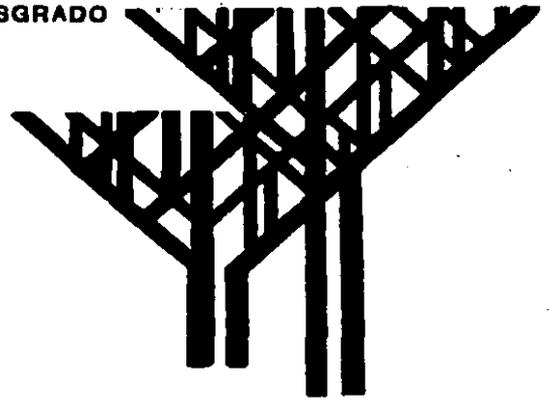


00169

2ej.
5

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE ARQUITECTURA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



VELARIAS DE ACERO

**METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION PARA EL DEBARROLLO
EXPERIMENTAL DE ESTRUCTURAS VELARIAS DE ACERO**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRIA
EN ARQUITECTURA (TECNOLOGIA) QUE PRESENTA EL
ARQ. JOSE MIRAFUENTES GALVAN MARZO DE 1989**



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

.....V E L A R I A S.....D E.....A C E R O.....

.....C O N T E N I D O.....

PROLOGO.....4

INTRODUCCION.....6

1. LAS PRIMERAS OBRAS CONSTRUIDAS9

La rueda de bicicleta. El sistema colgante sin pretensar. Sistema de cables y nervaduras. Diseño de vigas para tensar la red. Rigidización por peso.

2. EVOLUCION: LAS PRIMERAS REDES18

Redes sobre arcos. Redes estabilizadas por su geometría. Formalismo arquitectónico. Red integral construida con estática de modelos. Arcos estabilizados por la red. Arco circular sobre columnas. Construcciones actuales con arcos.

3. LOS SISTEMAS DE CABLES UNIDOS Y TENSADOS31

El sistema Jawerth. Redes onduladas de cables y vigas. Aplicación en México del sistema Jawerth. Onduladas de grandes claros. La corrosión en las estructuras de cables.

4. REDES CERRADAS40

Redes anticlásticas entre vigas de alma abierta. Redes de cables y vigas. Redes en tres direcciones.

5. REDES ABIERTAS47

Optimización del sistema de redes. El cable de borde como elemento dominante. Investigación de redes en el Space Structures Research Centre. Redes integrales. El desarrollo actual de las redes.

6. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

6.1 DISEÑO DE UN EDIFICIO EXPERIMENTAL57

Investigación en la estática de modelos. El modelo de superficie mínima. El modelo textil. El corte de la red. Requerimientos básicos de los modelos de medición. Sistemas de medición y obtención de planos.

6.2 CONSTRUCCION DEL EDIFICIO EXPERIMENTAL67

Montaje y tensado de la red. Montaje de la membrana. Detalles constructivos: apoyos y cimentación, herrería y tensores. Adaptabilidad. La cubierta permanente.

7. APLICACION DE LA ESTATICA DE MODELOS

7.1 EL DISEÑO ESTRUCTURAL78

La construcción del Pabellón Alemán en Montreal. Diseño y construcción de modelos. Mecanismos de medición. La construcción de la red. Pruebas de carga y resultados. Medición del modelo. Dibujo por computadores. Medición de la membrana. Mediciones en el túnel de viento.

7.2 LA CONSTRUCCION Y EL MONTAJE98

Prefabricación de la red y la membrana. El montaje de la red. El montaje de la membrana. Montaje de los accesorios.

8. APLICACION A MACRO ESTRUCTURAS106

La investigación coordinada de los Institutos de la Universidad de Stuttgart (SFB 64) para la construcción de la cubierta de las Instalaciones Olímpicas de Munich.

El proyecto arquitectónico. El diseño estructural. Los modelos de medición. Apoyos y Anclajes. El montaje.

9. ANALISIS DE ESFUERZOS

Matemático, experimental y computarizado.....121

10. CONCLUSIONES.....133

11. BIBLIOGRAFIA.....134

A manera de PROLOGO

puede saltárselo si lo desea, no tiene gran importancia...

