

LA SOBRECUBIERTA DEL MUSEO DEL PRADO

Luis Viñuela Rueda.

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director Servicio Obras Especiales - FCC, S.A.

José Martínez Salcedo.

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Jefe Dpto. Estructuras Metálicas - FCC, S.A.

RESUMEN

La cubierta actual del Museo del Prado está formada por diez distintos materiales, cuyo comportamiento irregular cumple de manera más que dudosa la función de cerramiento e impermeabilización del edificio.

La reforma emprendida consiste no sólo en sustituir la mayor parte de ellos, dejando como únicos el plomo y el vidrio, sino en renovar la mayor parte de la estructura bajo cubierta. Para realizar esta obra, se ha construido una sobrecubierta formada por unos pórticos de estructura comercial prefabricada que, en la alineación del lado Prado se apoyan en la fachada a través de la cornisa, y que se mueven a medida que lo requieren las necesidades de la obra, lo cual permite proteger contra la lluvia las zonas del museo que queden provisionalmente descubiertas.

De esta forma, se plantea una obra de ejecución artesanal, sin especiales complicaciones técnicas, aunque con un importantísimo condicionante: la ejecución de los trabajos sobre una de las más importantes pinacotecas del mundo.

La descripción de la estructura, de sus mecanismos y de los cálculos que se llevaron a cabo para su construcción y utilización, son el objetivo del presente artículo.

ABSTRACT

The roof of the Prado is made up of ten different materials whose non uniform behaviour affects the soundness of the roof as a protection against the elements.

The repair under way involves not only the replacement of most of the existing materials except the lead and glass, but also the renovation of most of the supporting structures.

To carry out the task, a cover was made of prefabricated porticos that are supported on the cornice at the front of the building. As the work progresses, they are moved to provide temporary protection from the rain to the uncovered parts of the building. It is an artisan task without much technical difficulty except for the responsibility of working on one of the world's finest art galleries.

This article describes the structure, the mechanisms and the calculation made for its construction and use.

Se admiten
comentarios a este
artículo, que deberán
ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
marzo de 1997.

Recibido en ROP:
enero de 1997

1. INTRODUCCIÓN

Las Obras de "Remodelación de Cubiertas del Museo del Prado" que, con Proyecto de los Arquitectos Dionisio Hernández Gil y Rafael Olalquiaga, se están realizando en el Museo del Prado por la UTE formada por Fomento de Construcciones y Contratas, S.A. y Entrecanales y Távora, S.A., consisten en la recuperación de formas y materiales de las cubiertas originales del edificio. Desde su apertura como Museo, en 1819, el primitivo proyecto de Villanueva, sufrió grandes transformaciones, sobre todo en su Cubierta.

Refiriéndose a las cubiertas, según se señala en la Memoria del Proyecto, "...existen hasta 10 materiales de cubrición: Los principales son tejas curvas, chapa de plomo, chapa de cinc, baldosas de cemento, granito, vidrio armado, y policarbonato": Los únicos materiales previstos en esta Remodelación, son el plomo y el vidrio. La estructura bajo cubierta se renueva, también, mayoritariamente, a excepción de la Galería central y la Sala de Velázquez, con estructura metálica de pequeñas luces.

2. ANTECEDENTES

La principal dificultad en la ejecución de la Obra, venía dada por el cambio de aguas de la cubierta, que obligaba a descubrir grandes superficies y, por tanto, a proteger frente a la lluvia las zonas del museo que se quedaban provisionalmente descubiertas, como preveía el Proyecto: La entrada de agua no sólo se podía producir directamente a las salas, lo que es posible evitar, sino por la coronación de los muros que quedaban descubiertos y, que al estar compuestos de un relleno muy heterogeneo y poco compacto, podía crear "camino" al agua, que aparecería en otros puntos de los muros. En nuestra oferta se solucionaba este problema mediante la utilización de unos pórticos de estructura comercial prefabricada que en la alineación lado Prado, se apoyaban en el muro de la fachada, a través de la cornisa, y que se iban moviendo a medida de las necesidades de las fases de Obra, utilizando las propias grúas torres de Obra.

Con las anteriores premisas, aparentemente se planteaba una Obra de ejecución artesanal, sin especiales complicaciones técnicas, aunque con un importantísimo condicionante: la ejecución de los trabajos sobre una de las más importantes pinacotecas del mundo.

Una vez adjudicada la Obra, y al preparar la solución descrita, nos encontramos con la imposibilidad de apoyar las sobrecubiertas provisionales sobre la cornisa de granito que bordea todas las cubiertas, dado que su asiento sobre el muro no ofrece garantía de resistencia suficiente, al conservar las cornisas incluso las cuñas de madera con las que se nivelaron. Ésto, unido a la imposibilidad de poder utilizar grandes grúas (por el imposible acceso y posicionamiento de las mismas) que trasladasen unos pórticos que cubriesen total-

mente el Museo, nos llevó a plantear y ejecutar una gran sobrecubierta. Dado que, por otra parte era necesario desmontar y colocar elementos para la nueva estructura de cubierta, se debía permitir el acceso para el montaje con grúas torre de aquellos elementos: Ello llevó a la decisión de que esta sobrecubierta fuese móvil permitiendo, al poder variar su posición en planta, tanto la entrada y salida de materiales con las grúas de Obra, como ir cubriendo las distintas fases de los trabajos. Además debía colocarse un sistema que permitiese, también, cubrir la zona de trabajo, cuando esté descubierta para entrada de materiales, en muy pocos minutos: Por ello se eligió un sistema de traslación con bogies automotrices.

