

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 3

### PLANIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS

Con la perspectiva de las investigaciones realizadas hasta la fecha y de acuerdo con los objetivos marcados en el capítulo anterior, se decidió abordar un estudio experimental sobre el comportamiento de vigas de hormigón armado, en función de la edad de descimbrado.

La planificación de los ensayos debía ser llevada con el máximo rigor posible a fin de alcanzar los objetivos propuestos, optimizando los recursos disponibles. En este momento de la investigación era necesario decidir cómo debían ser las vigas a ensayar, cuántas vigas, a qué edades y cómo debían ser ensayadas, qué parámetros o magnitudes se debían medir y cómo se debía realizar la toma de datos, y todo ello teniendo presente las necesidades de espacio, tiempo y material que cada una de aquellas decisiones comportaban frente a los recursos de que se podía disponer.

#### 3.1.- DESCRIPCIÓN DE LAS VIGAS ENSAYADAS

Sin duda la elección del tipo de vigas a ensayar, incluyendo el tipo de sección, el número de vanos y las condiciones de apoyo, las características del hormigón, el tipo de acero, la cuantía de armaduras, etc. era un punto importante en la planificación de los ensayos puesto que ello podía influir notablemente en las posibilidades de generalización de los resultados obtenidos. Ciertamente, las vigas a ensayar debían ser representativas de las comúnmente construidas en edificación, sin embargo, razones de tipo económico y de disponibilidad de tiempo, básicamente, hacían imposible abordar una campaña de ensayos que cubriera todos y cada uno de los parámetros que influyen en su comportamiento.

Acotar estos parámetros a los usualmente utilizados en este país para edificación fue, en algunos casos, sencillo puesto que su variación es mínima en la mayoría de obras. Un ejemplo de ello es el tipo de acero utilizado en edificación, el cual siempre es AEH-500, y también el tipo de hormigón, el cual suele ser H-175, si bien tiende a generalizarse el H-200. En cuanto a los componentes del hormigón, el tipo de cemento, la relación agua/cemento y el tipo de áridos son fijados, en la mayoría de los casos, por la central de hormigonado; el tamaño máximo del árido suele fijarse en 20 mm. Los tipos de sección usuales en edificación son las secciones rectangulares, tanto de canto como planas.

Por otro lado, las cuantías de armado dependen tanto de las dimensiones de la sección de hormigón como de la luz de la viga, de las cargas que ésta debe soportar y también de las condiciones de apoyo. Normalmente las vigas de hormigón armado de una estructura de edificación forman parte de pórticos planos con nudos rígidos.

Con todo ello se tomó la decisión de ensayar vigas de un solo tramo, simplemente apoyadas, básicamente por dos razones; en primer lugar porque con ello era posible alcanzar los objetivos concretos planteados y por otro lado porque reproducir las condiciones de apoyo reales de una viga de edificación suponía una reducción del número de vigas a ensayar, teniendo en cuenta el espacio disponible en el laboratorio.

Llegado a este punto se creyó conveniente tomar, como prototipo, una viga de un caso usual de edificación. Con ello era posible determinar las cargas, fijar las dimensiones de la sección y, con las características usuales de los materiales, dimensionar las armaduras, en el supuesto de viga simplemente apoyada. Sin embargo, teniendo en cuenta el espacio disponible en el laboratorio y la viabilidad de los ensayos, se decidió que las vigas a ensayar fueran un modelo a escala 2/3 en razón a las dimensiones del prototipo.

El prototipo era una viga que formaba parte de la estructura de un edificio de viviendas, de 5.40 m de luz sobre la que apoyaba un forjado de viguetas de hormigón y casetones cerámicos de canto total 24 cm (20 + 4 cm). El ámbito de incidencia del forjado sobre la viga era de 4 m. El pavimento estaba formado por terrazo sobre mortero, de 5 cm de espesor total. Con ello, la carga por m<sup>2</sup> de forjado era:

Peso propio del forjado.....	2.7 kN/m <sup>2</sup>
Pavimento.....	0.8 kN/m <sup>2</sup>
<hr/>	
CARGAS PERMANENTES.....	3.5 kN/m <sup>2</sup>
Sobrecarga de uso.....	2.0 kN/m <sup>2</sup>
Sobrecarga de tabiquería.....	1.0 kN/m <sup>2</sup>
<hr/>	
SOBRECARGAS.....	3.0 kN/m <sup>2</sup>

En cuanto a la sección del prototipo, era posible plantear dos casos distintos: sección de canto y sección plana. En un principio se contempló la posibilidad de ensayar ambos tipos de sección, sin embargo, al plantear los ensayos a realizar se creyó conveniente que el tipo de sección fuera siempre el mismo, lo cual permitía aumentar el número de ensayos y con ello profundizar más en el comportamiento de las vigas. Definitivamente se optó por una sección rectangular de canto, siendo las dimensiones del prototipo de 30x45 cm. Una vez fijada la sección era posible determinar el valor de la carga uniformemente repartida que

debía soportar el prototipo:

Peso propio (0.30x0.45x25).....	3.375 kN/m
Carga permanente (3.5x4).....	14.000 kN/m
Sobrecarga (3.0x4).....	12.000 kN/m
<hr/>	
TOTAL.....	29.375 kN/m

Con el criterio de mantener los niveles de tensión, se aplicó un coeficiente reductor de 2/3 a las dimensiones del prototipo, manteniendo el valor de las cargas superficiales ( $kN/m^2$ ) así como la resistencia característica del hormigón y el límite elástico del acero. Con ello, el modelo a ensayar en el laboratorio quedó definido como una viga simplemente apoyada de 3.60 m de luz y sección rectangular de 20x30 cm que debía soportar un forjado cuyo ámbito de incidencia sobre aquélla era de 2.667 m., con una carga permanente de 3.5  $kN/m^2$  y una sobrecarga de 3.0  $kN/m^2$ . Dado que la reducción del canto producía una disminución del peso propio del modelo, en relación al del prototipo, para el cálculo de la carga de proyecto del modelo se añadió un suplemento por este concepto. Finalmente, el valor de la carga de proyecto del modelo fue:

Peso propio (0.20x0.30x25).....	1.50 kN/m
Suplemento.....	0.75 kN/m
Carga permanente (3.5x2.667).....	9.33 kN/m
Sobrecarga (3.0x2.667).....	8.00 kN/m
<hr/>	
TOTAL.....	19.58 kN/m

La resistencia característica del hormigón se fijó en  $f_{ck} = 20 MPa$  (H-200) y el límite elástico del acero en  $f_{yk} = 510 MPa$  (AEH-500N).

En coherencia con el factor de escala aplicado al prototipo, el recubrimiento mecánico de las armaduras fue también afectado por el coeficiente 2/3, a pesar de que, con ello, el recubrimiento efectivo de la armadura traccionada quedara sólo en 2.2 cm y el de los cercos en 1.6 cm.

El dimensionado del modelo se realizó según la Instrucción EH-91, suponiendo un nivel de control normal, lo cual condujo a los siguientes coeficientes de seguridad:  $\gamma_c = 1.5$  para el hormigón,  $\gamma_s = 1.15$  para el acero y  $\gamma_f = 1.6$  para las acciones.

Para el dimensionado a flexión se adoptó, como diagrama de cálculo tensión-deformación del hormigón, el diagrama rectangular definido en el apartado b) del artículo 26.6 de la citada Instrucción. Con un momento flector máximo de servicio  $M_s = 31.72 m kN$  y un momento flector de cálculo  $M_d = 50.8 m kN$ , resultaba necesaria una armadura de tracción de área  $A_s = 5.266 cm^2$ , produciéndose la rotura en dominio 3, es decir, no era necesaria armadura en

compresión. El armado definitivo quedó en  $3 \varnothing 16 \text{ mm}$  en tracción, lo cual suponía un área real de  $A_s = 6.03 \text{ cm}^2$ , y  $2 \varnothing 10 \text{ mm}$  en compresión como armadura de montaje.

