

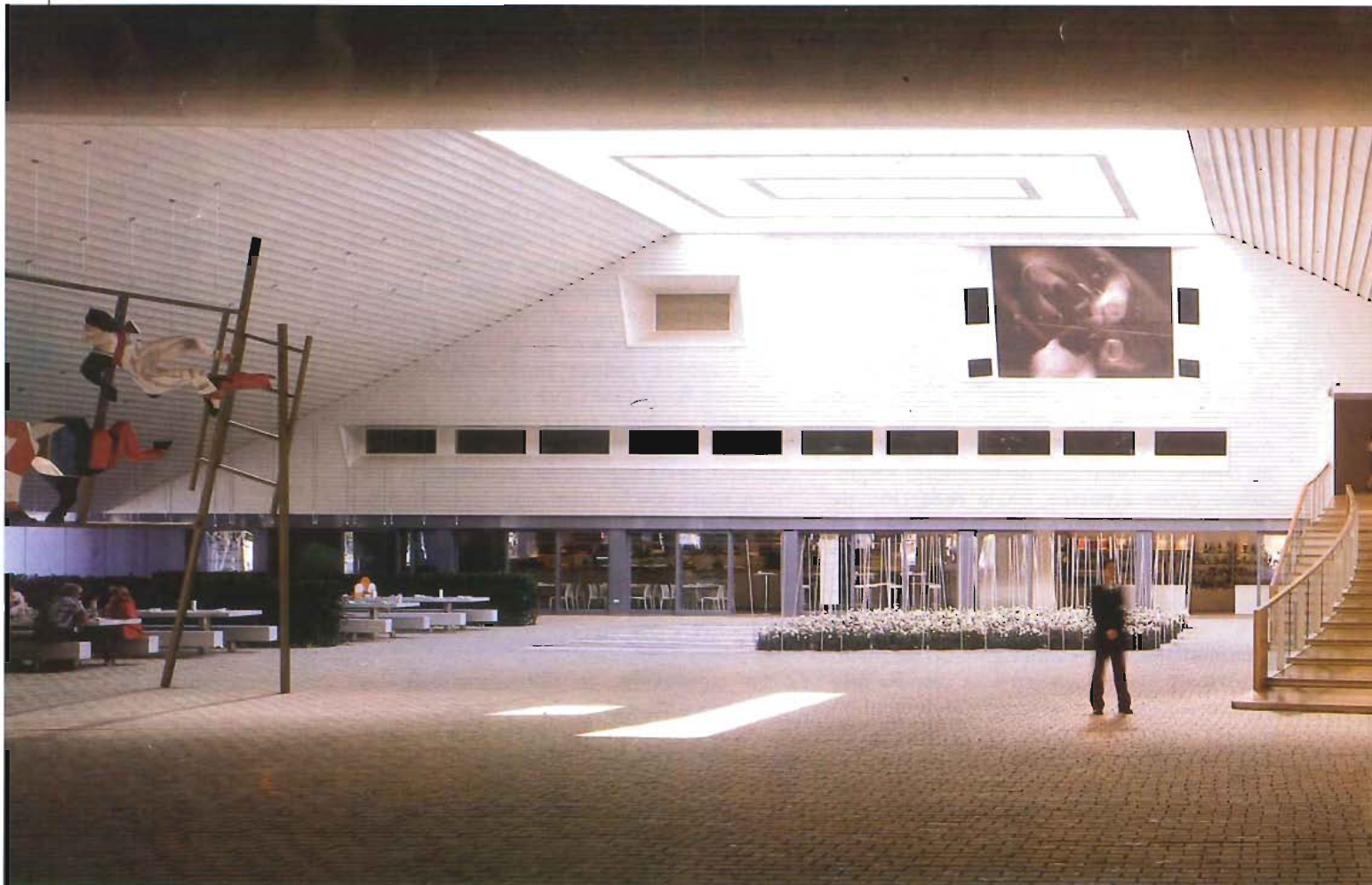
EL PABELLÓN ESPAÑOL PARA LA EXPO 2000 DE HANNOVER

Desmontable y sostenible

Bajo el lema *Hombre, naturaleza y tecnología* se celebra en Hannover, Alemania, entre el 1 de junio y el 31 de octubre, la **Expo 2000**. España participa en esta última exposición universal del milenio con la intención declarada de “sorprender y de **romper** la imagen tópica que se tiene del país en el extranjero”. Una de las claves en este empeño ha sido el **diseño** del propio pabellón, obra de los arquitectos sevillanos **Cruz y Ortiz**, cuya estructura, desmontable y reutilizable, presenta un buen ejemplo de innovación constructiva basada en criterios de **sostenibilidad**.

