

el laboratorio de estructuras



de una empresa constructora

072 - 1

CARLOS FERNANDEZ CASADO y LUIS HUARTE GOÑI, ingenieros de caminos

La evolución de las empresas constructoras

El haber más importante de una Empresa Constructora es su experiencia directa de la realidad constructiva, acumulada día a día, en un transcurso de años, enriqueciendo sus métodos, sus archivos y los criterios de las personas que la rigen en sus diversos sectores. Esta experiencia es fundamental en el sector técnico, donde además la persistencia de los hombres que lo dirigen ha hecho cambiar el carácter y quizás las características del tipo de Sociedad que es una Empresa Constructora.

Es preciso repasar el Pliego de Condiciones Generales de la Contratación de Obras Públicas (año 1886) para darse cuenta del régimen de desconfianza total que lo anima. Se establece una contratación de servicios entre la Administración y el Constructor, como puede ser la de otro servicio cualquiera, cobro de las contribuciones, por ejemplo, y la relación entre ambas Entidades se regula casi exclusivamente en el aspecto económico. A la Administración no le interesa la solvencia técnica del Constructor, ya que tiene un proyecto acabado, con unas condiciones de realización que exigirá rigurosamente, y sólo ha de precaverse respecto a su solvencia económica, exigiéndole una fianza dineral.

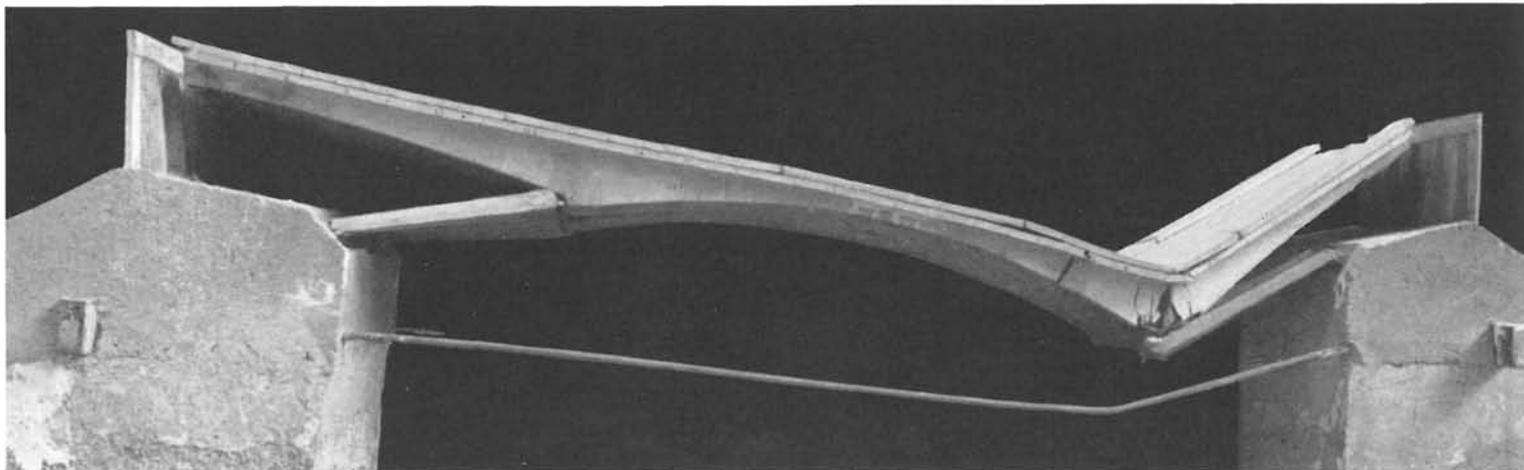
No quiere esto decir que la Administración considere al contratista en el citado Pliego como un ente inmoral, según la frase tan poco ingeniosa de: contratista = contra ti está, sino que lo supone menor de edad y, por tanto, sin ninguna responsabilidad.

El que ejecuta una obra es el que ha hecho la baja más importante entre todos los postores; por consiguiente, le corresponde el riesgo mayor en cuanto a equivocaciones desfavorables. Si esto le sucede, no tiene otro recurso, para desenvolverse económicamente, que el de cometer pequeños fraudes, como son quitar cemento en los hormigones o mermar las dimensiones ocultas de los elementos. El ceder a estas tentaciones está facilitado por la irresponsabilidad, consecuencia de su falta de preparación técnica, que le ayuda a cerrar los ojos para no ver las consecuencias de sus fraudes. Por eso, la Administración ha de estar siempre alerta, presta al palo de la sanción económica, que establezca un régimen de subordinación, muy lejano, de la colaboración sincera. Hay que meter en cintura al contratista para que se limite a ser el ejecutor fiel de lo que la Administración ha proyectado, planeado y dirige. Esta fidelidad, que es toda su solvencia, está garantizada por la fianza.

La situación inicial de las Obras Públicas se acomodaba perfectamente a este régimen, pues las obras eran de técnica sencilla, y por tanto, accesibles sin necesidad de gran preparación, se llevaban de un modo lento y con muy poca maquinaria. Además, la organización de la Administración permitía la presencia constante de un facultativo a pie de obra, que llevaba materialmente la dirección de los trabajos. Por otro lado, las comprobaciones de control se limitaban a mediciones geométricas o ponderales.

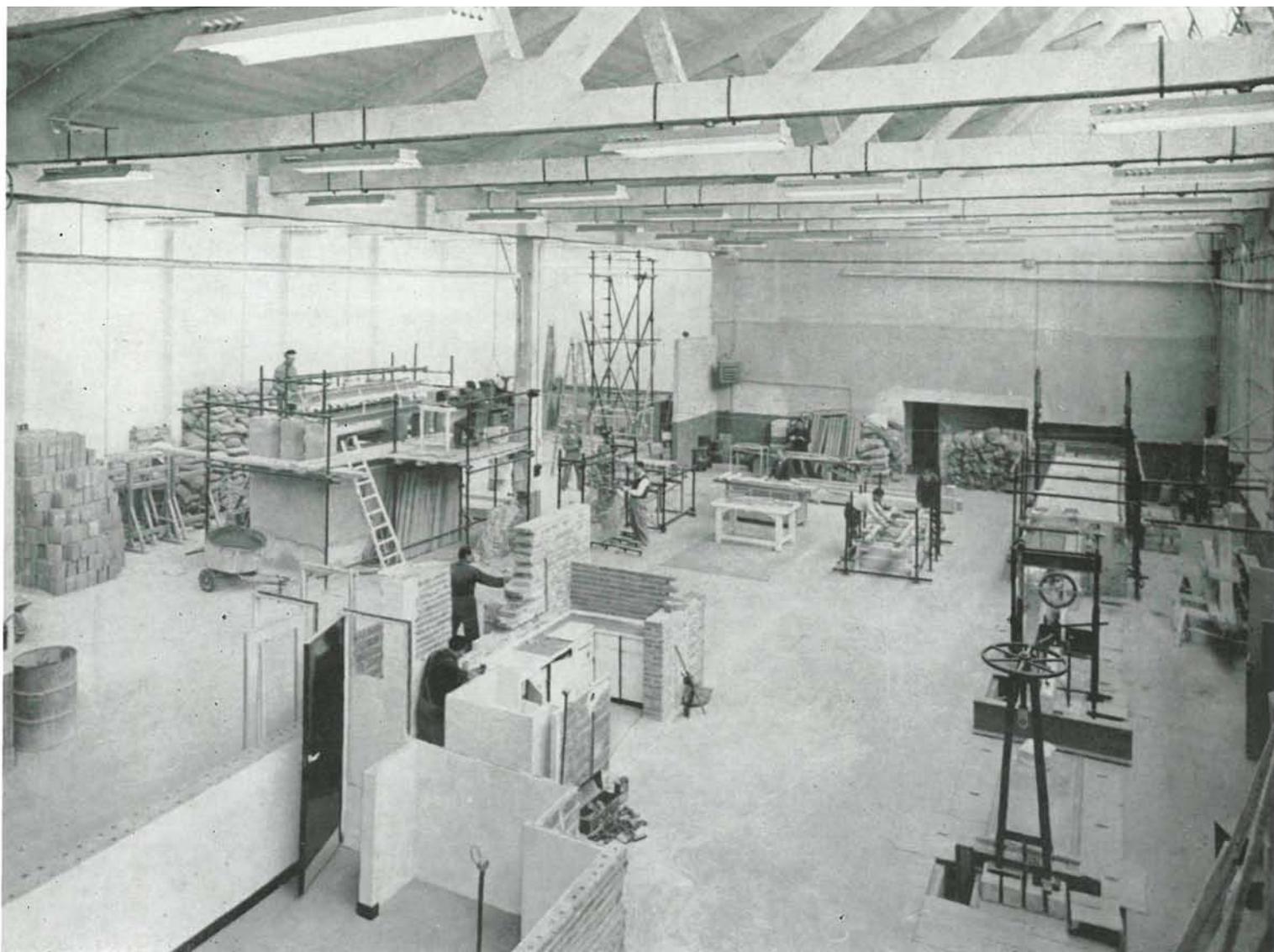
La evolución de la técnica constructiva, exigiendo unos conocimientos cada vez más importantes del modo de hacer, la necesidad de utilización de maquinaria y la experiencia misma de las Empresas constructoras, ha modificado de modo radical esta situación, y el Constructor, de mero ejecutor de lo que la Administración impone, ha pasado a ser su colaborador eficaz.

Al iniciarse el hormigón armado, las patentes del mismo eran propiedad de las Sociedades, creadas muchas de ellas para su aplicación exclusiva. Al mismo tiempo, ingenieros de gran categoría organizaron Empresas, en las cuales su capacidad técnica y su espíritu organizador, encaminó la construcción por nuevos caminos. De las obras por contrata se pasó a los concursos de obras con proyecto libre, es decir, desde el contratista de mano de obra de los primeros tiempos, al constructor que arroga todas las facultades al ser responsable no sólo de la construcción sino también del proyecto.



En la última etapa, el desarrollo del hormigón pretensado se ha llevado desde las Empresas constructoras. Todas las obras importantes proceden o de concursos de proyecto-construcción, o de contrato directo en el cual la estructura es privativa de la Empresa.

En general, la fijeza de los cuadros de personal es mayor en las Empresas que en la propia Administración, y el hecho de su mayor adentramiento en el negocio constructivo le da un conocimiento más directo de la fase técnica del mismo.



Los constructores hace tiempo que llegaron a la mayoría de edad y tienen plena solvencia técnica, a la cual va aparejada una mayor solvencia económica, e incluso, en algunos casos, el aspecto económico ha llegado a su máximo desarrollo, convirtiéndose el constructor en finanzador.

El factor económico, que es el que afina la técnica, es más acuciante en la Empresa privada que en la Empresa pública: primero porque hay una gran diferencia de escala, y segundo, porque aquélla no puede existir sin un rendimiento positivo.

Y estas son las razones por las que el contratista de Obras Públicas se haya convertido en Empresa Constructora, cuyas características son: Gran solvencia técnica, posesión de un parque de maquinaria importante y especialización en determinados procedimientos constructivos.

El método experimental en la teoría de las estructuras

El método experimental ha sido la base de la Física moderna, y la teoría de las estructuras es simplemente Mecánica Aplicada. Experiencia en el sentido más amplio la obtiene el constructor al realizar sus obras como ya hemos apuntado. Toda construcción es un acontecimiento físico y, al lograr su permanencia da una cierta validez a las suposiciones del proyecto.

Esta experiencia tan elemental de comprobar el éxito de nuestras previsiones se especifica un poco más cuando al final de la obra la Administración realiza las pruebas de carga para la recepción del puente. Entonces se analiza el comportamiento de la obra, a través de mediciones que nos aseguran de ciertas modalidades muy importantes, como su inclusión dentro de la fase elástica, y nos permiten un cotejo con otros resultados numéricos procedentes del cálculo analítico.