El esfuerzo cortante máximo de servicio era  $V_s = 35.244 \text{ kN}$  y el cortante de cálculo  $V_d = 56.4 \text{ kN}$ , siendo éste mucho menor que el cortante que agotaba la sección por compresión oblicua del alma ( $V_{ul} = 216 \text{ kN}$ ). La contribución del hormigón resultaba  $V_{cu} = 31.17 \text{ kN}$  por lo que la armadura transversal debía resistir un cortante de  $V_{su} = 25.23 \text{ kN}$ . Con ello se optó por disponer cercos de dos ramas, de  $\varnothing 6 \text{ mm}$  y separación  $s = 22 \text{ cm}$ , en toda la longitud de la viga.

La comprobación de adherencia, realizada según lo dispuesto en el artículo 42.1 de la Instrucción EH-91, dio una tensión de adherencia  $\tau_b = 2.31 \text{ MPa}$ , calculada para el cortante máximo de cálculo  $V_d = 56.4 \text{ kN}$ . Resultado correcto puesto que la resistencia de cálculo para adherencia era  $\tau_{bd} = 5.75 \text{ MPa}$ .

La comprobación del estado límite de fisuración se realizó según lo dispuesto en el artículo 44 de la citada Instrucción, calculando el ancho característico de fisura según el método general propuesto y utilizando las expresiones aproximadas para el cálculo de la tensión de servicio  $\sigma_s$  y la tensión en el instante de fisuración  $\sigma_{sr}$  de la armadura traccionada. Con ello se obtuvo un ancho característico de fisura  $w_k = 0.153 \text{ mm} < 0.4 \text{ mm}$ , cumpliendo, pues, la limitación para el caso de ambiente I (estructuras en interiores de edificios).

Para la comprobación del estado límite de deformación se supuso la siguiente secuencia de construcción:

- Descimbrado de viga y forjado a las 2 semanas.
- Colocación del pavimento a los 3 meses.
- Colocación de la tabiquería a los 4 meses.
- Entrada en servicio del edificio (sobrecarga de uso) a 1 año.

El cálculo se realizó, según el método aproximado propuesto en el artículo 45 de la Instrucción EH-91, utilizando la inercia equivalente para el cálculo de la flecha instantánea y multiplicando ésta por el factor correspondiente para el cálculo de la flecha diferida. El módulo de elasticidad para cada edad de carga se calculó según la expresión  $E_{cj} = 19000 \sqrt{f_{cj}}$  y la resistencia del hormigón para cada edad de carga se dedujo del cuadro 10.4.b propuesto por la citada Instrucción, en el caso de hormigones de endurecimiento normal. Con todo ello, la flecha total a plazo infinito resultó  $f_{tot} = 1.43 \text{ cm}$  y la flecha activa  $f_{act} = 0.38 \text{ cm}$ . Estos valores cumplían las limitaciones impuestas por la Instrucción EF-88 para el caso de forjados: flecha total a plazo infinito  $f_{tot} \leq L/250$  (para  $L = 3.6 \text{ m}$ ,  $f_{tot} \leq 1.44 \text{ cm}$ ), y flecha activa  $f_{act} \leq L/500$  (para  $L = 3.6 \text{ m}$ ,  $f_{act} \leq 0.72 \text{ cm}$ ).

El despiece de la armadura de tracción se realizó teniendo en cuenta que,

durante los ensayos, la carga sería aplicada mediante dos cargas puntuales en lugar de una uniformemente repartida. Para ello se tomó un diagrama de momentos flectores trapecial, manteniendo el valor máximo  $M_d = 50.8 \text{ m kN}$  entre los puntos de aplicación de las puntuales.

Las longitudes de anclaje, calculadas según el artículo 40.3 de la Instrucción EH-91, quedaron definidas en  $l_b = 49 \text{ cm}$  para el caso de anclaje en prolongación recta y en  $l_{neta} = 34 \text{ cm}$  para el caso de terminación en patilla.

En la *Figura 3.1* se presenta el esquema de armado del modelo, y en el Anejo I se incluyen los planos de armado.

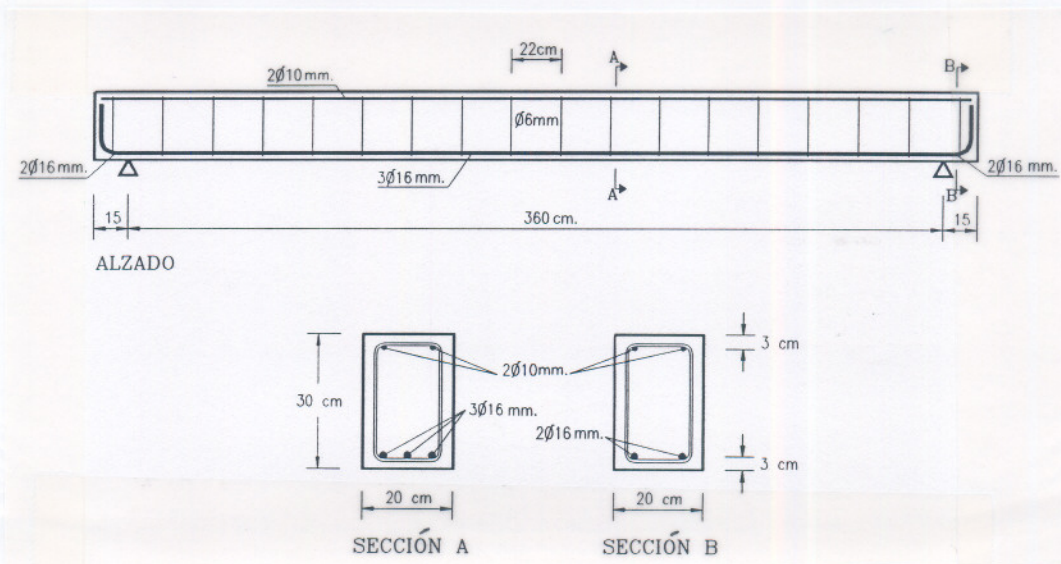


Figura 3.1.- Esquema de armado del modelo

### 3.2.- DEFINICIÓN DE LOS TIPOS DE ENSAYO

A partir de los objetivos propuestos se vio la necesidad de plantear, básicamente, dos tipos de ensayo: ensayo a *Fluencia* y ensayo a *Rotura*.

El primero de ellos estaría orientado al estudio de la deformabilidad diferida de las vigas. Este mismo ensayo podría servir, también, para el estudio de los mecanismos de deformación seccional en el tiempo. Este ensayo requería mantener una carga constante en la viga durante un cierto período de tiempo.

El segundo estaría orientado al estudio de la deformabilidad instantánea y

la capacidad resistente de las vigas. Llevando éstas hasta rotura, mediante escalones de carga sucesivos, sería posible seguir la evolución de las deformaciones en función de la carga aplicada y estudiar los mecanismos de rotura. Puesto que en la flexión simple existe tanto momento flector como esfuerzo cortante, era importante estudiar la capacidad resistente ante ambos tipos de sollicitación. Una posibilidad para ello era realizar 2 tipos de ensayo a rotura, diferenciados por la forma de aplicar la carga en las vigas.

El estudio de la influencia de una carga prematura sobre la seguridad y la deformabilidad instantánea, a largo plazo, se podría abordar ensayando a rotura las vigas que, previamente, hubieran sido sometidas a ensayo de fluencia.