3. SOBRECUBIERTA

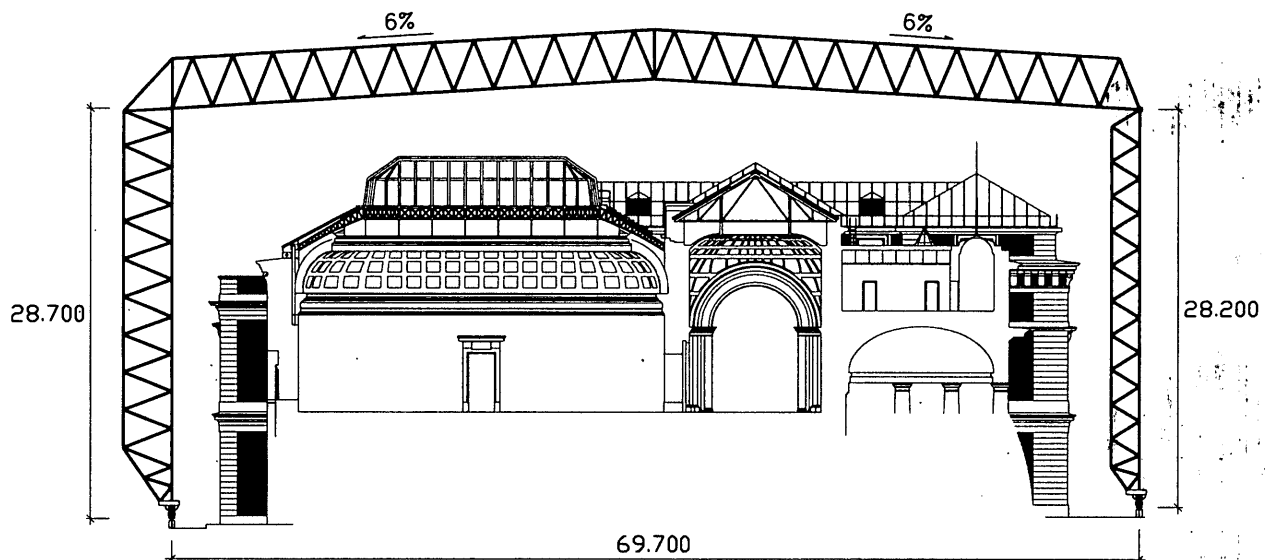
3.1. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL

La estructura móvil que se diseña, Fig. 1, cubre toda la sección transversal del Museo, pudiéndose desplazar a lo largo de los 202 metros de longitud del mismo. Sus dimensiones en planta son de 73.2 metros, en sentido transversal al Museo, por 32 metros de longitud. La altura de la cumbrera sobre el nivel de calle, que tiene una pequeña pendiente de 1.7%, es de 35 metros aproximadamente.

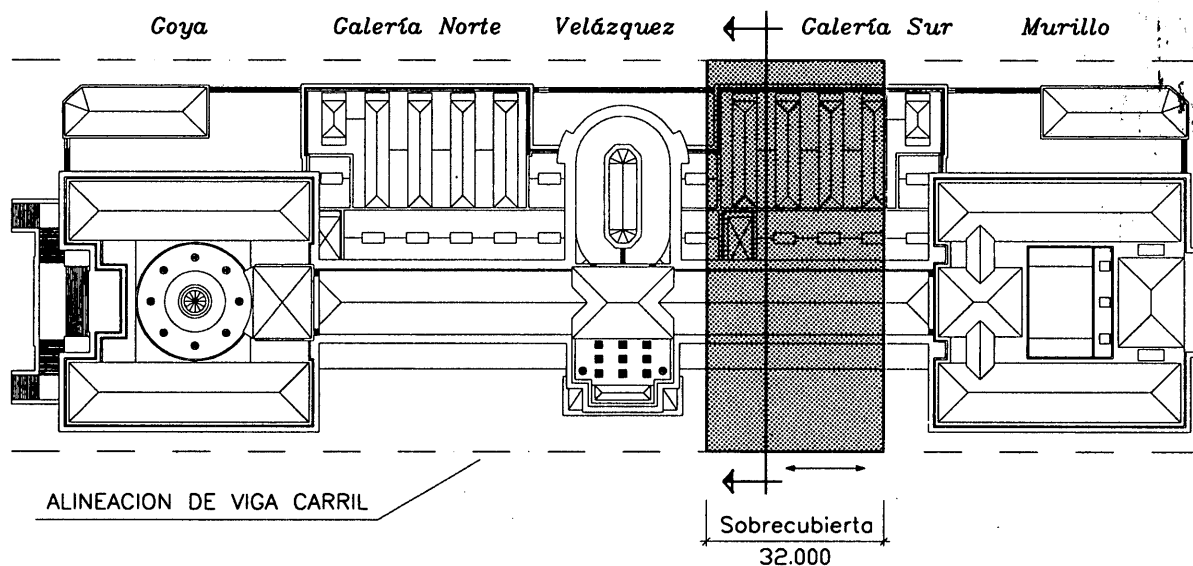
Los pórticos dejan libre, en su sección, un espacio de 30 metros de altura por 67.7 metros de ancho: Con estas dimensiones, en cualquier posición en planta, queda cubierto totalmente el Museo, dejando un resguardo sobre el punto más alto de la actual cubierta. La elección de la longitud de la sobrecubierta, 32 metros, vino dada por el equilibrio entre la necesaria estabilidad estructural longitudinal, la adecuación de la superficie cubierta al ritmo de los trabajos y la economía máxima necesaria en cualquier elemento auxiliar de Obra.