Por PETER TANNER y JUAN LUIS BELLOD THOMAS
Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Fotos: DUCCIO MALAGAMBA y CESMA INGENIEROS



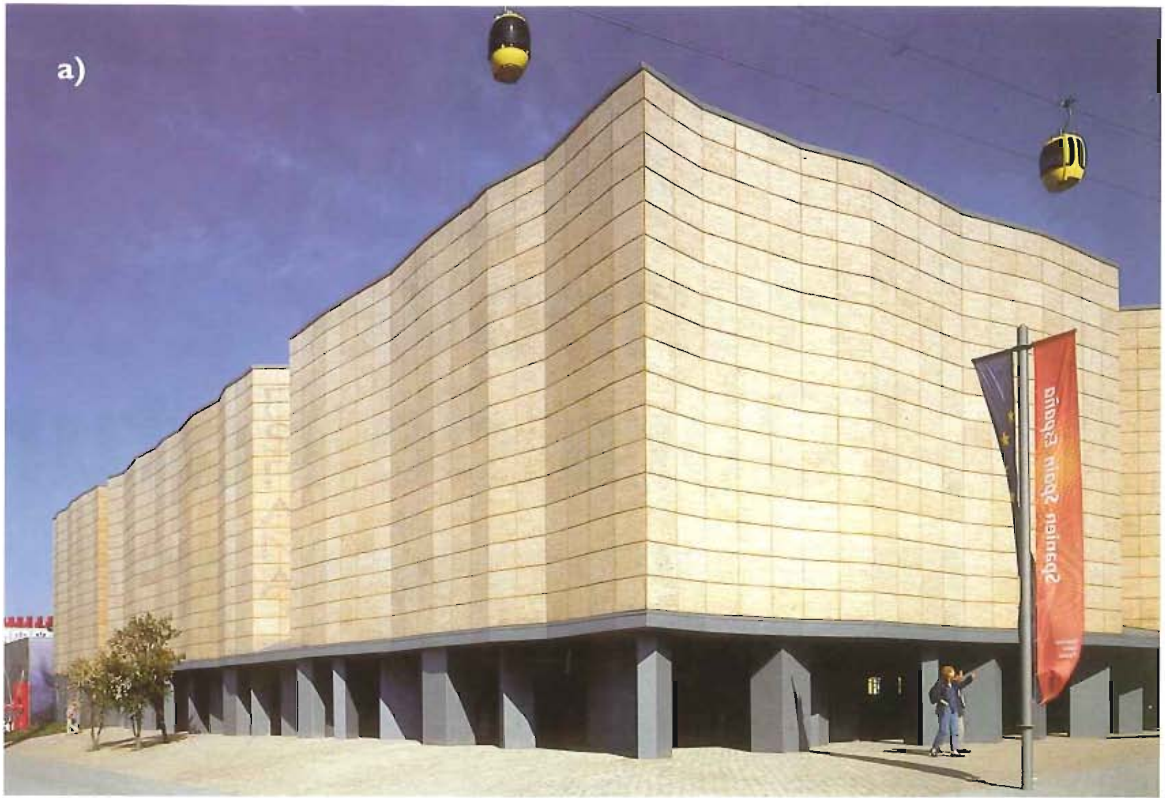
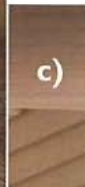


Fig. 1: a) Vista exterior del pabellón terminado b) Aperturas entre pilares c) Plaza interior.