Por otro lado, para poder contrastar los resultados experimentales con predicciones teóricas, sería necesario conocer la evolución de las propiedades del hormigón utilizado en la construcción de las vigas. No se trataba tanto de realizar un control de calidad del hormigón como de conocer, lo mejor posible, las propiedades reales del hormigón de las vigas ensayadas. Lógicamente, éstas permanecerían en el laboratorio desde su hormigonado hasta el instante del ensayo, lo cual planteaba la disyuntiva de si las probetas debían ser conservadas en las condiciones estándar de humedad y temperatura que determina la normativa vigente para el control de calidad, o bien era preferible conservar aquéllas en las mismas condiciones ambientales que las vigas. En cualquier caso, sería necesario tomar registros de temperatura y humedad en el laboratorio durante el período de tiempo comprendido entre el hormigonado de las vigas y el último ensayo a realizar.

Con todo ello se tomó la decisión de llevar a cabo 2 campañas de ensayos, paralelas, para la caracterización del hormigón. Una, más exhaustiva, con probetas conservadas en las mismas condiciones ambientales que las vigas, que permitiría conocer las propiedades reales del hormigón de las mismas, y otra con probetas conservadas en condiciones estándar, en la que sólo se determinaría la resistencia a compresión y tracción, y cuyos resultados permitirían conocer la influencia de las condiciones ambientales del laboratorio en las propiedades reales del hormigón.

Los tipos de ensayo definitivamente propuestos se enumeran a continuación:

- Ensayos sobre vigas:
  - Fluencia.
  - Rotura a flexión, inmediatamente después del descimbrado.
  - Rotura a flexión, vigas sometidas a carga prematura.
  - Rotura a cortante, inmediatamente después del descimbrado.
  - Rotura a cortante, vigas sometidas a carga prematura.

- Ensayos sobre probetas conservadas en las condiciones ambientales del laboratorio:
  - Rotura por compresión.
  - Rotura por tracción indirecta (Brasileño).
  - Módulo de deformación.
  - Fluencia.
  - Retracción.
  
- Ensayos sobre probetas conservadas en condiciones estándar:
  - Rotura por compresión.
  - Rotura por tracción indirecta (Brasileño).

Ciertamente la variable principal de esta experimentación era la edad del hormigón en el momento del descimbrado y puesta en carga de la viga, lo cual imponía que el mismo ensayo debía repetirse para distintas edades. Para poder comparar los resultados obtenidos a distintas edades y puesto que la evolución de las propiedades del hormigón con la edad puede variar según sus componentes, curado etc., se creyó conveniente que todas las vigas sometidas a un mismo tipo de ensayo debían ser hormigonadas a la vez, es decir, con hormigón procedente de la misma amasada. Ello requería tener en consideración el espacio disponible en el laboratorio a la hora de decidir las edades de ensayo.

Definitivamente, se optó por realizar ensayos para 4 edades distintas, las cuales eran 2, 4, 7 y 28 días. En función de los tipos de ensayo previstos hasta el momento, para cada una de aquellas edades se deberían construir 3 vigas: una para ensayo a fluencia, otra para ensayo a rotura por flexión y otra para ensayo a rotura por cortante, pero teniendo en cuenta que se deseaba hormigonar todas las vigas el mismo día, los tres ensayos deberían realizarse también un mismo día, lo cual resultaba materialmente imposible. Ello condujo a plantear dos series de ensayos, a realizar en distintas épocas y diferenciados por la forma de cargar las vigas en el ensayo a rotura. Cada serie debía constar de 8 vigas, 4 para ensayo de fluencia y otras 4 para ensayo de rotura, lo cual supuso un total de 12 ensayos por cada serie puesto que las 4 vigas para fluencia fueron ensayadas a rotura una vez finalizado el primero.

En los ensayos de rotura de la primera serie y los de fluencia de las dos series se optó por aplicar dos cargas puntuales situadas a  $1/3$  de la luz de la viga, respecto de los apoyos. En los ensayos de rotura correspondientes a la segunda serie, las cargas puntuales fueron aplicadas a  $1/4$  de la luz de la viga, respecto de los apoyos. La *Figura 3.2* muestra el esquema de carga para cada caso.

En la *Tabla 3.1* se establece la nomenclatura de las vigas así como las edades de descimbrado, puesta en carga y rotura de cada una de ellas. En dicha tabla puede apreciarse que cada viga es designada mediante una letra y dos



números. La letra *R* corresponde a las vigas destinadas a ensayo de rotura inmediatamente después del descimbrado. La letra *C* corresponde a las vigas destinadas a ensayo de fluencia inmediatamente después del descimbrado y que, una vez descargadas, han sido llevadas a rotura. El primer número (1 ó 2) indica la serie a que pertenece cada viga. El segundo número (1, 2, 3, ó 4) permite distinguir entre las 4 vigas, de cada serie, destinadas a un mismo tipo de ensayo.

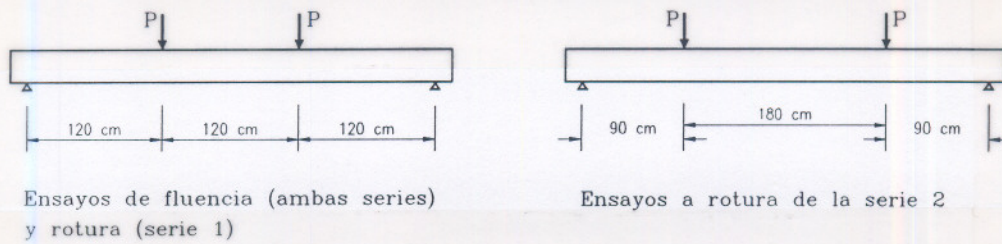


Figura 3.2.- Esquema de carga aplicada en los ensayos

Tabla 3.1.- Edades de descimbrado y ensayo de las vigas

SERIE	VIGA	EDAD DE DESCIMBRADO Y PUESTA EN CARGA [días]	EDAD DE ROTURA [días]
S1	R11	2	2
	C11	2	85
	R12	4	4
	C12	4	86
	R13	7	7
	C13	7	87
	R14	28	28
	C14	28	88
S2	R21	2	2
	C21	2	281
	R22	4	4
	C22	4	282
	R23	7	7
	C23	7	283
	R24	28	28
	C24	28	283

En cuanto a la caracterización del hormigón, en la *Tabla 3.2* se establecen las distintas edades para las que se realizó cada tipo de ensayo.

*Tabla 3.2.- Edades de ensayo sobre probetas*

TIPO DE ENSAYO	EIDADES DE ENSAYO [días]	
	Probetas conservadas en las condiciones ambientales del laboratorio	Probetas conservadas en condiciones estándar
Resistencia a compresión	2, 4, 7, 28 y 60 días (ambas series) 91 días (1ª serie) 287 días (2ª serie)	1, 2, 4, 7, 14, 28 y 90 días
Resistencia a tracción		
Módulo de deformación		-----
Retracción	Iniciado después del hormigonado	-----
Fluencia	2, 4, 7 y 28 días	-----

### 3.3.- DESCRIPCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN ADOPTADA

De cara a conocer la respuesta real de cada viga y poder comparar los resultados con las predicciones teóricas realizadas se consideró necesario, independientemente del tipo de ensayo al que aquella fuera sometida, disponer de información relativa a los siguientes parámetros:

- 1.- Deformaciones del hormigón en las fibras superior e inferior de las vigas y en la dirección longitudinal de las mismas.
- 2.- Deformaciones de la armadura longitudinal, superior e inferior.
- 3.- Deformaciones de la armadura transversal, en los ensayos de rotura por cortante.
- 4.- Carga aplicada.
- 5.- Flechas alcanzadas durante los ensayos.
- 6.- Fisuración aparecida durante los ensayos.
- 7.- Duración de cada ensayo.

