

cubierta del estadio de Moscow*EE. UU.

JERRY JOE YORK, P. E. Asociados
KKBNA Consulting Engineers

886 - 35

sinopsis

Esta cubierta es la única estructura de gran luz realizada hasta ahora con arcos mixtos, de acero y madera, de alma calada.

La estructura es un cuerpo cilíndrico compuesto de 200 arcos triangulados de 0,61 m de anchura y 2,29 m de espesor.

La cubierta, con una luz de 121,92 m, se apoya sobre vigas piramidales de acero conectadas, por su vértice, a una viga de hormigón, mediante pasadores.

El método de realización de la cubierta fue el siguiente:

- primero se realizó la mitad de un arco y se situó en su posición;
- posteriormente se colocó el otro medio arco;
- finalmente se unieron ambas mitades.

Los muros que cierran el estadio se construyeron a base de viguetas de madera y acero colocadas verticalmente y recubiertas con madera contrachapada. La altura de las viguetas varía de 6,09 a 31,39 metros.



INTRODUCCION

Cualquier aficionado a un acontecimiento deportivo al aire libre sabe que el tiempo lluvioso o con demasiado viento reduce el placer del acontecimiento. Igualmente los participantes encuentran muchas dificultades para actuar en condiciones adversas de tiempo. Estas fueron algunas de las consideraciones que llevaron a la Universidad de Idaho a quemar el antiguo estadio de madera y edificar un nuevo estadio.

Con este nuevo estadio se pretendía no sólo proporcionar asiento para ver los espectáculos, sino proteger a los jugadores y espectadores de los elementos.

En el pasado pudo haber dificultad en realizar un sistema de cubierta económica para proteger a los aficionados al fútbol u otros deportes. Desarrollos recientes en las estruc-

turas de cubierta de gran luz, no obstante, han hecho esto posible, y una de las soluciones más satisfactorias a este problema fue la usada para cubrir el estadio de la Universidad de Idaho, en Moscow, Idaho. Este estadio sirve para una gran variedad de deportes: fútbol, baloncesto, tenis, pistas interiores de atletismo y golf. Es también el único estadio, en Estados Unidos, con un césped sintético que se puede quitar y enrollar en un tambor cilíndrico de acero, permitiendo celebrar conciertos, exhibiciones y asambleas.

La estructura usada para cubrir este estadio es un arco cilíndrico doblemente articulado, con una luz de 121 m y una longitud de 121,92 metros. Cubre una superficie de 14.992,4 m² de terreno y tiene una altura neta de 45,72 m sobre el terreno de juego y de 30,48 m desde la línea de arranque. El radio de este arco es de 74,06 m. El estadio tiene actualmente una capacidad de 18.000 espectadores, previendo-



fabricadas piezas con una longitud de 24,38 m y un ancho de 609,6 mm, precortadas y preperforadas en fábrica con una tolerancia de ± 3 mm. Se usaron para la cubierta 3.300 piezas de este tipo.

Los elementos diagonales colocados entre los cordones superior e inferior son tubos huecos de acero galvanizado en zinc y laminados en frío.



se aumentar su capacidad en 5.000 espectadores en una futura expansión por los extremos. Los muros que cierran los fondos norte y sur varían su altura desde 6,09 m hasta 31,39 m y se extienden verticalmente desde las vigas de hormigón a lo largo del terreno de juego hasta el borde de la superficie de la cubierta.

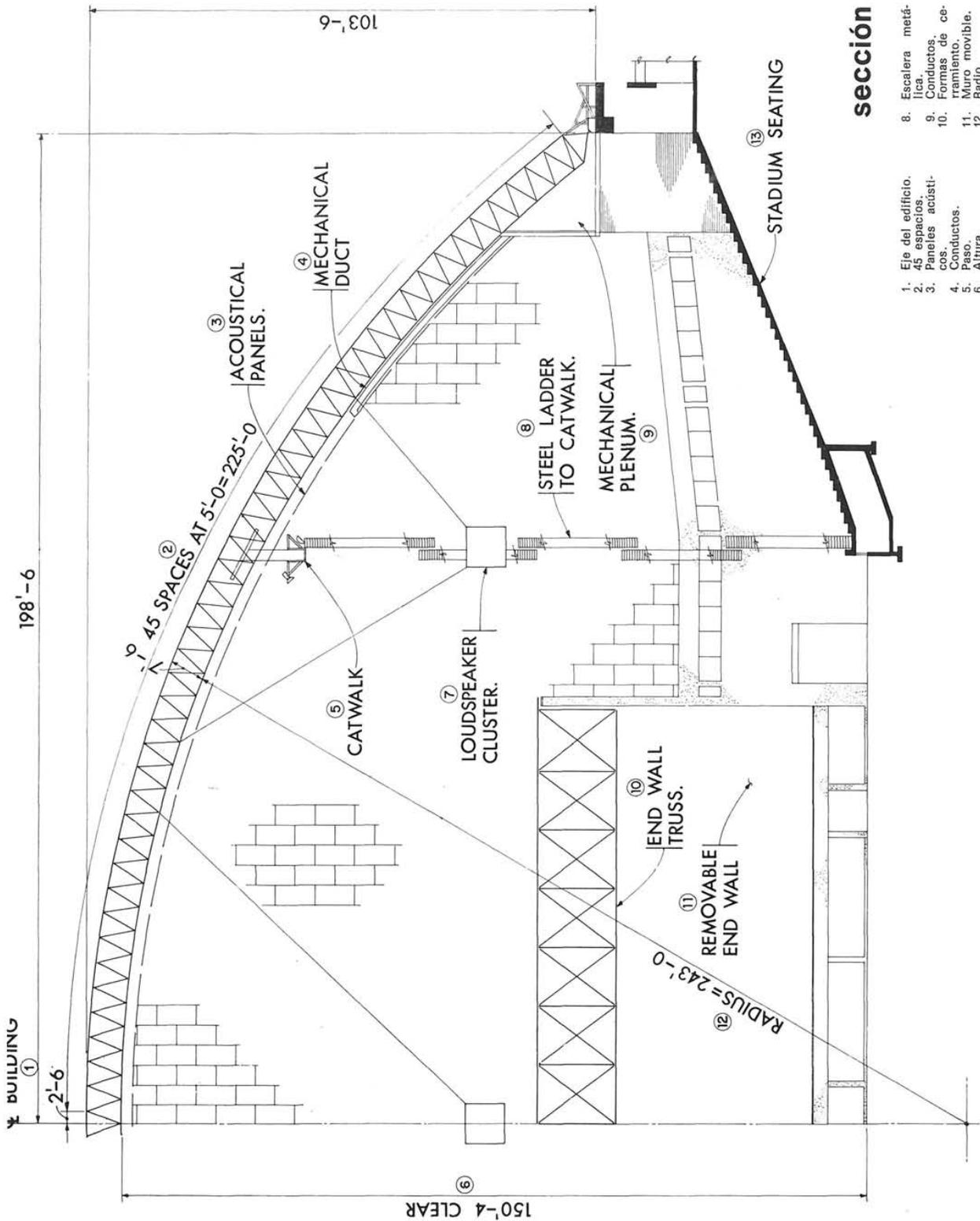
El estadio se construirá en tres fases: la primera fue la construcción del terreno de juego y las gradas a ambos lados de dicho terreno, incluyendo las vigas soporte colocadas en toda la longitud del campo por detrás de las gradas. Estas vigas se proyectaron para soportar la cubierta prevista para la segunda fase. La primera fase del estadio costó aproximadamente 4 millones de dólares y la segunda 3,8 millones, incluyendo la cubierta y los muros de los fondos, de un coste de 1,2 millones de dólares. La primera fase se terminó a finales de 1973 y la segunda a finales de 1975, con tiempo suficiente para celebrar el primer partido de fútbol de la temporada. La tercera fase consistirá en añadir gradas y una cubierta por los extremos del terreno de juego.