La sobrecubierta se mueve sobre dos vigas carril metálicas, paralelas al Paseo del Prado, separadas de 4 a 5 metros de las fachadas del Museo. La viga carril situada en el lado Ruiz de Alarcón, se apoya sobre los pilares de la galería subterránea de instalaciones; La situada en el lado Prado estaba previsto hacerla de hormigón directamente sobre el terreno, pero la gran cantidad de conducciones e instalaciones cuyo trazado es perpendicular al Paseo del Prado, ha obligado a hacerla también metálica apoyando en cimentaciones micropilotadas.

El cerramiento, de chapa grecada, se efectúa sólo en la zona de cubierta y faldones. No se prevé ningún cerramiento en fachadas, tanto para minimizar los esfuerzos de viento como para no ocultar la fachada del Museo. También por motivos estéticos, se diseñó una estructura tubular con tubos de mínimo tamaño, a fin de conseguir una estructura lo más transparente posible: Para aumentar esta sensación, se eligió el color blanco para la pintura de la estructura, después de hacer unas pruebas en fotomontajes.



SECCION TIPO



PLANTA

3.2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La estructura, Fig. 2 y 3, está compuesta por 5 pórticos separados 7 metros entre ellos, sobre los que apoyan las correas del sistema de cubierta, que vuela dos metros sobre los últimos pórticos. Los pórticos, como se ha dicho tienen una luz de 69.7 metros y son pórticos a dos aguas con una altura de

28 a 29 metros sobre la cota de carril.

Figura 1. Definición de la sobrecubierta.

Los pórticos están, evidentemente, articulados en la cabeza del carril, formando un cuerpo conjunto con los bogies de traslación. Tienen además una articulación entre el dintel y el pilar lado Ruiz de Alarcón: de esta forma este pilar es una auténtica biela. El pilar lado Prado está

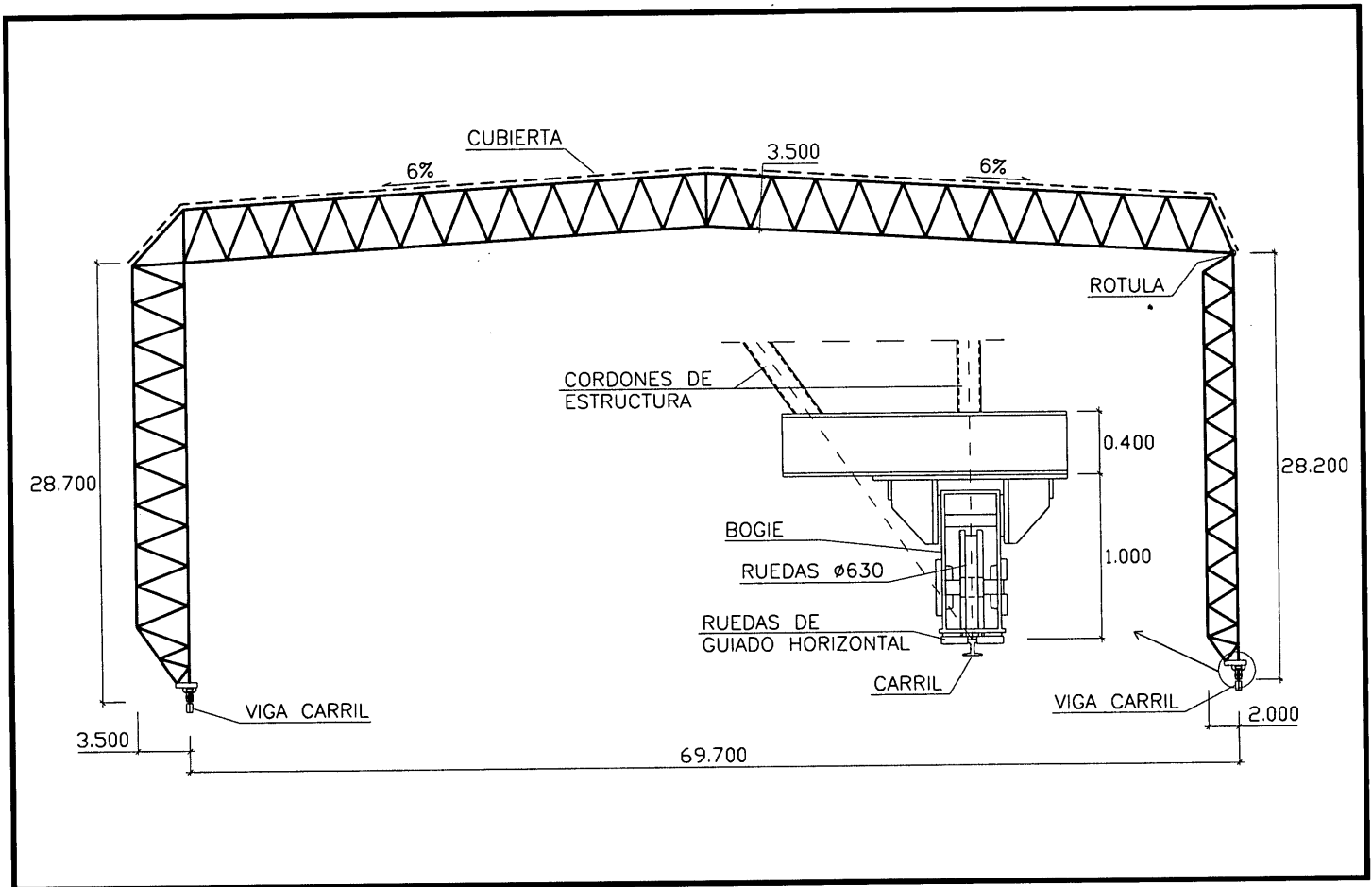


Figura 2.
Sección
de pórtico.

aporticado con el dintel. Esto se hace así para que no aparezcan (a causa de las cargas verticales, por efectos térmicos o por irregularidades de las vigas carril) fuerzas horizontales en las ruedas de los bogies, que impidan el correcto movimiento, al acodarse la estructura contra los carriles. Las únicas cargas horizontales que pueden aparecer son las correspondientes a las cargas horizontales exteriores (viento), que tomará el pilar que está aporticado, no produciéndose el enclavamiento de la estructura. Este esquema estático es el utilizado en grandes pórticos grúas de astilleros, por ejemplo.

