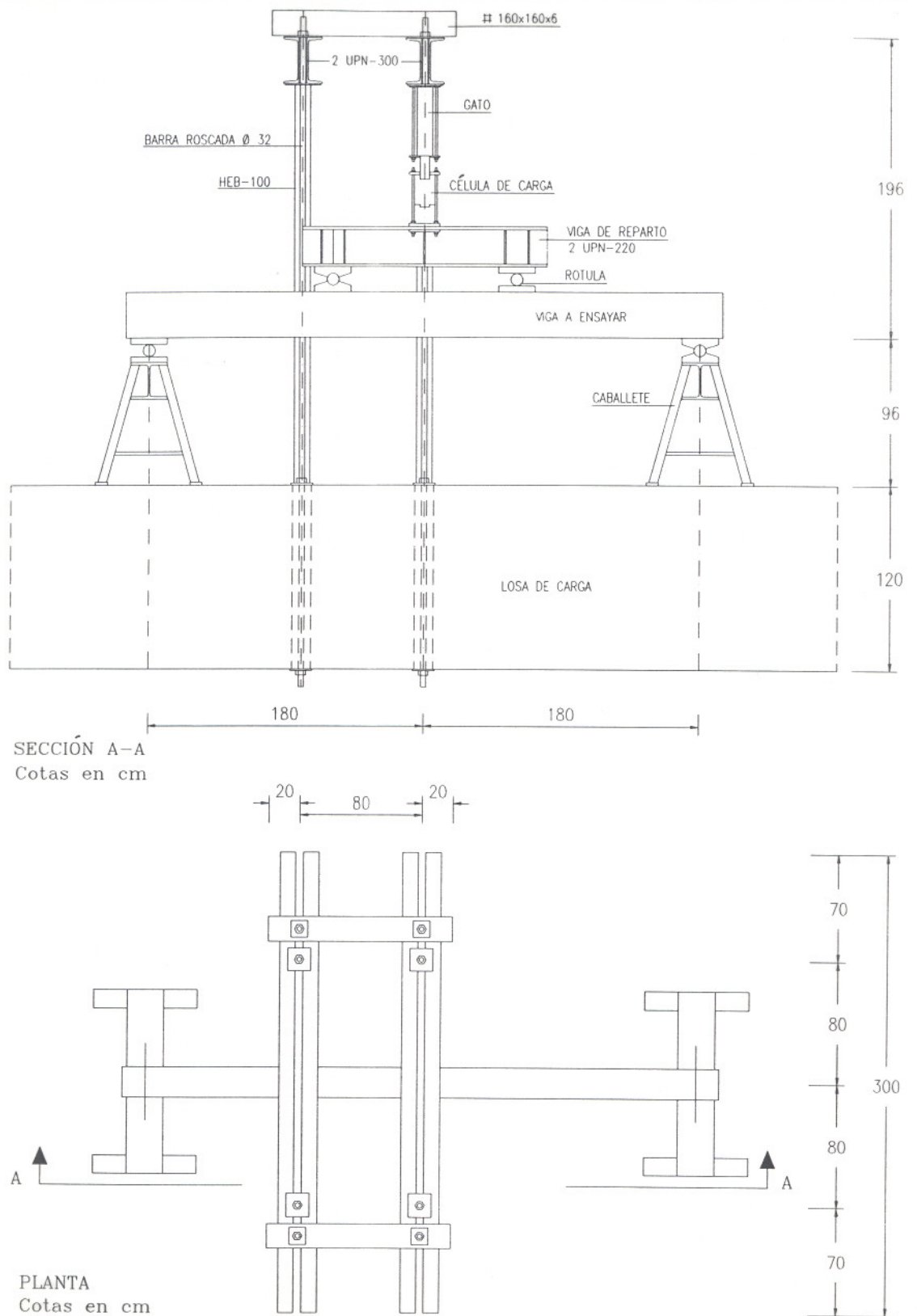


Figura 4.3.- Esquema del conjunto de viga y pórtico



Con el fin de facilitar la adaptación del pórtico a otros ensayos, se evitaron las uniones soldadas, utilizando en su lugar tornillos de alta resistencia. A su vez, y con el fin de asegurar la estabilidad del conjunto, los tirantes fueron tesados con una fuerza de 80 *kN*.