La apariencia exterior del pabellón español en Hannover ofrece un volumen ciego, apoyado en un gran número de pilares (Fig. 1a), cuya piel está constituida por paneles de corcho, material típicamente mediterráneo. La envolvente del edificio queda fracturada por hendiduras. Al acceder al pabellón por cualquiera de las aperturas entre los pilares (Fig. 1b), se llega a una plaza interior (Fig. 1c) que por su amplitud (44.9x50.6 m); por su iluminación, a través de las aperturas entre pilares y del lucernario situado a 10 m sobre el suelo; por los materiales empleados, y por las plantaciones pretende despertar en los visitantes el recuerdo de la calidad de vida mediterránea. El techo de la plaza, en forma de artesa invertida, constituye a su vez el soporte de las zonas de exposición (Fig. 2b, c), así como de las plataformas horizontales de circulación de los visitantes que ascienden a este nivel superior por una rampa (Fig. 1c). Sobre este elemento principal, la artesa, también se levanta la estructura de la cubierta y de la fachada (Fig. 2b, c), formando las hendiduras apreciadas desde fuera (Fig. 7) y que no son visibles desde la plaza interior.

CONCEPCIÓN ESTRUCTURAL

En edificación, el número de condicionantes que hay que respetar en la concepción estructural puede ser muy importante. Particularmente, en el presente caso se añaden a los habituales, caracterizados por la necesidad de traducir geométricamente las exigencias arquitectónicas y funcionales, otros particulares:

- El lema de la Exposición sugiere el uso de materiales y métodos constructivos respetuosos con el medio ambiente.

- Por parte de la organización existe la exigencia de, una vez terminada la Expo, dejar el terreno en su estado original.
- La Sociedad Estatal, propietaria del pabellón, desea desmontarlo finalizada la exposición y ubicarlo en otro lugar para su reutilización.

La combinación de estos condicionantes tiene consecuencias importantes con relación a la elección de los materiales constructivos, la concepción global de la estructura y de los detalles constructivos, así como los procedimientos de fabricación y montaje.

La estructura del pabellón se diferencia claramente en dos zonas: una primera, más convencional, constituye el denominado edificio de servicio; y la segunda, de carácter especial, el edificio de exposiciones (Fig. 2a). Estas dos zonas no se pueden considerar por separado, ya que la concepción global de la estructura conduce a una interacción entre ambas.

El elemento portante principal del edificio de exposiciones, un falso tronco de pirámide (artesa invertida), está formado por los planos inclinados, así como por los denominados cordones superior e inferior. El cordón inferior está constituido por un cajón metálico cerrado de sección trapezoidal, mientras que el cordón superior está formado por una serie de vigas metálicas tipo Vierendeel, tanto en los planos verticales como en el plano horizontal superior de la cubierta y en los planos inferiores inclinados (Fig. 3). Las superficies inclinadas, finalmente, están concebidas como una estructura mixta de vigas metálicas con sección en cajón y elementos colaborantes de madera laminada encolada (Fig. 3).

El tronco de pirámide se denomina falso porque, desde el punto de vista del esquema resistente, solo contiene tres planos inclinados, mientras que la función del cuarto se le confía al edificio de servicio. A estos efectos se conectan (en el eje 22') el cordón inferior, los planos inclinados a media altura, así como el cordón superior con la estructura del edificio de servicio (Fig. 2a), estableciendo la interacción mencionada. El tronco de