El diseño de la estructura del pórtico estará condicionado por el difícil montaje de la estructura, que



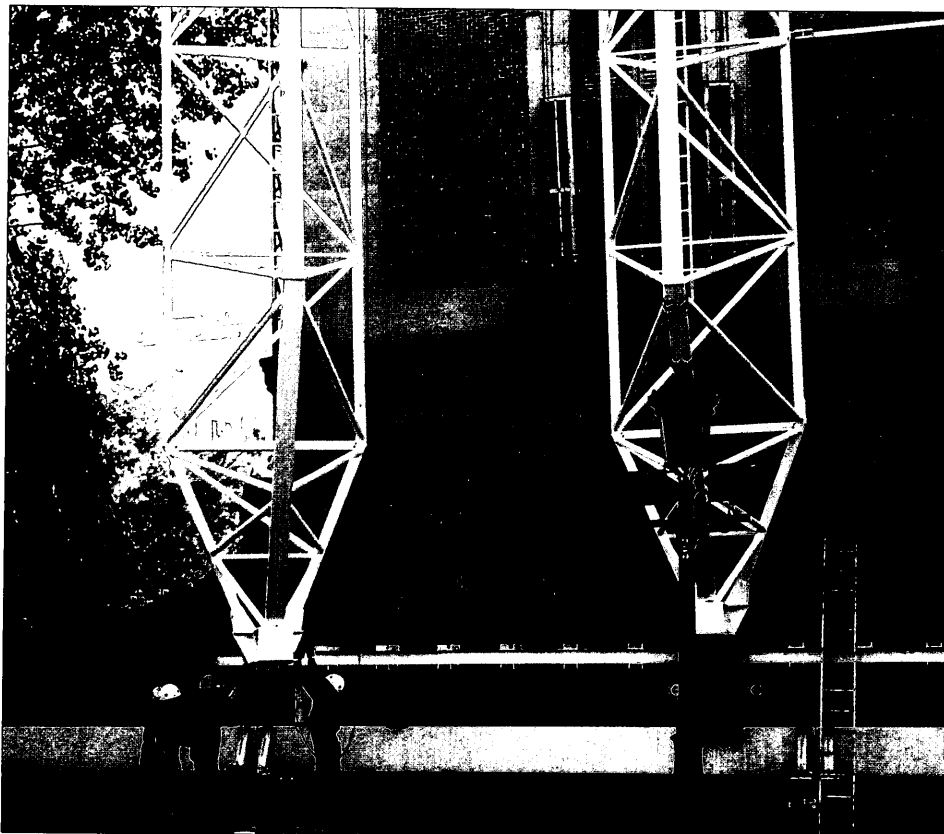
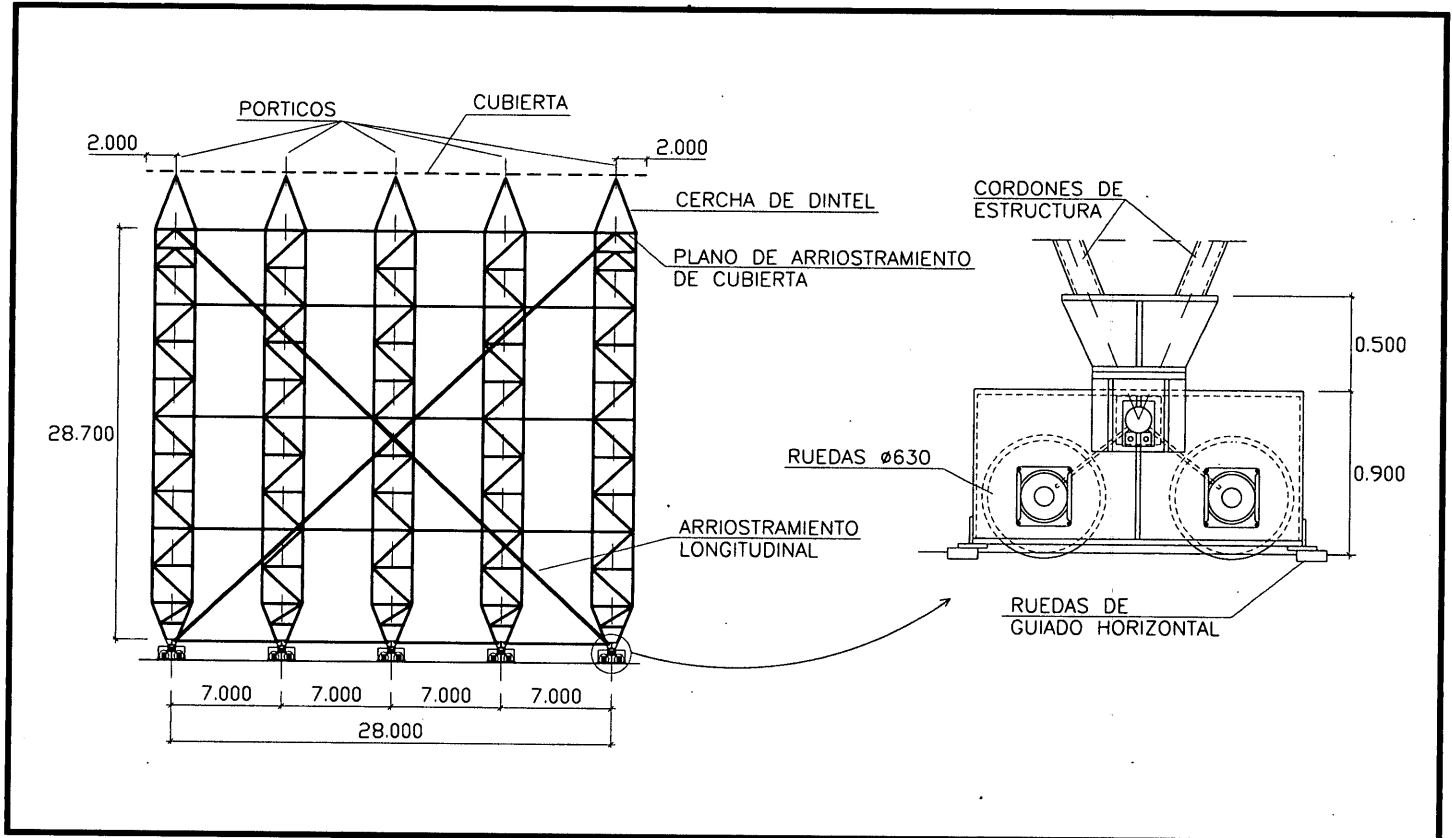