Si bien el pórtico podía trabajar con dos gatos simultáneamente, para la realización de los ensayos se optó por la utilización de uno sólo puesto que, dadas las características de las vigas, ello era suficiente para alcanzar la rotura de las mismas. Este gato hidráulico fue fijado a la viga de uno de los pórticos, perfectamente centrado, con el émbolo orientado hacia abajo. El extremo de dicho émbolo disponía de rosca, lo cual permitió colgar de él la célula de carga a la que se sujetó una viga de reparto. Este sistema, unido al hecho de que el gato era de doble efecto, facilitaba la operación de descarga de las vigas ya ensayadas y evitaba la caída de cualquiera de los elementos intercalados entre el gato y la viga, una vez alcanzada la rotura de ésta. Entre la viga de reparto y la viga a ensayar se dispusieron 2 rótulas, una fija y otra móvil, situadas en la posición requerida según la planificación efectuada.

Durante los ensayos correspondientes a la primera serie, la viga de reparto utilizada estaba formada por 2 UPN-220 de 160 *cm* de longitud, separados 4 *cm* y unidos por 2 platabandas de sección 200x20 *mm* en toda su longitud. Esta viga fue sustituida por otra, formada por 2 UPN-220 de 250 *cm* de longitud, para la realización de los ensayos de la segunda serie ya que en ellos la distancia entre los puntos de aplicación de las dos cargas puntuales era 180 *cm* (véase *Figura 3.2*).

El conjunto del pórtico quedaba completado por los elementos de apoyo de la viga a ensayar. Se diseñaron y construyeron dos caballetes metálicos de 80 *cm* de altura y 120 *cm* de longitud, sobre los cuales se apoyaron una rótula fija y otra móvil respectivamente.

En la *Figura 4.3* se presenta un esquema del conjunto formado por el pórtico y la viga de ensayo. En el Anejo II se incluyen fotografías del mismo.

El sistema de presión estaba configurado por un cilindro y una electrobomba de la marca ENERPAC. El cilindro era del modelo RR-3014, de doble acción y 300 *kN* de capacidad máxima (45 *kN* en tracción). La electrobomba era del modelo BPM-14423, con una válvula de carga-descarga VM-4, capaz de ejercer presiones de hasta 71.68 *MN/m<sup>2</sup>*.

#### **4.2.2.- Descripción de las operaciones previas al ensayo**

La edad de las vigas a ensayar, unida a las características del pórtico construido, llevó a la necesidad de idear la manera de situar aquéllas bajo dicho pórtico sin someterlas a esfuerzos que pudieran variar su comportamiento durante el ensayo. La solución adoptada consistió en desplazar los caballetes de apoyo



fuera del pórtico y, una vez colocada la viga sobre éstos, situar el conjunto de viga y caballetes en la posición correcta para efectuar el ensayo.

Los caballetes fueron soldados a un perfil HEB-100 fijando así la distancia entre ellos (360 *cm* entre ejes) y facilitando su desplazamiento, el cual se llevó a cabo elevando y arrastrando el conjunto con la ayuda de un toro en un extremo y una carretilla elevadora en el otro.

Una vez descimbrada (vigas *R*) o descargada (vigas *C*) una viga, ésta era colocada sobre los caballetes (situados fuera del pórtico). Para efectuar este traslado se utilizó un perfil metálico HEB-280, de 300 *cm*, de longitud con el que se recogía la viga por debajo mediante un toro o el puente grúa. Posteriormente se procedía a desplazar el conjunto de viga y caballetes, según la forma descrita anteriormente, hasta dejarlo perfectamente situado bajo el pórtico de carga.

La situación de la célula de carga, fijada al gato hidráulico, no permitía comprobar las reacciones en los apoyos, por lo que era indispensable asegurar la simetría de los puntos de aplicación de las cargas puntuales. Ello obligó a replantear minuciosamente la colocación de cada viga bajo el pórtico antes del inicio del ensayo.