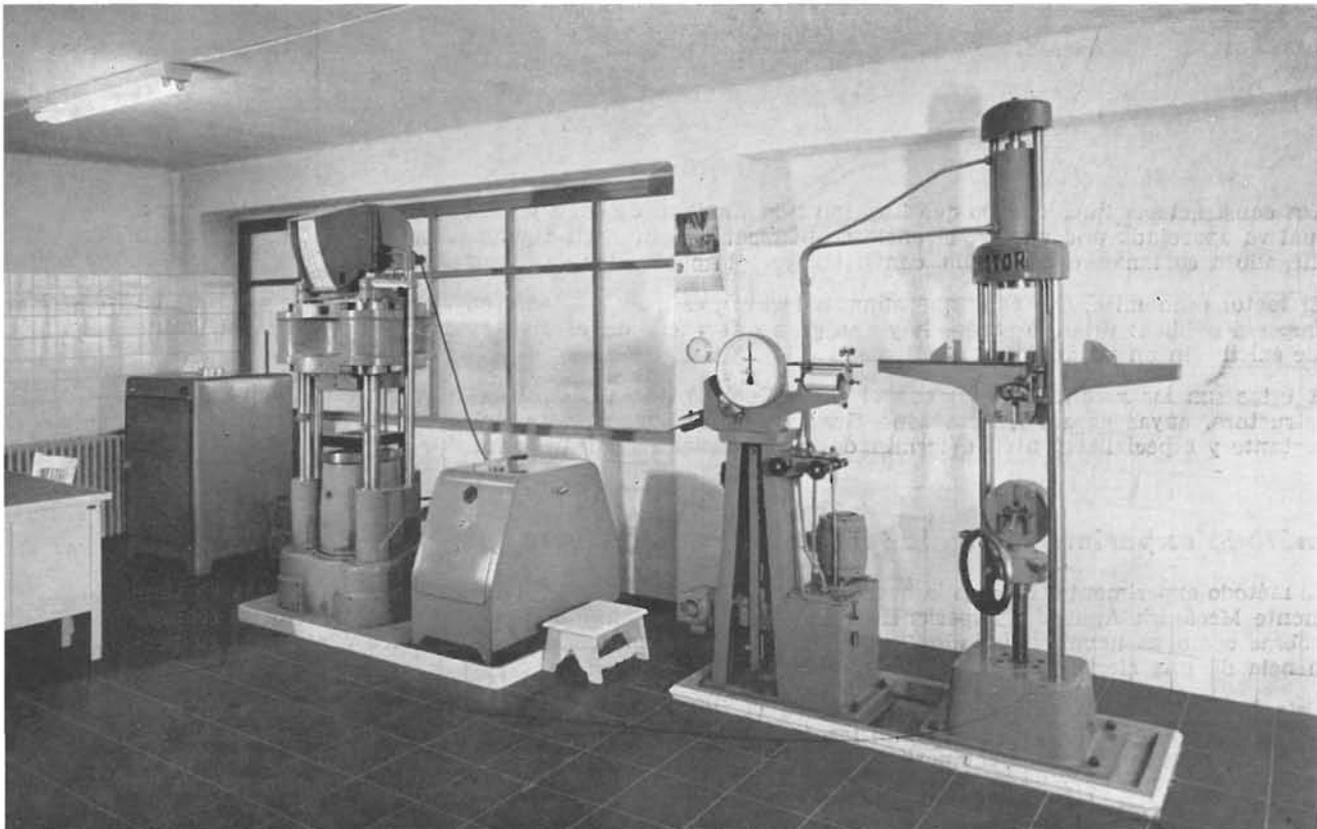
Los resultados que obtenemos nos aseguran respecto de la obra concreta que probamos, pero además podemos aprovecharlos en las obras venideras, puesto que las estructuras ingenieriles se ordenan en grupos y los problemas se repiten con características análogas.

Pero es preciso precaverse contra esta invitación a la experiencia que lleva implícita la obra que construimos y contener en sus justos límites el afán de investigación del ingeniero constructor. La experimentación en obra es cara, pues introduce alteraciones que pueden perjudicar al proceso constructivo; pero sobre todo es peligrosa, pues entraña un riesgo de vidas humanas. Además esta experimentación es muy limitada; se refiere, a un solo ejemplar, en el cual no podemos salirnos de las condiciones de comportamiento normal, el cual no denuncia a qué distancia nos encontramos de una anomalía peligrosa.

Pasando de esta experimentación, en un sentido lato, a la experiencia de estructuras, en su sentido específico, nos encontramos al comienzo con una terrible paradoja: para tener la experiencia integral de una estructura resistente, tenemos que romperla. El absurdo desaparece si consideramos estructuras en las que se repite un elemento básico, pues entonces podemos llevar la experimentación hasta el final en uno de dichos elementos, midiendo la amplificación de acciones necesaria para dejarlo materialmente fuera de servicio, con lo cual estudiamos todo su comportamiento y obtenemos directamente el *coeficiente de seguridad* que le corresponde.

Otra modalidad de este procedimiento directo del estudio integral de una estructura es el de los *modelos reducidos*, en el cual llevamos hasta rotura una reproducción a escala de la estructura, sometiéndola a las acciones que en ley de semejanza le corresponden. Se estudia con todo detalle el fenómeno físico evolutivo a través de las flechas, inclinaciones de la directriz y deformaciones unitarias que nos proporcionan las tensiones en los puntos principales. Además, como en los ensayos directos, podemos medir los coeficientes de seguridad a fisuración y a rotura. Este procedimiento, mucho menos costoso que el ensayo directo, está llegando a ser habitual en estructuras complicadas, y cuando la función impone una forma más o menos forzada.

El método de los modelos reducidos es un espléndido presente que la ciencia experimental ha puesto en las manos del Ingeniero. Ha abierto un amplio cauce a la imaginación del que proyecta, dándole la posibilidad de seleccionar formas por un procedimiento análogo al de la naturaleza. La multiplicación de los modelos, introduciendo en ellos pequeñas variaciones, permite agotar las posibilidades estructurales de las formas anteriores o de las ideadas por el que proyecta.



Se han reducido al mínimo las trabas para la intuición, consolidándose al máximo la firmeza del proyecto, pues descansamos siempre sobre una base científica, real, material, y esto nos permite actuar con audacia prudente.

Claro está que las condiciones son algo diferentes en la realidad y en el modelo, puesto que hay características físicas que no se sujetan a una correlación sencilla e, incluso, muchas veces se trata de un material completamente distinto en el modelo. Esto puede resultar interesante, ya que estamos haciendo un análisis experimental y muchas veces conviene simplificar el fenómeno, prescindiendo de modalidades que lo complican. Por ejemplo, en el caso de modelos reducidos de escayola, ésta se mantiene elástica hasta rotura; en los modelos de caucho conseguimos una deformabilidad mucho mayor, con lo cual se observan mejor los efectos correspondientes a cambios de forma. Pero aún en el caso de mínimas diferencias, cuando el modelo se fabrica con un material semejante al de la estructura, la aplicabilidad de los resultados no es nunca automática y la utilización del experimento requiere una interpretación. Con los datos obtenidos, sometidos a una previa crítica metódica, es preciso reconstruir el fenómeno físico acaecido a nuestro modelo, lo cual exige un criterio del experimentador de laboratorio; pero lo que tiene más gravedad es que los resultados de esta reconstrucción hay que trasladarlos a la estructura real. Aquí el criterio es más difícil e integral, pues hay que poner en juego facultades de experimentador e ingeniero estructural, lo cual no hay que considerar tan extravagante, porque ya hemos dicho que todo ingeniero constructor tiene que ser en cierto modo un investigador.

Insistimos sobre este punto de la necesidad de una interpretación a fondo de los resultados de la experiencia, para no inducir al error de que la experimentación sobre modelo reducido puede improvisarse dada su facilidad y aparente baratura. Simplemente el construir un modelo con pericia material y el poseer unos aparatos de medición (poseer en el sentido de dominar) requiere una larga preparación.

La adquisición de este criterio supone, naturalmente, una experiencia de experiencias, pero de tipo tal que hayan permitido en algún caso llegar a una correlación directa. Es decir, haber cotejado resultados obtenidos en un modelo con los resultados obtenidos sobre el prototipo llevado también hasta rotura. Todo laboratorio requiere un cierto número de experiencias de esta naturaleza básica, aparte del número suficiente de experiencias normales para llegar a dominar aparatos y métodos. La correlación que indicamos tiene su plena eficacia cuando, además de enlazar modelo y prototipo, éste se ha calculado por un método eficaz, con lo cual tenemos un tercer enfoque del problema que nos relaciona el caso aislado de la estructura que estudiamos con toda la teoría de estructuras a la cual pertenece el método de cálculo.

Precisamente, la gran ventaja del modelo reducido es que en los casos de estructuras complicadas llega a ser el único método válido en la actualidad. Cuando se presenta una estructura cuya complicación la hace inabordable a los métodos de cálculo normales, caben dos actitudes del que proyecta: una es la de forzar la estructura cambiándola de forma o sustentación para hacerla abordable al cálculo, o bien forzar éste haciendo grandes simplificaciones en las bases de partida, con lo cual calculamos una estructura distinta que nos dará una indicación grosera de lo que corresponde a la verdadera. Estas dos actitudes ilícitas, especialmente la primera para el ingeniero que proyecta conscientemente, se salvan recurriendo al modelo reducido, en el cual no tenemos que forzar ni lo uno ni lo otro, sino que, por el contrario, con respecto a la estructura podemos mejorar su comportamiento estudiando en modelos sucesivos su mejor adaptación, no al cálculo, sino a su funcionamiento estructural.

Como en el modelo reducido tenemos una verdadera maqueta de la estructura, su papel principal de permitir el estudio resistente de la misma se complementa en otros dos aspectos que son también muy interesantes. El primero corresponde a su utilidad como maqueta arquitectónica, es decir, del aspecto que va a presentar la construcción definitiva, lo cual permite observar ciertos detalles que no ponen de relieve los planos, como son, por ejemplo, los encuentros de elementos (especialmente si se trata de estructuras oblicuas), los cuales pueden retocarse mejorando la estética de nuestra obra. En este mismo papel de maqueta puede servir para estudiar otras características arquitectónicas, como la distribución de luz en naves industriales, completando la maqueta de la estructura con el relleno que totaliza la obra.

El otro aspecto utilizable del modelo reducido es su propia construcción, que nos permite estudiar los problemas que se van a presentar en la obra, como son, por ejemplo, los relativos a encofrados, armaduras, juntas de construcción, manejo de elementos prefabricados, etc.

Después de esta introducción sobre la evolución de la Empresa Constructora, y del estado actual del método experimental en el cálculo de estructuras, permítasenos al de más edad de los que firmamos el artículo narrar brevemente su pequeña odisea en el ámbito de los laboratorios.

Al orientar nuestra actividad profesional hacia la construcción nos dimos cuenta de que para entrar a fondo en ella se precisaban tres vías de acceso: la primera, naturalmente, construir; la segunda, estudiar, cuanto más mejor, la teoría de estructuras; y la tercera, la del método experimental. La puerta de acceso a la primera vía me fue fácil encontrarla; en la segunda, estaba ya desde la etapa escolar; y, en cambio, llegar a la tercera me ha sido verdaderamente difícil: y cuando llevaba ya casi treinta años de vida profesional.

La decisión data del año 1930, y en ese mismo año, aprovechando un viaje al extranjero, recorrí los laboratorios de fotoelasticidad europeos, que casi empezaban por entonces. Resultado: una Memoria al Director de nuestra Escuela, y en viajes sucesivos las gestiones para la adquisición de un aparato que llegó a España en 1935, pero que no se utilizó, puesto que el lapso de nuestra guerra hizo que el sistema de nicols para obtener el análisis por luz polarizada quedase desbancado por el de los *polaroides*, el cual es el del aparato definitivo del Laboratorio de la Escuela.

Un segundo intento de organizar laboratorio corresponde a los años 1943-1946, consiguiendo, entonces, un segundo aparato de fotoelasticidad, éste ya de *polaroides*, para el Laboratorio de la Dirección de Aeropuertos del Ministerio del Aire.

En el primer puente que construimos (Puerta de Hierro, año 1933) coincidiendo con el primer ataque hacia los laboratorios, tuvimos la buena intención de hacer investigaciones experimentales, y en algunos de los capiteles de las columnas aparecen marcas indicando la situación de los hierros para poder llegar hasta ellos con extensímetros. En el puente de El Pardo (año 1935-6), que es el segundo que construimos, dimos un paso más, y realizamos una instalación bastante completa de auscultadores Icon, pero no conseguimos la apisonadora necesaria para materializar la sobrecarga, viniendo después la guerra con la inutilización de toda la instalación.

En el segundo ataque hacia los laboratorios, ya mencionado, conseguimos construir ex profeso, para probarla hasta rotura, una viga Vierendel de 15 m de luz, de hormigón armado, con una instalación también Icon de auscultadores, flexímetros y clinómetros y gatos para materializar las cargas. En este caso, fueron dificultades burocráticas de personal subalterno las que impidieron obtener fruto de todo este esfuerzo.