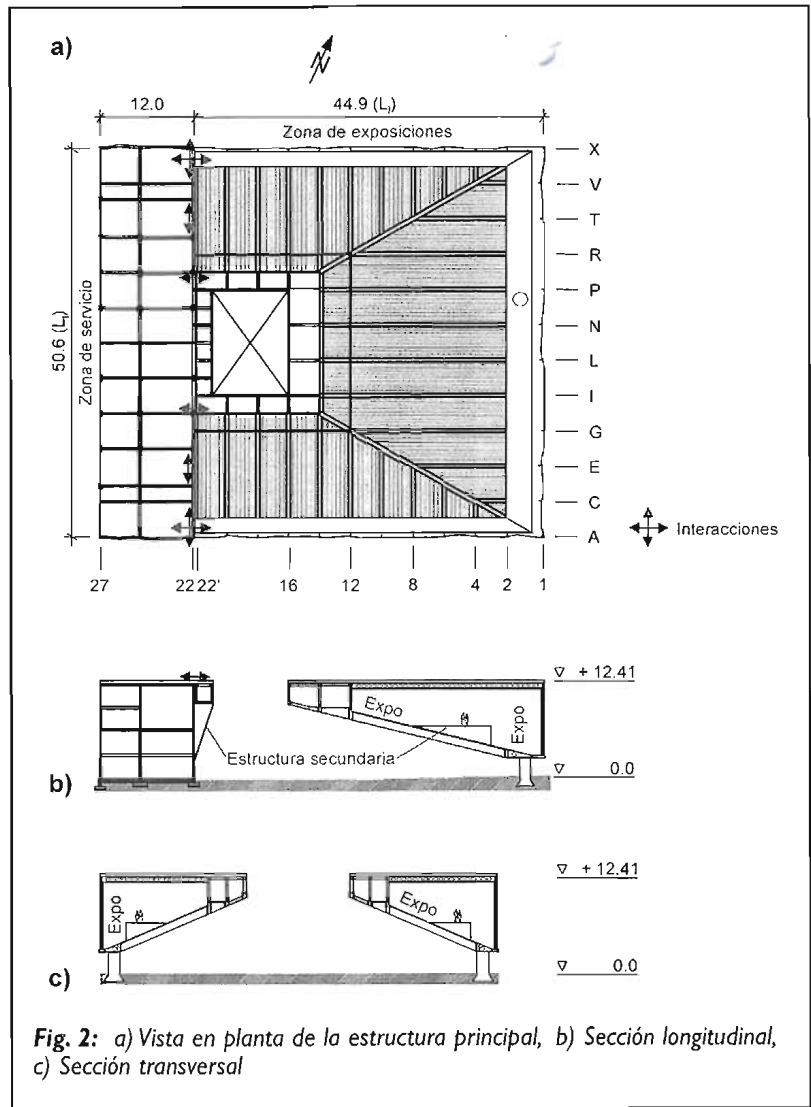


Fig. 2: a) Vista en planta de la estructura principal, b) Sección longitudinal, c) Sección transversal

pirámide, que descansa sobre los pilares metálicos situados alrededor de la plaza interior y apoyados directamente sobre el terreno, tiene una sección simétrica en sentido transversal al edificio, mientras que, en el sentido longitudinal, no existe simetría (Fig. 2b, c). La cubierta del edificio de exposiciones está concebida como estructura metálica que transmite las cargas verticales por un lado al cordón superior del tronco de pirámide y, por el otro, a través de los pilares de fachada al cordón inferior y de éste, a los pilares perimetrales y al terreno.



Fig. 3: Elementos estructurales del edificio de exposiciones

A TRAVÉS DE UN CONCEPTO ESTRUCTURAL COHERENTE SE OBTUVO UNA ESTRUCTURA COMPLETAMENTE PREFABRICADA Y DESMONTABLE DE GRAN ROBUSTEZ

Debido a que las cargas verticales se introducen directamente en los planos inclinados, éstos no solamente están sometidos a esfuerzos de compresión, sino también a momentos flectores y esfuerzos cortantes. La relación de rigideces relativas conduce a la situación de que los empujes a transmitir por los planos inclinados a los cordones inferior y superior son más importantes en sentido transversal del edificio que en sentido longitudinal. Por otra parte, por motivos geométricos, el canto útil del cordón inferior es relativamente pequeño ($L_i/18.5$) donde el empuje transmitido es mayor, y relativamente grande ($L_i/10.5$) donde el empuje es menor (Fig. 2a). Con el fin de reducir los momentos flectores resultantes en el cordón inferior, se introducen unos apoyos horizontales intermedios en los ejes 8 y 16, coincidiendo aproximadamente con el tercio de la luz. Cada uno de estos apoyos está constituido por dos de los pilares (mixtos hormigón - acero) perimetrales, formando un pórtico con el cordón inferior del tronco de pirámide y la cimentación de los pilares (Fig. 4a). Para equilibrar la componente horizontal de la reacción a introducir, se unen los dos apoyos horizontales correspondientes a cada uno de los dos ejes mencionados mediante un tirante, formado por cables de pretensar (dos cables por eje, cada uno constituido por 19 cordones de 13 mm de diámetro). La estabilidad frente al vuelco de cada pórtico queda asegurada mediante un anclaje al terreno. La concepción de las zapatas viene dictada por el proceso constructivo de la estructura (apartado "proceso de montaje"). Durante la aplicación de la fuerza de pretensado, la parte superior (2ª fase del hormigonado) se puede desplazar horizontalmente sobre apoyos de neopreno. Después del proceso de pretensar se

