

El laboratorio de ensayo de estructuras en modelo reducido, de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Barcelona

Javier OLIVER
Benjamín SUAREZ
Elena BLANCO
Eugenio OÑATE
(E.T.S. Ing. de Caminos de Barcelona)

INTRODUCCION

Es un hecho bien conocido que al plantearse el cálculo de una estructura de cierta complejidad, el ingeniero puede recurrir esencialmente a tres procedimientos diferentes: el cálculo analítico, el análisis numérico, o bien el estudio experimental del comportamiento de la estructura mediante un ensayo en modelo reducido.

Los límites del campo de aplicación de cada método, dependen de diversos factores tales como geometría de la estructura, características de los materiales que la componen, precisión de los cálculos, etc. Soluciones analíticas a problemas de estructuras, sólo existen en aquellos casos en los que las características geométricas y del material de la estructura permiten una integración de las ecuaciones diferenciales que gobiernan su comportamiento. Para los casos en que dichas soluciones no existan, o sean difíciles de obtener, son más adecuados los procedimientos numéricos, tales como el método de los elementos finitos o el de diferencias finitas; pues en general permiten estudiar, aunque sea en forma aproximada, estructuras de forma y propiedades complejas. Finalmente, en aquellos casos en los que se desee visualizar de una forma global el comportamiento de la estructura, o cuando la categoría de la misma exige refrendar de alguna manera los resultados numéricos, es imprescindible realizar un ensayo de un modelo de la estructura a escala reducida.

Ciertamente, el desarrollo exponencial que han experimentado los medios de cálculo en los últimos años, ha tendido a colocar en un segundo plano las técnicas experimentales. La llegada del ordenador y sus enormes posibilidades, junto con el desarrollo de nuevos métodos de cálculo, enfocados esencialmente a su uso en ordenadores digitales, ha originado que la atención de muchos ingenieros proyectistas se concentrara en el uso de procedimientos numéricos para el cálculo de estructuras.

No obstante, pese a la innegable exactitud y sofisticación de los procedimientos de cálculo y diseño actuales, no cabe la menor duda que, en muchos casos, será indispensable utilizar procedimientos alternativos que permitan comprobar, aunque sea cualitativamente, la fiabilidad de los resultados obtenidos por procedimientos automáticos. Sencillas comprobaciones, tales como la del equilibrio estático del conjunto de la estructura o de alguna de sus partes a partir de los resultados del cálculo, o la mera interpretación racional de los mismos comprobando que son físicamente posibles, tendrán que ser prácticamente obligatorias en la actividad cotidiana del ingeniero proyectista de estructuras.

Desde esa perspectiva, el análisis experimental de estructuras en modelo reducido, recupera el papel que le corresponde como una de las pocas alternativas de que dispone el ingeniero, especialista en estructuras, para comprobar las predicciones de los cálculos numéricos.

Para que las técnicas experimentales de ensayo en modelos puedan servir de adecuado complemento a los potentes y rápidos métodos de cálculo existentes, es evidente que tienen que estar dotadas de una gran flexibilidad y de un alto grado de precisión. Para ello es imprescindible que dichas técnicas se aprovechen de los últimos adelantos en los campos de la informática y de la electrónica. Un laboratorio de ensayo de estructuras en modelo reducido, tiene que estar dotado de sofisticados equipos de medida e informáticos, que le permitan realizar ensayos complejos de una forma rápida y precisa.



Fig. 1. Vista parcial del laboratorio

En este artículo vamos a describir las características fundamentales del Laboratorio de Ensayo de Estructuras en Modelo Reducido, de la Cátedra de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Este laboratorio fué desarrollado, inicialmente, por el ingeniero suizo H. Hossdorf, en Basilea, Suiza, y se caracteriza principalmente por la total automatización de todos los procesos de carga y de medida. En particular, utiliza un procedimiento de cálculo, desarrollado por H. Hossdorf, que combina el análisis experimental, con el uso del ordenador, para procesar los resultados del análisis del modelo, generando analíticamente superficies de influencia (método híbrido). En el apartado siguiente se presentan, de una forma sucinta, los fundamentos de dicho método de ensayo. A continuación, pasaremos a describir los elementos esenciales del laboratorio y las distintas etapas de que consta un ensayo. Finalmente, en el último apartado, presentaremos un ejemplo reciente de utilización del laboratorio en el análisis de un estructura completa.

2. FUNDAMENTOS DEL METODO HIBRIDO DE ENSAYO

El método de ensayo utilizado consiste, en esencia, en aplicar repetidamente al modelo una carga puntual, en un número suficiente de puntos, de manera que midiendo, para cada carga aplicada, una serie de efectos en el modelo, sea posible construir la superficie de influencia de cada uno de dichos efectos en la estructura real (o prototipo).