Este conjunto de datos permitía, tal como se verá en el capítulo de resultados, extraer conclusiones sobre deformabilidad, capacidad resistente, curvatura seccional y otros aspectos estudiados, de acuerdo a los objetivos marcados inicialmente y en función del tipo de ensayo realizado.

Desde un principio se planteó la disyuntiva de optar por mediciones manuales, electrónicas, o bien combinar ambas dentro de lo posible. Respecto a las medidas manuales hay que señalar que resultan más económicas, lo cual permite aumentar el número de datos adquiridos, sin embargo requieren de un

cierto tiempo para la realización de las lecturas, su precisión depende de la persona que las realiza y, sobre todo, no son posibles en puntos sin acceso, como en el caso de las armaduras. Por el contrario, las medidas electrónicas permiten alcanzar mayor precisión, la toma de lecturas es mucho más rápida y posibilitan el acceso a puntos interiores de la estructura. No obstante, la instrumentación electrónica impone la necesidad de otros equipos, además del propio elemento de medición, lo cual eleva el coste de realización del ensayo además de requerir una correcta planificación de las mediciones.

Finalmente, se decidió combinar el origen de las mediciones (manuales y electrónicas), asegurando así la obtención de resultados en el caso de un fallo del sistema electrónico. Para la elección del tipo de medida, según el parámetro a estudiar, se fijaron los siguientes criterios:

- Medición electrónica de los parámetros que sólo puedan ser adquiridos por esta vía, esto es, deformaciones de la armadura y cargas aplicadas.
- No mezclar los dos tipos de medida, dentro de un mismo ensayo, para la adquisición de parámetros homogéneos.
- Contrastar mediciones de ambos tipos mediante la adquisición de un mismo parámetro por las dos vías.
- Las medidas manuales, realizadas con un mismo aparato, deberían ser tomadas por una sola persona, para conseguir una precisión uniforme.
- Evitar, en lo posible, las medidas manuales durante los ensayos de rotura por motivos de seguridad.
- La instrumentación debería ser la misma en todas las vigas sometidas a un mismo tipo de ensayo.

Tal como se ha descrito al principio de este apartado, los parámetros a estudiar en los distintos tipos de ensayo eran los mismos y, más aún, la localización de la instrumentación en cada viga podía y debía ser la misma, independientemente del tipo de ensayo. Por ello, la instrumentación adoptada se describe de una sola vez, para todos los ensayos, en función del tipo de parámetro medido.

### **3.3.1.- Deformaciones del hormigón**

Las deformaciones del hormigón pueden ser medidas tanto manual como electrónicamente.

Manualmente, aquéllas pueden ser conocidas mediante el extensómetro mecánico. Este aparato mide la distancia existente entre dos pequeños discos metálicos a los que se ajusta y que previamente deben haber sido adheridos al hormigón con resina de poliéster. La lectura se realiza a través de un reloj, graduado y calibrado, de forma que se pueden detectar deformaciones superiores

a  $1.09 \cdot 10^{-5}$ . Éstas se calculan a partir de dos lecturas: la primera, de referencia, previa a la deformación, debe restarse de la segunda, posterior a aquélla, y la diferencia se multiplica por un factor que convierte la medida de longitud en una de deformación media entre los discos, que aproximadamente distan 15 cm (en el aparato John Bull utilizado). Siempre, pues, se obtendrán deformaciones relativas al instante en que se tomó la lectura de referencia.

Electrónicamente, las deformaciones pueden ser conocidas mediante la galga extensométrica, la cual está formada por una pequeña resistencia en forma de banda que debe ser adherida al hormigón en una superficie sin poros. Como ello es prácticamente imposible, el pegado de la galga se realiza con cianocrilato sobre una fina capa de resina de poliéster previamente endurecida. La medida de deformaciones exige, como en el caso manual, de una lectura de referencia anterior al ensayo, pero éstas son mucho más rápidas y, dada la escasa longitud de la galga (entre 3 y 10 cm), las deformaciones pueden considerarse casi puntuales. El error cometido en estas lectura no supera el 1% del valor de la medida realizada.

Volviendo a las vigas, se consideró suficiente disponer de datos acerca de las deformaciones del hormigón en la sección central de aquéllas, puesto que en toda la zona comprendida entre los puntos de aplicación de las puntuales el momento flector sería prácticamente constante. Por otro lado, se deseaba comparar las deformaciones de la armadura y las del hormigón, por lo que se optó por situar los puntos de medición en las caras laterales de las vigas y a la misma altura que las armaduras, dentro de lo posible.

Para los ensayos de rotura se creyó conveniente utilizar, exclusivamente, galgas extensométricas debido a la rapidez de las lecturas y también porque permitían obtener datos hasta el instante mismo de la rotura. Para los ensayos de fluencia esta rapidez era necesaria, sobre todo, en las primeras horas después de la aplicación de la carga, y dado que las vigas ensayadas a fluencia serían sometidas a rotura una vez finalizado el anterior, se decidió utilizar galgas extensométricas para todos los casos. Sin embargo, la larga duración de los ensayos de fluencia (3 meses en la primera serie y 9 meses en la segunda), hizo aconsejable realizar, además, mediciones de tipo manual. Con ello se cubría la posibilidad de un deterioro de las galgas y se posibilitaba la comparación entre ambos tipos de medición.

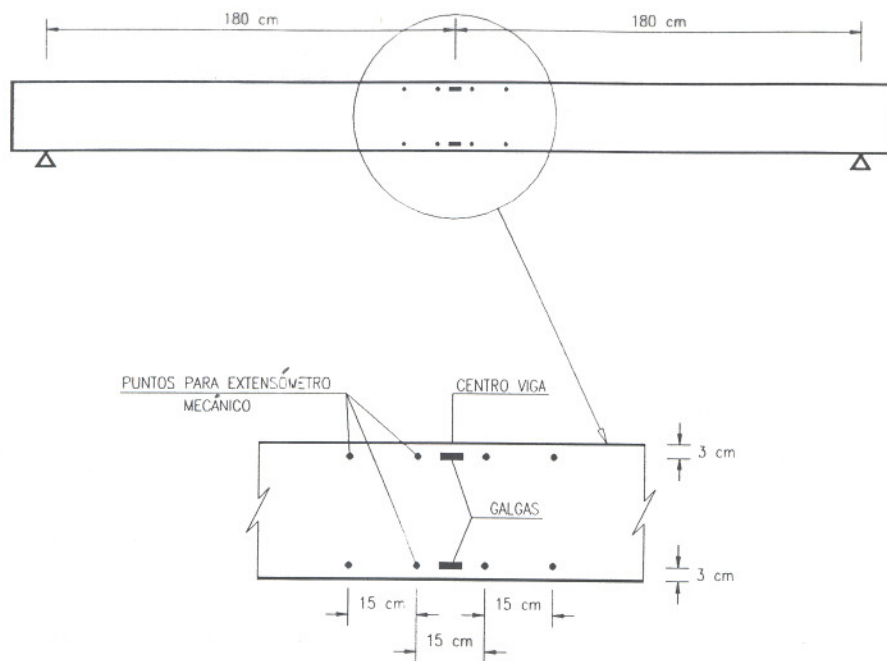
Por todo lo expuesto, para la medición de las deformaciones del hormigón, la instrumentación realizada fue la siguiente:

- Medición electrónica, igual en todas las vigas ensayadas, mediante 4 galgas extensométricas pegadas en su sección central y en sus caras laterales, disponiendo 2 galgas en cada lado, una de ellas a 3 cm de la fibra superior y la otra a 3 cm de la fibra inferior.