SISTEMA DE CUBIERTA

El arco cilíndrico de la cubierta tiene un sistema superficial de tensado llamado «Trus Dek». El elemento básico de la cubierta es un arco triangulado de alma abierta con los cordones superior e inferior hechos de madera laminada y con la parte central realizada con tubos de acero colocados diagonalmente. Los cordones fueron constituidos por planchas de 43 a 45,5 mm de espesor por 609,6 mm de ancho. Cada plancha está hecha por laminación de 16 capas de 3,17 mm de abeto Douglas combinada con una baja presión y con una resina fenólica, en una operación de alimentación continua.

Algunas de las ventajas del material Micro-Lam, respecto a la madera sólida normal, son: no se alabea, no se agrieta, no tiene nudos y, debido a los métodos de fabricación, es muy uniforme en calidad. Tampoco es objeto de contracción o entumecimiento, por lo que es posible fabricarlo con tolerancias muy estrechas. Debido a la laminación se eliminan las juntas en el producto acabado. En el caso de la cubierta del Estadio de Moscow fueron





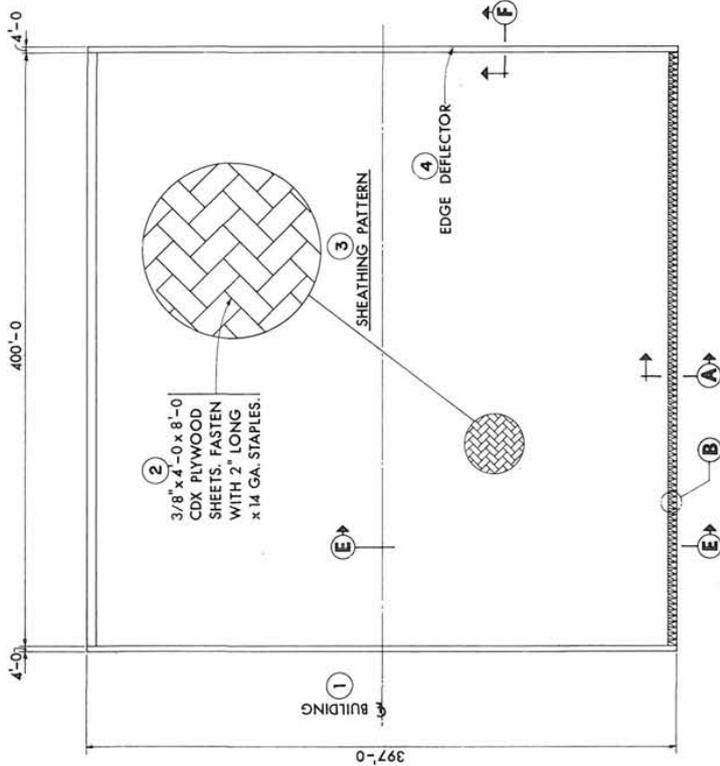
sección

- 1. Eje del edificio.
- 2. 45 espacios.
- 3. Paneles acústicos.
- 4. Conductos.
- 5. Paso.
- 6. Altura.
- 7. Altavoces.
- 8. Escalera metálica.
- 9. Conductos.
- 10. Formas de cerramiento.
- 11. Muro móvil.
- 12. Radio.
- 13. Graderío.

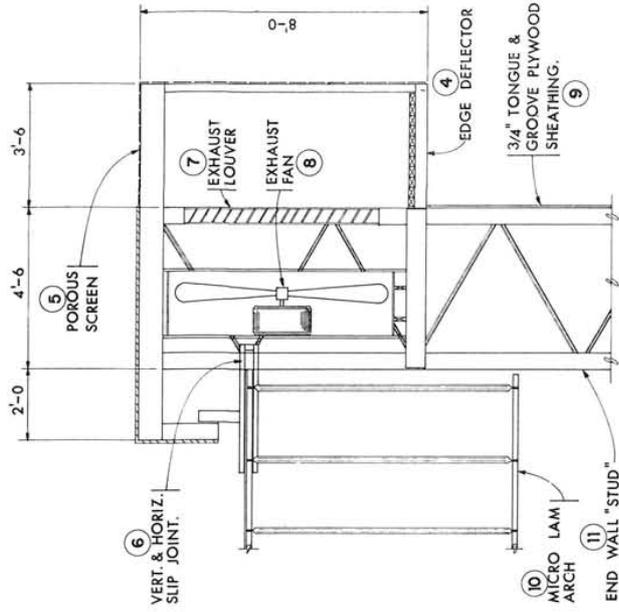
Los tubos se aplastaron por sus extremos y se perforaron con un troquel especial para poderlos conectar a los cordones superior e inferior.