Una vez obtenidas dichas superficies de influencia, se pueden utilizar para determinar, a posteriori, la respuesta del prototipo ante cualquier tipo de carga, mediante la sencilla aplicación del principio de la superposición. Evidentemente, este procedimiento lleva implícito el carácter elástico del ensayo, y presupone en todo instante una relación lineal entre acciones y efectos.

La base del éxito de este método de ensayo se encuentra, como es lógico suponer, en la total automatización de los procesos de carga y medición. Esto permite trabajar con un número prácticamente ilimitado de puntos de carga y medida; lo que representa una gran ventaja con respecto a los procedimientos de ensayo clásicos. Así pues, en poco tiempo y con gran precisión, pueden efectuarse gran cantidad de lecturas, cuyos resultados, almacenados por el ordenador, permiten obtener los coeficientes de la matriz de influencia. Esta matriz será la base de los cálculos numéricos, para el estudio posterior de la respuesta de la estructura a diversas acciones.

Por consiguiente, se puede afirmar que la diferencia fundamental entre éste y otros métodos de ensayo no automáticos o semiautomáticos, estriba, en primer, lugar, en la flexibilidad, rapidez y precisión de los procesos de carga y de medida; y en segundo, en la facilidad de poder estudiar el comportamiento del prototipo a posteriori (incluso una vez desmontado el modelo) frente a los más diversos tipos de carga.

Siguiendo la nomenclatura de Hossdorf, (1), al método de ensayo que se está describiendo se le denominará "híbrido", en el sentido de que combina el análisis experimental (para obtener la matriz de influencia), con el posterior tratamiento numérico de la misma, a bajo costo. Recalcamos de nuevo que, en el método híbrido, la información obtenida durante el ensayo queda almacenada; lo que permitirá al ingeniero obtener, en cualquier momento, una rápida respuesta del prototipo frente a solicitaciones normalmente no previstas, sin necesidad de efectuar un nuevo ensayo.

3. DESCRIPCION DEL LABORATORIO

A efectos de su descripción, se podría considerar el laboratorio constituido por:

- 3-1) Mesa de ensayo.
- 3-2) Dispositivos de carga.
- 3-3) Dispositivos de medida.
- 3-4) Dispositivos de control.

3.1. Mesa de Ensayo

La mesa de ensayo está formada por perfiles en I, que constituyen una base muy rígida sobre la que se asentarán los modelos que se vayan a ensayar.

3.2. Dispositivos de Carga:

- a) Un puente-grúa móvil, que sirve para aplicar cargas puntuales verticales, con una precisión de colocación de la carga de ± 0.2 mm. Este puente-grúa está dotado de movimiento en dos direcciones (x, y) y se posiciona controlado por un ordenador (en la actualidad un HP 2116B). También, si se desea, puede accionarse manualmente. La carga aplicable puede variarse desde 5 a 60 kgs, con incrementos de 1 kg.
- b) Gatos neumáticos de accionamiento manual, o automático por el ordenador, que sirven para aplicar cargas en cualquier dirección o movimientos impuestos a la estructura, como, por ejemplo, descensos de apoyos.

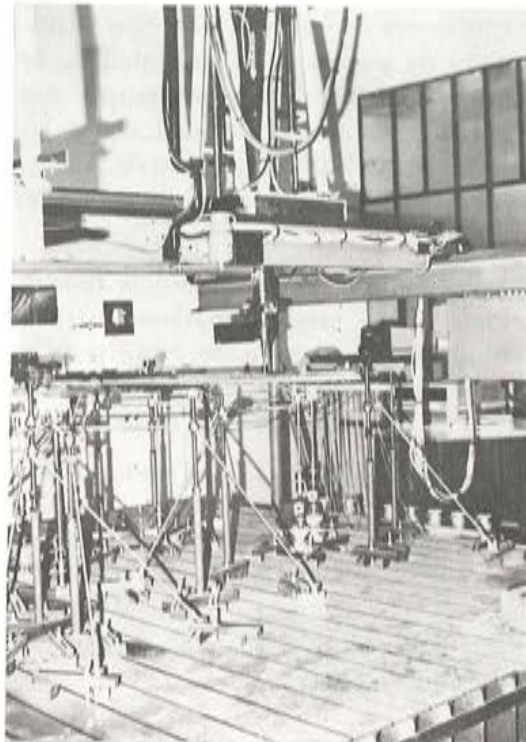


Fig. 2. Vista general de la mesa de ensayo y del puente grúa

3.3. Dispositivos de medida

En un ensayo de un modelo reducido, se pretende medir, fundamentalmente, tres tipos de efectos.

- a) Deformaciones, y en consecuencia tensiones, para lo que se utilizan strain-gauges (o bandas extensométricas) de diversos tipos.
- b) Reacciones o fuerzas, mediante dinamómetros o células de carga.
- c) Flechas y corrimientos, empleando para ello deflectómetros.