Una vez colocada la viga a ensayar en la posición correcta, se realizaba la conexión de las galgas, tanto de la armadura como del hormigón, se situaban los LVDT bajo la viga y finalmente, antes de iniciar el ensayo, se comprobaba el correcto funcionamiento de todos los aparatos de medición.

#### **4.2.3.- Descripción del proceso de ensayo**

Una vez situada correctamente la viga bajo el pórtico y conectada toda la instrumentación al SAD, antes de iniciar el proceso de carga se procedía a tomar una primera lectura, de referencia, de cada uno de los aparatos de medición. Seguidamente se realizaba otra lectura, sin carga, con el fin de evaluar las posibles fluctuaciones de la instrumentación electrónica.

A continuación se iniciaba el proceso de carga con la aplicación de un primer escalón, seguido de una nueva lectura de los aparatos de medición. Antes de proceder a la aplicación de un nuevo escalón de carga se realizaba un control visual de la viga con el fin de detectar la aparición de fisuras, procediéndose a su marcado en caso afirmativo. Este proceso se repetía hasta alcanzar un valor de carga cercano al de rotura, momento a partir del cual se reducían los incrementos de carga, aproximadamente a la mitad, y se disminuía el control visual de las fisuras (por motivos de seguridad).

El nivel de carga a aplicar con el primer escalón se estableció en función de la edad y la resistencia del hormigón, con el criterio de que la viga empezara

a fisurar a partir del segundo escalón o los posteriores. Con ello se pretendió obtener datos del comportamiento de la viga sin fisurar. Los sucesivos incrementos de carga se mantuvieron constantes hasta alcanzar un valor de carga total cercano al de rotura. Cabe destacar que los ensayos de caracterización del hormigón se realizaban justo antes del inicio del ensayo aquí descrito, lo cual permitía, a partir de los resultados de resistencia a compresión y tracción del hormigón obtenidos, predecir tanto la carga de fisuración como la de rotura.

El tiempo transcurrido entre dos escalones de carga sucesivos fue de 4 ( $\pm$  2) minutos, dependiendo de la cantidad de fisuras aparecidas que debían ser marcadas. El tiempo total invertido en el proceso de ensayo osciló entre 1.5 y 2 horas.

#### **4.2.4.- Sistema de control del ensayo**

El control de cada ensayo se llevó a cabo a través del programa "PORTIC", implementado en el ordenador HP-85. Este programa, desarrollado en lenguaje BASIC, respondía a un estudio minucioso de todas las incidencias que podían surgir durante la realización de los ensayos, sin olvidar que su misión principal consistía en ordenar al SAD la toma de lecturas electrónicas, procesarlas y archivarlas.

El esquema básico del programa estaba constituido por un Menú de Escalón que permitía realizar una nueva lectura, aplicar un nuevo escalón, observar la evolución de cada uno de los parámetros instrumentados y por último, finalizar el ensayo. En previsión de un corte de fluido eléctrico durante el ensayo, el programa realizaba un listado automático de las medidas tomadas en cada lectura y además permitía continuar con un ensayo previamente interrumpido.

En primer lugar, "PORTIC" conectaba el reloj del SAD y seguidamente preguntaba si se iniciaba el ensayo. En caso afirmativo, "PORTIC" ordenaba la realización de las lecturas de referencia. En caso negativo (se trataba de continuar con un ensayo ya iniciado e interrumpido por la razón que fuera), "PORTIC" preguntaba el número de lecturas y escalones ya realizados y permitía la entrada manual de los valores de referencia. A continuación, en ambos casos, permitía la aplicación de un escalón de carga y quedaba a la espera de recibir la orden, manual, de realización de una nueva lectura. Una vez efectuada ésta, "PORTIC" se situaba en el Menú de Escalón.

La opción "Escalón de Carga" exigía una total interacción con el operario situado en la bomba, cuyo control se establecía a través de un indicador numérico conectado a un transductor de presión acoplado directamente al gato. Cuando la carga aplicada se consideraba correcta se pasaba directamente a la adquisición, procesamiento y listado de las medidas electrónicas, para volver de nuevo al Menú de Escalón.