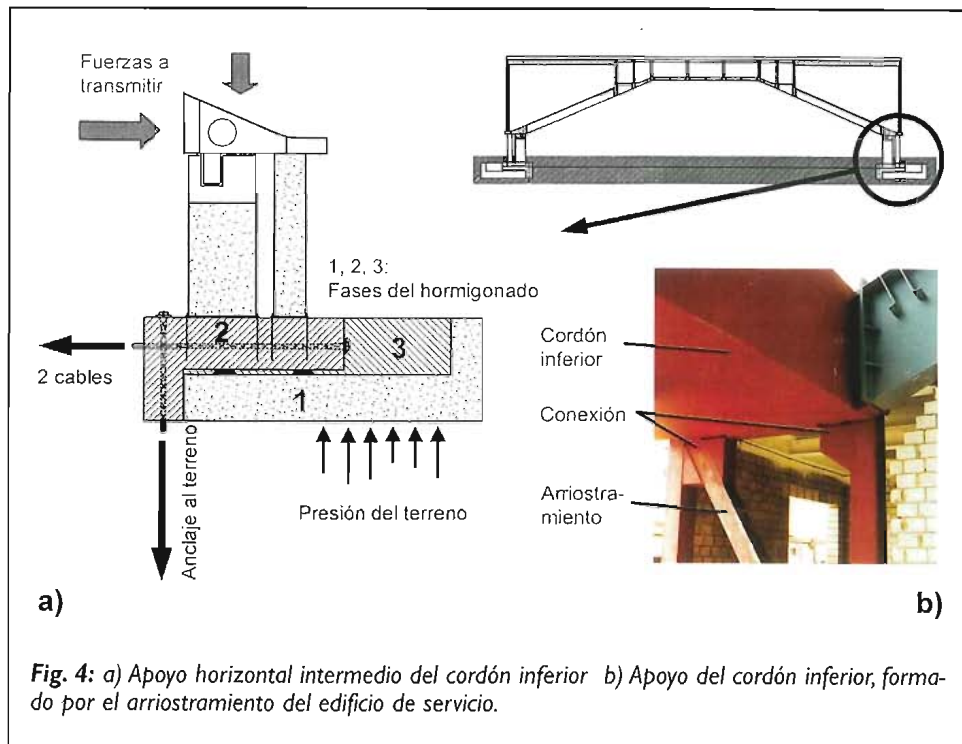


Fig. 4: a) Apoyo horizontal intermedio del cordón inferior b) Apoyo del cordón inferior, formado por el arriostramiento del edificio de servicio.

establece una zapata monolítica, rellenando el hueco entre las partes superior e inferior (3ª fase del hormigonado), obteniendo de esta manera el sistema estático final. Finalmente, la unión entre el cordón inferior y el edificio de servicio se establece de forma que las reacciones de apoyo del cordón, en particular la componente horizontal, se transmite a la cimentación a través de los arriostramientos (Fig. 4b) integrados en el eje 22 del edificio de servicio (Fig. 2a). La estructura aporticada del edificio de servicio está formada por pilares metálicos y vigas mixtas. El trabajo solidario de los perfiles metálicos y de las losas prefabricadas de hormigón [resistencia característica a compresión de 35 N/mm² y con unas dimensiones tipo de 4.6x2.3x0.12 m] se asegura mediante tornillos pretensados (Fig. 5).

EL LEMA DE LA PROPIA EXPOSICIÓN, QUE SUGIERE EL USO DE MATERIALES Y MÉTODOS CONSTRUCTIVOS RESPETUOSOS CON EL MEDIO AMBIENTE, CONSTITUYÓ UN CONDICIONANTE EN LA CONCEPCIÓN ESTRUCTURAL DEL PABELLÓN



Fig. 5: Acción mixta establecida mediante tornillos pretensados

establece una zapata monolítica, rellenando el hueco entre las partes superior e inferior (3ª fase del hormigonado), obteniendo de esta manera el sistema estático final.