Todas las medidas eléctricas que conlleva la utilización de estos elementos, se realizan con un voltímetro digital integrador, con una sensibilidad de medida de 10^{-6} voltios.

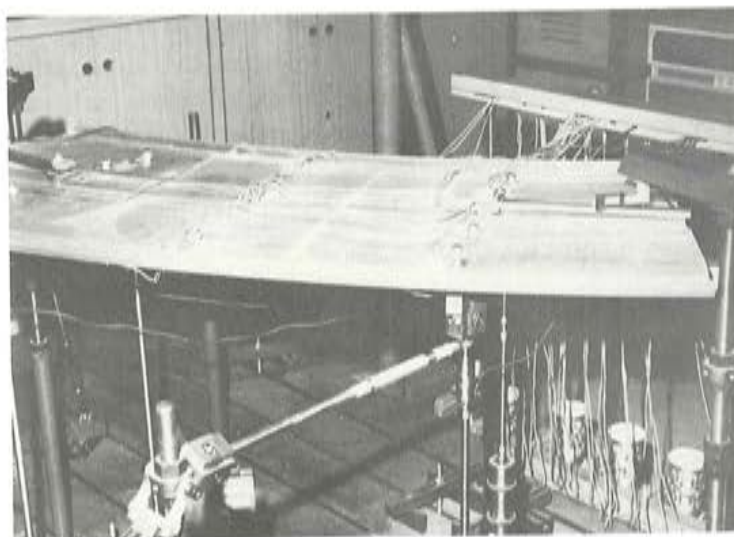


Fig. 3. Detalle de elementos de medición eléctrica

3.4. Dispositivos de control:

- El control del puente grúa, mediante el cual se aplican las cargas puntuales verticales, lo realiza el ordenador del equipo a través de un cuenta vueltas de alta precisión.
- El control de los dispositivos de carga neumática, lo realiza el ordenador a través de un distribuidor de canales neumáticos, con una capacidad de 60 canales independientes.
- El control de los efectos eléctricos que hay que medir, lo realiza el ordenador a través de un distribuidor de canales eléctricos (SCANNER), con una capacidad de 100 canales independientes, que permite, asimismo, controlar la tensión de trabajo de los distintos elementos de medición, en grupos de 10.

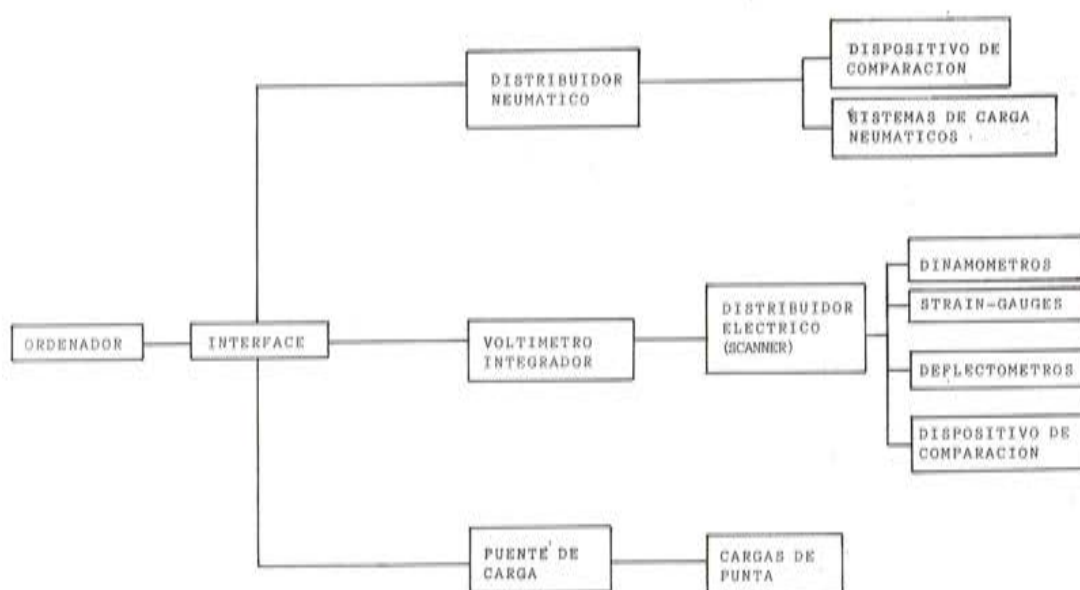


Fig. 4. Descripción del laboratorio de ensayo de estructuras, en modelo reducido

Finalmente, el equipo lleva incorporado un dispositivo automático de comparación, accionado neumáticamente, cuya función es, entre otras, controlar la calibración de los distintos elementos de medición de deformaciones, fuerzas y corrimientos. (En el apartado 5 se darán más detalles sobre su funcionamiento).