- Medición manual, solamente en las vigas para ensayo de fluencia, mediante extensómetro mecánico, realizando un total de 12 lecturas en la zona central de cada viga y situando los discos metálicos en las mismas fibras que las galgas extensométricas.

En la *Figura 3.3* se muestra la localización, en las vigas, de la instrumentación descrita. Las galgas extensométricas seleccionadas fueron, en todos los casos, TML, modelo PL-90.

Durante los ensayos de rotura de las vigas sometidas previamente al ensayo de fluencia, se tomaron lecturas manuales, desde el inicio del ensayo hasta alcanzar niveles de carga cercanos a rotura. En unos casos ello fue necesario debido a que algunas de las galgas extensométricas fluctuaban excesivamente. En los demás casos se optó por realizarlas igualmente, para poder contrastar ambos tipos de medición.



*Figura 3.3.- Esquema de la instrumentación del hormigón*

### 3.3.2.- Deformaciones de la armadura longitudinal

La información relativa a estas deformaciones fue necesario recogerla a través de instrumentación electrónica. Para ello se utilizaron galgas extensométricas pegadas a algunas de las barras de la armadura longitudinal.

El correcto funcionamiento de estas galgas requiere, por un lado, que éstas sean pegadas sobre una superficie lisa que garantice una perfecta adherencia con la armadura, lo cual se consigue limando la barra en la zona donde se desea pegar la galga. Por otro lado, la conexión de los cables de salida debe ser protegida para evitar su deterioro durante el proceso de hormigonado. También la propia galga debe ser protegida del contacto directo con el hormigón puesto que, tanto el rozamiento entre ambos, durante el proceso de carga de la viga, como una mala disipación del calor generado por el uso continuado de la galga, pueden alterar las mediciones, llegando a hacerlas inoperantes [Martínez Abella, 1993].

Con estas premisas, la colocación de las galgas extensométricas en las armaduras se realizó de la siguiente manera:

- 1.- Limado de la barra a instrumentar, en la zona donde se deseaba pegar la galga.
- 2.- Pegado de la galga con cianocrilato y conexión de los cables de salida.
- 3.- Protección, tanto de la galga como de los cables de salida, mediante cinta aislante.
- 4.- Recubrimiento de la galga y los cables de salida con un tubo hueco, metálico, para aislarlos del contacto con el hormigón.

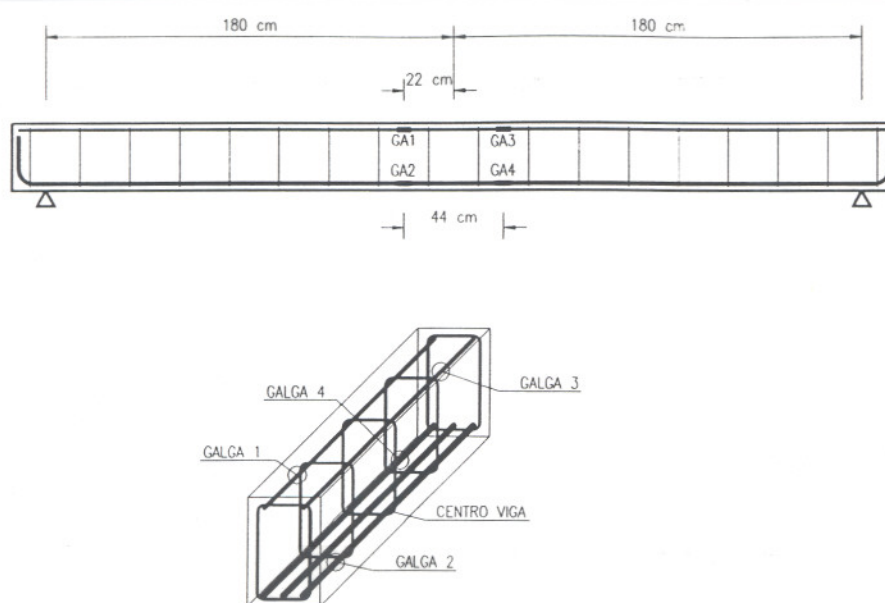
Con el fin de sujetar el tubo hueco y evitar su desplazamiento durante el hormigonado, éste fue rellenado con silicona en las vigas de la primera serie. Sin embargo, durante los 3 meses que permanecieron cargadas las vigas sometidas a ensayo de fluencia, se detectó el progresivo fallo de las galgas. Debido a ello, en el intervalo de tiempo comprendido entre la finalización de la primera serie y el inicio de la segunda, se realizó una prueba para detectar el motivo de dicho fallo. La conclusión fue que la silicona utilizada atacaba químicamente a la galga, produciendo su deterioro.

En las vigas de la segunda serie, la sujeción del tubo hueco se realizó taponando exclusivamente sus extremos, utilizando para ello una silicona neutra. El funcionamiento de estas galgas fue correcto en el período de 9 meses comprendido entre el hormigonado y la finalización de los ensayos de esta serie. En el Anejo II se presenta un reportaje fotográfico de la instrumentación descrita. Las galgas extensométricas seleccionadas, para ambas series, fueron TML, modelo FLA-5-11.

Ya que las deformaciones del hormigón se medirían en la sección central de las vigas, era lógico disponer la instrumentación de las armaduras en la misma sección con el fin de comparar ambas deformaciones. Para el estudio de la curvatura seccional era imprescindible conocer las deformaciones, tanto de la armadura inferior como superior. La larga duración de los ensayos de fluencia, unida a la posibilidad de fallo de las galgas, así como la necesidad de obtener información redundante con el fin de poder detectar posibles errores de medición,

hacían aconsejable disponer un mínimo de 2 galgas extensométricas en cada una de las armaduras (superior e inferior).

Puesto que la colocación de las galgas extensométricas requería el limado de las barras, con la consiguiente, aunque pequeña, reducción de la sección de las mismas, se temió que la concentración de aquéllas en una única sección pudiera producir una debilitación de la misma. Esto motivó la decisión de repartir la instrumentación de las armaduras entre dos secciones, colocando, en cada una de ellas, una galga extensométrica en la armadura inferior y otra en la armadura superior. Las secciones así instrumentadas fueron elegidas de forma que, por su proximidad a la sección central, la variación del momento flector, respecto al máximo, fuera despreciable y por ocupar posiciones simétricas, respecto al centro de la viga, las mediciones tomadas pudieran ser comparadas entre sí. La *Figura 3.4* muestra un esquema de la localización de las 4 galgas extensométricas colocadas en cada viga.



*Figura 3.4.- Esquema de la instrumentación de la armadura longitudinal*

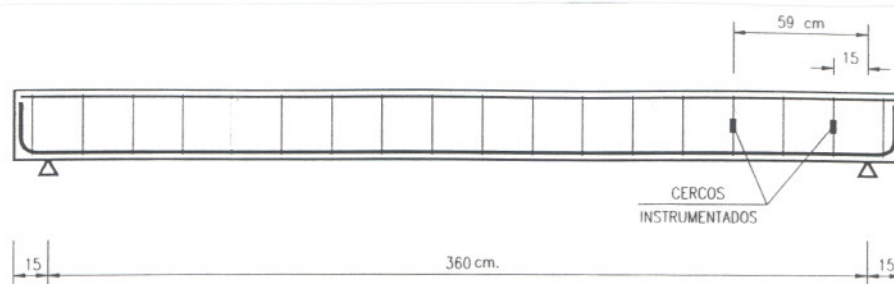
### 3.3.3.- Deformaciones de la armadura transversal

Los ensayos de rotura de la segunda serie fueron planteados con la finalidad de profundizar en la capacidad resistente a esfuerzo cortante de las vigas. Para ello se consideró necesario recoger información acerca de las deformaciones

de la armadura transversal, la cual debía ser obtenida, por razones obvias, a través de instrumentación electrónica, utilizándose galgas extensométricas TML, modelo FLA-5-11.