Finalmente, la unión entre el cordón inferior y el edificio de servicio se establece de forma que las reacciones de apoyo del cordón, en particular la componente horizontal, se transmite a la cimentación a través de los arriostramientos (Fig. 4b) integrados en el eje 22 del edificio de servicio (Fig. 2a).

La estructura aporticada del edificio de servicio está formada por pilares metálicos y vigas mixtas. El trabajo solidario de los perfiles metálicos y de las losas prefabricadas de hormigón [resistencia característica a compresión de 35 N/mm² y con unas dimensiones tipo de 4.6x2.3x0.12 m] se asegura mediante tornillos pretensados (Fig. 5).

ESTABILIDAD

La estabilidad global de la estructura queda asegurada a través del falso tronco de pirámide y de su interacción con el edificio de servicio. En el sentido longitudinal del edificio, el tronco de pirámide es estable en sí, básicamente debido a la gran rigidez en su plano de las superficies inclinadas hacia el norte y el sur, formadas por los elementos mixtos acero-madera. En el sentido transversal del edificio, la estabilidad queda asegurada, por un lado, por la rigidez en su plano de la superficie mixta inclinada hacia el este y, por otro lado, por la conexión (en el eje 22) de los planos inclinados a media altura con la estructura del edificio de servicio (Fig. 2a). También la estabilidad del edificio de servicio queda asegurada, sin necesidad de introducir arriostramientos adicionales. En el sentido longitudinal de la estructura, el edificio de servicio está arriostrado, a través de las conexiones mencionadas, por el tronco de pirámide que es autoestable. En

el sentido transversal, la estabilidad queda asegurada por los arriostramientos del eje 22 (Fig. 4b).

CAMBIOS DEL PROYECTO ORIGINAL

Por diferentes motivos, relacionados básicamente con los ajustados plazos de ejecución que no permitieron llevar a cabo los ensayos experimentales exigidos por la normativa alemana, se decidió renunciar tanto a la conexión entre acero y madera, como a los anclajes al terreno en los apoyos horizontales del cordón inferior (Fig. 4a). La consecuencia más directa del primer cambio fue la necesidad de introducir una serie de arriostramientos en el edificio de servicio, con el fin de asegurar la estabilidad global de la estructura sin la contribución de las superficies mixtas a través de la rigidez en su plano.

En cuanto al segundo cambio, para asegurar una correcta introducción de las reacciones de apoyo en el terreno sin anclajes, se tenían que incrementar considerablemente las dimensiones de las zapatas en los ejes 8 y 16. Debido a la proximidad de los solares adyacentes, las zapatas no se podían incrementar hacia el exterior del pabellón, tal y como lo exigían las condiciones de equilibrio. Finalmente se adoptó una solución acorde con el proceso constructivo de la estructura (apartado "proceso de montaje"), en la que se tuvo que triplicar prácticamente el volumen de hormigón inicialmente previsto.

PROCESO DE MONTAJE

Después del montaje de la estructura metálica completa y de la colocación de las chapas de la cubierta, se aplican las fuerzas de pretensar en los cables de los ejes 8 y 16. Estas fuerzas conducen a la descarga de la estructura auxiliar sobre la que se apoya el cordón superior durante el montaje (Fig. 6) y, finalmente, a la introducción de una contraflecha.



Fig. 6: Cordón superior apoyado en una estructura auxiliar durante el montaje.