Entre el ordenador y los periféricos, va acoplado un adaptador (Interface) que hace posible la conversación entre los mismos.

Un esquema de los elementos del laboratorio puede verse en la figura 4.

4. DESCRIPCION DEL ENSAYO

El proceso de ensayo se desarrolla según los siguientes pasos (véase figura 5):

- 1) Se proporcionan al ordenador las características físico-geométricas del modelo y del prototipo, así como la posición de los puntos de carga y medida.
- 2) Se procede a efectuar el número de ciclos de carga correspondiente, realizando para cada uno de ellos los siguientes pasos:
 - a) El ordenador da una orden de posicionamiento al puente-grúa, que lo lleva al punto de carga deseado,
 - b) Antes de aplicar la carga, se efectúa todo el proceso de medición, que se describe en c),
 - c) Proceso de medición: El ordenador da la orden de medición al distribuidor eléctrico (SCANNER), que efectúa un lazo, sobre los distintos canales eléctricos de medición.

El voltímetro integrador realiza la medición para cada canal, que es transformada, de su valor analógico a uno digital, por medio del Interface; tras lo cual dicho valor se almacena en disco.
 - d) El ordenador establece una orden de carga, que acciona la carga de punta, o la carga neumática, según corresponda, y asimismo el dispositivo de comparación.
 - e) Se repite el proceso de medición descrito en el punto c).
 - f) El ordenador efectúa la diferencia entre cada dos valores eléctricos, medidos antes y después de la carga. Los transforma consecuentemente, mediante las relaciones de comparación magnitud física/magnitud eléctrica y las relaciones de semejanza modelo/prototipo, para obtener las tensiones, fuerzas, desplazamientos, etc., del prototipo, que almacenará en el disco.
- 3) El conjunto de operaciones descrito en el apartado 2), se repite para cada ciclo de carga.
- 4) Con los resultados de todos los ciclos de carga, el ordenador construye la matriz de influencia de cada uno de los efectos que deseen conocerse en los puntos de medida.
- 5) Mediante la matriz de influencia, puede estudiarse la respuesta del prototipo, frente a distintos tipos de acciones. Para ello se hace uso de un programa de ordenador escrito al respecto. Los resultados del análisis pueden presentarse en forma gráfica, por medio de una pantalla-gráfica, lo que facilita su interpretación.

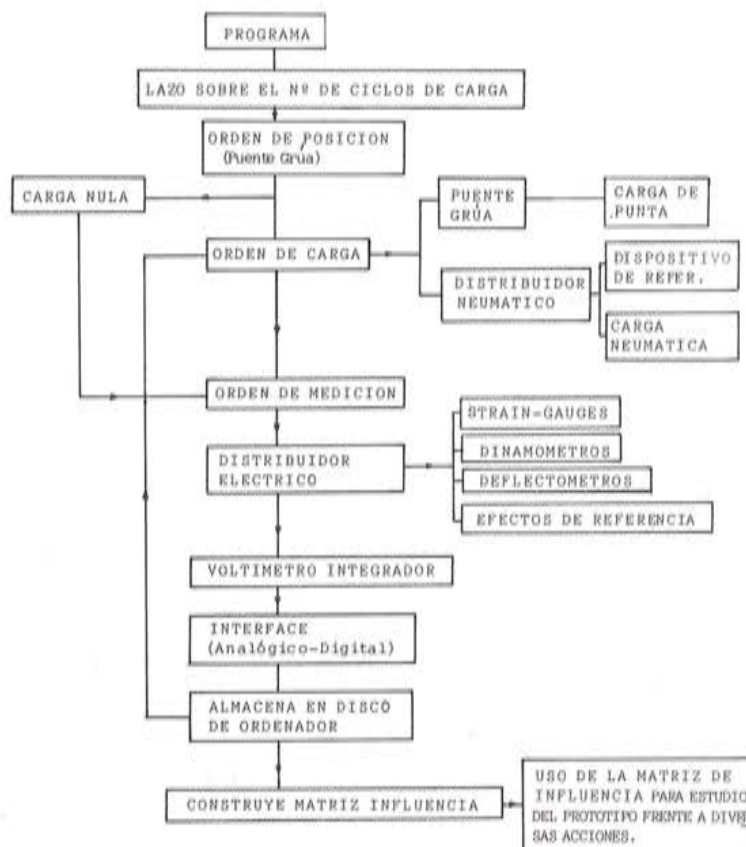


Fig. 5. Proceso de ensayo

5. DESCRIPCION DEL DISPOSITIVO DE COMPARACION

Vamos a detenernos a explicar, con un cierto detalle, el dispositivo automático de comparación al que hicimos referencia en el apartado 3.4, pues consideramos que es una de los elementos más peculiares del laboratorio.