El tercer ataque ha dado por fruto el laboratorio que es objeto de este artículo, y que está en funcionamiento desde el año 1952.

Puntos de vista seguidos en la organización del laboratorio

Tratándose del laboratorio de una Empresa Constructora, es lógico que los puntos de vista que nos han guiado en su organización han sido bastante particulares, pues en primer lugar, no conocemos ningún laboratorio análogo, lo cual no quiere decir que neguemos su existencia.

Al constructor se le presentan problemas muy concretos y, en general, con carácter urgente. Si tiene que decidir sobre una estructura importante en un Concurso de Proyecto-Construcción, necesitará saber a qué atenerse en un plazo relativamente corto.

Otra característica es que el constructor importante ha de proyectar estructuras en competencia y, por consiguiente, afinadas, audaces. Ya hemos visto también cómo lo económico, que es el factor que perfecciona lo técnico, presiona más a la Empresa que a la Administración. Estas estructuras audaces llevan, por consiguiente, un riesgo superior al normal en construcción, riesgo que, por otro lado, jamás puede eliminarse. El constructor de categoría ha de ir en vanguardia, pero tiene que darse cuenta que esto supone extrapolar en los términos de la serie que forman las sucesivas estructuras de un determinado tipo. Extrapolar significa salirse del cómodo descansar sobre la afirmación de todas las estructuras de ese tipo que permanecen en pie, dándonos pie para estar tranquilos. Mediante la interpolación nos movemos en un terreno conocido; pero si damos un paso más allá entramos en lo desconocido y, a veces, se extrapola en varias direcciones, lo cual nos lleva a un desconocimiento total de la distancia a que estamos de ese terreno firme. Creemos que los estudios del coeficiente de seguridad y en las consecuencias de aplicabilidad numérica que se han deducido de ellos, no se ha prestado la suficiente atención a esta diferencia entre interpolar y extrapolar.

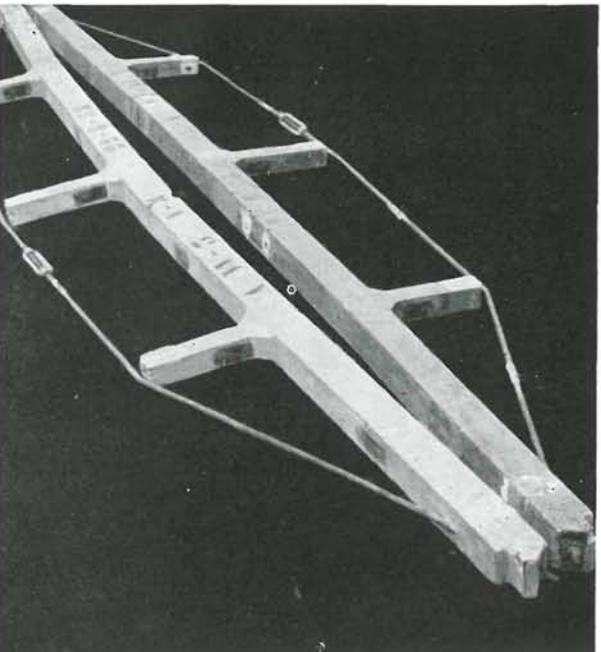
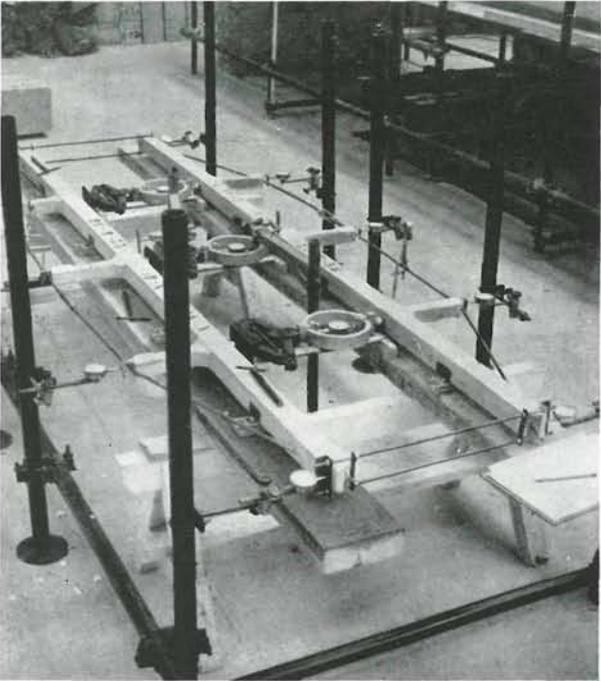
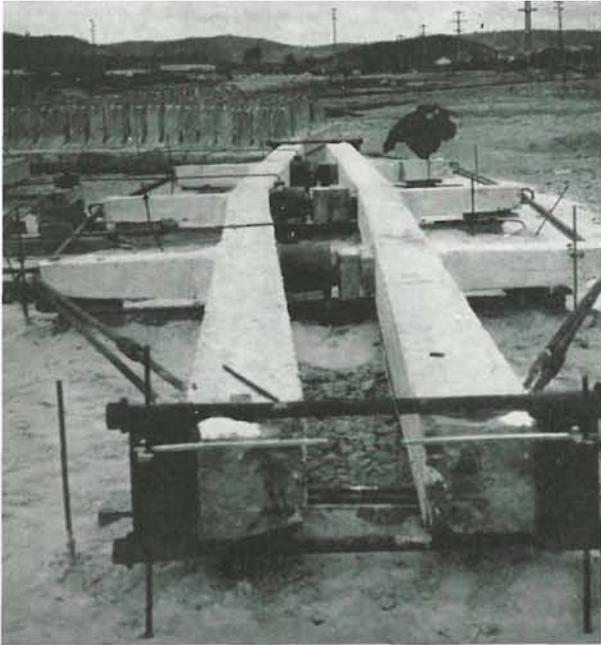
El Ingeniero constructor que por la índole de su oficio está muchas veces encima o debajo de las estructuras que ha proyectado, adquiere un sentido casi fisiológico de lo que es el coeficiente de seguridad. Es la conciencia permanente del riesgo, y esto le educa para que a la hora de proyectar lo haga con atrevimiento, pero con atrevimiento consciente, con audacia, pero con audacia prudente. Y para adquirir la responsabilidad que corresponde a esta actitud, lo más eficaz es acudir hasta las cosas mismas, o las más próximas a ellas, que en nuestro caso son los modelos reducidos de las propias estructuras. Y de esta relación en definitiva sacar un resultado tangible, que es precisamente el coeficiente de seguridad.

Por estos motivos hemos enfocado el laboratorio hacia los modelos reducidos estructurales, del mismo material de nuestras estructuras, es decir, de mortero armado u hormigón de árido fino, cuando se trata de estructuras de hormigón armado. En el análisis de un modelo reducido de esta especie se elimina lo mínimo de las relaciones de homogeneidad con la estructura real, y, por lo tanto, el sacrificio del modelo que rompemos para que no le pase otro tanto a nuestra estructura es verdaderamente propiciatorio.

Los motivos que acabamos de exponer nos han dispensado de importar el tercer aparato de fotoelasticidad como parecería lógico en la trayectoria descrita. Además, consideramos que el actual de nuestra Escuela funciona con plena eficacia, y a él recurriremos cuando de un modo extraordinario necesitemos sus servicios.

La normalidad de nuestro laboratorio es actuar sobre modelos, pero sin perder ninguna ocasión que se presente para actuar sobre las estructuras reales. Estas nos dan la experiencia efectiva y básica permitiéndonos restablecer la correlación que necesitamos entre estas dos series de fenómenos físicos, de los cuales es preciso no olvidar que son correlativos, pero no idénticos.

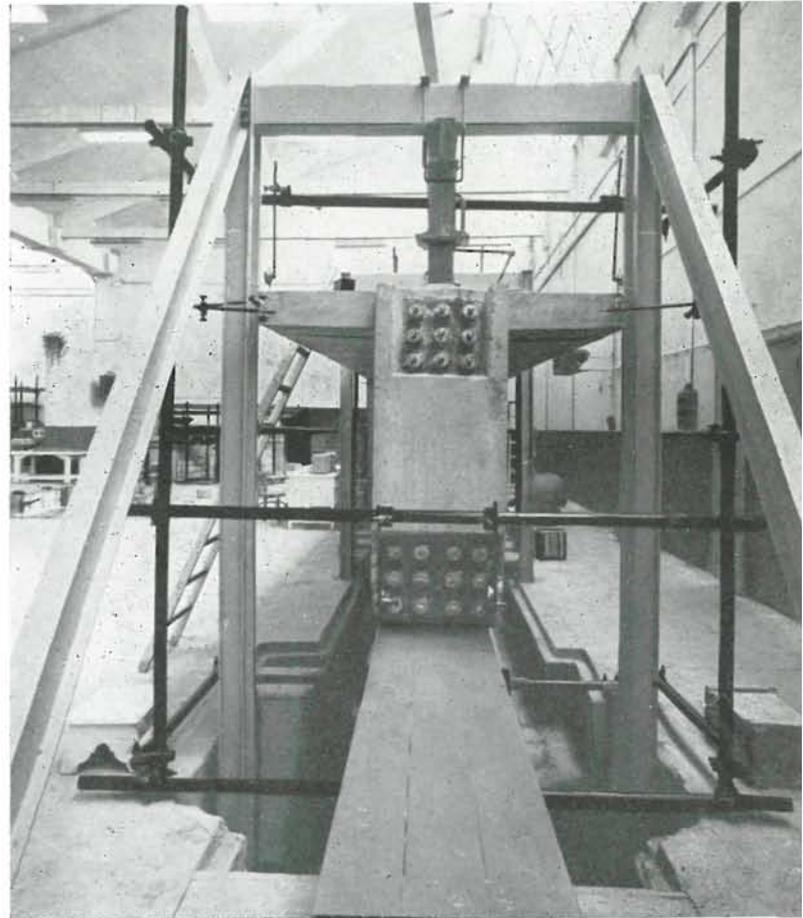
Para completar la definición de este laboratoriodiremos que con él hemos conseguido frenar la apatía del Ingeniero constructor de experimentar en la obra misma, lo cual, como decíamos, es oneroso y puede ser nefasto.



Experiencias llevadas a cabo

Las experiencias básicas del laboratorio han sido las de las vigas de cubierta de Avilés, las de las vigas de cobertura de la estación subterránea del Paseo de Gracia, en Barcelona, y las de las grandes vigas pretensadas para puentes grúas del Taller de Laminación de Avilés. En la primera se estableció correlación entre: la estructura real, probando hasta rotura dos vigas de las construídas para la cubierta del taller de laminación de ENSIDESA, varios modelos reducidos de hormigón armado y de escayola de las mismas, y los cálculos que se habían llevado a cabo con gran detalle y varias hipótesis de comportamiento (figuras 1 a 3). Previamente a la adopción de esta solución estructural se probó en los talleres de la Empresa una viga a tamaño natural (luz de 14 m), improvisando un