La investigación que presento en este trabajo se originó hace algunos años. Siendo profesor de construcción, fui invitado por mis profesores Felix Candela y Enrique Landa a realizar un posgrado con Frel Otto en Alemania. A principios de 1966 me trasladé a Berlín, al Centro de desarrollo de la Construcción Ligeras, como llamaba Frel Otto al taller donde desarrollaba interesantes proyectos de estructuras ligeras.

En Berlín

Cuando llegué al centro, estaba Frel Otto con dos de sus ayudantes, Berndt Romberg y Uwe Roeder, fotografiando un finísimo modelo en película de Jabón, del edificio experimental que se muestra en la segunda parte de esta tesis. Después de entregarle una carta de Candela, que por cierto recibió con mucho gusto, les ayudé a inundar el taller, a fin de tener la humedad suficiente para que el modelo durara un poco más. Después de un tiempo en Berlín, construyendo modelos y dibujando planos de velarias, Otto me invitó a colaborar en un proyecto de investigación.

Frel Otto y un arquitecto de Stuttgart, Rolf Gutbrod ganaron el primer premio y la construcción del Pabellón Alemán en la Expo 67 en Montreal. Como nunca se había construido una velaria tan grande, la Dirección Federal de Construcción Alemana, dio un contrato a la Universidad de Stuttgart, para desarrollar el proceso de diseño y construcción. Otto había sido llamado a la Universidad de Stuttgart para dirigir un instituto y dictar un seminario.

El proyecto se llevaría a cabo en el nuevo Instituto de Estructuras Laminadas Ligeras, que estaba situado en un viejo edificio de la Kepler strasse, casi en el centro de Stuttgart. El local principal era un gran salón, donde estaba instalada la mesa de medición de modelos. Sobre los muros colgaban complicados modelos de los mas fantásticos proyectos, Eran tantos que, aunque ya colgaban unos sobre otros, difícilmente cabría uno más. También tenía el IL su taller de modelos y un laboratorio fotográfico donde amplifiqué la mayor parte de las fotos del proyecto Montreal. Por otra parte, lo más importante era el equipo que trabajaría en el proyecto.

El equipo

Larry Medlin, coordinaba el proyecto arquitectónico de Gutbrod con el diseño estructural de Otto. Prácticamente el dirigió en todos sus detalles el proyecto. A su regreso a los Estados Unidos, dirigió centros de construcción ligera, en la Universidad de St. Louis Missouri y actualmente en la de Tucson. Ha dictado algunos cursos de actualización en la UNAM.

Eberhard Haug, era el ingeniero encargado de la estática de modelos, controlaba la forma y los esfuerzos en la estructura. cuando terminó el proyecto, hizo un doctorado en la Universidad de Berkeley, donde escribió el programa MASL, que implementó en varias Universidades Americanas y Europeas.

En la UNAM, Haug mismo lo adaptó como programa de biblioteca, en colaboración con Johan Stokman, Durante muchos años ha sido el Único programa de estructuras laminares, documentado con manuales, que existe en la UNAM.

Gernot Minke, un brillante arquitecto, estaba a cargo de la administración del proyecto, al mismo tiempo, efectuaba una investigación sobre eficiencia de las estructuras, completamente original. El también colaboró en la construcción de los modelos de Montreal. Posteriormente participó en un curso de actualización en la UNAM. Dirige actualmente el laboratorio de la construcción experimental en Kassel, algunos alumnos de México han trabajado con el varios años.

Berthold Burkhard, un técnico en ingeniería, estuvo a cargo del complicado corte de la membrana con una paciencia increíble. Dirige actualmente un instituto de investigación en Alemania. Pues bien, es difícil nombrar a todos los colaboradores en éste proyecto. pues fueron alrededor de 70 estudiantes, que trabajaron mas de 2000 horas construyendo los modelos y dibujando los planos, algunos de ellos continúan con las estructuras laminares, como Uli Hangleiter.

Los colaboradores son personas importantes, como Jochen Schilling, el técnico mecánico, quien construye ahora bellas velarías, tampoco hay que olvidar el apoyo de Beate Muller Munz la amable secretaria. Mi estancia en Stuttgart, fue muy formativa, pues tuve la suerte de tener como amigos a personalidades de la construcción que conocí en la Universidad, en congresos y en la práctica profesional.