El objetivo de dicho dispositivo es eliminar las influencias perturbadoras que puedan alterar el resultado del ensayo (tales como la temperatura, tiempo de medición, fatiga del material, etc.), así como comprobar en todo momento que la marcha del mismo es correcta.

El método seguido estriba, simplemente, en establecer una relación entre una magnitud conocida y una magnitud buscada. Para aclarar conceptos tomemos, por ejemplo, como magnitud buscada, el valor de las tensiones en el modelo. Para obtener dicho valor es preciso, en primer lugar, medir las deformaciones en el modelo, por medio de bandas extensométricas (strain-gauges). Una vez conocidas las deformaciones, multiplicándolas por el módulo de elasticidad del material se determinarían las tensiones.

Ahora bien, el módulo de elasticidad de los materiales varía con el tiempo, con la temperatura y con los ciclos de carga realizados; luego si se determinan directamente las tensiones a través de las deformaciones medidas, en cada lectura se obtendrán valores diferentes.

Para efectuar la comparación, se utiliza un dispositivo automático controlado neumáticamente. Al aplicar una carga sobre el modelo, actúa simultáneamente una carga perfectamente calibrada, sobre una pieza isostática del mismo material que el modelo, colocada en el dispositivo comparador. En consecuencia, se puede conocer exactamente, aplicando los principios de la Resistencia de los Materiales, la tensión en cualquier punto de la pieza isostática

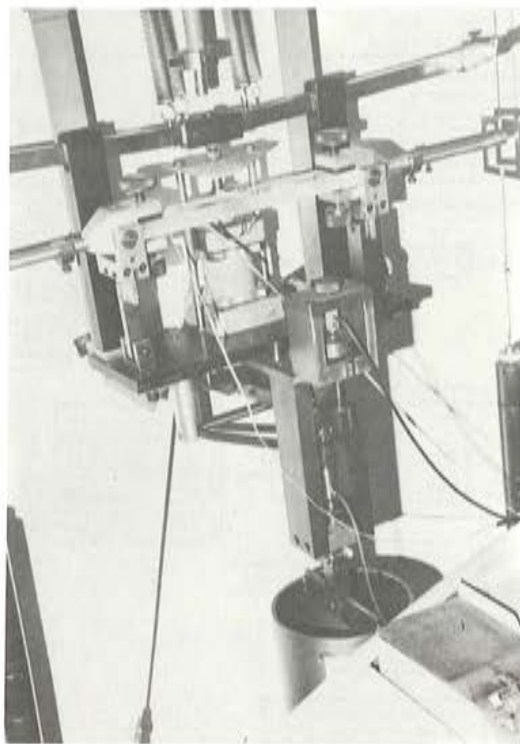


Fig. 6. Dispositivo de comparación

del dispositivo comparador. Si en uno de estos puntos se coloca una banda extensométrica y se mide la deformación en dicho punto, se puede establecer, para cada punto de medida del modelo, la relación:

$$\sigma_m = \frac{\epsilon_m}{\epsilon_c} \sigma_c$$

donde: σ_m = tensión en el modelo

ϵ_m = deformación en el modelo

ϵ_c = deformación en la pieza del comparador

σ_c = tensión en la pieza del comparador

Puesto que se conocen los valores ϵ_m y ϵ_c (medidos eléctricamente) y el valor σ_c (determinado analíticamente), ahora queda determinada la tensión en cada punto de medida del modelo.

Como además existe una relación de proporcionalidad entre la deformación de la banda extensométrica y la variación de la diferencia de potencial medida en el canal eléctrico correspondiente, la relación anterior puede transformarse en:

$$\sigma_m = \frac{\Delta V_m}{\Delta V_c} \sigma_c$$

donde: σ_m = tensión en el molde;

ΔV_m = variación de diferencia de potencial en la banda del modelo;

ΔV_c = variación de diferencia de potencial en la banda de la pieza del comparador;

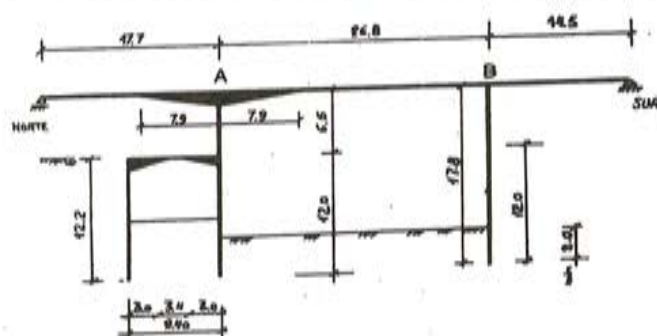
σ_c = tensión en la pieza del comparador;

De igual manera se procede para hallar los valores de las reacciones, flechas, etc., comparando siempre la variación de la diferencia de potencial medida en cada uno de los dispositivos medidores del modelo, con la obtenida en la pieza del comparador bajo la acción de una fuerza, flecha, etc., perfectamente conocida.