Figura 3.
Alzado la-
teral de la
estructura.

hace que no se puedan colocar elementos provisionales de atirantamiento: Por ello los elementos deben ser lo más autoestables posible. Tanto el dintel como los pilares tienen sección triangular, Fig. 4, con sus caras trianguladas formando cerchas en esos planos: De esta forma el dintel y los pilares se podrán montar en una sola pieza.

El dintel y el pilar lado Prado tienen un canto de 3.5 metros, mientras que la biela lado Ruiz de Alarcón tiene un canto de 2 metros. Como se ha señalado todos sus perfiles son en cajón, (UPN en cajón y tubos redondos y cuadrados).

Los pórticos están unidos con un arriostramiento en cubierta, no al nivel de la cubrición, sino al nivel inferior de la sección triangular del dintel. Este arriostramiento transmite los esfuerzos de viento longitudinal a las dos alineaciones de rodadura.

Longitudinalmente la estructura, que está articulada con un bulón a los bogies de traslación, está también arriestrada con

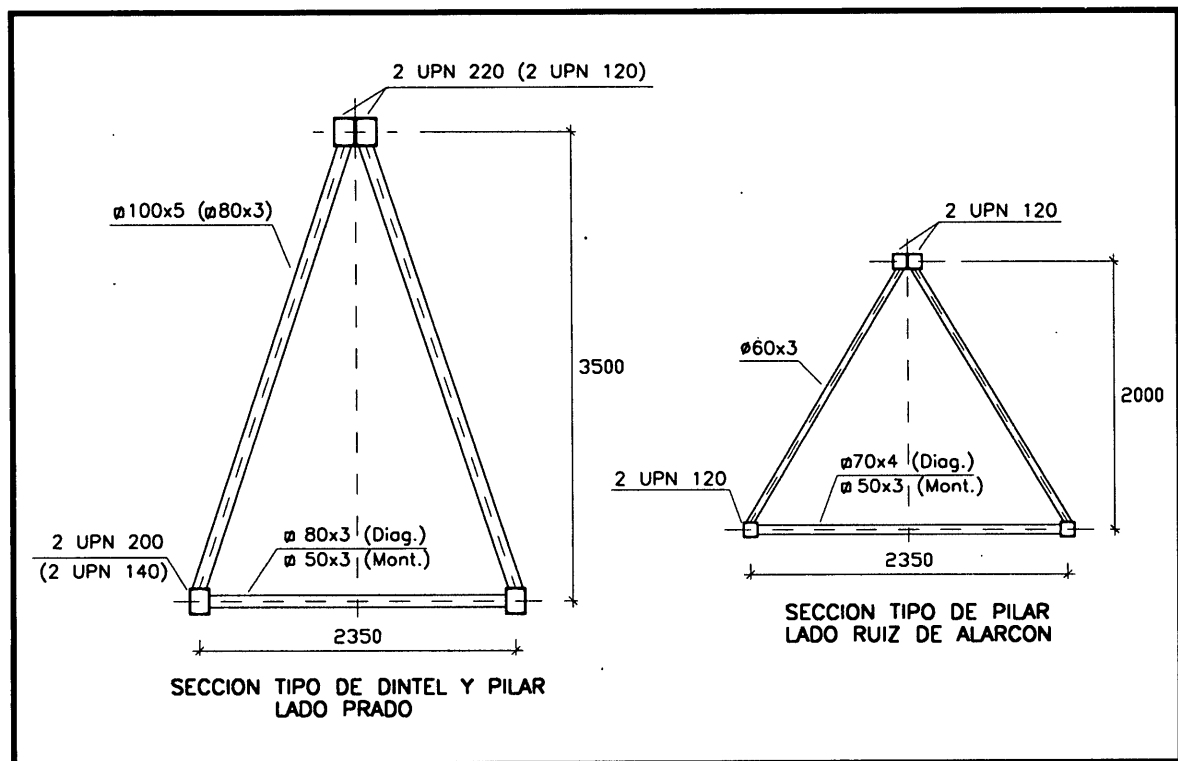


Figura 4.
Secciones tipo.