La opción "Gráficos" permitía observar la evolución de las deformaciones de las galgas, tanto del hormigón como de las armaduras, de las flechas alcanzadas y del deslizamiento de la armadura traccionada, representando la gráfica *Carga / Deformación* o bien *Carga / Desplazamiento*, correspondiente a la galga o al LVDT seleccionado. Esta información, junto con la observación de las fisuras aparecidas y la predicción efectuada, posibilitaban evaluar la proximidad de la rotura.

Con la opción "Nueva Lectura" era posible realizar tantas lecturas como se quisiera, dentro del mismo escalón, obteniendo datos acerca de la evolución de los distintos parámetros instrumentados durante el intervalo de tiempo transcurrido entre dos escalones de carga sucesivos.

La opción "Finalizar" daba por concluido el ensayo, grabando la información recopilada sobre cinta magnética y transmitiendo seguidamente dicha información a un ordenador IBM.

#### **4.3.- ENSAYO DE VIGAS A FLUENCIA**

Este ensayo consistió en mantener una viga bajo la acción de dos cargas puntuales, constantes, durante un determinado período de tiempo. El nivel de carga aplicado a cada viga se estableció en función de la edad y la resistencia del hormigón, con el criterio de que la tensión en la fibra más comprimida de hormigón fuera del orden del 40% de su resistencia a compresión, sin superar dicho valor, en el instante de la puesta en carga. Previamente al descimbrado de cada viga y a partir del resultado de los ensayos de las probetas, se realizó un cálculo en servicio para determinar el valor de la carga que se debía aplicar.

El sistema de carga empleado, así como el proceso de aplicación de la carga y el sistema de control del ensayo, descritos a continuación, fueron idénticos en todas las vigas ensayadas.

##### **4.3.1.- Descripción del sistema de carga**

La carga fue aplicada mediante un sistema elemental de palanca, apoyando sobre la viga un bastidor metálico del que se colgaba un peso muerto en uno de sus extremos y anclando su otro extremo, a través de un tirante, a la losa de carga del Laboratorio. La simultaneidad de los ensayos de fluencia de las cuatro vigas correspondientes a una misma serie obligó a disponer de 4 equipos de carga idénticos.