Además de mi trabajo en el IL tomaba clases en la facultad de construcción, recuerdo las enseñanzas de Curt Siegel, que aún ahora repito y las de ese gran teórico que es Jurgen Joedicke. En un congreso de estructuras neumáticas, conocí a Walter Bird, las obras de Birdair Structures que cito, dan un toque actual a ésta tesis.

Las mas grandes personalidades son personas sencillas como Fritz Leonhard o Z.S.Makowski. Mi amistad con Makowski comenzó desde la primera conferencia internacional de estructuras espaciales en la Universidad de Surrey. A estas conferencias asisten los mas destacados constructores, entre los mexicanos están Francisco Castaño y Heberto Castillo quien presentó por primera vez la tridlosa. En la segunda conferencia en 1975, siendo chairman, presenté a Le Ricolais y a Max Mengerlinghausen. En la Última conferencia en 84 presenté a mi buen amigo Stephane Du Chateau. Cuando la situación económica de la UNAM lo permitió, invité a muchos de ellos a venir a México a exponer sus ideas.

INTRODUCCION

En esta tesis, se propone un método experimental para el análisis y construcción de estructuras velarias, que puede emplearse para el desarrollo de otros sistemas estructurales.

Para el lector no familiarizado con el sistema constructivo, se muestra con ejemplos construidos, la evolución de esta técnica. Se espera que aprovechando las experiencias de estas obras, el lector no repita los costosos errores de las primeras obras construidas.

La tesis se divide en dos partes, en la primera se describe el desarrollo de estas estructuras, en la segunda se propone el método experimental que se implementó en un instituto de investigación para el análisis y la construcción de estructuras con redes de cables.

La forma en que se presenta la información, trata de evitar que se vuelva una antología o un catálogo de formas que el lector pueda copiar, mas bien se busca la comprensión de los requerimientos geométrico constructivos del sistema, con los cuales se puedan desarrollar obras más eficientes.

En los primeros ejemplos se muestran estructuras muy elementales y como fueron evolucionando, la originalidad en soluciones de procedimientos constructivos, como en la Alberca Olímpica de México, con sus errores y aciertos.

La Arena de Raleigh, ya es historia en esta tecnología, pues es el inicio de las redes tensadas, también se incluyen copias mal logradas de su forma, que no entendieron su diseño estructural. En este capítulo de velarias sobre arcos, tenemos además obras contemporáneas con un diseño actualizado.

La evolución se presenta cuando los constructores cambian formas y elementos del sistema sin alterar sus exigencias geométrico constructivas. Como un ejemplo de lo anterior se presenta el Pabellón Francés en Bruselas, cuando se cambian los bordes de las redes, de los arcos a las armaduras de alma abierta.

En el capítulo de redes cerradas, La Alberca Olímpica de Tokio, es un ejemplo interesante de como el formalismo arquitectónico es determinante para disminuir la eficiencia estructural.

Estos ejemplos son muy discutibles, pues intervienen factores estéticos, económicos y de simplificación de procedimientos constructivos. Esto es importante constatar en obras donde los constructores no se atrevieron a usar las nuevas técnicas por desconocimiento del sistema, imitando la geometría de las velarias con procedimientos tradicionales.

El capítulo 5 trata sobre la optimización del sistema, al utilizar redes abiertas. Se muestran las grandes posibilidades de diseño, de constructores en la práctica profesional y en institutos de investigación como W. Bird, Z.S. Makowski, Frei Otto y Rene Sarger.

La segunda parte de este trabajo, es una metodología de la construcción experimental desarrollada en el Instituto de Estructuras Laminares Ligeras de la Universidad de Stuttgart, donde el autor trabajó en todos los detalles de esta investigación.

La presentación de esta técnica experimental, esta pensada como un modelo a seguir, o como una opción, para el desarrollo de estructuras en institutos de investigación y como guía del diseño en la práctica profesional.