1



2

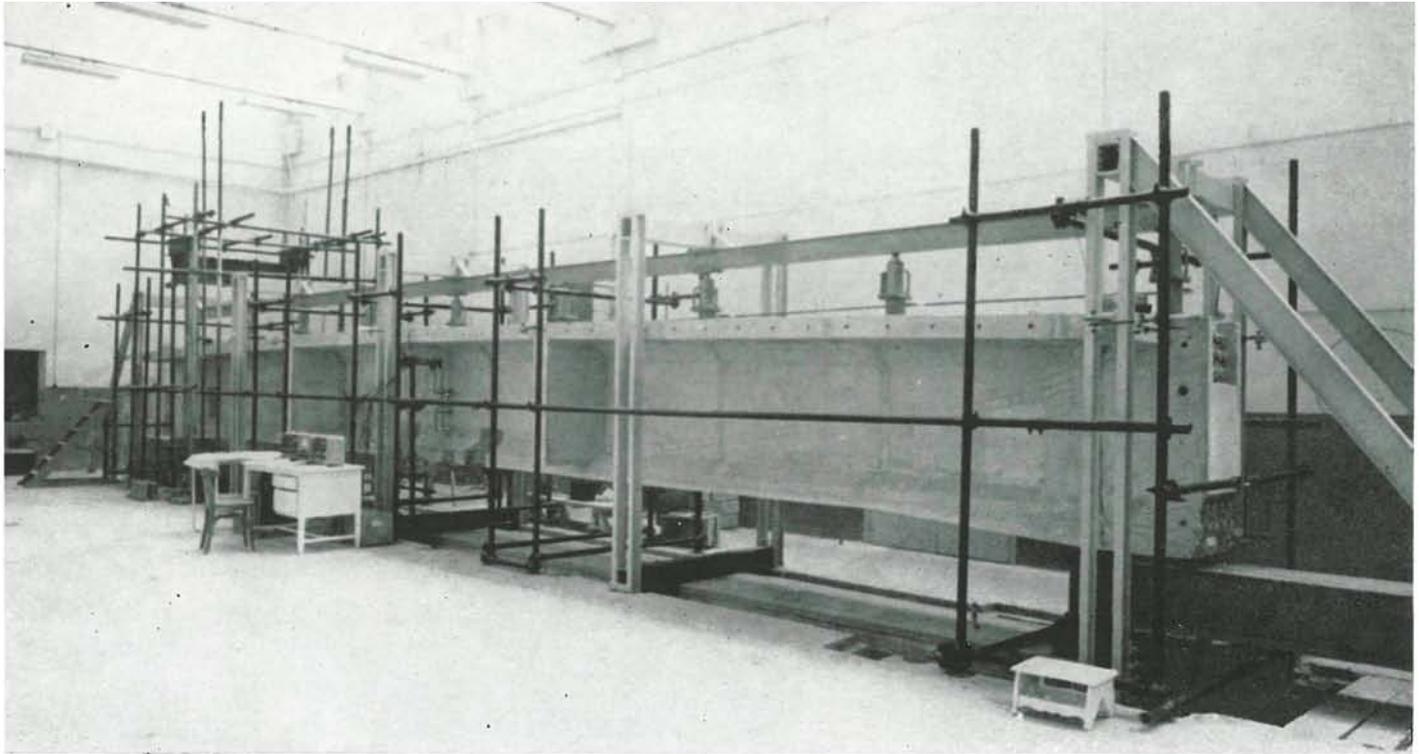
Vigas de cobertura de la estación del Paseo de Gracia. Detalle de la aplicación de las cargas.

4

dispositivo para la carga mediante sacos. Las dificultades con que se tropezó en esta experiencia, anterior a la creación del laboratorio, determinaron la ejecución de una viga pretensada (sistema Barredo) de 16 m de longitud, que sirve de banco de prueba.

3

Vigas de cubierta de Ensidesa (Avilés).
Experimentación en obra.
Experimentación en modelo reducido.



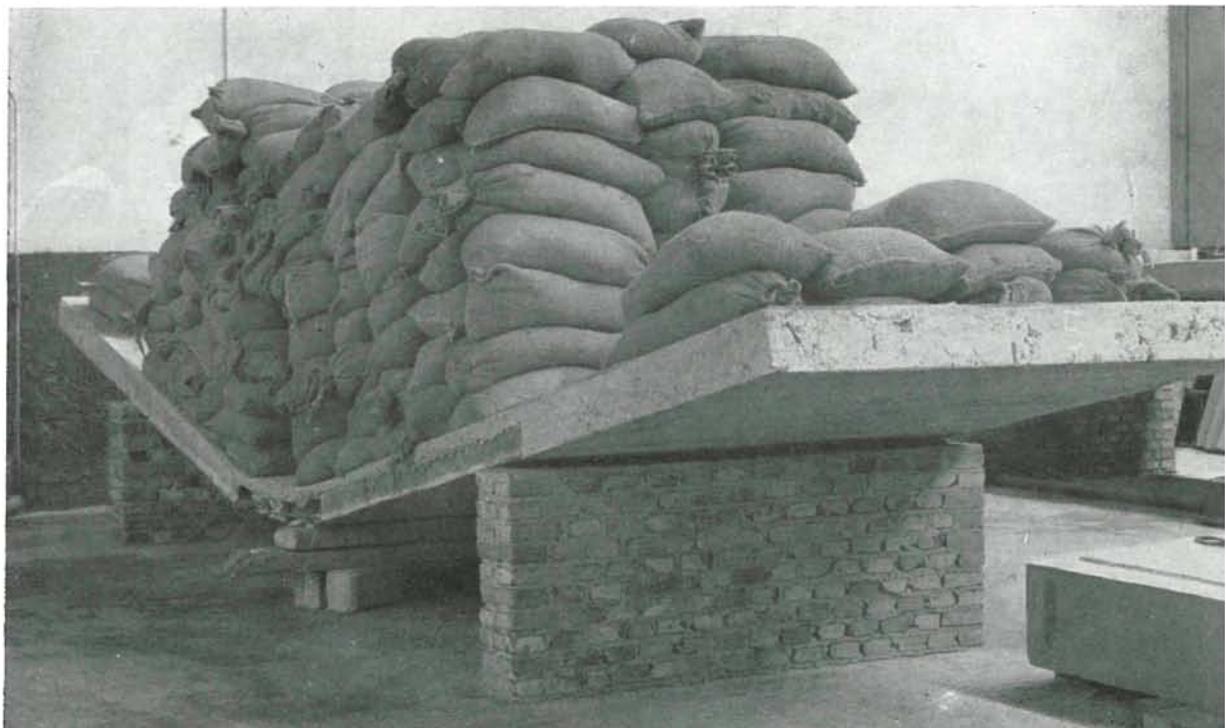
5

Viga de cobertura de la Estación del Paseo de Gracia: Disposición de los ensayos.

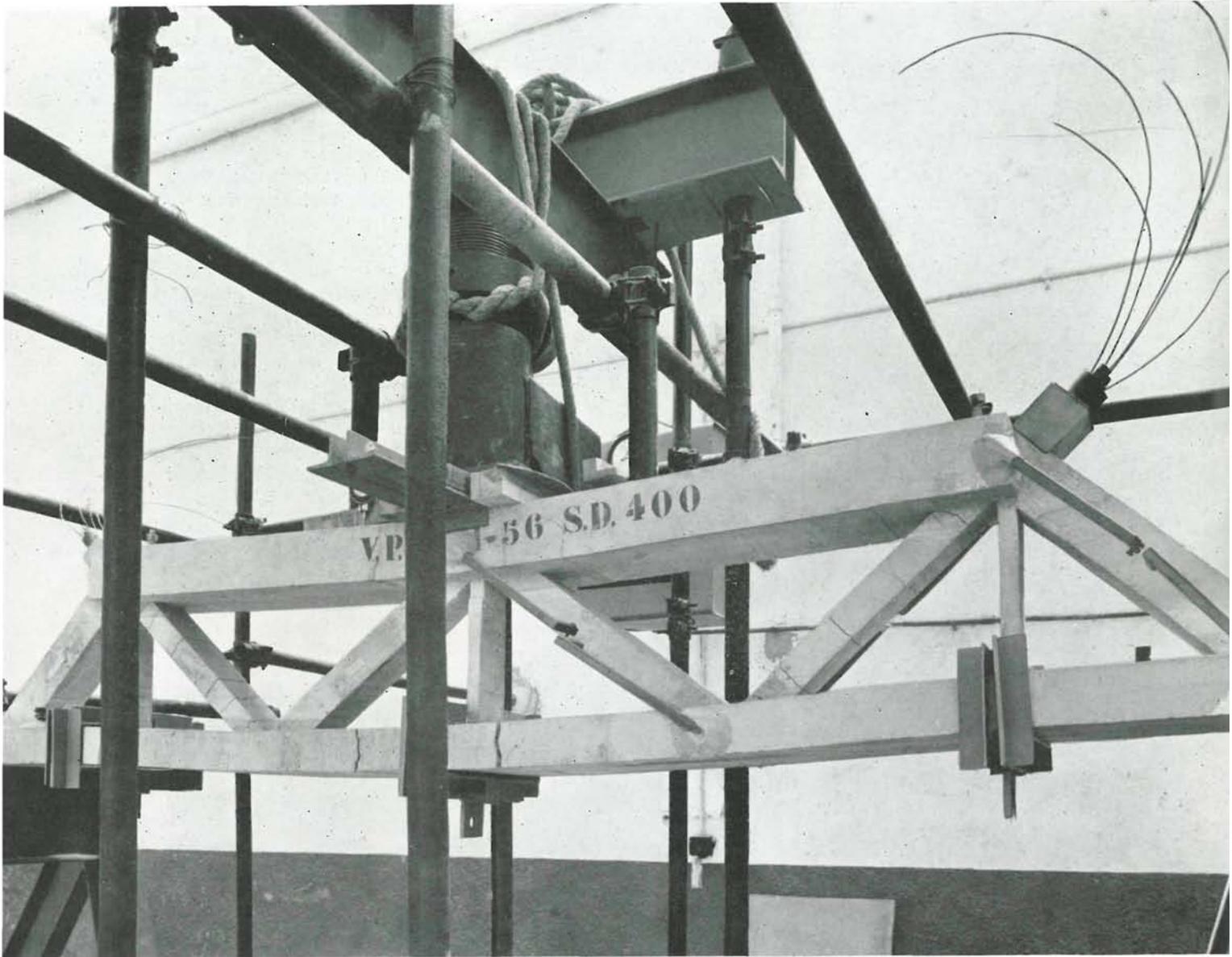
En ella se apoyan los elementos de gran luz transmitiéndoles las cargas mediante gatos, a través de pórticos que se anclan en la cabeza superior de dicha viga, que es de sección doble T (fig. 4).

Esta viga-banco se ha utilizado en toda su amplitud para las pruebas de la viga de la estación subterránea de Barcelona, que tenía una longitud ligeramente superior (15,60 m) y que se probó hasta rotura. La Administración resolvió hacer este ensayo antes de adoptar definitivamente la solución de nuestro proyecto, sirvió además para poner a punto los detalles constructivos del manejo y empalme de las dovelas, enhebrado de cables, tesado de los mismos, etc.

6



Ensayo de rotura de un forjado de elementos Prefabricados cerámicos.



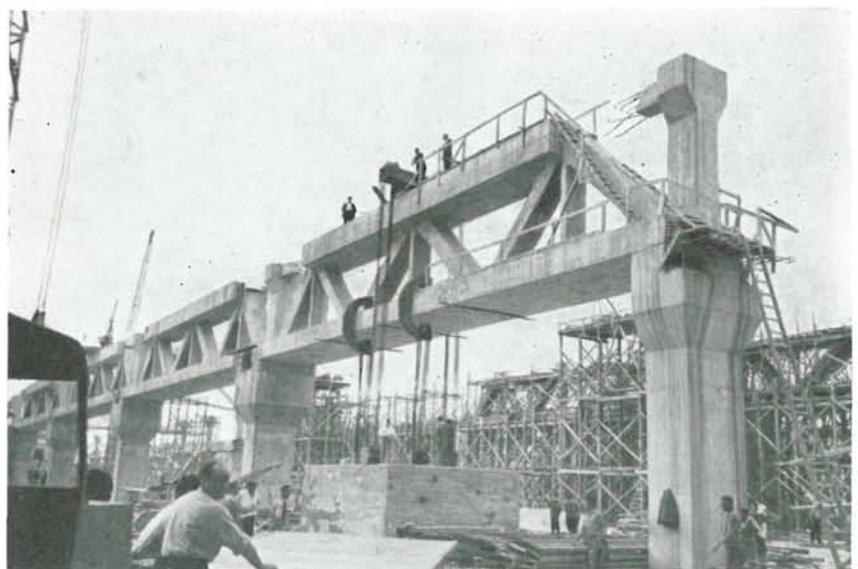
7

El programa de pruebas consistió en observar el comportamiento hasta las cargas de servicio, correspondientes al paso de tanques de 60 t en cuatro filas perpendiculares al eje de la viga, continuando después hasta rotura, que se obtuvo materializando cuatro cargas simétricas centrales. Se midieron flechas, inclinaciones de las extremidades y deformaciones unitarias en sección central (figs. 4 y 5).