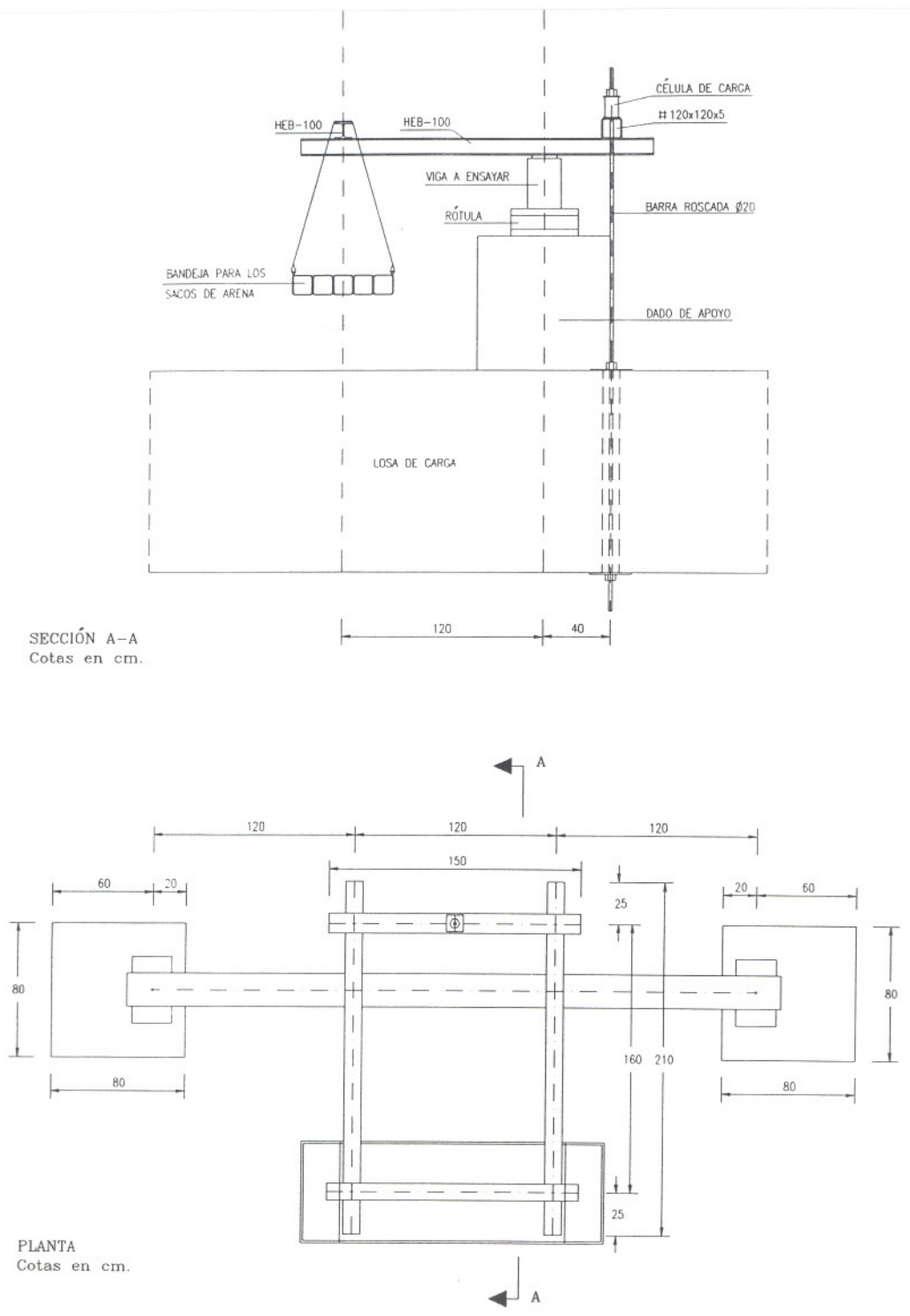


Figura 4.4.- Esquema del sistema de carga empleado en el ensayo de vigas a fluencia

El bastidor estaba constituido por 2 perfiles HEB-100, de 210 *cm* de longitud, soldados por un extremo a otro perfil HEB-100, de 150 *cm* de longitud, y a un perfil cuadrado hueco de sección 120x120x5 *mm* y 150 *cm* de longitud por el otro, formando un rectángulo de 120x160 *cm* entre ejes de barras. Una perforación central del perfil cuadrado permitía el paso del tirante que anclaba dicho bastidor a la losa de carga del Laboratorio. Como tirante se utilizó una barra roscada tipo MACALLOY de 20 *mm* de diámetro y 320 *cm* de longitud.

El peso muerto estaba configurado por una bandeja metálica sobre la que se depositaron sacos de arena de 0.3 *kN*, dispuestos uniformemente sobre aquélla. La bandeja se construyó con perfiles cuadrados huecos de sección 160x160x6 *mm* y 170 *cm* de longitud, soldados longitudinalmente con sus caras laterales enfrentadas, utilizándose 3 perfiles para las vigas cargadas a los 2 y 4 días y 4 perfiles para las otras dos vigas. La bandeja fue colgada del bastidor mediante cadenas.

Entre el bastidor y la viga se intercalaron placas armadas de material elastomérico de 15x20 *cm* y 30 *mm* de espesor. El control de la carga aplicada se efectuó midiendo la tracción producida en el tirante. Para ello se utilizó una célula de carga anular a través de la cual pasaba dicho tirante, siendo colocada entre el bastidor y la rosca de sujeción de éste.

Como apoyos se utilizaron dados de hormigón de 80x80x80 *cm* con una pletina de acero de 20 *mm* de espesor, perfectamente nivelada, en su cara superior y sobre los cuales se colocaron las rótulas (una fija y otra móvil para cada viga). La longitud de las vigas y la distribución de los huecos de la losa de carga del Laboratorio permitieron aprovechar un mismo dado para apoyar dos vigas consecutivas (véase *Figura 3.8*).

En la *Figura 4.4* se muestra un esquema del sistema de carga descrito. En el Anejo II se incluyen fotografías del mismo.