En ese caso ante las deformaciones y posibles irregularidades de la viga carril, un pórtico podía “colgarse” de los adyacentes, sobrecargando los correspondientes bogies.

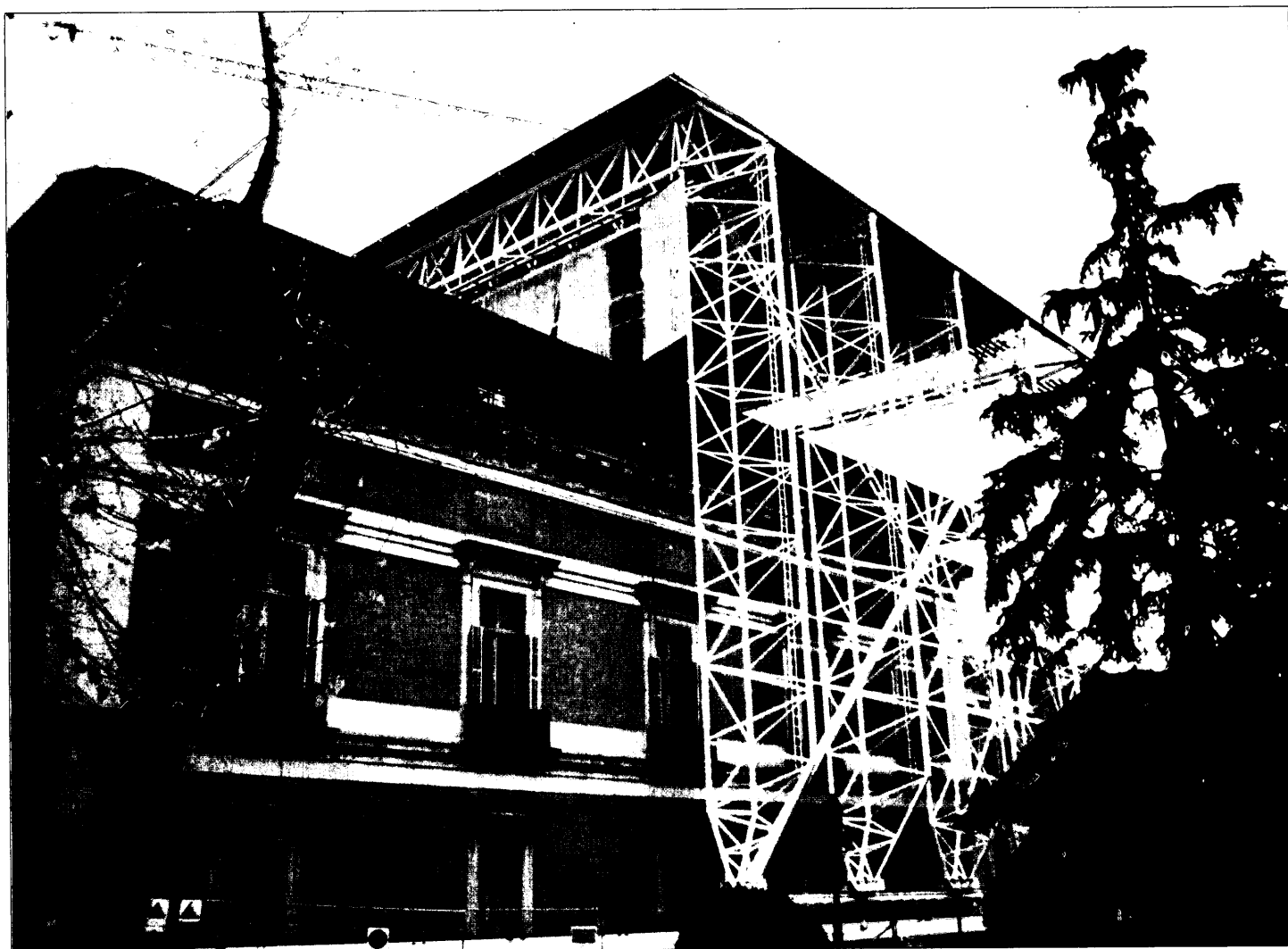
Los aspectos reseñables del cálculo de esta estructura son:

▼ a.- La ventaja que ofrece la articulación de la biela (pilar lado Ruiz de Alarcón) al dintel, para el movimiento de la estructura, hace que ésta sea mucho más

deformable que si se hubiese aporticado. Por ello fue necesario calcular el pórtico en segundo orden, a fin de poder cuantificar el efecto de la fuerza horizontal que introduce la biela al resto de la estructura, cuando esta se inclina. La influencia de este análisis es de un aumento del orden del 10% sobre los

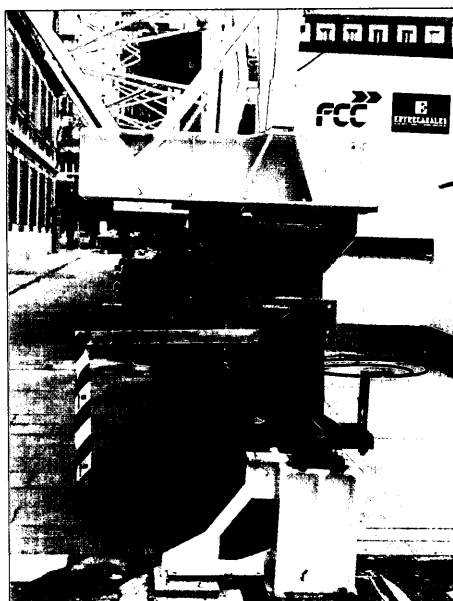
una gran cruz de S. Andrés. Este arriostramiento lleva los citados esfuerzos de viento al primer y último pórtico, así como las fuerzas de inercia del movimiento y los esfuerzos de inestabilidad de los pilares. Inicialmente, como parece razonable, se pensó en triangular completamente la estructura de fachada:





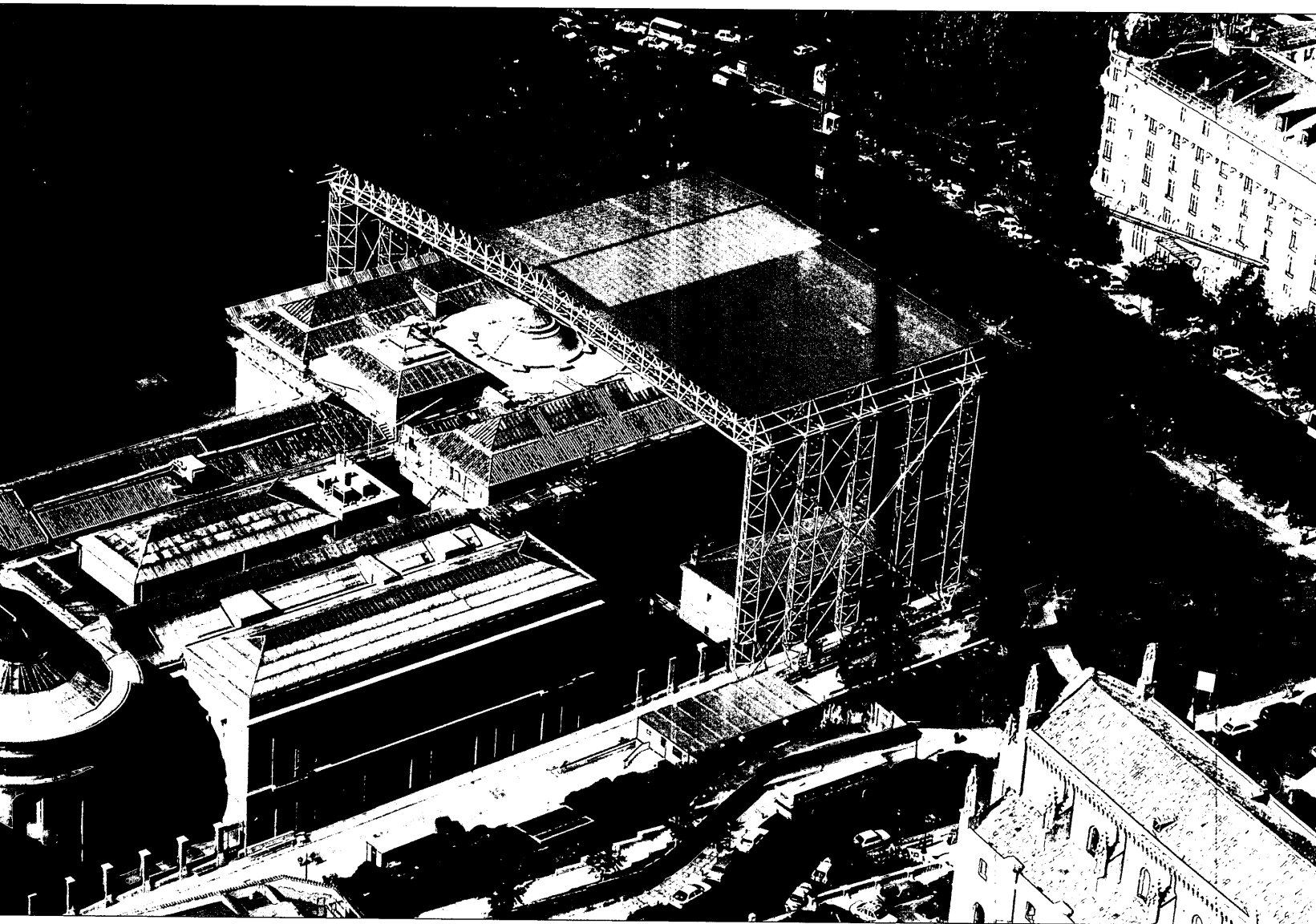
esfuerzos del análisis lineal. Las deformaciones correspondientes al peso propio, se eliminaron con una contraflecha de ejecución de 11 cm en el dintel y una predeformación horizontal de 13 cm en pilares.

▼ b.- Con objeto de optimizar el ancho de la viga triangular del dintel, con vistas a facilitar su transporte desde el Taller (Ingemetal) donde se fabricó, y para poder arriostrar, únicamente, la cubierta al nivel del cordón inferior de la misma, se efectuó un análisis de la carga crítica de pandeo del cordón superior comprimido de la cercha, que no queda atado por ningún arriostramiento. Los análisis efectuados con ANSYS 5.0A, permiten confirmar que pese a tratarse de una cercha triangular, con sus tres caras trianguladas, la longitud efectiva de pandeo del cordón superior no tiene por que ser la distancia entre nudos (2.875 m).



Para la cercha finalmente adoptada con canto 3.5 m, y separación de cordones en el cordón inferior traccionado de 2.35 m, se obtuvieron los siguientes resultados:

En situación de montaje, en el que se monta con grúa un dintel único, con la carga aplicada al nivel del cordón superior y con el cordón inferior sin arriostrar, la longitud efectiva de pandeo es de 5.86 m. En un estudio de una situación de momento constante, la longitud de pandeo del cordón superior comprimido es de 5.50 m. Con carga aplicada al nivel del cordón superior y con el cordón inferior



arriostrado (situación final) la longitud efectiva es de 4.92 m.