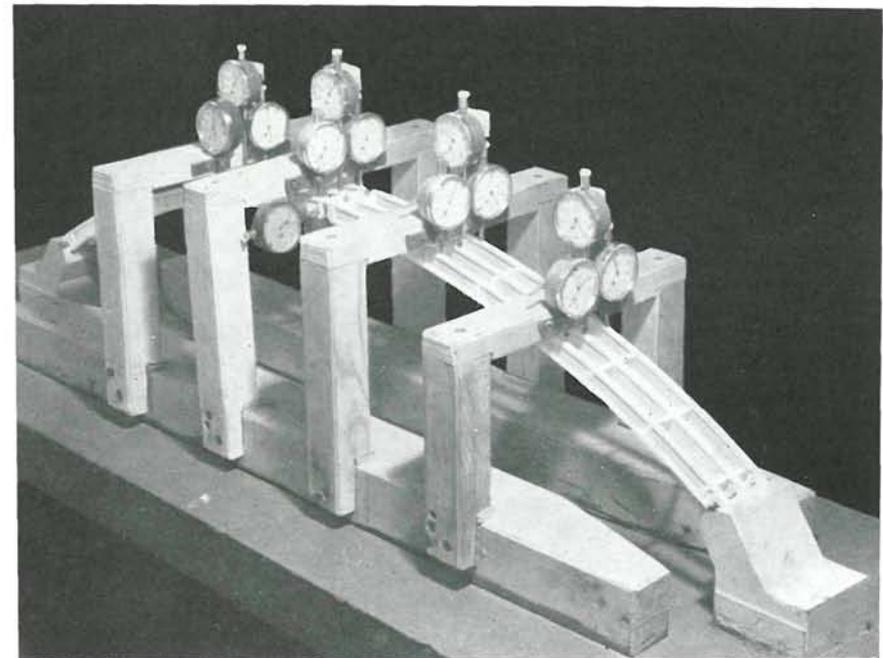
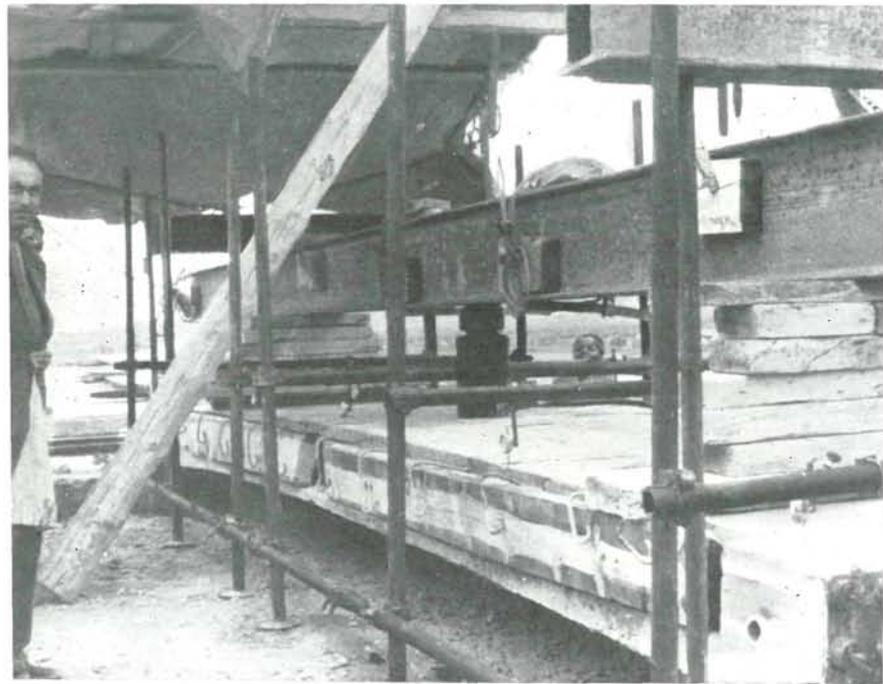
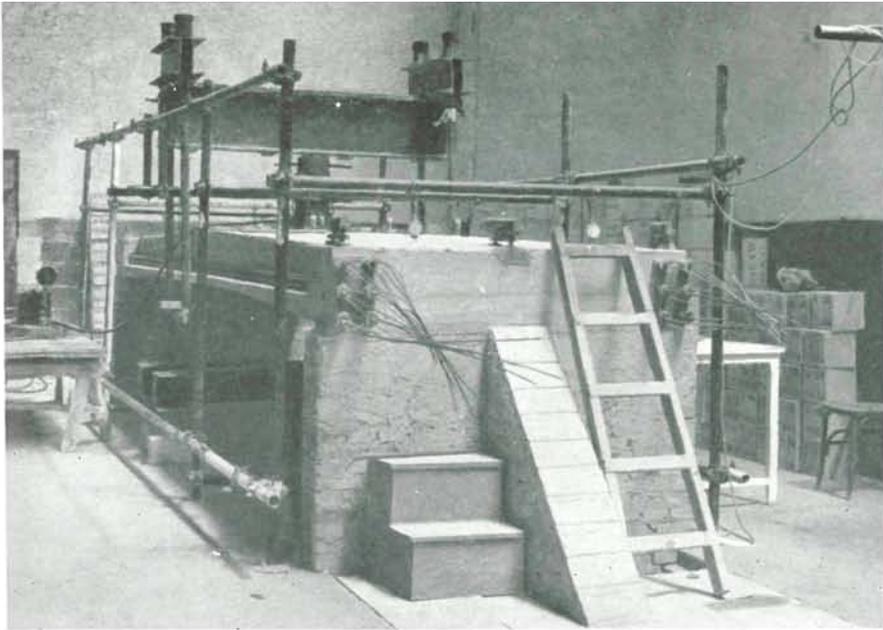
Vigas pretensadas de la nave de laminación de Ensidesa:

Ensayo en modelo reducido.

Ensayo en obra.



8



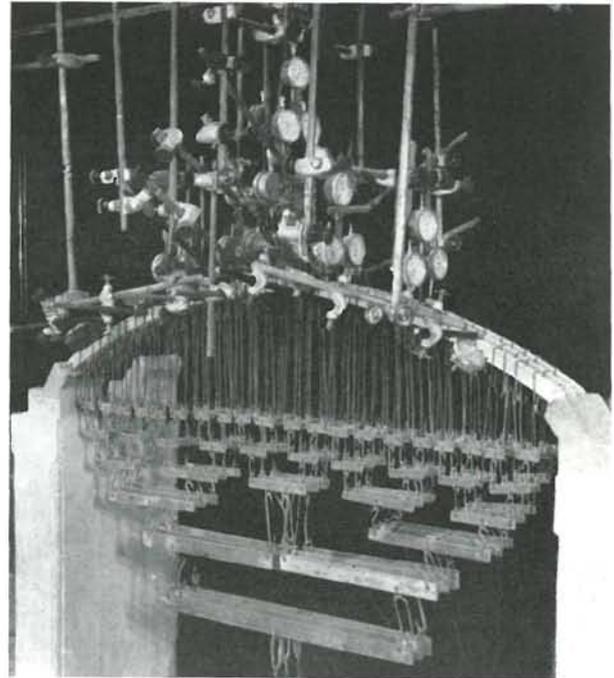
9

Una serie de ensayos, también en tamaño natural, son las pruebas de forjados, ya que todo nuevo forjado que va a ser utilizado por la Empresa se ensaya hasta rotura midiendo flechas y deformaciones unitarias en recuadros de dos vanos o de un vano con voladizos (fig. 6), para obtener condiciones de continuidad.

En las vigas pretensadas de Avilés, de tipo reticular, con dos cordones que soportan el superior todas las cargas de un par de arcos de cubierta (unas 220 toneladas) y el inferior los puentes-grúas de ambos lados (hasta 120 toneladas), la correlación se estableció entre los ensayos de modelo reducido (dos ejemplares), el cálculo llevado por el método de Cross para estructuras espaciales y una prueba de carga en obra para condiciones de servicio (figs. 7 y 8).

10

12



Puente de Mérida:

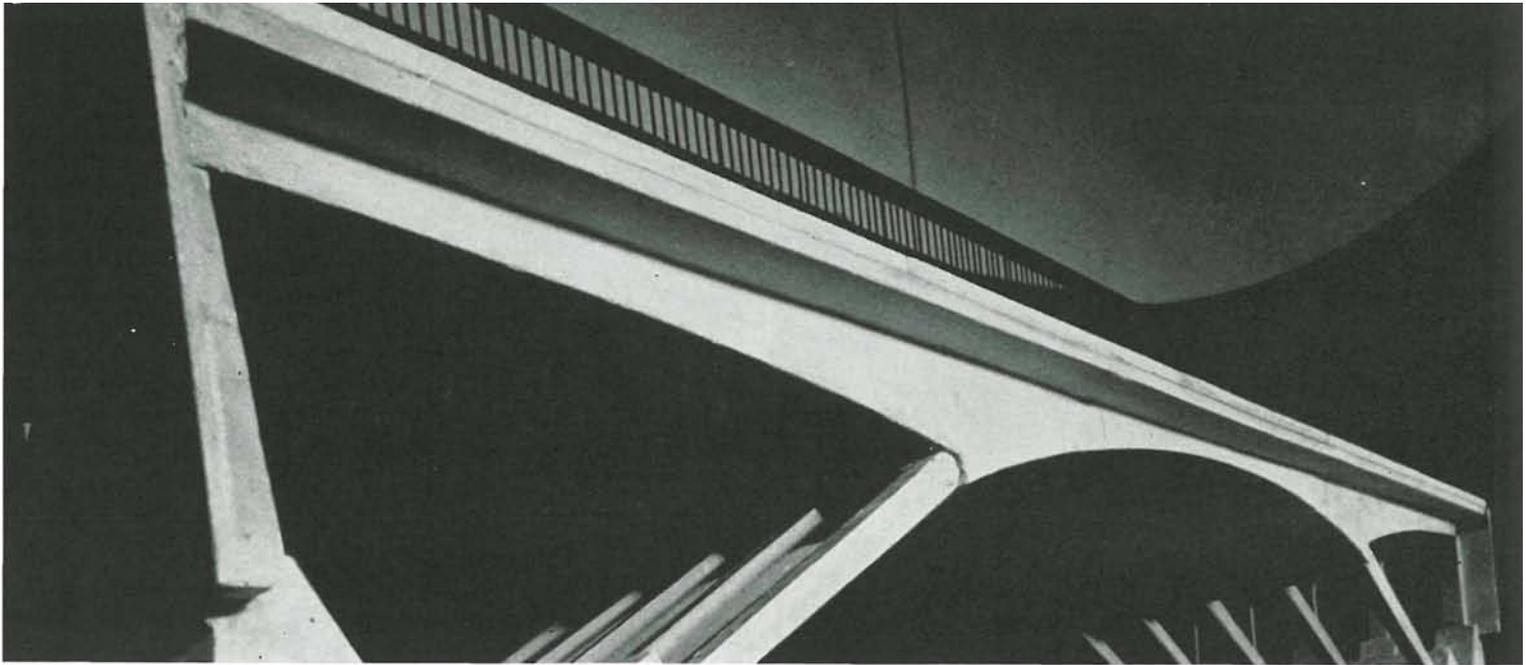
Ensayo de una pretensada en Laboratorio.

Ensayo de una losa pretensada en obra.

Ensayo de los anillos autocimbra: Modelo de escayola.

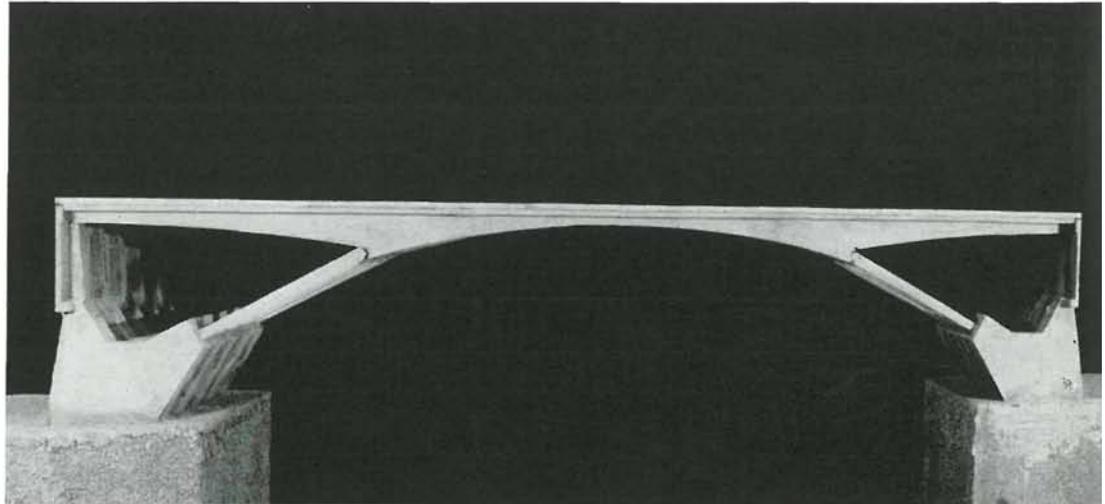
Modelo de mortero armado.