En cada viga fueron instrumentados 2 cercos situados entre el punto de aplicación de la carga y el apoyo. La *Figura 3.5* muestra la localización de dichos cercos en el conjunto de la viga.

Esta instrumentación fue dispuesta, únicamente, en las vigas de la segunda serie, tomándose lecturas, exclusivamente, durante los ensayos de rotura. La colocación de las galgas fue realizada de la forma descrita en el apartado anterior.



*Figura 3.5.- Esquema de la instrumentación de la armadura transversal*

### 3.3.4.- Carga aplicada durante los ensayos

Si bien el sistema de carga utilizado para los distintos tipos de ensayo se describe en el capítulo siguiente, cabe señalar aquí, someramente, los aparatos empleados para el control de la carga aplicada durante cada ensayo.

En los ensayos de fluencia la carga era aplicada mediante un sistema elemental de palanca. Su control se realizó mediante una célula TML, modelo CLC-20A, capaz de soportar hasta 200 kN de carga, alimentada con una corriente continua de 10 V y cuyo error no excedía del 0.15%.

En los ensayos de rotura la carga fue aplicada mediante un gato conectado a una electrobomba hidráulica. El control de la presión ejercida por el gato se realizó por dos vías. La primera, a través de un indicador numérico conectado a un transductor de presión, marca KISTLER, acoplado directamente al gato. La segunda, a través de una célula de carga, colocada entre el gato y la viga de reparto del pórtico, registrando con el ordenador la carga total aplicada y realizando la diferencia con el escalón de carga anterior. La célula utilizada fue la

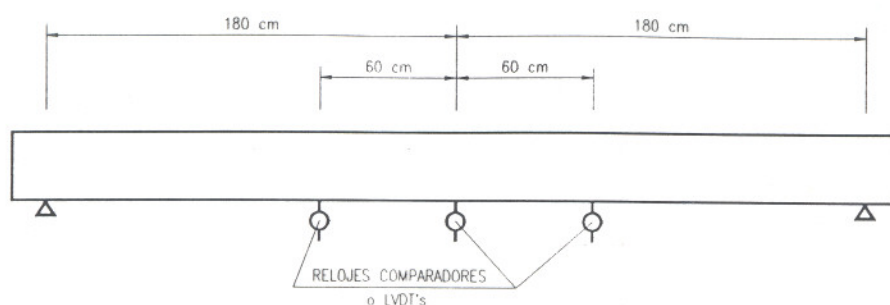


C-92, de Toledo Española S.A., con una capacidad de carga nominal de 450 kN, alimentada con una corriente continua de 10 V y cuyo error no excedía del 0.05%.

### 3.3.5.- Flechas alcanzadas durante los ensayos

De cara a evaluar la deformabilidad de las vigas y poder comparar los resultados experimentales con las predicciones analíticas, se consideró suficiente medir la flecha, o descenso vertical, en la sección central de aquéllas. Sin embargo, con el fin de detectar posibles errores de medición, se decidió instrumentar, además de dicha sección, otras dos situadas simétricamente respecto al centro de la viga y distanciadas 60 cm de éste. En la *Figura 3.6* se muestra un esquema de las secciones instrumentadas para la medición de flechas.

Habitualmente, la medición de flechas o movimientos verticales se realiza de forma manual, mediante un reloj comparador, o bien electrónicamente utilizando para ello un transformador diferencial, comúnmente conocido por las siglas LVDT (Linear Variable Differential Transformer).



*Figura 3.6.- Secciones instrumentadas para la medición de flechas*

El reloj comparador resulta más económico y es un instrumento similar al extensómetro mecánico. Su precisión depende del tipo de reloj y de la práctica del observador. El LVDT tiene un coste mucho más alto pero, a igualdad de rango de medición con el reloj comparador, ofrece una mayor precisión. La utilización correcta de ambos aparatos requiere de un punto de apoyo fijo, en relación al sistema de coordenadas adoptado, el cual debe mantenerse estable durante toda la realización del ensayo. El valor de la flecha se obtiene de la diferencia entre la lectura realizada en un instante determinado y la lectura de referencia, previa al inicio del ensayo.

Finalmente se decidió utilizar LVDT en los ensayos de rotura y relojes comparadores en los ensayos de fluencia debido a la larga duración de estos

últimos. Todos los LVDT eran de la marca SANGAMO-SCHLUMBERGER, modelo DC/15, de 30 mm de recorrido, los colocados en las secciones laterales y modelo AC/50, de 100 mm de recorrido, el colocado en la sección central. Los relojes comparadores situados en las secciones laterales eran de la marca KAFER, de 5 mm de recorrido y con una precisión de 0.01 mm, y los situados en las secciones centrales de las vigas eran de la marca MITUTOYO, de 50 mm de recorrido y con una precisión de 0.1 mm.

El punto de apoyo fijo, necesario para el correcto funcionamiento de ambos tipos de aparatos de medición, lo constituyó la losa de carga del Laboratorio, considerada indeformable a todos los efectos. Tanto los relojes como los LVDT se sustentaron mediante un pequeño pórtico metálico cuya amplia base fue inmovilizada con sacos de arena antes del inicio de cada ensayo.

### **3.3.6.- Fisuración aparecida durante los ensayos**

En el transcurso de todos los ensayos se realizó un control visual de la fisuración producida, marcando directamente sobre las vigas la posición y longitud de las fisuras. Una vez finalizados los ensayos se realizó un plano de localización de las mismas, a escala, para cada una de las vigas.

Durante los ensayos de rotura el marcado de fisuras se realizó después de cada escalón de carga, exceptuando los cercanos a la rotura por motivos de seguridad, utilizando distintos colores y tipos de trazo con el fin de poder estudiar, con posterioridad a la finalización del ensayo, la evolución de dicha fisuración.

En las vigas sometidas a ensayo de fluencia se procedió a un marcado de fisuras justo después de la aplicación de la carga. Posteriormente, a medida que fue avanzando el ensayo, se repitió el control de la fisuración para intervalos de tiempo cada vez mayores, marcando las nuevas fisuras con distintos colores y trazos a fin de poder estudiar, una vez finalizado el ensayo, la evolución de las mismas y, sobre todo, observar la influencia de esta fisuración previa en el comportamiento de las vigas durante el posterior ensayo a rotura.

### **3.3.7.- Duración de cada ensayo**

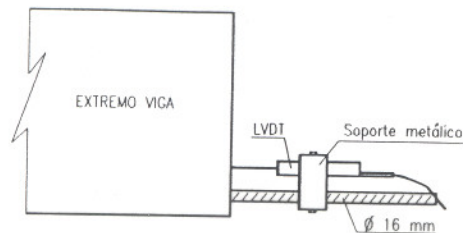
El tiempo era un parámetro más a medir, esencial, en los ensayos de fluencia. La medición del tiempo transcurrido desde la aplicación de la carga hasta el instante en que se tomó cada lectura se realizó a través del propio ordenador HP-85 programado para llevar el control de los ensayos. Este programa permitía tomar las lecturas electrónicas de forma automática, según una función de tiempo programada, así como en cualquier otro instante. Puesto que era imposible realizar las lecturas manuales (extensómetros mecánicos y relojes comparadores) en el mismo instante que las lecturas electrónicas, hubo que efectuar un control de

tiempo, exclusivo para aquéllas, anotando la fecha y la hora en que fueron tomadas, calculando luego el tiempo total transcurrido.