Los tubos se hallan conectados a las cabezas superior e inferior mediante grapas angulares de acero soldadas a los extremos con una pletina de acero cuadrada de 12,7 mm. Los

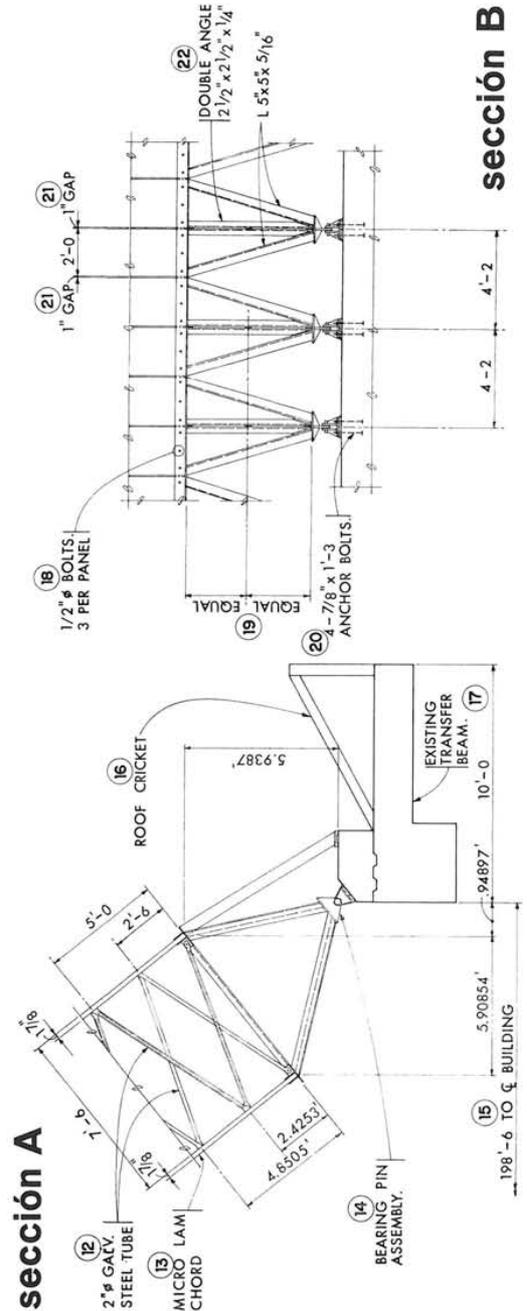
planta de cubiertas



sección F



sección A



sección B

1. Edificio.
2. Madera contrachapada.
3. Cubierta exterior.
4. Borde rigidizador.
5. Lámina porosa.
6. Junta vertical y horizontal.
7. Ventilación.
8. Madera.
9. Intradós del arco.
10. Cerramiento.
11. Acero.
12. Acero.
13. Acero.
14. Edificio.
15. Edificio.
16. Abrazadera de cubierta.
17. Viga existente.
18. Roblones.
19. Igual.
20. Anclajes.
21. Juntas.
22. Angulares dobles.

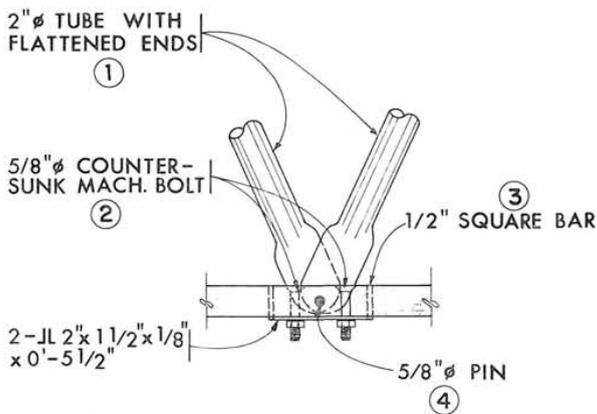
extremos aplastados de los tubos se colocaron en el trasdós de los angulares, sujetándose a ellos pasadores de acero de diámetro 15,8 mm. Cada angular se sujeta a las piezas

de madera Micro-Lam de los cordones superior e inferior con pernos de cabeza plana de 15,8 mm de diámetro, con espigas hexagonales abocardadas. Las tuercas de los pernos

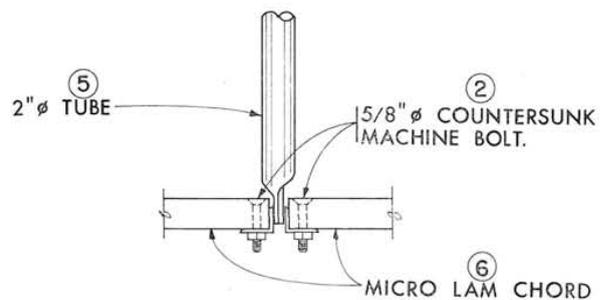
se soldaron provisionalmente a las alas resistentes de los angulares en fábrica. Se usaron pernos de cabeza plana, puesto que así se podía mantener plana la parte de arriba del cordón superior. Los arcos que forman la cubierta cilíndrica se apoyan por la parte inferior en vigas trianguladas continuas de acero, de forma piramidal hecha de perfiles diagonales L 127 × 128,5 mm y verticales 2 L de 12,7 × 50,7 y 12,7 × 6,3 mm. Estas vigas soporte están unidas por dos lados opuestos de la base de la pirámide al extremo de los arcos y por el vértice de la pirámide a una viga de hormigón mediante un conjunto de pasadores de cojinete. Los 192 pasadores usados se unen a la estructura con pernos embe-

bidos en un bordillo de hormigón moldeado en la parte superior de las vigas de detrás de las gradas. Las vigas soporte tienen cada 15,24 m una junta deslizante conectada a los extremos de los arcos para permitir la expansión y contracción.

La superficie por encima del cordón superior de los arcos lleva un contrachapado CDX de 644,5 mm de espesor. El contrachapado actúa como un diafragma para transmitir las reacciones horizontales producidas por el viento en la parte superior de los muros de los fondos, diagonalmente hacia abajo a las vigas soporte y, por consiguiente, a las vigas continuas de hormigón de detrás de las gradas.