11

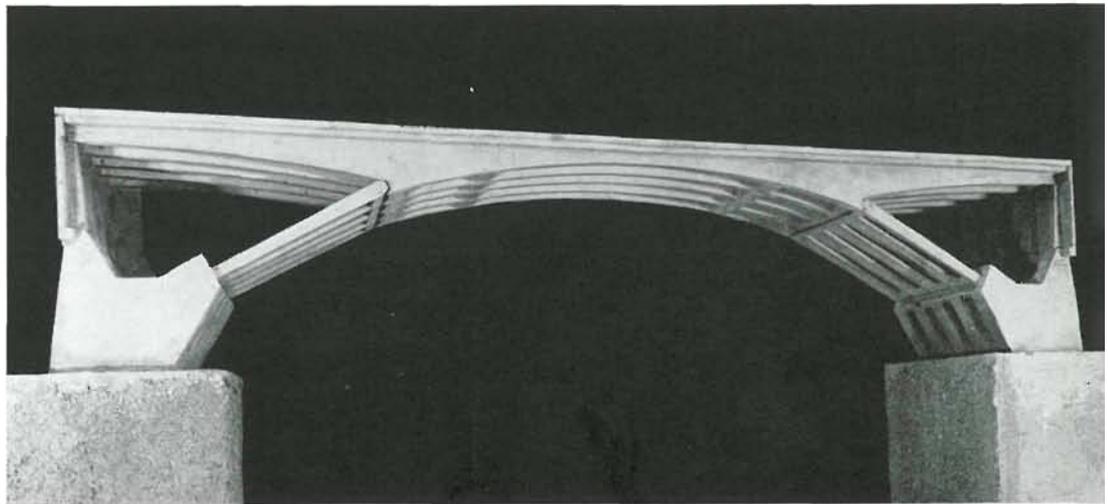


13

Otro ensayo de prototipo fue el de las losas para cubrir el hueco longitudinal entre bóvedas del puente de Mérida. En este ensayo se probó un elemento previo a la construcción, manteniéndose en observación durante un periodo de días, en el cual se observó el comportamiento de la losa para cargas de servicio (10 toneladas). Al final, aumentando la carga aplicada, se llegó al agotamiento: primero, sin relleno de las zonas de enlace de los elementos y, después, con el hormigonado que correspondía a la estructura terminada (fig. 9).



14



15

Puente de La Chantrea:

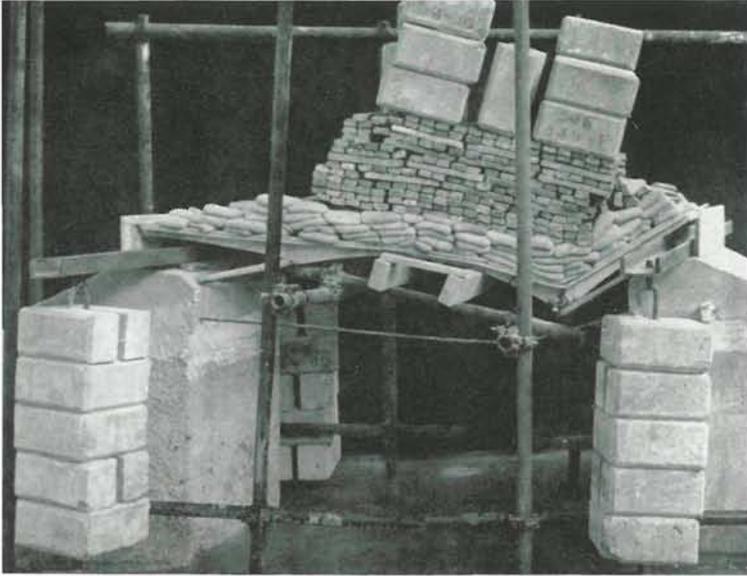
El modelo reducido como maqueta arquitectónica.

Vista frontal del modelo.

Obra vista del modelo.

16

Puente de La Chantrea: El modelo con la carga que produjo la rotura.



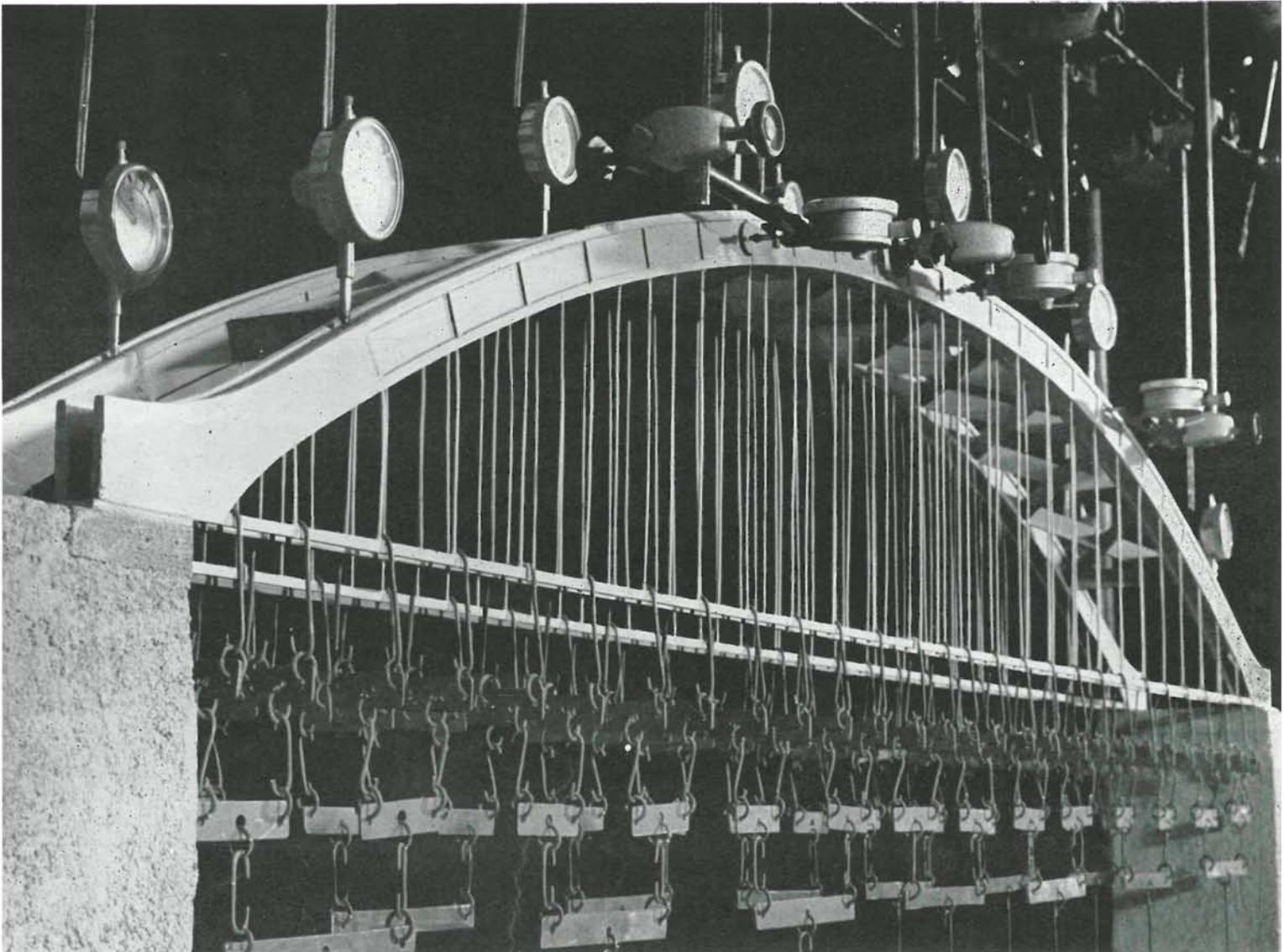
17

Puente de La Chantrea: Detalle del estado del nudo externo en la zona arruinada.



18

Puente del Río Tinto: Disposición de cargas y de medidas para el estudio de la estabilidad de montaje.



Complementario de este ensayo fue el llevado a cabo en la obra con tres de las losas construidas (el 1 %, aproximadamente, del total), que también se probaron hasta rotura en las mismas condiciones que la del laboratorio antes y después de rellenar las zonas correspondientes al empalme (fig. 10).

En el ramo de puentes tenemos los ensayos de repartición de cargas entre los anillos autocimbras del mismo puente de Mérida, estudiando además su estabilidad de montaje al progresar el hormigonado de las bóvedas. Estos ensayos empezaron con modelos de escayola, dado el gran número de ejemplares que había que ejecutar; pero vista la maestría con que los obreros realizaban los modelos de mortero armado, nos decidimos definitivamente por este procedimiento (figs. 11 y 12).

Un ensayo de puente muy completo y de gran interés, puesto que es uno de los casos donde el cálculo analítico resulta muy complejo, corresponde al puente de La Chantrea sobre el Arga, en Pamplona (fig. 13), donde la gran oblicuidad complicaba el comportamiento resistente de una estructura ya complicada de por sí, intermedia entre la viga continua con pilares inclinados y el arco de cuatro articulaciones con prolongaciones del dintel apoyadas en sus extremos. Se estudió el comportamiento con cargas de servicio, se trazaron las líneas de influencia de las secciones características en las distintas vigas y se llevó el ensayo hasta rotura, primero con carga total y, al final con carga asimétrica, llegándose a determinar el coeficiente de seguridad más desfavorables (figs. 14 a 17). En este caso donde los encuentros de los elementos se complicaban por la oblicuidad, tuvo mucho interés el comprobar su corrección en maqueta, introduciendo algunas variantes pequeñas que mejoraron notablemente el aspecto. También sirvió como enseñanza para los técnicos y encargados que habían de llevar la obra, al ver cómo se ejecutaban los distintos elementos, enterarse de cómo eran y estudiar con anterioridad el modo de resolver encofrados, colocación de armaduras, juntas de hormigonado, etc.

Otro ensayo del ramo de puentes fue el de la estabilidad de montaje de los anillos prefabricados de la solución de tramo en arco único atirantado en el puente del río

Tinto (fig. 18). También pertenece a ese ramo la viga de cobertura de la Estación subterránea de Barcelona, pues las sobrecargas son trenes de tanques de la Instrucción de Carreteras.

En vigas para grandes cargas de características muy próximas a las de los puentes tenemos, además de la viga, pretensada que hemos descrito al principio, y que fue decisiva para la construcción de un gran número de vigas iguales y otras ligeramente diferentes, otra gran viga triangularada con el cordón inferior pretensado, también para el taller de laminación de ENSIDESA, cuyas características eran extraordinarias no sólo por las cargas, sino por las dimensiones y la asimetría de las mismas, respecto al plano axial. Se realizó el modelo con la misma técnica y elementos que en la otra viga, sometiéndose a prueba de cargas sucesivas, tomándose los resultados en clinómetros, flexímetros longitudinales y transversales y bandas extensométricas (figs. 19 y 20). Un método se sometió a cargas crecientes hasta rotura, aumentando las cargas permanentes y las sobrecargas, llegándose a un coeficiente de seguridad de rotura respecto al conjunto de ambas acciones. A la nueva de la primera viga donde el cálculo era complicado, pero accesible y satisfactorio, en el caso de ésta no había un cálculo del mismo tipo y había que aventurarse en hipótesis aproximadas.