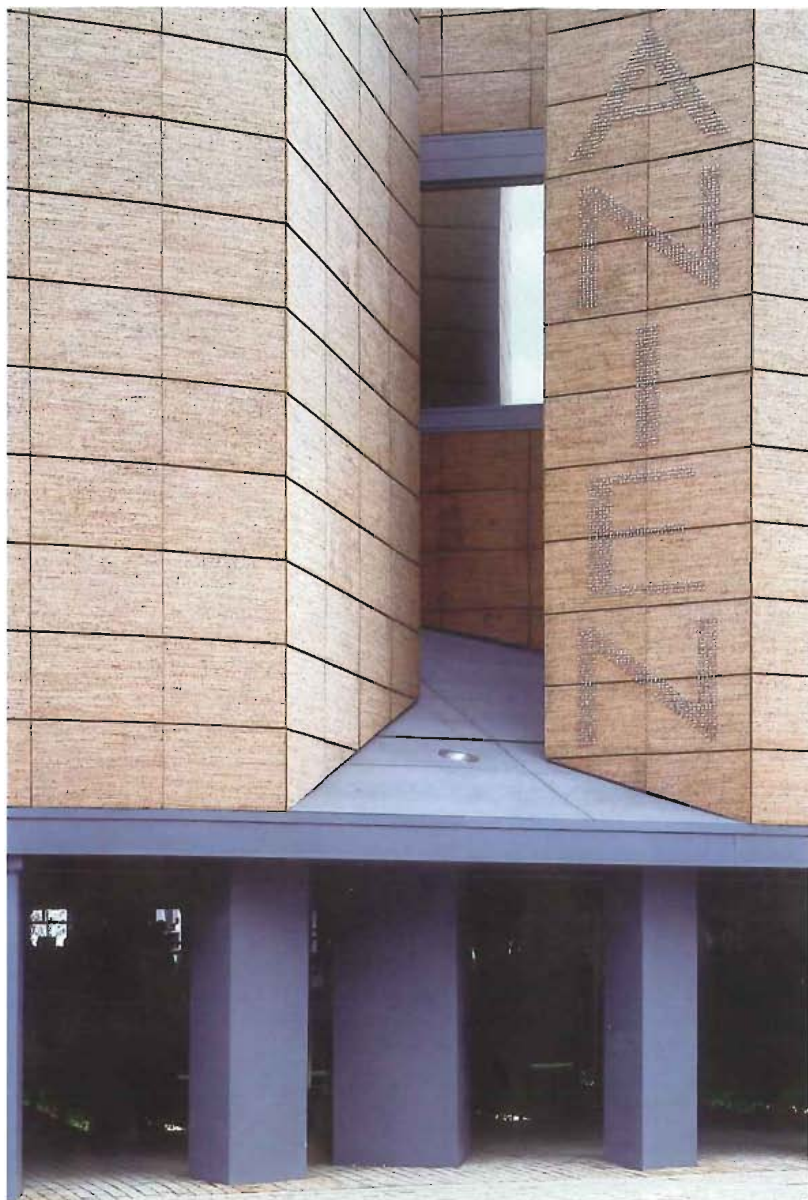
F I C H A T É C N I C A

Propiedad	SOCIEDAD ESTATAL HANNOVER 2000
Arquitectura	CRUZY ORTIZ ARQUITECTOS
Estructura (Proyecto y Asistencia Técnica a la D.O.)	CESMA INGENIEROS
Ensayos especiales	INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN, IETcc - CSIC
Supervisión	INGENIEURBÜRO PETER KELEMEN
Adquisición de datos	IBMB - TU BRAUNSCHWEIG
Empresa constructora	U.T.E. OHL - HOCHTIEF
Taller metálico	GEBRÜDER CORNILS GMBH
Sistema de pretensado	DYWIDAG SYSTEMS INTERNATIONAL GMBH
Elementos prefabricados de hormigón	PACADAR
Elementos de madera laminada encolada	GROSSMANN BAU GMBH&CO
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS	
Acero estructural	779 t
Madera laminada encolada	163 m ³
Superficie útil	7.000 m ²
Coste (ejecución por contrata) de la estructura	496.405.750 Ptas

El pretensado se determina de forma que permita compensar las deformaciones debidas al peso propio de la estructura portante y a una parte de las sobrecargas permanentes (originalmente estaba previsto compensar las deformaciones debidas al 100% de las sobrecargas permanentes; sin embargo, este porcentaje se tuvo que reducir debido al cambio de las zapatas descrito en el apartado anterior y a la subsiguiente pérdida de robustez estructural). Las fuerzas de pretensar así determinadas se aplican por fases. En primer lugar se pretensan simultáneamente los dos cables del eje 16, en cinco fases sucesivas hasta alcanzar la fuerza total de 1385 kN. El procedimiento se repite de manera análoga en el eje 8, para alcanzar la fuerza total requerida de 930 kN.