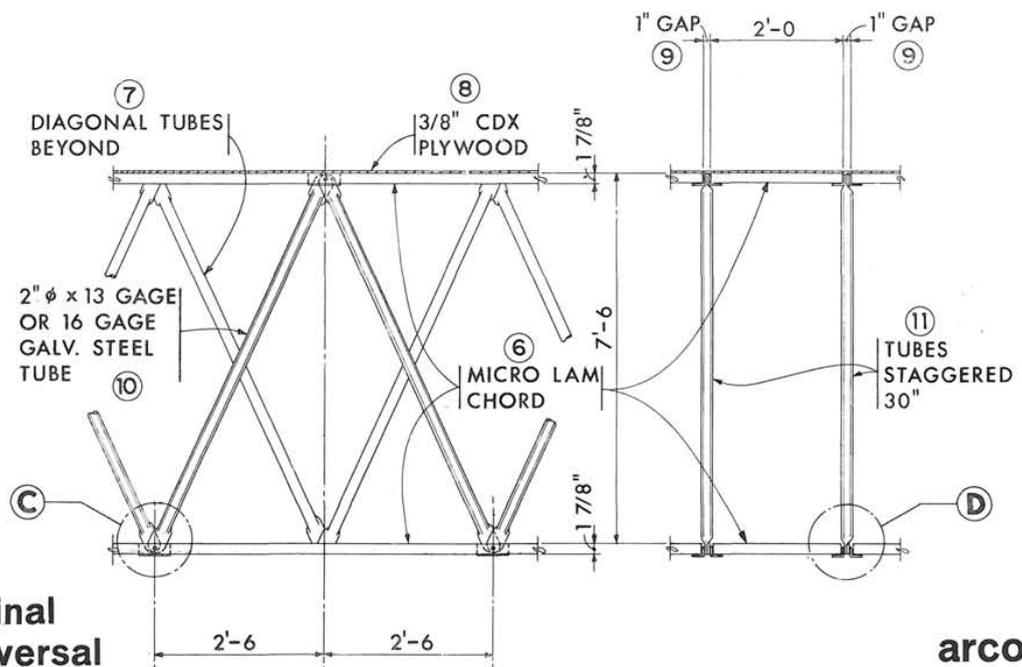


detalle E



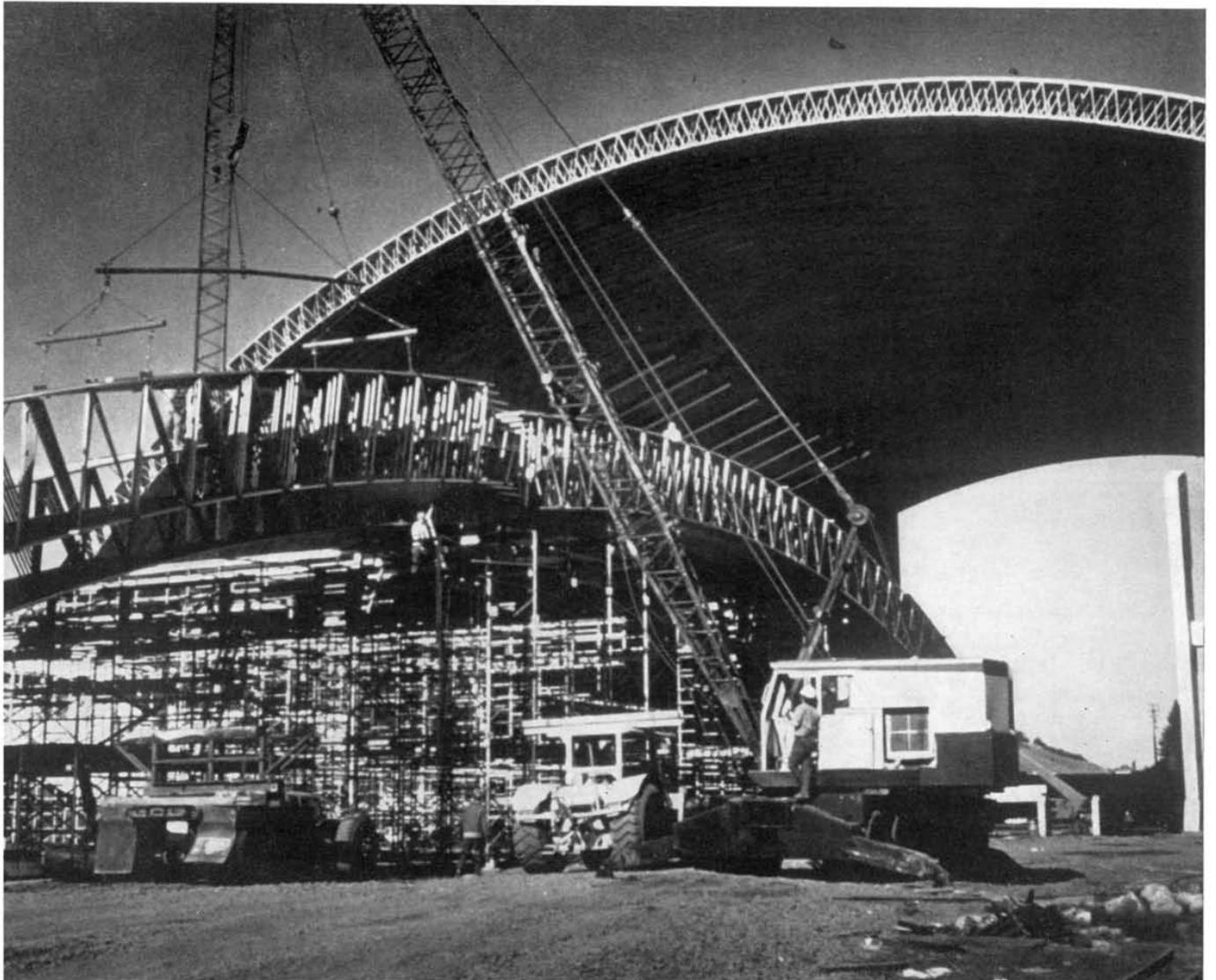
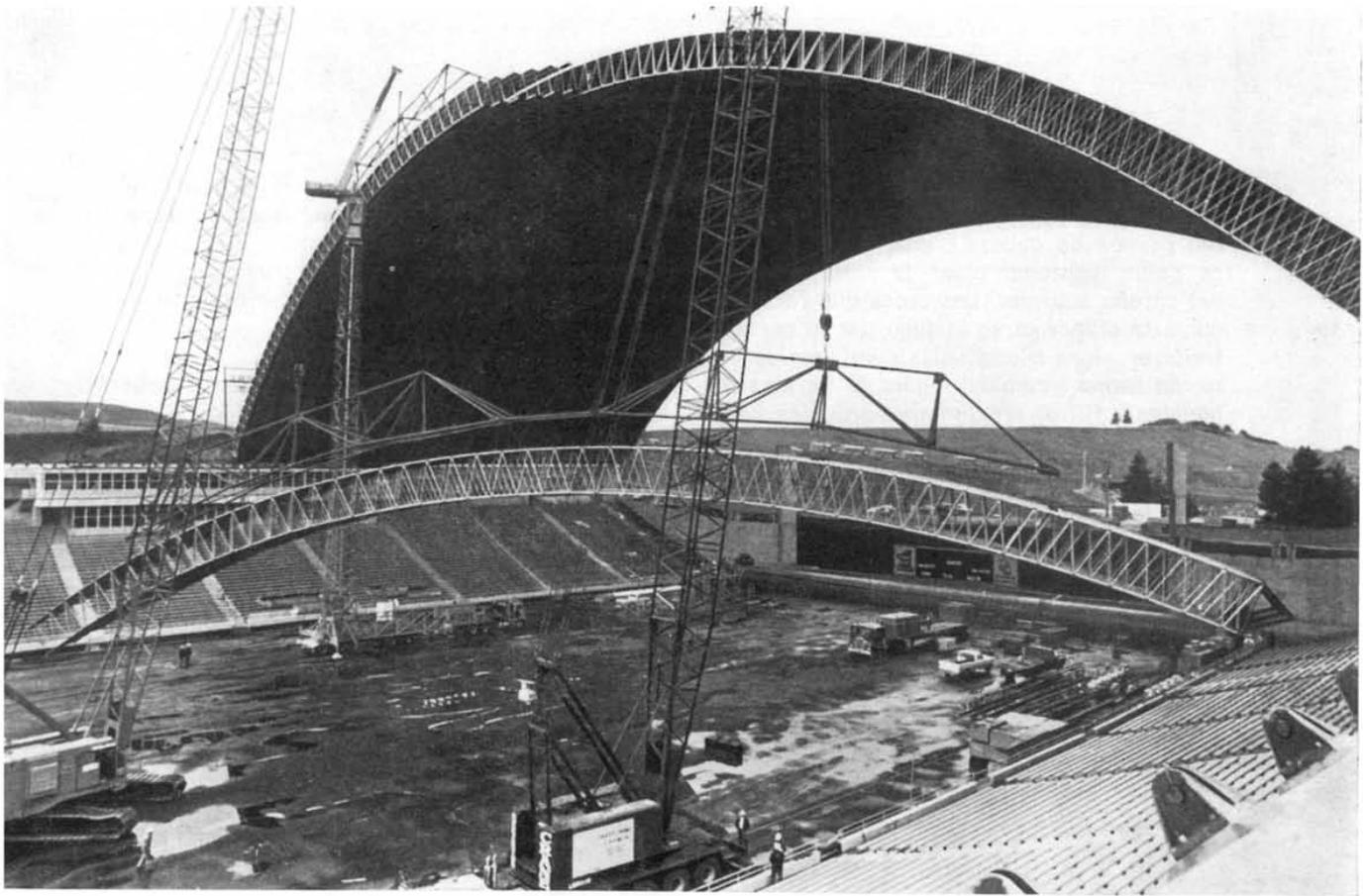
detalle D