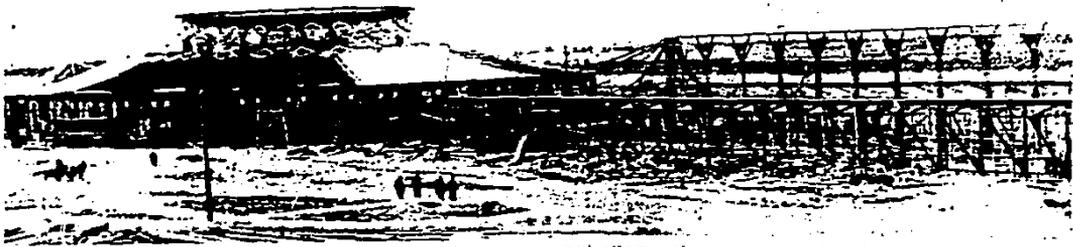
En esta segunda parte se muestra el marco teórico dentro del cual se desarrolla la construcción con modelos, el proceso sistemático de construcción de éstos y la evaluación de los esfuerzos, comparándolos con la construcción original.

Los capítulos siguientes nos muestran la aplicación de este desarrollo a dos grandes obras: el Pabellón Alemán en la Expo 67 en Montreal y la Cubierta de las Instalaciones Olímpicas en Munich. En estas obras son interesantes los procedimientos constructivos debido a sus grandes dimensiones.

El análisis matemático, experimental y computacional se expone en el último capítulo de esta tesis.

LAS PRIMERAS OBRAS CONSTRUIDAS

**DESARROLLO DE LAS CUBIERTAS COLGANTES
SISTEMAS DE ESTABILIZACION
EJEMPLOS: LA ALBERCA OLIMPICA DE MEXICO**



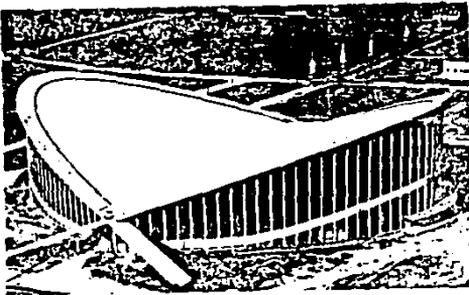
pabellon circular en Nijni Novgorod 1826

LAS PRIMERAS OBRAS CONSTRUIDAS

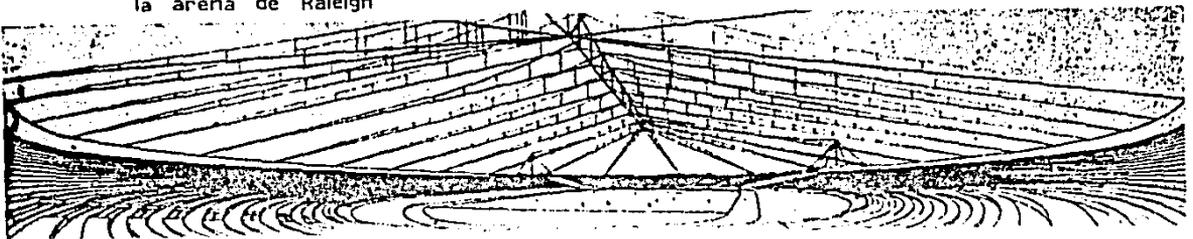
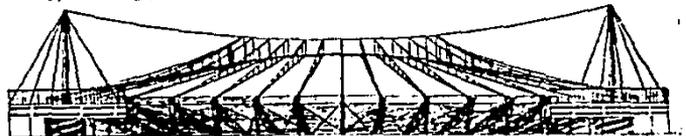
La construcción con cables se inició desde 1826 con los primeros puentes colgantes, sin embargo, el Único precedente que existe de cubiertas con cables son los pabellones construidos en 1896 por V. G. Schuchow en la Exposición Rusa en Nijny Novgorod. Un pabellón tenía un anillo circular en la parte superior de donde colgaba una red con forma de hiperboloides. Otra red con forma oval estaba suspendida de dos mástiles. Es extraño que estas obras tan adelantadas no tuvieron una repercusión inmediata, pues tuvo que pasar más de medio siglo antes de que se construyera la Arena de Raleigh, en 1952, una red pretensada sobre arcos, que llamó la atención de los arquitectos hacia este sistema constructivo. En 1958 ya se presentaron en la exposición de Bruselas, dos pabellones con cables, el americano, utilizando el sistema de rueda de bicicleta y el francés con una red de cables.