Si bien en los ensayos de rotura el tiempo no era un parámetro fundamental, se creyó conveniente tener constancia del tiempo transcurrido entre los distintos escalones de carga así como de la duración total del ensayo. En este caso la medición del tiempo se realizó también a través del ordenador HP-85, programado para controlar este tipo de ensayos.

### 3.3.8.- Deslizamiento de la armadura traccionada

A pesar de que inicialmente no se planteó la necesidad de recoger datos acerca del posible deslizamiento de las armaduras traccionadas, la aparición de fisuras longitudinales en la cara inferior de las vigas y en las zonas cercanas a los apoyos durante los ensayos de rotura de la primera serie, especialmente en las vigas de menor edad, llevó a la decisión de instrumentar adecuadamente la segunda serie de vigas a fin de detectar el deslizamiento de la armadura traccionada en el caso de que ello se produjera.



*Figura 3.7.- Esquema de la instrumentación realizada para controlar el deslizamiento de la armadura de tracción*

Para ello se prolongaron, fuera de la sección extrema de la viga y en ambos lados, 2 de las 3 barras que constituían la armadura de tracción, disponiendo un LVDT sujeto a la barra, mediante una pieza metálica especialmente construida, de forma que fuera capaz de detectar el movimiento relativo del punto de sujeción respecto de la sección extrema de la viga. La *Figura 3.7* muestra un esquema de este sistema de instrumentación y en el Anejo II se incluye una fotografía de detalle del mismo.

Esta instrumentación sólo se realizó en las vigas que fueron sometidas a ensayo de rotura inmediatamente después del descimbrado.

### 3.4.- ORGANIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

El hecho de que la variable común a todos los ensayos propuestos era la edad del hormigón, unido a la decisión tomada de hormigonar a la vez todas las vigas de una misma serie, hizo necesario organizar minuciosamente el proceso global de la experimentación.

Cada serie constaba de 8 vigas, de las cuales 4 serían sometidas a carga mantenida durante un cierto período de tiempo y las otras 4 serían llevadas a rotura inmediatamente después de su descimbrado. La duración de los ensayos de fluencia implicaba la simultaneidad de los mismos. Era necesario, por tanto, prever el espacio físico donde ubicar las 4 vigas, manteniendo la maniobrabilidad dentro del Laboratorio y facilitando las operaciones de carga, descarga, instrumentación etc. También era preciso prever la localización de las restantes 4 vigas hasta el momento de su ensayo.

Por otro lado, se creyó conveniente evitar, en lo posible, el traslado de las vigas antes de la experimentación, lo cual llevó a la decisión de que aquéllas fueran construidas en el lugar exacto donde posteriormente serían ensayadas. Sin embargo esto no era posible en 3 de las vigas destinadas a ensayo de rotura puesto que, lógicamente, el pórtico de carga era único. Ello hizo necesario idear un sistema para llevar a cabo su traslado y tener en cuenta, en la planificación de las operaciones a realizar cada día de ensayo, el tiempo necesario para efectuarlo.

La descripción que se realiza a continuación del proceso de construcción de las vigas, de la organización de la instrumentación adoptada y de las operaciones llevadas a cabo cada día de ensayo es común a las 2 series.

#### 3.4.1.- Construcción de las vigas

El encofrado de 5 de las 8 vigas fue construido en el lugar exacto en que éstas serían ensayadas posteriormente, de forma que fuera posible su descimbrado sin necesidad de moverlas. Ello requirió la colocación previa de los apoyos y rótulas correspondientes en su situación definitiva.

El encofrado de las restantes 3 vigas fue construido sobre una bancada, situada a 1 m del suelo y sustentada mediante tablonés de madera, siendo posible el descimbrado de cada una de ellas por separado. En la *Figura 3.8* se muestra un esquema, en planta, de la situación de los distintos encofrados en el Laboratorio.

Mientras se construían los encofrados se procedió a realizar la instrumentación de las armaduras. Posteriormente éstas fueron colocadas en el interior de los encofrados, utilizando dados de cemento para conseguir las distancias a los paramentos especificadas en proyecto. Antes del hormigonado se comprobó la correcta disposición de las armaduras.

El hormigonado de la primera serie se realizó el día 21 de septiembre de 1992, con una temperatura ambiental media de  $26^{\circ}\text{C}$  y el de la segunda serie el día 26 de abril de 1993, con una temperatura ambiental media de  $16^{\circ}\text{C}$ . En ambos casos se solicitó a planta un hormigón de resistencia característica a 28 días de 20 *MPa*, con tamaño máximo de árido de 20 *mm* y consistencia blanda (asiento en cono de Abrams entre 6 y 9 *cm*).

El hormigón se transportó en camión hormigonera y fue puesto en obra mediante cubilote, siendo necesaria una única amasada para la construcción de las 8 vigas y el total de probetas para los ensayos de caracterización del hormigón previstos. No se utilizó ningún tipo de aditivo plastificante. La compactación se realizó mediante vibradores convencionales.

Una vez completado el hormigonado, se procedió al riego de las vigas durante 3 horas para garantizar un buen curado y posteriormente fueron cubiertas con plástico para evitar la pérdida de humedad. Éste se mantuvo hasta pasadas 24 horas del inicio del hormigonado. También las probetas fueron cubiertas con plástico durante la 24 horas siguientes a su confección.

El día siguiente al hormigonado se procedió a retirar el encofrado de todas las vigas, dejando únicamente la cimbra. Asimismo se procedió al desmoldeo de las probetas.

### **3.4.2.- Organización de la instrumentación adoptada**

La instrumentación electrónica fue conectada al Sistema de Adquisición de Datos (SAD) a través de una caja o Módulo de Conexión (MC), diseñada y construida por los técnicos del Laboratorio para su utilización en los ensayos de una losa postesa realizados con anterioridad a los aquí descritos [Martínez Abella 1993]. Dicho MC contiene los puentes de Wheatstone, en su modalidad de 1/4, necesarios para completar el circuito de las galgas extensométricas, agrupa la alimentación de corriente continua necesaria (potenciales de 5 ó 10 *V*) y conecta con el SAD a través de 5 cables de salida (uno para cada tarjeta).

La adquisición de datos era realizada por el SAD, el cual efectuaba las lecturas, las convertía en una señal digital y las transmitía al ordenador de control. Mediante los programas especialmente desarrollados para cada tipo de ensayo, dicho ordenador organizaba automáticamente las lecturas y almacenaba los datos adquiridos en una cinta magnética. Una vez finalizado cada ensayo, los datos eran transmitidos a un PC para su tratamiento.

Las lecturas manuales fueron anotadas en unos estadillos, especialmente confeccionados en función del tipo de ensayo, y posteriormente fueron pasados a PC mediante una hoja de cálculo.