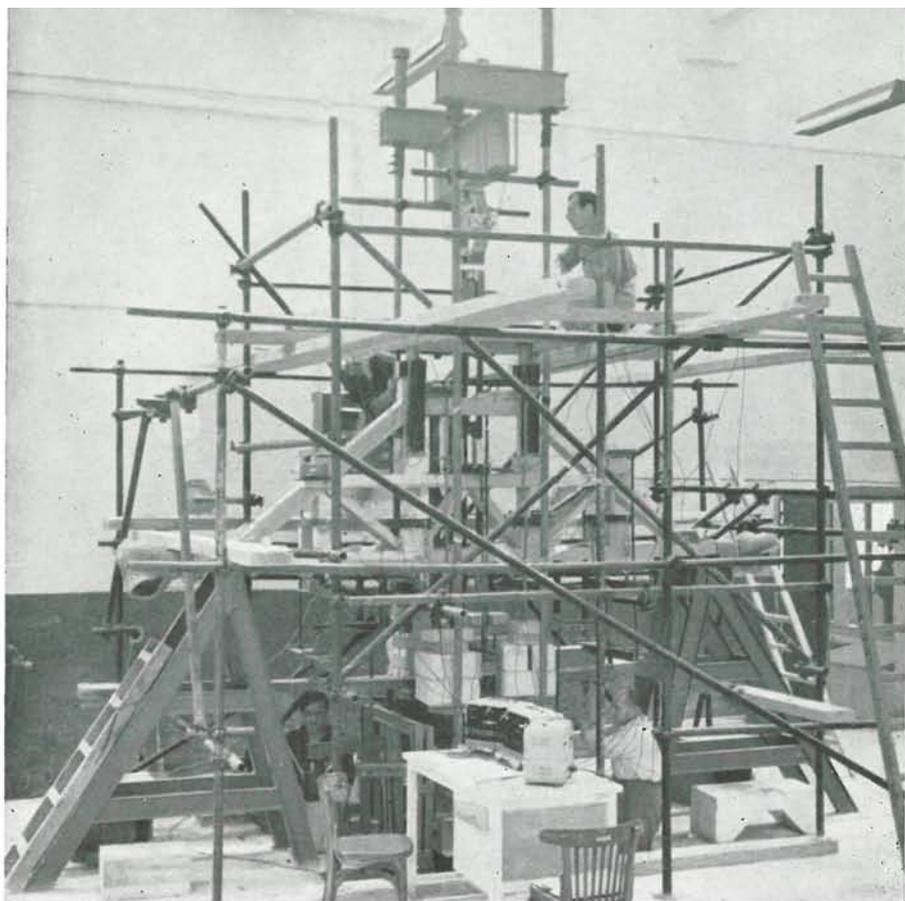
En estructuras de cubiertas, una de las primeras estudiadas fue la de los talleres de Metalúrgica Santana, con dientes de sierra, organizados en vigas longitudinales de cumbrera y canalón que descansaban sobre pilares en Y, teniendo sección en T asimétrica, que trabajaba además en flexión oblicua dada la disposición inclinada de sus ejes elásticos. Se hizo un modelo de tres vanos en dos dientes completos, prolongando las vigas en voladizos para conseguir condiciones análogas a las de continuidad (figura 21).

En las cubiertas de la nave de laminación de ENSIDESA, otra experiencia de interés fue la del estudio de la estabilidad transversal durante el montaje, siguiendo la misma técnica que en los anillos autocimbras del puente de Mérida y después en los arcos del puente del río Tinto (figura 22).

Disposición de cargas y medidas en el modelo reducido para la viga de Ensidesa.

El conjunto más completo y sistemático de experiencias sobre estructuras de cubiertas, es el de bóvedas laminares, iniciado en 1955, con una cubierta en casquete de paraboloides apoyada sobre tres puntos del tipo tortuga, lanzada a la arquitectura moderna por Saarinen y Whitney. La estructura correspondiente no llegó a construirse y los ensayos de viento no se terminaron, pero está destinada a ello cuando haya un claro en los trabajos del laboratorio (figuras 23 y 24).

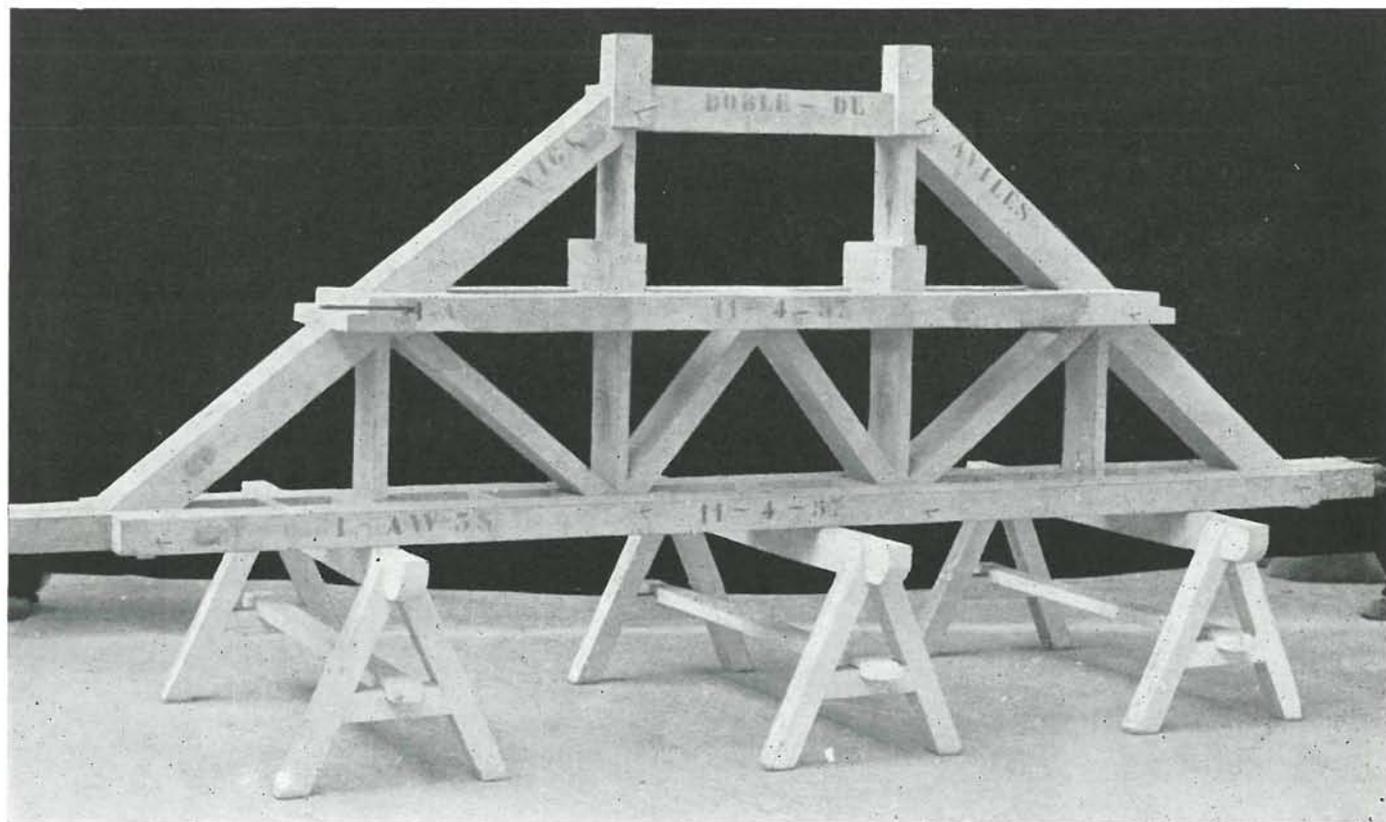
La segunda estructura laminar estudiada fue la correspondiente a la cubierta de la Escuela de Formación Profesional Acelerada en Barcelona, con un desarrollo de dos dientes y tres vanos continuos.

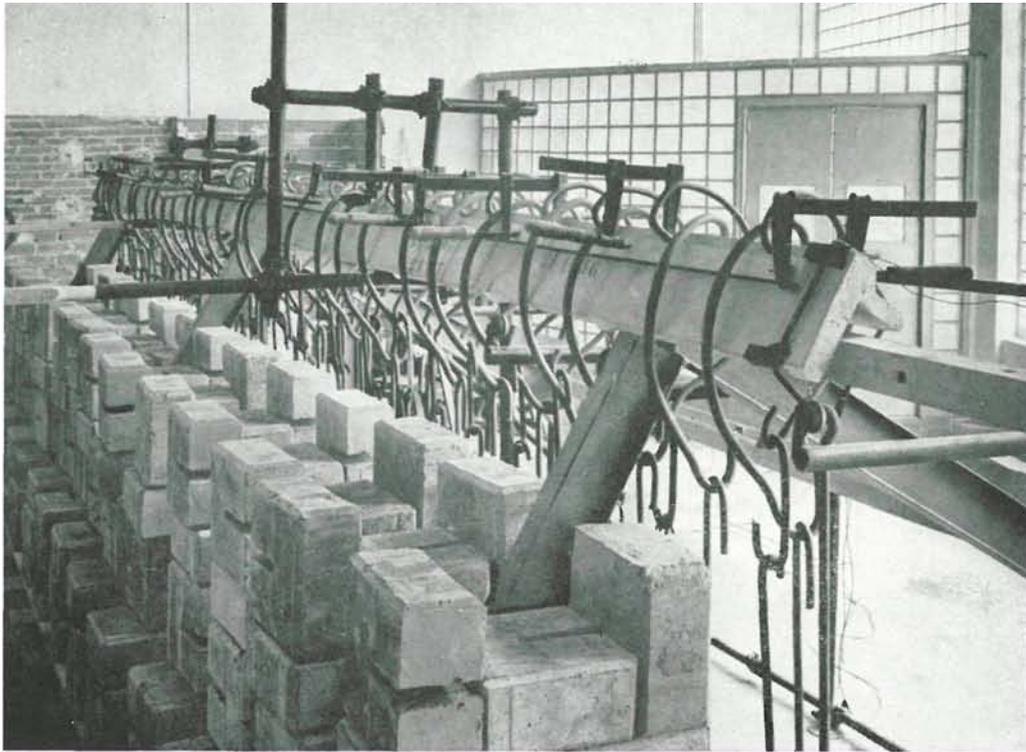


20

Modelo reducido: Viga del departamento de Blooming de Ensidesa (Avilés).

19



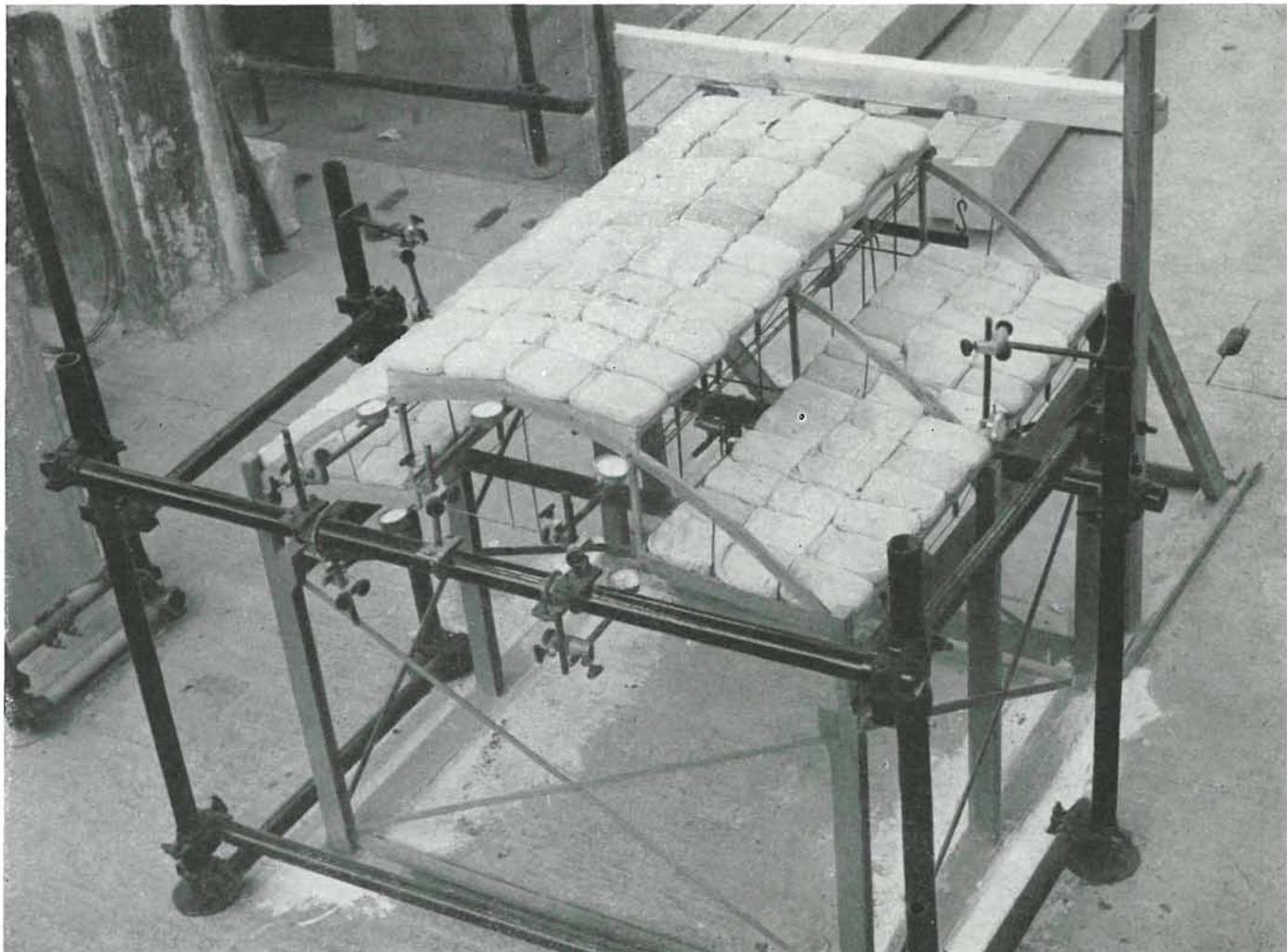


Modelo reducido de las vigas cumbreira y canalón en la cubierta de dientes de sierra de Metalúrgica Santana (Linares).