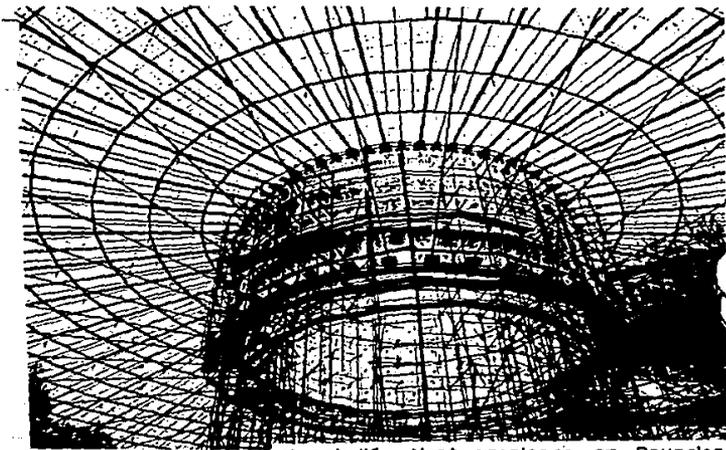
Aunque existieron proyectos muy factibles, fueron considerados en su tiempo como utópicos, como la cubierta de un estadio por los hermanos Rasch en los años 20, que no se llegaron a realizar.

Tendría que irse desarrollando lentamente la técnica de la construcción con cables para que aparecieran las primeras velarias de acero. Las primeras construcciones eran cascarones de concreto, armados con cable de acero y con curvatura en una sola dirección. Estas cubiertas parecían colgar por lo que recibieron el nombre de cubiertas colgantes. La construcción de cubiertas con cables fue aceptado como un sistema estructural eficiente hasta el Ier. Coloquio Internacional sobre cubiertas colgantes, en julio de 1962, donde se presentaron constructores como Frei Otto, René Sarger, Le Ricolais, Lew Setlin, S. Du Chateau y muchas otras personalidades que con sus obras crearon un nuevo tipo de arquitectura.