1. Tubos.
2. Enlaces.
3. Cuadrado.
4. Pasador.
5. Tubo.
6. Cordón.
7. Diagonales.
8. Madera contrachapada.
9. Juntas.
10. Tubos de acero.
11. Tubos.



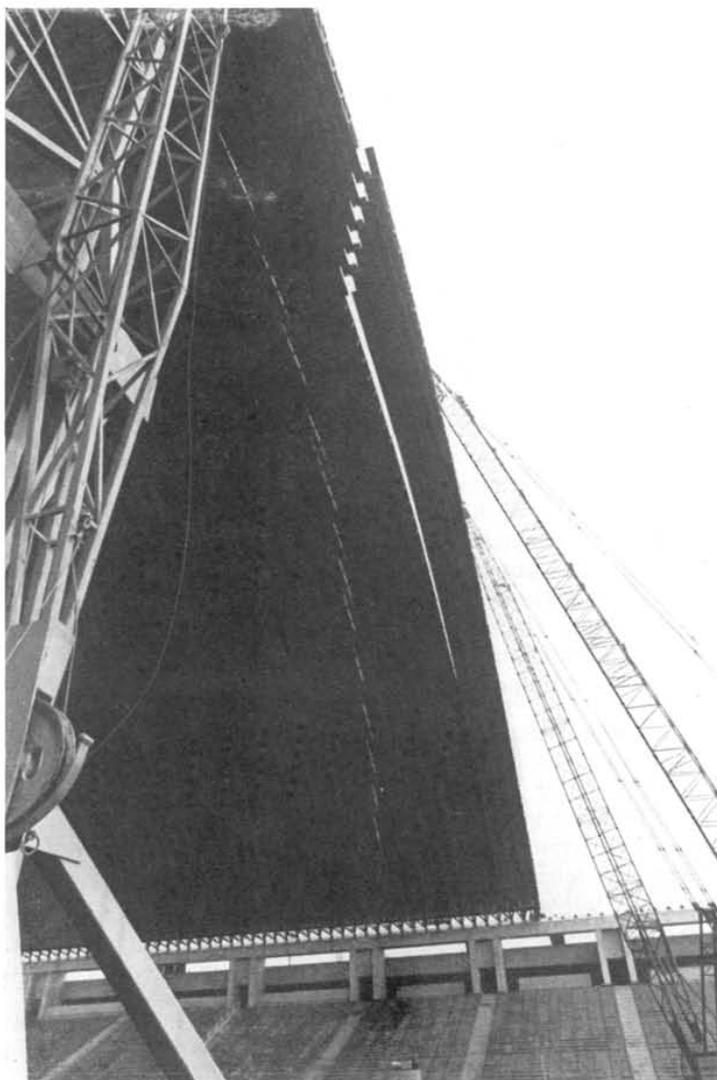
alzado longitudinal y sección transversal

arco



La utilización de contrachapados con su cara granular a 45°, con lo que se aumenta su tensión admisible hasta el doble, permite el uso de contrachapados más delgados. Según la importancia de las tensiones se colocaron de una a tres filas de argollas para fijar el entablado. Una capa de 25,4 mm de espesor de espuma rígida de poliuretano se extendió directamente sobre el contrachapado para que actuase como aislante. Una membrana elastomérica se aplicó después sobre el aislante para impedir la penetración de la humedad en la cubierta.