También, en cada ciclo de carga, el ordenador realiza una comprobación de equilibrio sobre el modelo, proporcionando una relación, entre la suma de las reacciones medidas y las cargas aplicadas, que también en este caso debe ser aproximadamente igual a la unidad.

Estas referencias permiten determinar, en todo momento, si el proceso de carga y de medición ha sido correcto o si, por el contrario, ha existido un factor de perturbación que hará necesario repetir un determinado ciclo de carga.

Se describe a continuación el ensayo realizado en el Laboratorio de Estructuras, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, de Barcelona, sobre un modelo del tablero del puente ZEUGHAUSBRUCKE, correspondiente a un tramo del proyecto GELLERDREIECK, ETAPPE 2B, que va a construirse en el cantón de BASEL-STADT (Suiza). El ensayo se efectuó durante los meses de Febrero y Marzo de 1981.



73

La estructura completa es de tipo porticado, de planta curva, y consta en su parte superior de un tablero de losa maciza, de canto variable, con dos calzadas para circulación rodada y una zona central destinada a tráfico de tranvías. En la figura 7 se presenta un alzado longitudinal de todo el puente, y en la figura 8 la sección transversal del tablero.

Se deseaba efectuar un ensayo elástico, complementario del cálculo numérico, que se había realizado previamente, para analizar el estado de tensiones en la *sección central del vano intermedio superior, entre los puntos A y B* (véase figura 7). Esta sección se consideraba como crítica y se deseaba estudiarla variando, además, los grados de empotramiento en la zona de apoyos.

El material que se va a emplear en la construcción del puente es hormigón armado, de módulo de elasticidad $E: 250.000 \text{ kg/cm}^2$.

Para la ejecución del modelo se eligió, por sus idóneas características físicas, metacrilato de módulo de elasticidad $E: 40.873 \text{ kg/cm}^2$. Se adoptó una escala 1:40 que permitió la obtención de una placa de dimensiones aceptables ($0,49 \times 1,12 \text{ m}$ de media) para la carga y la medición, manejable y de costo adecuado.

En la geometría de la placa se hicieron algunas simplificaciones geométricas, de pequeña magnitud, con respecto al proyecto (sustitución de las clotoideas por circunferencias, etc.), admitiendo una tolerancia en las dimensiones de $0,2 \text{ mm}$.

DESCRIPCION DE LAS ACCIONES

a) Acciones Verticales:

Sobre la parte superior del modelo, se situaron 64 puntos de carga, distribuidos según las direcciones radial y circunferencial. La distancia entre puntos fué de $1/8$ de la luz, radial y circunferencial, salvo para los inmediatamente próximos a los apoyos en los que fué $1/16$ de la luz.

Dicha distribución, permitió cubrir la superficie de modo conveniente para obtener la matriz de influencia del tablero (véase figura 9).

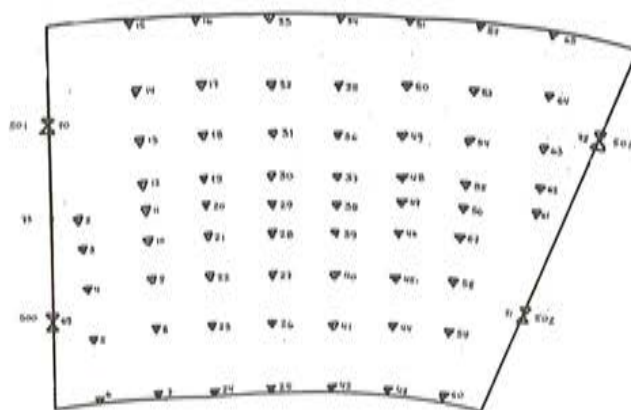


Fig. 9. Zeughausbrücke - puntos de carga

b) Momentos en los apoyos:

Puesto que el modelo fué construído físicamente como bi-apoyado, interesaba conocer los efectos que la continuidad con los demás vanos del puente producía sobre la parte estudiada del mismo.

A tal efecto, se consideraron dos acciones que produjeran un momento conocido sobre los apoyos. Dichas acciones consistieron en aplicar una carga puntual, vertical, a una pieza metálica rígidamente unida a la línea de apoyos (véase figura 10).