la arena de Raleigh





el pabellón Norteamericano en Bruselas

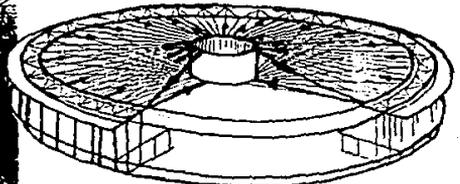


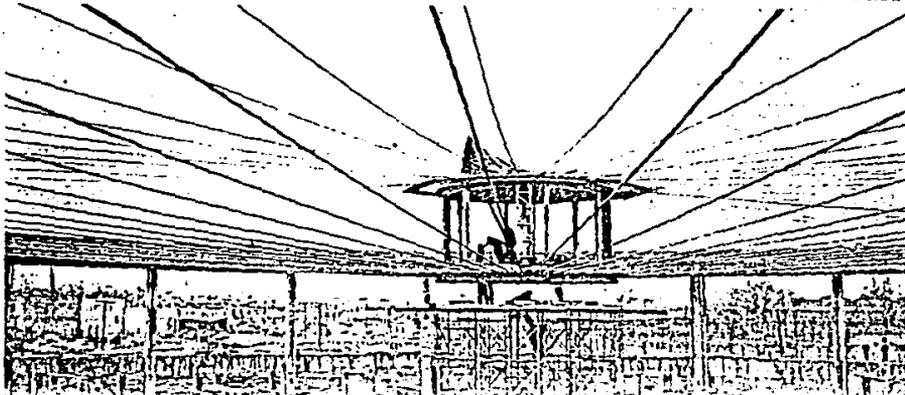
diagrama estático

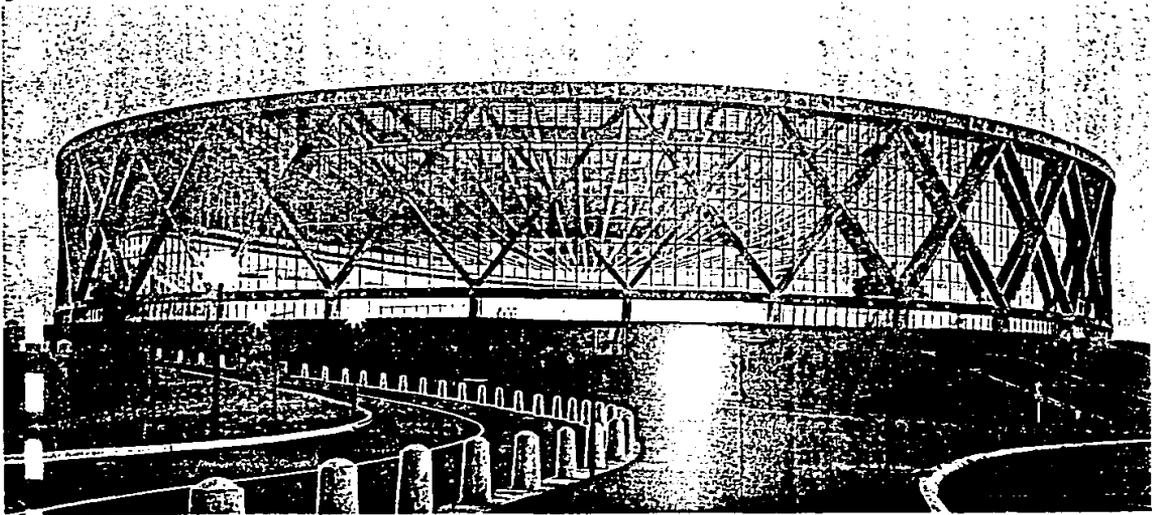
LA RUEDA DE BICICLETA

Un precedente importante de las velarias de acero, son las estructuras con cables radiales en dos capas. Usualmente se forman con una viga de borde exterior circular, que trabaja en compresión, y un anillo interior en tracción. Las plantas circulares se llegaron a cubrir también con una sola capa, estas estructuras se rigidizan por peso y para darles la pendiente necesaria, es a menudo necesario poner un mástil en el centro, lo que las hace muy ineficientes. Si se pone un cable soportante en la parte inferior, que sostenga al anillo interior, se evita el mástil, formándose de esta manera las estructuras de dos capas. Los cables tensores están situados en este caso en la parte superior y sobre ellos se apoya la cubierta.

La planta circular es la más adecuada, ya que las plantas cuadradas o en forma de elipse tienen muchas desventajas para la transmisión de esfuerzos horizontales, pues estos tienen diferentes magnitudes y habría que cambiar el espesor del cable, además de añadir momentos flexionantes a la viga exterior. El montaje es sumamente sencillo, como se describe en la Arena en Mantua. Entre los primeros ejemplos construidos tenemos en 1958 al Pabellón Norteamericano en Bruselas, al Auditorio en Utica, de 75 m. de diámetro, construido por Lev Zetlin en 1960. La Arena en Mantua en 1965 y la Arena en Alameda de 120 m. de diámetro construida en 1970.

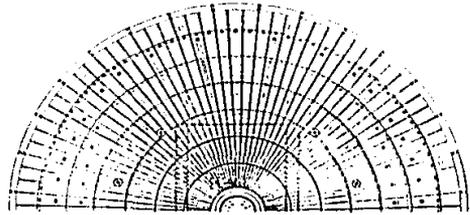
el auditorio en Utica



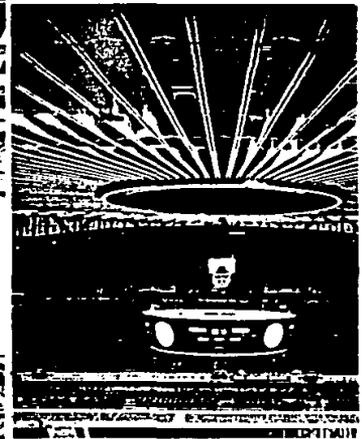
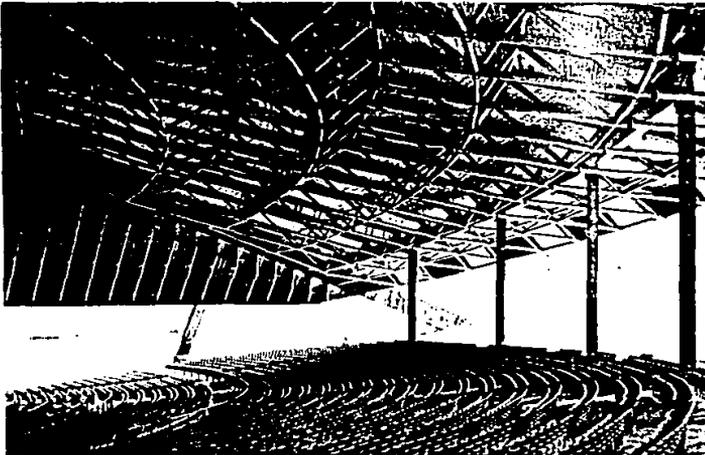