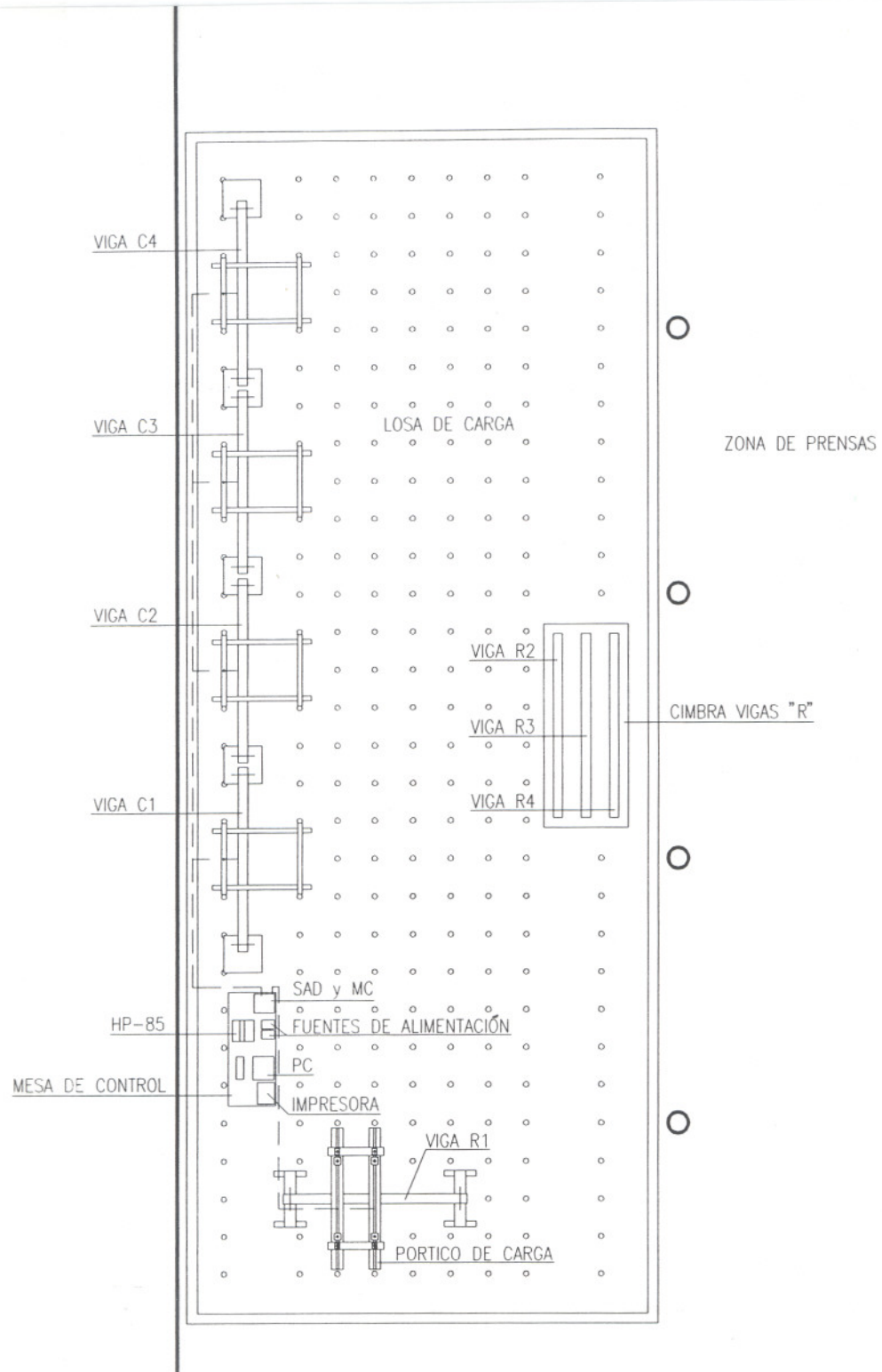


Figura 3.8.- Esquema en planta de la situación de las vigas, el pórtico de carga y el centro de control, dentro del laboratorio.

La simultaneidad de los ensayos de una misma serie, inevitable puesto que la variable principal era la edad del hormigón, requirió tener conectadas al SAD, a la vez, las 4 vigas sometidas a ensayo de fluencia y 1 de las vigas destinadas a ensayo de rotura. Ello supuso tener en consideración la ubicación del pórtico de carga y de las vigas sometidas a carga permanente, dentro del Laboratorio, para situar el Centro de Control. En la *Figura 3.8* se indica la disposición de dicho Centro, ubicado finalmente entre el pórtico y la viga cargada a los 2 días.

Este Centro de Control, común a todos los ensayos realizados, estaba configurado por el SAD (modelo HP-3497-A) junto al que se situaron el MC, las fuentes de alimentación y los ordenadores. Las fuentes de alimentación, 2 en total, eran del modelo HP-E3610A. El ordenador de Control utilizado fue un HP-85 y los datos almacenados por éste fueron transmitidos a un IBM-XT.

Cabe señalar que el cableado realizado para la primera serie de ensayos fue aprovechado para la segunda serie, puesto que la situación tanto del pórtico de carga como de las vigas para ensayo de fluencia fue la misma en ambas.

### **3.4.3.- Organización de un día de ensayo**

El hecho de que la variable esencial de toda la experimentación era la edad del hormigón, hizo imprescindible la realización de un conjunto de operaciones en un mismo día, lo cual obligó a una perfecta planificación de las mismas, en especial las correspondientes a los 2, 4, 7 y 28 días después del hormigonado de cada serie. A continuación se enumeran cada una de estas operaciones.

Operaciones realizadas a los 2, 4, 7 y 28 días después del hormigonado:

- Ensayos para caracterización del hormigón.
  - Rotura a compresión de 3 probetas.
  - Rotura a tracción indirecta de 2 probetas.
  - Ensayo de módulo de deformación de 2 probetas.
  
- Ensayo a rotura de una viga.
  - Descimbrado de la viga correspondiente.
  - Traslado de la viga y colocación de ésta bajo el pórtico de carga. (Esta operación no fue necesaria a los 2 días del hormigonado).
  - Conexión de la instrumentación electrónica y comprobación de su correcto funcionamiento.
  - Realización del ensayo.
  
- Ensayo a fluencia de una viga.
  - Preparación del bastidor de fluencia para 1 probeta.

- Descimbrado de la viga correspondiente.
- Proceso de carga, simultáneo, de la viga y la probeta.
- Inicio de la toma de datos secuencial.

Cabe señalar que, para conseguir encajar todas estas operaciones dentro de un mismo día, fue necesario prever y planificar todos los trabajos que podían y debían ser realizados con anterioridad al día de ensayo, como, por ejemplo, el refrentado de las probetas y el pegado de las galgas extensométricas sobre el hormigón.

#### 3.4.4.- Calendario global de la experimentación realizada

A modo de resumen de los aspectos descritos en este capítulo, y con el fin de aportar la máxima información posible sobre los ensayos realizados, en las tablas 3.3 y 3.4 se detallan las fechas en que fueron realizadas cada una de las pruebas de la primera y la segunda serie respectivamente.

Tabla 3.3.- Calendario de la primera serie

FECHA	DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO
21-9-92	Hormigonado de vigas y probetas
22-9-92	Desencofrado de las vigas y desmoldeo de las probetas
23-9-92	Ensayos correspondientes a los 2 días
25-9-92	Ensayos correspondientes a los 4 días
28-9-92	Ensayos correspondientes a los 7 días
19-10-92	Ensayos correspondientes a los 28 días
20-11-92	Ensayos sobre probetas (60 días)
15-12-92	Descarga y rotura de la viga C11
16-12-92	Descarga y rotura de la viga C12
17-12-92	Descarga y rotura de la viga C13
18-12-92	Descarga y rotura de la viga C14
21-12-92	Ensayos sobre probetas (91 días)



Tabla 3.4.- Calendario de la segunda serie

FECHA	DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO
26-4-93	Hormigonado de vigas y probetas
27-4-93	Desencofrado de las vigas y desmoldeo de las probetas
28-4-93	Ensayos correspondientes a los 2 días
30-4-93	Ensayos correspondientes a los 4 días
3-5-93	Ensayos correspondientes a los 7 días
24-5-93	Ensayos correspondientes a los 28 días
25-6-93	Ensayos sobre probetas (60 días)
28-1-94	Descarga de las 4 vigas sometidas a ensayo de fluencia
1-2-94	Ensayo a rotura de la viga C21
2-2-94	Ensayo a rotura de la viga C22
3-2-94	Ensayo a rotura de las vigas C23 y C24
7-2-94	Ensayos sobre probetas (287 días)