Los muros de los extremos del estadio se construyeron a base de viguetas de madera y acero de 1.371,6 milímetros de canto. Estas viguetas tienen una longitud que varía de 6,09 a 31,39 m. El exterior de los muros se recubre con un



contrachapado de ranura y lengüeta exterior con 4×4 tablas verticales sobre las juntas que cumplen una función estética y sirven de sellado. Una capa de lana de vidrio se aplicó en la superficie interior del revestimiento para absorber los ruidos. Se colocaron tablas horizontales por la parte interior de las vigas con objeto de conseguir el acabado de la superficie interior de los muros y actuar como aislantes acústicos. Parte de los muros se proyectaron de manera que puedan ser trasladados cuando se haga la tercera fase del proyecto, instalación de las gradas finales. Las conexiones entre el borde superior de los muros y el borde de la cubierta cilíndrica se realizaron con placas de teflon que permiten el movimiento lateral y vertical de la cubierta cilíndrica con respecto a los muros.

En ambos extremos del estadio hay dos columnas de hormigón de 19,81 m de altura y separadas 50,90 m una de otra, que soportan vigas de acero triplanares. El objeto de estas vigas es permitir que se puedan quitar los muros por debajo y construir allí las gradas. Las vigas tienen una sección transversal con una profundidad de 4,87 m en el plano vertical, 3,65 m de ancho en el plano horizontal y 6,09 m en el plano diagonal. Las vigas están apoyadas por cojinetes deslizantes de teflon en la parte superior de las columnas de los extremos. Hay una pasarela en la superficie horizontal de la viga que puede usarse para colocar las cámaras de filmación y televisión.

PROYECTO

Las cargas mínimas exigidas para el proyecto eran:

- 1) Peso propio de la estructura más sobrecarga de los equipos mecánicos, de cubierta y aislamiento, paneles acústicos del cielorraso y redes de distribución.
- 2) Una carga uniforme de nieve de 170,88 kilos por metro cuadrado en todo el arco actuando verticalmente sobre el área proyectada en un plano horizontal.
- 3) Una carga de nieve sobre una mitad del arco que varía de 0 en el vértice del arco a 341,77 kg/m² en el origen.
- 4) Fuerzas de viento producidas por una velocidad del mismo que varía linealmente desde 80 m/h a una altura de 9,14 m hasta 110 m/h a una altura de 91,44 m. Esas cargas se aplicaron según el criterio establecido por la Norma ASCE 3269.
- 5) Cargas sísmicas.

6) Variaciones de temperatura de -50°F a 115°F en el exterior y de -40°F a 190°F en el interior.

7) Variaciones de humedad producidas por aire con una humedad relativa mínima del 20 % hasta una humedad relativa máxima del 85 %.

Teniendo en cuenta estos criterios básicos se presentaron varios proyectos: arcos de acero con vigas de acero y tirantes, y tableros también de acero; vigas de madera con tablero también de madera, y el sistema mixto Trus Dek, finalmente elegido.

Debido a la naturaleza de las cargas de viento y al hecho de no considerar el efecto del terreno circundante en la Norma ASCE 3269, se consideró necesario realizar ensayos en el túnel de viento de un modelo reducido de la estructura del estadio. El modelo consideró el terreno circundante y proporcionó datos sobre el efecto del viento desde distintos ángulos de ataque. El terreno que rodea al estadio, incluyendo árboles y cerros, se realizó de la manera más perfecta posible. Se hicieron dos modelos: uno para analizar el flujo del aire sobre la estructura de la cubierta, y otro para las lecturas de presión en diferentes puntos de la superficie de la cubierta. Los modelos se sometieron a un viento uniforme de 50 m/h y se realizaron lecturas con diferentes ángulos de ataque desde 0° (perpendicular al eje del arco) hasta 355° , con incrementos de 5° .

En contra de las previsiones de la Norma ASCE, las fuerzas máximas se encontraron con un ángulo de 223° hacia el eje del arco. Se vio que las fuerzas variaban considerablemente tanto a lo largo del borde de la cubierta como en la superficie curva. A lo largo del borde las presiones varían de un máximo positivo de 122,06 kg/m² a un máximo negativo de 258,77 kg/m². A lo largo de la superficie curva situada a 60,96 m del borde, la presión positiva máxima fue de 83 kg/m² y la presión negativa máxima fue de 122,06 kg/m².

Debido a la uniformidad de la construcción del arco se hizo necesario proyectar toda la estructura para una fuerza máxima del viento, considerándose una máxima presión positiva de 146,47 kg/m² y una máxima presión negativa de 170,88 kg/m² que se producen aproximadamente a 15,24 m del borde de la cubierta. Puesto que las fuerzas determinadas por los ensayos en el túnel de viento exceden estos valores se consideró necesario reducir

las presiones negativas en ese área. Tres maneras diferentes de romper el flujo del aire y, por tanto, de reducir las presiones negativas se idearon y ensayaron en el túnel de viento con objeto de comprobar sus efectos. Se probó primero una lámina aerodinámica muy parecida a la existente en la aleta de un aeroplano, encontrándose que era inefectiva a menos que fuese muy larga y se colocara muy alta sobre la cubierta. Después se probó una barrera con largueros horizontales formando ángulos de 0°, 45° y 90° con la superficie de la cubierta, y aunque a 45° se consiguió un cierto efecto de reducción de las presiones a lo largo del borde, se encontraron otros inconvenientes que hicieron desechar esta solución. Finalmente la solución que produjo el resultado deseado fue un cajón poroso cubierto con una pantalla de tamices muy finos.

El peso propio uniforme considerado fue de 117,17 kg/m², incluyendo: cubierta, aislamiento y cielorraso. La sobrecarga resultó difícil de obtener debido al hecho de que sólo una cuarta parte de los sistemas mecánicos se instalaron inicialmente, lo que produjo una sobrecarga no uniforme en algunos de los arcos interiores. Para paliar los efectos de esta sobrecarga desequilibrada se colocaron sacos de arena en el extremo opuesto a aquél donde se instaló el equipo mecánico, consiguiéndose de esta manera el equilibrio de todo el arco. Todos los sacos de arena se quitarán cuando se coloque el sistema mecánico final.

Para el dimensionamiento se consideró primero un arco de 0,61 m y se estudió como un emparrillado plano de 187 juntas y 371 elementos en un computador GA 18/30 con un programa IBMSTRESS.