En realidad, era una estructura de tipo muy normal con cálculo perfectamente accesible, aunque siempre hay opción para enfocar la continuidad por varios caminos. Precisamente esta circunstancia y el encajar la experiencia en el plan sistemático de estructuras laminares, nos impulsó a aprovechar la oportunidad de podernos referir a una estructura real y estudiarla en modelo reducido, que, además nos sirvió de maqueta para la visión arquitectónica y para el estudio del reparto de iluminación (figuras 25, 26 y 27).

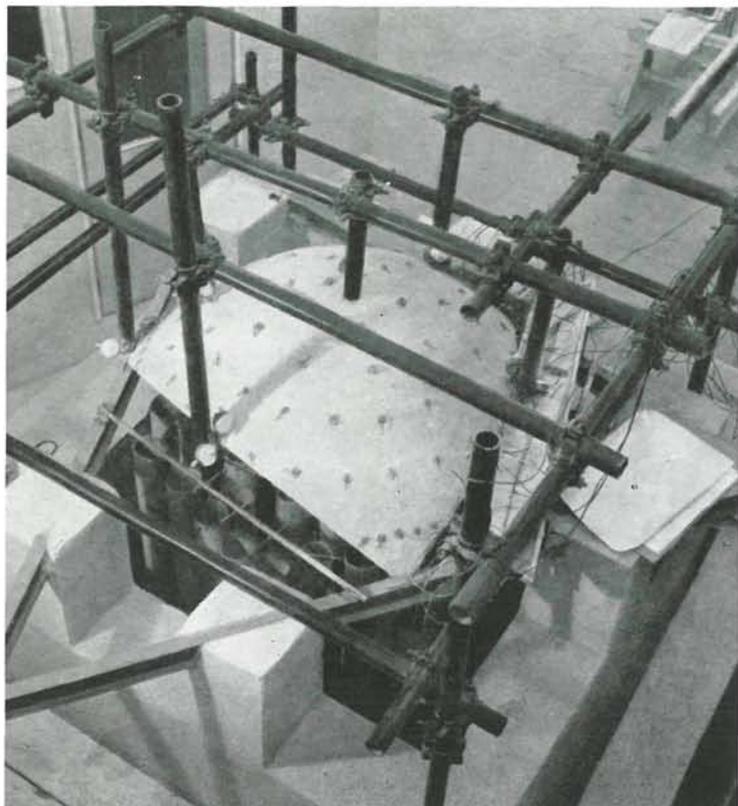
21

Modelo reducido para estudio de la estabilidad de montaje de la cubierta de la nave de laminación de Ensidesa.



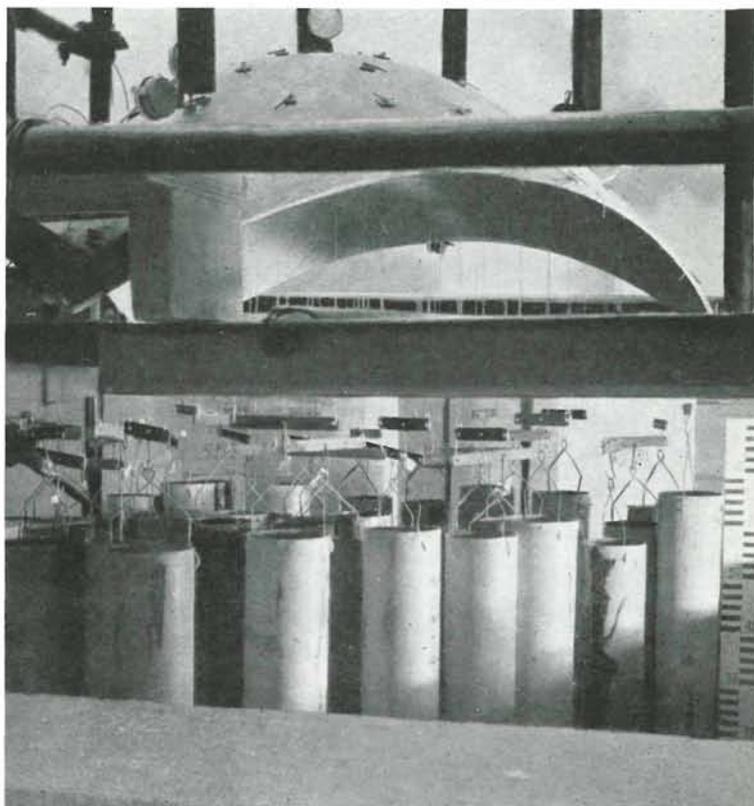
22

Modelo reducido de una cubierta en parabolóide apoyado en tres puentes.



23

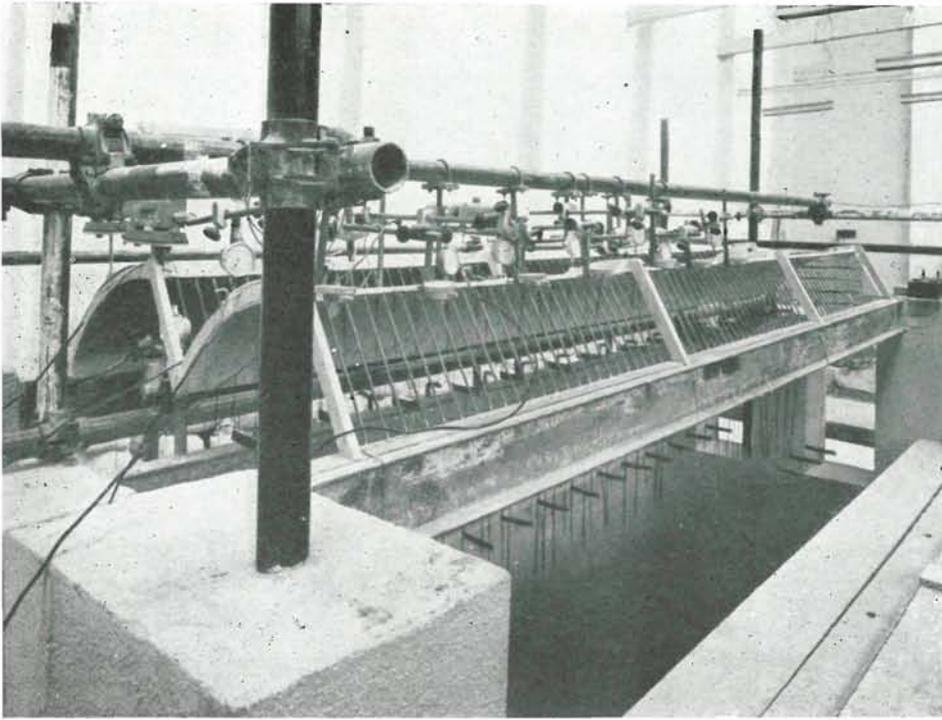
Detalle de la disposición de cargas en el modelo de cubierta en parabolóide.



24

Las experiencias se continúan con el estudio de bóvedas laminares, habiendo empezado por las cilíndricas, las cuales nos permiten coordinar el cálculo analítico y los resultados del modelo, y estando en desarrollo el programa completo de éstas con bóvedas horizontales, bóvedas inclinadas en una de las dos direcciones, vanos continuos en uno y otro caso y condiciones de borde diferentes. En todas ellas—como decíamos antes—el cálculo es en la actualidad perfectamente válido, y esto nos permite una interpretación correcta de los resultados de los ensayos. Siguiendo nuestro programa al complicar las formas de las bóvedas, dejará de ser verdad lo que decimos del cálculo y, entonces, tendremos que seguir apoyándonos más sobre los resultados de la experiencia para llegar a poner a punto este último método, que es un auténtico método de cálculo, para recurrir a él como único válido cuando se trate de formas de bóvedas muy complicadas determinadas por condiciones derivadas del funcionamiento del edificio, o simplemente, de razones puramente arquitectónicas, tan lícitas como las anteriores.

Para terminar de exponer las funciones de laboratorio, nos quedan dos actividades contrapuestas: los ensayos de probetas para el control sistemático de todos los hormigones que se realizan en la Empresa y la investigación de temas más generales para contribuir al esclarecimiento de algunos problemas actualmente planteados en hormigón armado y hormigón pretensado.

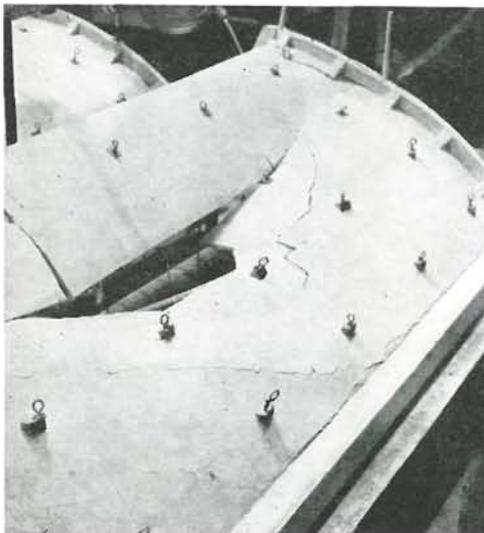


En estas últimas hemos iniciado el estudio hasta rotura de vigas de un solo vano con distintos tipos de armaduras, que van a ampliarse a las de dos vanos para analizar la influencia del hiperestatismo en la fase anelástica del comportamiento hasta rotura.

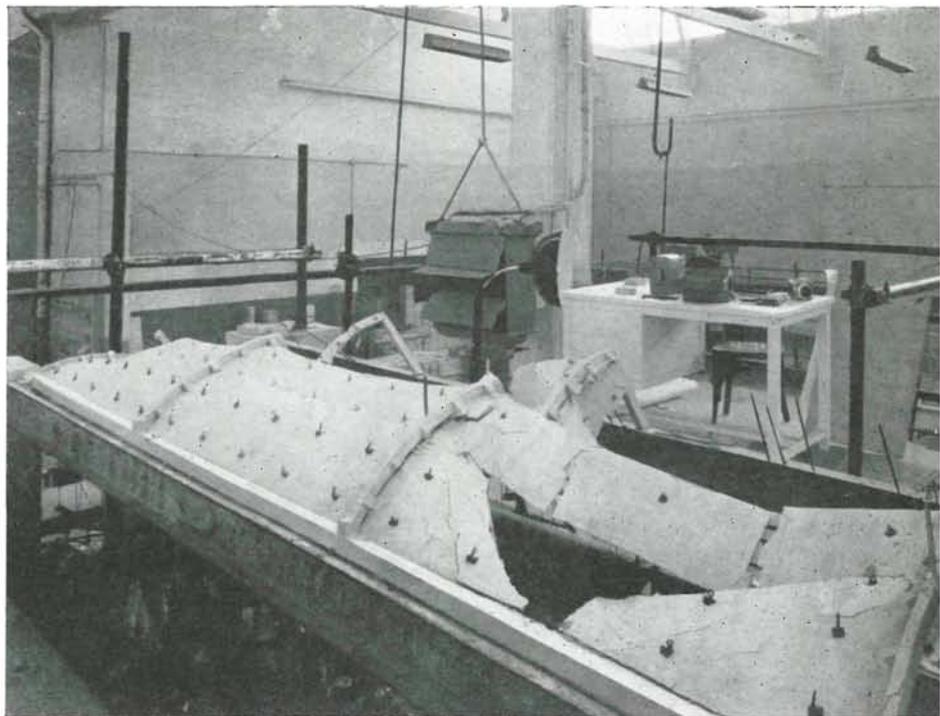
En artículos sucesivos pensamos dar a conocer los resultados de los diferentes ensayos que acabamos de enumerar en cuanto puedan ser útiles para otros estudios análogos o para aplicarlos en el proyecto de estructuras del mismo tipo.

Modelo reducido de las naves en dientes de sierra de la Escuela de Formación Profesional Acelerada (Barcelona).

Detalles de la rotura de las láminas.



26



27

Fotos: M. GARCIA MOYA y PANDO