#### **4.3.2.- Descripción del proceso de carga**

Antes de proceder al descimbrado de una viga, se efectuaba una lectura (de referencia) de la instrumentación asociada a las deformaciones de la armadura (electrónica) y del hormigón (electrónica y manual). Una vez descimbrada, se colocaban los relojes comparadores bajo la viga y se realizaba otra lectura que proporcionaba la deformación unitaria longitudinal debida al peso propio de la viga y la referencia en cuanto a flecha.

Seguidamente se colocaba el bastidor, el cual debía quedar perfectamente nivelado y centrado respecto a la viga a fin de garantizar el estado de carga deseado. Esta operación se llevó a cabo con la ayuda de un toro. Una vez comprobada la perfecta disposición del bastidor, se colocaba la célula de carga y



se ajustaba la rosca superior, intercalando entre célula y rosca una placa de acero de 10 mm de espesor. Finalizado este proceso y una vez estabilizados los relojes comparadores, se efectuaba otra lectura de toda la instrumentación (electrónica y manual).

Finalmente se procedía a colgar del bastidor la bandeja con los sacos de arena correspondientes. Con la ayuda de un toro se centraba la carga bajo el bastidor, se colocaban las cadenas y se desplazaban las palas del toro hacia abajo, lentamente y evitando sacudidas, hasta dejar colgada la carga. Instantáneamente se efectuaba una lectura electrónica y, una vez estabilizados los relojes comparadores se realizaba otra lectura, tanto electrónica como manual. Esta última lectura proporcionaba los valores de deformación y flecha instantáneos, así como el tiempo de referencia ( $t_0$ ) a partir del cual se iniciaba el ensayo de fluencia.

Durante la primera hora después de la aplicación de la carga se efectuaron lecturas cada 6 minutos. Posteriormente se estableció una frecuencia de lecturas según la función logarítmica:

$$L = 10 + 10 \log T$$

donde  $T$  es el tiempo transcurrido, en horas, desde la 1ª lectura y  $L$  es el número de lecturas realizadas.

#### 4.3.3.- Sistema de control del ensayo

Tal como se ha descrito en el capítulo anterior, en las vigas ensayadas a fluencia se combinaron mediciones de tipo manual (deformaciones del hormigón y flechas) con mediciones de tipo electrónico (deformaciones de la armadura y del hormigón y carga aplicada). El tiempo transcurrido desde la aplicación de la carga hasta el instante mismo de la lectura era otro parámetro a medir, esencial en este tipo de ensayo. La imposibilidad de efectuar los dos tipos de medición simultáneamente, unida a la consideración de que para determinar la evolución de cada uno de los parámetros no era imprescindible realizar las lecturas en el mismo instante, llevó a la decisión de establecer dos sistemas de control (uno manual y otro electrónico) en función del tipo de medición (manual o electrónica).

El control manual lo realizó siempre la misma persona. A partir del instante de la puesta en carga de la viga y según la frecuencia de lecturas establecida anteriormente, se confeccionó una *Tabla de lecturas* en la que se anotó el día y la hora en que debía efectuarse cada una de ellas. Esta tabla sirvió solamente como referencia, ya que las lecturas que debían tomarse durante la noche fueron adelantadas a la tarde anterior o bien retrasadas a la mañana siguiente. Los datos fueron anotados en un estadillo (uno por cada viga ensayada), incluyendo el día y la hora en que se efectuó cada medición.

El control electrónico se llevó a cabo a través del programa "CREEP", implementado en el ordenador HP-85. Este programa, desarrollado en lenguaje



BASIC, agrupaba el control de todos los ensayos dependientes del tiempo y realizados dentro de una misma serie, es decir, todos los ensayos de fluencia, tanto de vigas como de probetas, y el ensayo de retracción. La misión principal de "CREEP" consistía en ordenar al SAD la toma de lecturas electrónicas, procesarlas y archivarlas.

Para facilitar la programación, las probetas de fluencia se trataron como una medida más a tomar con cada viga. Ello fue posible porque ambas fueron cargadas simultáneamente, con lo que el tiempo de referencia era el mismo. La probeta de retracción se incluyó en el programa como una viga más. Con todo esto, "CREEP" fue dimensionado para tomar lecturas de 5 vigas.