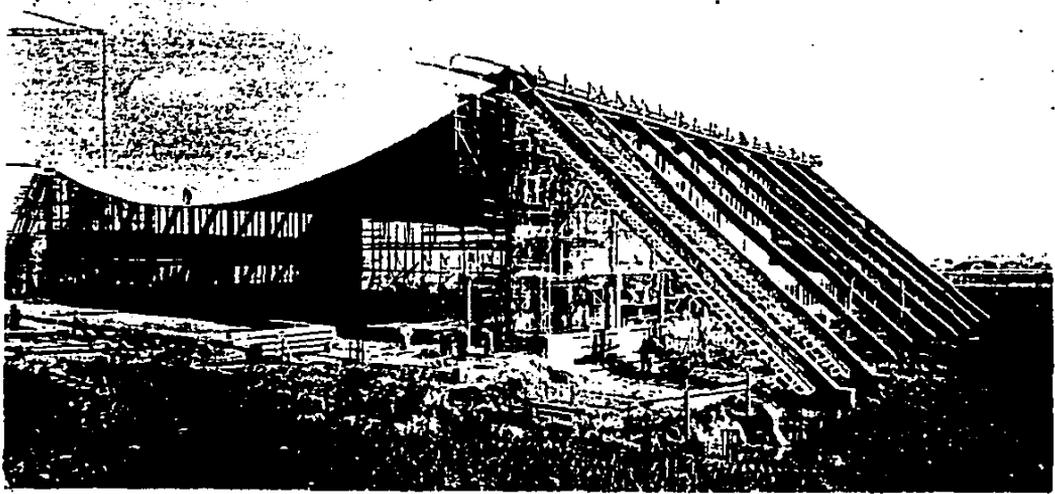
la arena en Alameda

Le Ricolais afirmaba que la cúpula con un reticulado de cables en 3 direcciones era más rígida y eficiente que las radiales. Aunque se suprimía el anillo central, se tenía que poner una barra entre las dos capas de cables. El recomendaba esta cúpula para claros muy grandes, arriba de los 300 m. Algún tiempo después Fuller presentó su cúpula tensegrity adonde varía el reticulado de los cables. En los estudios realizados en modelos en el Laboratorio de Estructuras Laminares, se concluyó que para construir cualquiera de estas cúpulas es indispensable realizar un análisis con cargas dinámicas.



la estructura en planta





EL SISTEMA COLGANTE SIN PRETENSAR

Esta fábrica construida en Memmingen, RFA. por el Arq. Paul Gerne, es la forma mas simple que se puede dar a una cubierta colgante. La estructura soportante consiste en cables de acero simplemente colgantes, cuya única rigidización es el peso, ya que sobre ellos se colocaron placas precoladas de concreto como cubierta. En las estructuras en tracción, la rigidización por peso es la menos económica. La curva resultante se considera para efectos de cálculo como una catenaria pesada. La importancia de esta obra radica en el hecho de ser una de las primeras estructuras en tracción en construirse y en la influencia que ejerció por este motivo, en obras subsecuentes, como la Alberca Olímpica de México. Existen sin embargo muy grandes diferencias en el comportamiento estructural de estas dos obras, en la fábrica, se utilizan columnas inclinadas para llevar los esfuerzos horizontales a la cimentación, mientras que en la alberca se sustituyen por cables de acero que mantienen en equilibrio a las columnas. Estos cables o retenidas ocupan mucho espacio y requieren de grandes anclajes, esto es sumamente caro, por lo que se procura en casos de edificios de espectáculos, utilizar el peso de las gradierias para equilibrar las fuerzas horizontales.