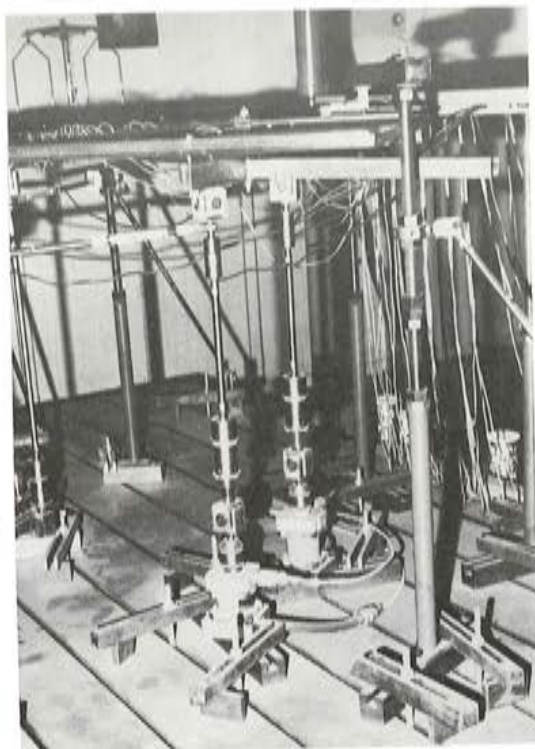


Fig. 10. Vista del dispositivo para aplicación de momentos sobre los apoyos y de los gatos neumáticos.

c) Descenso de apoyos:

Se consideraron dos acciones, consistentes en descensos verticales en los apoyos, que fueron conseguidos mediante gatos neumáticos con un recorrido controlado hasta 0,1 mm.

DESCRIPCION DE LOS EFECTOS

a) Tensiones:

A efectos de medición de las tensiones, se fijó una sección transversal para el estudio de las mismas, situada aproximadamente a la mitad de la luz del tablero. Sobre dicha sección se eligieron trece puntos característicos, que permitieran una buena definición de la distribución transversal de tensiones (véase figura 11).

En cada uno de estos puntos se colocaron dos bandas extensométricas, una en la cara superior y otra en la inferior, que permitían conocer la distribución de tensiones a lo largo del canto.

Dado que no existía la certeza de que la sección estudiada fuera la más desfavorable, se colocaron otras cuatro bandas extensométricas, según la dirección circunferencial de la estructura y en la parte inferior de la misma, lo que hizo posible obtener información sobre la variación de las tensiones en diferentes secciones de estudio.

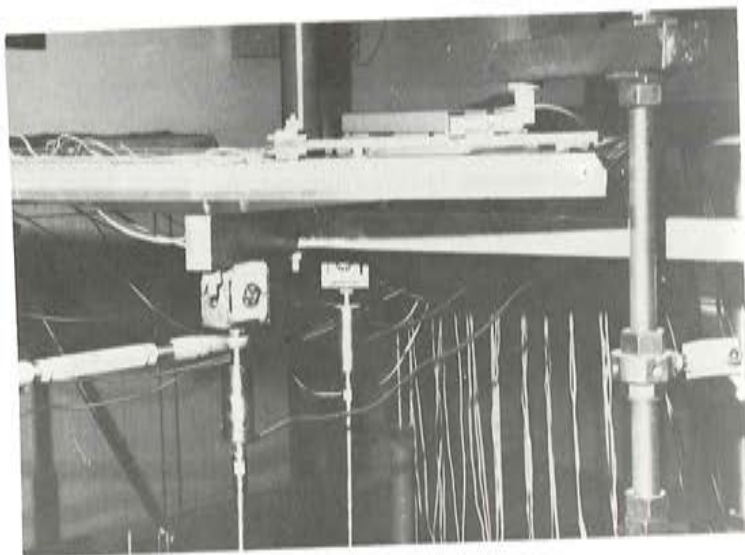


Fig. 13. Deflectómetro eléctrico y dispositivo para medición de giros

SUJECION DEL MODELO:

El modelo fué apoyado sobre cuatro pies derechos, situados dos de ellos en cada línea de apoyo del puente.

Los pies derechos estaban convenientemente solidarizados con la mesa de ensayo, mediante barras de arriostramiento que impedían cualquier movimiento de los mismos. La conexión de los pies derechos con el modelo, se hizo a través de un rótula bidireccional que aseguraba que el apoyo no transmitía al modelo ninguna reacción horizontal.

En cada uno de los pies derechos, fué incorporado un tornillo micrométrico que permitía la perfecta nivelación del modelo.