MEDICIONES

Los efectos de la acción del pretensado dependen de un gran número de parámetros, algunos de los cuales están asociados con incertidumbres importantes: la rigidez de las uniones atornilladas, la interacción entre los dos edificios, las fases evolutivas del montaje, la rigidez de los apoyos de neopreno, etc. A causa de estas incertidumbres, se decidió monitorizar la estructura. El objetivo de las mediciones a efectuar durante el



proceso de pretensar era doble. Por un lado debían garantizar el alcance de la geometría requerida de la estructura y, por otro lado, permitir el control de que los modelos numéricos utilizados reflejaran adecuadamente el comportamiento estructural.

En este contexto, el cambio de las zapatas de los ejes 8 y 16 (descrito en el apartado "Cambio del Proyecto original") resultó más importante todavía. La solución ejecutada implica una pérdida considerable de robustez estructural en comparación con la solución proyectada con los anclajes al terreno. Un incremento de la fuerza de pretensar podía provocar, en un caso extremo, la pérdida del equilibrio de la parte móvil de la zapata. Las mediciones arriba mencionadas debían contribuir a atenuar el riesgo correspondiente.

Durante la aplicación de las fuerzas de pretensar se llevaron a cabo las siguientes mediciones:

- Fuerzas de pretensado aplicadas.
- Desplazamientos horizontales de la parte móvil de las zapatas de los ejes 8 y 16.
- Deformaciones verticales de la parte móvil de las zapatas de los ejes 8 y 16.

Fig. 7: Hendidura en la envolvente del edificio.

- Deformaciones verticales de las vigas Viendeel del cordón superior del falso tronco de pirámide en los puntos 16/I y 16/P.
- Tensiones en diferentes puntos de los empotramientos de los pilares de las alineaciones 8 y 16, y en los bordes superior e inferior de la cara interior del cajón que forma el cordón inferior del tronco de pirámide.

Al final de cada fase de la aplicación de las fuerzas de pretensado se compararon los valores medidos con los valores teóricos correspondientes. En caso de que la diferencia resultara aceptable (los valores medidos no se desviaban más del 15% de los correspondientes valores previstos), se podía proceder a la siguiente fase del pretensado. En caso contrario, se tenía que interrumpir el proceso para analizar las diferencias. Solo si se podía llegar a una explicación inequívoca de las diferencias observadas, y siempre y cuando la seguridad estructural estuviera garantizada con una probabilidad adecuada, se podía reanudar el proceso.

En la obra, el proceso de pretensar no se tuvo que interrumpir en ningún momento. Para el pretensado de los cables del eje 16 se observó una excelente coincidencia entre los valores esperados y los medidos. La confianza así generada en el modelo numérico incluso permitió abreviar el procedimiento. La fuerza de pretensar correspondiente al eje 8 se aplicó en sólo 2 fases, de manera que todo el proceso de pretensar se pudo completar en media jornada de trabajo.

CONCLUSIONES

La construcción del pabellón español para la Expo 2000 requería una planificación cuidadosa, teniendo en cuenta las complejas interacciones entre geometría, funcionalidad, concepción estructural y materiales de construcción. La necesidad de disponer de una estructura desmontable aconsejaba el uso extensivo de las técnicas de prefabricación. A través de un concepto estructural coherente, en el que todos los elementos contribuyen a la estabilidad global del sistema, se obtuvo una estructura completamente prefabricada y desmontable de gran robustez. A la vez, esta estructura altamente hiperestática se ha concebido de forma que permitiera identificar de manera inequívoca el flujo de las fuerzas.

Un análisis estructural detallado permitió identificar la sensibilidad del comportamiento estructural frente a diferentes parámetros, particularmente durante la aplicación de las fuerzas de pretensar. La estructura se ha monitorizado durante la ejecución, con el fin de mantener estos parámetros en los límites admisibles. La aplicación de técnicas de monitorización, extendida en la construcción de puentes, se ha revelado de gran utilidad para completar con éxito el complejo proceso de montaje de esta estructura. ▲