Se consideraron 29 hipótesis de carga, encontrándose las condiciones más desfavorables cuando la nieve, el peso propio y el viento actúan en un mismo lado del arco. De esta manera se vio que las fuerzas máximas en la cabeza de las vigas eran de 23.451,12 kg de compresión y 14.515,2 kg de tracción, mientras que en el alma eran de 3.357 kg de compresión y 4.057 kg de tracción. Con estos datos se varió el espesor del arco y se proyectaron las cabezas y elementos diagonales de las almas. Una vez realizados tres ensayos de carga en una sección de 1,40 m de ancho y 9,14 m de largo, en donde se comprobó la casi exactitud de los análisis matemáticos, se estudió toda la estructura como un elemento espacial mediante un programa STRESS.

Los elementos verticales de los muros se dimensionaron para una flexión horizontal producida por una carga de viento de 122,06 kg por metro cuadrado.

El revestimiento de la cubierta se proyectó para cortantes que varían de 0 a 1.785,8 kg por metro lineal.

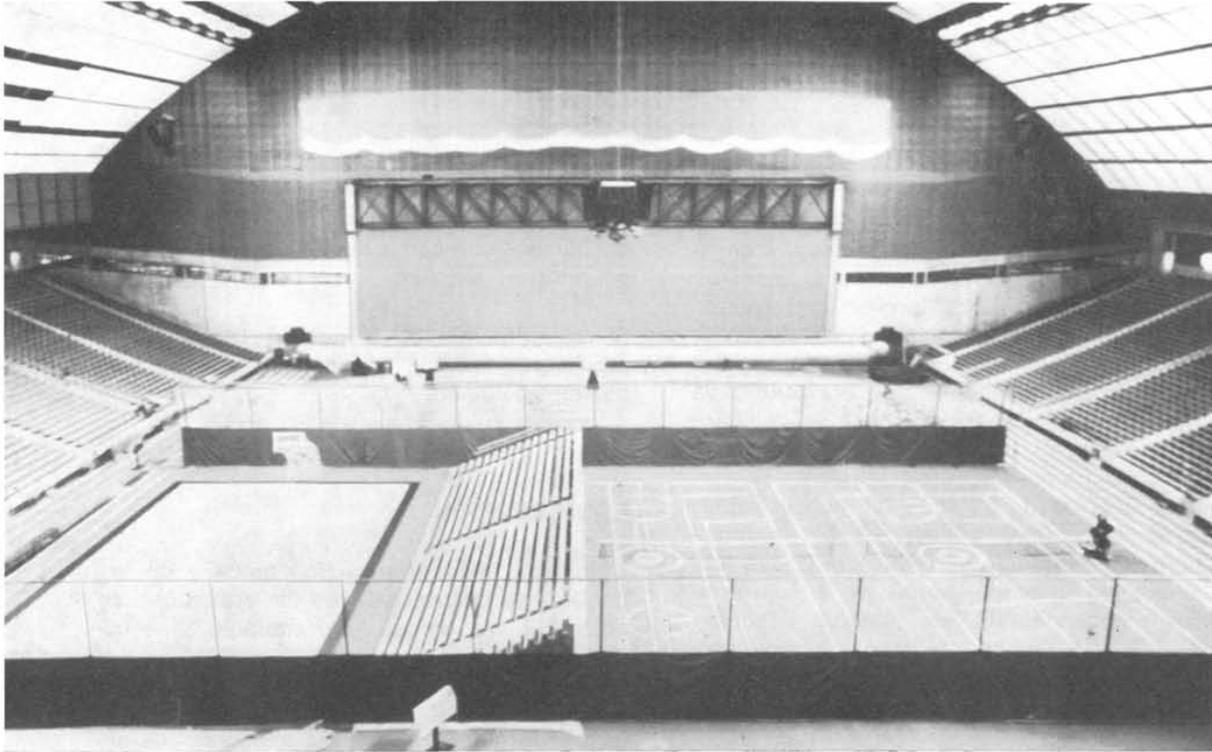
CONSTRUCCION

Todos los elementos de los arcos y de los muros y la mayor parte de las armaduras se colocaron ya unidos por equipos especialmente adiestrados.

La construcción del arco se realizó en el suelo, con lo que se eliminó la necesidad de andamiaje dentro del edificio y se minimizó el uso de obreros altamente cualificados. Algunos elementos de los muros y del arco se prefabricaron en taller en piezas bastante largas, aunque fácilmente transportables en camiones o ferrocarril, y se terminaron en la obra.

Las cabezas superior e inferior de los elementos del arco, previamente perforadas y cortadas, se transportaron a la obra por ferrocarril. Las diagonales se pintaron de color y se transportaron a la obra de la misma manera. Los elementos diagonales del alma se unieron con grapas a las cabezas superior e inferior. Seguidamente los seis Micro-Lam de 24,38 m se colocaron sobre una especie de plantillas curvas que asemejan la curvatura del arco. Se sujetaron después las grapas a las cabezas superior e inferior con pernos. De esta manera se consiguen seis elementos adyacentes de arco de, aproximadamente, 24,38 m de longitud. Las vigas de apoyo del arco compradas en fábrica en longitudes de 3,84 m se colocaron entonces en el extremo de uno de los segmentos de arco de 24,38 m. Se llevaron tres de estos elementos al andamiaje curvo y allí se empalmaron, formando unidades de 68,58 m de largo y de 20.411,55 kg de peso. Estas unidades de medio arco se llevaron a su posición final mediante grúas móviles y allí se unieron formando el arco completo. Análogamente se hizo con las unidades adyacentes, consiguiéndose en 24 días de trabajo colocar 32 unidades.

En cuanto a la construcción de los muros de los fondos se realizó de la siguiente manera: Los planos vertical y horizontal de las vigas triangulares se unieron en taller formando tres



piezas longitudinales. Estas piezas se ajustaron en el campo soldándose los elementos diagonales de las vigas in situ. Las vigas completas se levantaron mediante dos grúas y se colocaron en su sitio sobre la parte superior de las columnas de hormigón con cojinetes de teflon.