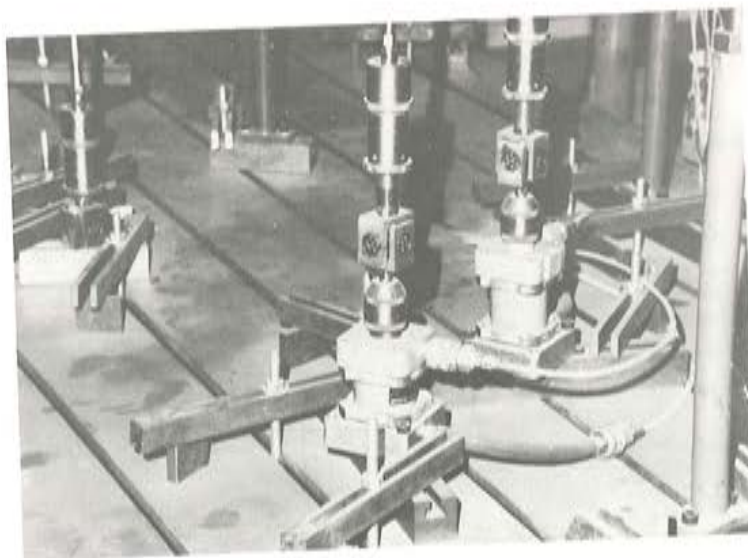
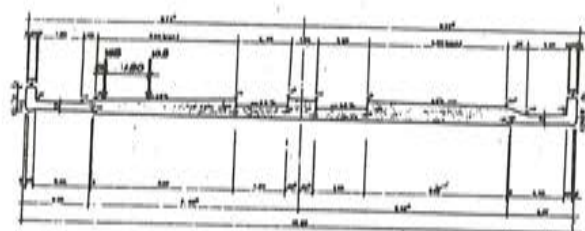


Fig. 14. Sujeción de los pies derechos a la mesa de ensayos, tornillos micrométricos y gatos neumáticos.

RESULTADOS DEL ENSAYO

Partiendo de la información obtenida del ensayo del modelo y almacenada en el ordenador, se estudiaron, a continuación, los efectos producidos sobre la estructura por varios trenes de carga y las combinaciones de los mismos más desfavorables.

En la figura 15 se presenta la distribución de tensiones longitudinales, en la cara inferior del tablero en la sección de estudio (véase figura 11), para un caso de carga de los estudiados. En la figura 16 se muestra la línea de influencia de la reacción vertical en el apoyo 501, cuando una fuerza unidad recorre la línea definida por los puntos 2, 11, 20,..., 61.



ZEUGHASISTEMA

CARGA 808
TENSIONES SX

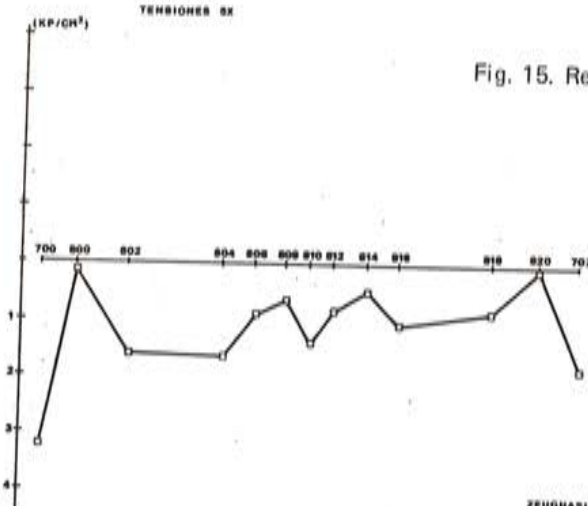


Fig. 15. Resultados del ensayo

ZEUGHASISTEMA

LÍNEA DE INFLUENCIA

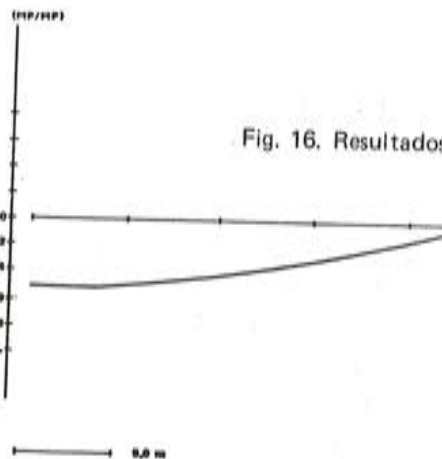
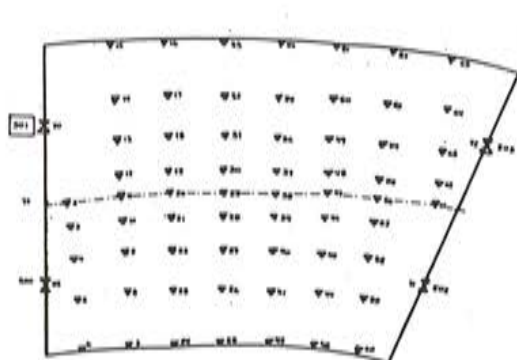


Fig. 16. Resultados del ensayo

REFERENCIA

- 1 Hosdorf Heinz. Modelos Reducidos. Método de cálculo. Instituto Eduardo Torroja, 1972.