La longitud de pandeo del cordón comprimido es, por tanto, casi el doble de la distancia entre nudos (ésta es 2.875 m), en contra de la creencia de que en una cercha de sección triangular, los dos cordones traccionados, "sujetan" el cordón comprimido. Sólo si se aumentase el ancho del cordón inferior a 2.85 m (lo que no se hizo, por problemas de transporte) la longitud efectiva de pandeo sería prácticamente igual a la distancia entre nudos.

▼ c.- La comprobación de los nudos se efectuó conforme a los criterios de uniones tubulares, no contemplados por nuestra Normativa, pero sí por el Eurocódigo 3 y otras Normas.

Al tratarse tanto los cordones superiores como inferior, de "tubos" constituidos por dos perfiles UPN soldados entre sí

(en los que la soldadura de unión no tiene apenas penetración), se procedió a verificar la validez de la formulación de uniones tubulares, cuando el tubo está configurado de este modo.

Un análisis por elementos finitos, efectuado también con ANSYS 5.0A, buscó comparar para un nudo en T, la curva de carga en montante-deformación en la cara del cordón, tanto cuando este es un tubo completo (situación considerada por las Normas), como para un "tubo" constituido por dos mitades (las dos UPN). El análisis efectuado, suponiendo un comportamiento no lineal del material y no lineal geométrico, se realiza aplicando progresivamente un desplazamiento impuesto al extremo del tubo que representa al montante.

Los resultados obtenidos en ambas situaciones, para la relación β (diámetro de cor dón/diámetro de montante) de los cordones superior e inferior del diseño efectuado, son comparables entre sí y similares a los de la formulación del Eurocód-

go 3 (prescindiendo de los factores correctores y de simplificación introducidos en la formulación final del EC-3).

Para valores de β menores, se ha detectado (aunque el estudio no fue paramétricamente extenso) una mayor deformabilidad para cargas de servicio, en la solución de cordón configurado por dos UPN frente al tubo, si bien la carga última no parece que se vea afectada.

3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS MECANISMOS

Cada uno de los 5 pórticos que constituyen la sobrecubierta apoya en dos bogies, uno en cada viga carril. Cada bogie tiene dos ruedas de diámetro 630 mm, separadas 1.0 m en una estructura soporte, con punto de apoyo central articulado mediante un bulón, de forma que la carga se distribuya por igual a ambas ruedas.

Los bogies se diseñaron para soportar una carga vertical, en posición estacionada, de 60 ton y una carga horizontal transversal, a nivel del carril, de 12 ton en la alineación lado Paseo del Prado.

De los 5 bogies de cada alineación, los centrales de ambas alineaciones son locos, y los 4 restantes son motrices. Los bogies motrices van accionados por un motorreductor DEMAG de 3.4 Kw, mandados por convertidores de frecuencia programados con rampas de aceleración y deceleración que no superen en arranque y parada los 0.05 m/seg². Se fijó este valor tan pequeño a fin de minimizar los esfuerzos dinámicos al comienzo y final del movimiento, dado que la mayor parte de la masa de la estructura, está en la cubierta, a una distancia de 30 metros, del mismo orden que la longitud de la estructura en el sentido del movimiento (28 metros). Tanto la frenada como el posicionamiento, están gobernados por el propio variador de frecuencia.

El motor-freno es un motor asíncrono con rotor en jaula de ardilla y entrehierro cónico, combinado con un freno accionado por un resorte. Al conectarlo se genera una fuerza magnética axial que al atraer el rotor, lo desplaza axialmente contrarestando la fuerza del resorte del freno, mientras que al des-



conectarse o producirse un fallo de tensión, queda frenado mecánicamente.

Los motores de ambas alineaciones se conectan de forma que se crea un "eje eléctrico", que asegura un avance simultáneo de los bogies de ambas alineaciones. Además de este mecanismo, comprobable en el cuadro de mandos, se realiza un control visual del movimiento.

El motor elegido (3.4 Kw / 685 rpm) proporciona un par nominal de 47 Nm, que junto con la reductora ($i=175$), permite hacer frente a los esfuerzos longitudinales de viento de operación (12 ton) resistencia a la rodadura (0.33%) y pendiente (1.7%) con la rueda de 630 mm.

La velocidad resultante de traslación es de 7.8 m/min. El convertidor de frecuencia permite, tras una conversión previa de la corriente alterna en continua, obtener corriente alterna de frecuencia variable, proporcionando una curva par de giro-revoluciones prácticamente constante.

Para hacer frente al viento longitudinal de diseño, en posición de pórticos estacionados, 50 ton, es necesario complementar la resistencia al deslizamiento de las ruedas frenadas (8 ruedas), ya que la capacidad del freno motor supera el par de deslizamiento. Para ello se calzan las ruedas locas, que de este modo pasan a contribuir a la resistencia al deslizamiento.

4. A MODO DE CONCLUSIÓN

La definición de una solución que garantizase la integridad del Museo del Prado, durante la ejecución de las Obras, ha sido más complicada de lo que se puede deducir de la descripción técnica efectuada: La preocupación y sensibilidad de todos los implicados (Administración, Patronato del Museo, Dirección de la Obra, Equipo técnico del Museo y Constructoras) por encontrar la más segura y rápida ejecución de la Obra ha permitido la búsqueda conjunta de la mejor solución y, como resultado, la fabricación de un medio auxiliar de Obra, ciertamente excepcional, pero que se justifica sobradamente por la singularidad del Edificio y Contenido a proteger. ●