Una vez terminada la colocación de arcos y muros comenzó el trabajo para la realización de los sistemas eléctricos y mecánicos. El espacio de 2,31 m existente entre las cabezas superior e inferior de las vigas facilita a los hombres el trabajo dentro del arco en completa seguridad. Un conducto de aire triangular corre a lo largo de la base de los arcos por el interior de las vigas soporte que se encuentran en la parte inferior de la estructura de la cubierta. Los conductos circulares que corren sobre las gradas por la parte inferior de la cubierta se empalmaron en el suelo, levantándose hacia su posición con tornos eléctricos portátiles y cables. Un extremo del conducto circular se conectó al triangular por su base, eliminándose así la necesidad de andamiaje interior y resultando de un costo insignificante.

Existen unas pasarelas que recorren la longitud total del estadio a ambos lados y sirven de soporte a los altavoces.

Se prefabricó el cielorraso acústico con paneles cuadrados de 3,65 m, colocándose en su posición mediante tornos eléctricos portátiles y cables. Una abertura de 0,91 m alrede-

dor del borde de los paneles actúa como deflector y absorbe las reflexiones del sonido. Además de los altavoces suspendidos de las pasarelas a ambos lados de la cubierta existen otros tres grupos —que pesan aproximadamente 4.535,9 kg cada uno— colocados en la línea central del arco. Estos altavoces, al igual que los anteriores, están equipados de tornos a fin de poder bajarlos al suelo para su reparación.

A la vez que se realizaban los trabajos finales por debajo de la cubierta, se colocó el contrachapado exterior sobre la superficie superior, extendiéndose, por encima, el aislamiento de espuma y la membrana elastomérica de 25,4 milímetros de espesor.

CONCLUSION

La cubierta del Estadio Moscow representa una original solución ingenieril al problema de cubrir una gran superficie. El sistema «Trus Dek» desarrollado ofrece distintas ventajas sobre otros sistemas estructurales usados anteriormente.

La estructura mixta de acero y madera es sólida, ligera y económica. Es también muy sencilla de unir y colocar en su sitio, y puede ser realizada rápidamente por trabajadores normales con un mínimo de grúas y andamiaje.

résumé

Couverture du Stade de Moscow. Etat Unis

Jerry Joe York Associates,
KKBNA Consulting Engineers

Cette couverture est la seule charpente de grande portée réalisée à ce jour à l'aide d'arcs mixtes, acier et bois, d'âme creuse. C'est un corps cylindrique composé de 200 arcs triangulés de 0,61 m de large et 2,29 m d'épaisseur.

La couverture d'une portée de 121,92 m s'appuie sur des poutres pyramidales d'acier connectées, à leur sommet, à une poutre de béton à l'aide de goujons.

La méthode de réalisation fut la suivante: on construisit premièrement une moitié d'arc qui fut mise en place, l'autre moitié fut placée ensuite et l'on procéda à l'union des deux moitiés.

Les murs qui ferment la stade furent construits à l'aide de poutrelles de bois et acier, placées verticalement et recouvertes de contre-plaqué. La hauteur de ces poutrelles varie de 6,09 m à 31,39 m.

summary

Roof for the Moscow (U.S.A.) Stadium

Jerry Joe York Associates,
KKBNA Consulting Engineers

This roof is the only large span structure built with trusses of mixed materials, steel and hollow-core wood.

The structure is a cylindrical body formed by 200 triangular archtrusses 0.61 m in width and 2.29 m in height.

The roof, with a 121.92 m span is supported by pyramid-shaped steel beams connected at their vertex, by means of pass-through bolts to a concrete beam.

The erection method used was as follows:

- first, a section constituting one-half of the arch-truss was constructed and put in place;
- second, the second half of the arch-truss was put in place;
- third, the two halves were joined.

The walls enclosing the stadium were built with wooden and steel vertical pilasters supporting plywood planks with a height varying from 6.09 to 31.39 m.

zusammenfassung

Ueberdachung des Stadiums in Moscow - U.S.A.

Jerry Joe York Associates,
KKBNA Consulting Engineers

Diese Ueberdachung ist bisher die einzige Struktur lichter Weite, die mit gemischten Bögen aus Metall und Holz mit Hohlsteg hergestellt wurde.

Die Struktur wird durch einen zylindrischen Körper aus 200 dreieckigen Bögen von 0,61 m Breite und 2,29 m Stärke gebildet.

Die Ueberdeckung mit einer lichten Weite von 121,92 m stützt sich auf pyramidenförmigen Stahlbalken ab, die an der Spitze durch Riegel mit einem Betonbalken verbunden sind.

Die zur Herstellung der Ueberdachung verwendete Methode ist folgende:

- Zuerst wurde die Hälfte eines Bogens hergestellt und in seine Lage gebracht;
- anschliessend wurde die zweite Hälfte des Bogens angeordnet;
- zuletzt wurden beide Hälften miteinander verbunden.

Die das Stadium schliessenden Mauern wurden aus senkrecht aufgestellten Holz- und Stahlträgern hergestellt, die mit Sperrholz verkleidet wurden. Die Höhe der Träger schwankt zwischen 6,09 und 31,39 m.

publicación del i. e. t. c. c.

LAMINAS DE HORMIGON

A. M. Haas

Dr. Ingeniero

Traducción de **José M.^a Urcelay**
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

El profesor A. M. Haas es personalidad muy conocida en todo el mundo dentro del campo de las estructuras laminares.

El libro, que ha sido traducido a varios idiomas, es de exposición clara e intuitiva, y destaca los conceptos fundamentales sobre los desarrollos matemáticos.

En su primera parte, el libro trata de la teoría de membrana en láminas de revolución. A continuación se aplica esta teoría, para el caso en que las cargas sean también de revolución, a las láminas de revolución más usuales: cúpulas esférica y elíptica, láminas cónicas, depósitos.

Se estudian seguidamente las láminas de revolución sometidas a cargas que no sean de revolución, así como las tensiones secundarias debidas a flexiones en láminas de revolución.

Se termina la primera parte con un capítulo dedicado a la construcción de láminas.

En la segunda parte se estudia la teoría de membrana para láminas rebajadas, dedicando sendos capítulos a las láminas en paraboloides hiperbólico, en paraboloides elíptico y en conoide.

A continuación se dedica un extenso capítulo a la flexión.

Seguidamente se estudia el caso de pequeñas cargas que originan fuertes tensiones por flexión.

Finalmente, el libro dedica un capítulo al pandeo.

Un volumen encuadernado en tela, brillantemente presentado, de 17 × 24,5 cm, compuesto de 420 páginas, numerosas figuras, tablas y ábacos. Precios: España, 1.250 ptas.; extranjero, \$ 25.