La frecuencia de lecturas, establecida según la función logarítmica anteriormente expuesta, podía ser implementada en el programa permitiendo un control automático de todos los ensayos, sin embargo, el proceso de carga de una viga exigía el control manual de dicho programa.

El esquema básico de "CREEP" estaba constituido por un Menú Manual que permitía realizar una lectura, cambiar a modo automático, grabar sobre cinta magnética los datos obtenidos y por último, finalizar la sesión. En previsión de un corte de fluido eléctrico durante el proceso de adquisición de datos, el programa listaba automáticamente las medidas tomadas en cada lectura.

En primer lugar, "CREEP" actualizaba el reloj del ordenador HP-85 y seguidamente preguntaba si existía el archivo "Vigas". En caso negativo (se trataba del inicio de la serie), "CREEP" creaba automáticamente dicho archivo. En caso afirmativo (se trataba de continuar con la adquisición de datos), "CREEP" pasaba a recuperar los datos grabados en cinta magnética, obtenidos en lecturas anteriores. Para ello, el programa leía primero el archivo "Vigas", el cual contenía, exclusivamente, el número de lecturas ya realizadas en cada viga, y luego leía la totalidad de la información grabada. A continuación, "CREEP" permitía tomar lecturas en modo automático o en modo manual.

Con la opción "Lecturas automáticas", el programa se situaba en un bucle que consistía en, para cada viga, comparar el tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo ( $t - t_0$ ) con el tiempo correspondiente a la siguiente lectura ( $t_1$ ). Si el primero ( $t - t_0$ ) era menor que el segundo ( $t_1$ ) se cerraba el bucle y en caso contrario el programa ordenaba la lectura correspondiente, imprimiendo los datos obtenidos y cerrando seguidamente el bucle. Con el fin de evitar la pérdida de información en el caso de una parada del sistema, una vez realizado un número determinado de lecturas ( $N$ ), el programa grababa automáticamente los datos adquiridos, solicitando dicho número ( $N$ ) al iniciar el modo automático. La tecla de función *PFI* situaba el programa en el Menú Manual.

La opción "Lecturas manuales" situaba el programa en el Menú Manual. Esta opción era obligatoria durante el proceso de carga de las vigas. Dentro de este

menú, la opción "Cambio a lecturas automáticas" permitía pasar al modo automático ya descrito.

La opción "Tomar lecturas" situaba el programa en el Menú de Lectura, el cual permitía elegir la viga de la que se deseaba información o volver al Menú Manual. La opción "Viga J" situaba el programa en el Menú Estado de Carga, cuyas opciones eran: lectura de referencia, lectura sin carga total, lectura con carga total y vuelta al Menú Manual.

La opción "Referencia" (E = 1), correspondiente a la viga cimbrada, tomaba un tiempo de referencia, creaba el archivo "Viga J", realizaba la lectura, imprimía la información y volvía al Menú Lectura.

La opción "Sin carga total" permitía tomar lecturas durante el proceso de carga, midiendo el tiempo transcurrido desde la lectura de referencia y volviendo al Menú Lectura una vez imprimida la información obtenida. Los distintos estados considerados dentro de esta opción eran:

- E = 2 Viga cimbrada (sin carga)
- E = 3 Peso propio (después de descimbrar)
- E = 4 Peso propio (después de colocar los relojes comparadores)
- E = 5 Bastidor colocado (estabilizados los relojes comparadores)
- E = 6 Carga aplicada (instantánea)

La opción "Con carga total" (E = 7) correspondía al caso de la viga cargada totalmente, es decir, una vez finalizado el proceso de carga y estabilizados los relojes comparadores. Con esta opción, el programa tomaba un nuevo tiempo de referencia si la lectura anterior correspondía al estado "Sin carga total", iniciando así las lecturas de fluencia. Una vez tomada la lectura e imprimida la información, el programa se situaba de nuevo en el Menú Lectura.

La opción "Grabar en cinta" del Menú Manual permitía almacenar toda la información adquirida. Esta opción era obligatoria antes de finalizar la sesión.

La opción "Finalizar" daba por concluida la sesión de adquisición de datos y permitía desconectar los equipos de medición.