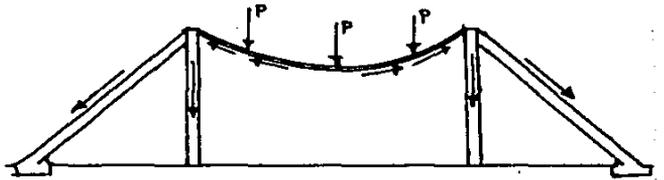
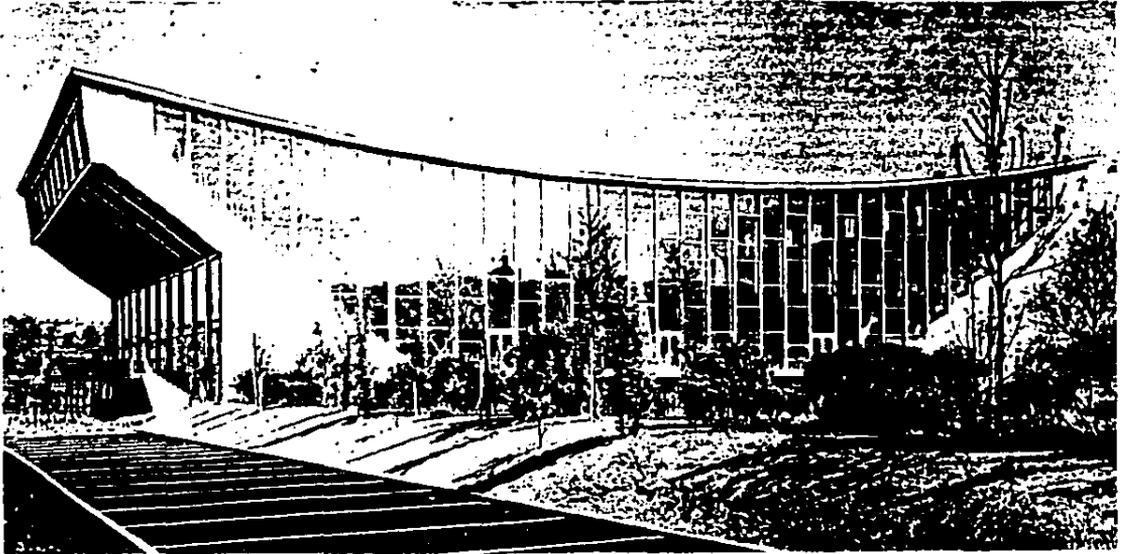


diagrama estático



SISTEMA DE CABLES Y NERVADURAS

Fritz Leonhard, el gran constructor de puentes colgantes, diseñó el Balneario en Wuppertal, RFA. como un cascarón de concreto cilíndrico, armado con una red de cables, por lo que podemos considerar esta obra como precursora de las cubiertas colgantes de redes. Leonhard presenta en esta obra dos innovaciones importantes: utiliza el peso de las graderías como anclaje de los cables soportantes de la cubierta y tensa estos cables por medio de nervaduras hacia la cimentación. Este sistema fue muy efectivo para equilibrar los esfuerzos y contrarrestar la succión del viento. El claro a salvar en esta obra era de 65 m.

El cascarón tiene un espesor de 5,7 a 9 cms. Los cables son en realidad barras. Se proporcionó el concreto especialmente para evitar grietas o porosidades previniendo así la corrosión del acero de refuerzo. El diseño del anclaje de los cables de la cubierta en las graderías, sirvió de ejemplo para edificios posteriores muy bien logrados como la Alberca Olímpica de Tokio. Las columnas inclinadas que soportan la gradería están a una distancia de 3,80 m. una de otra y toman los esfuerzos de tracción que le transmiten los cables. Sobre la cubierta se colocó un aislante térmico-acústico de 7 cms. con una membrana de impermeabilización.

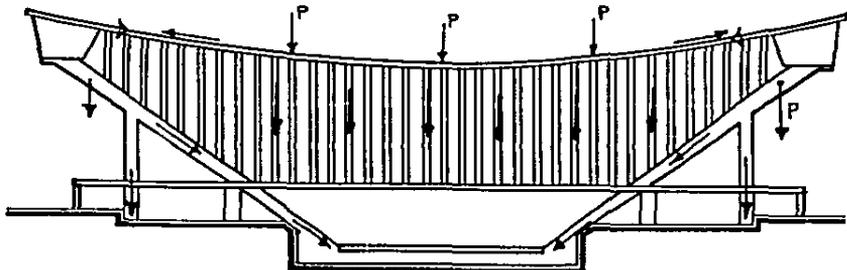
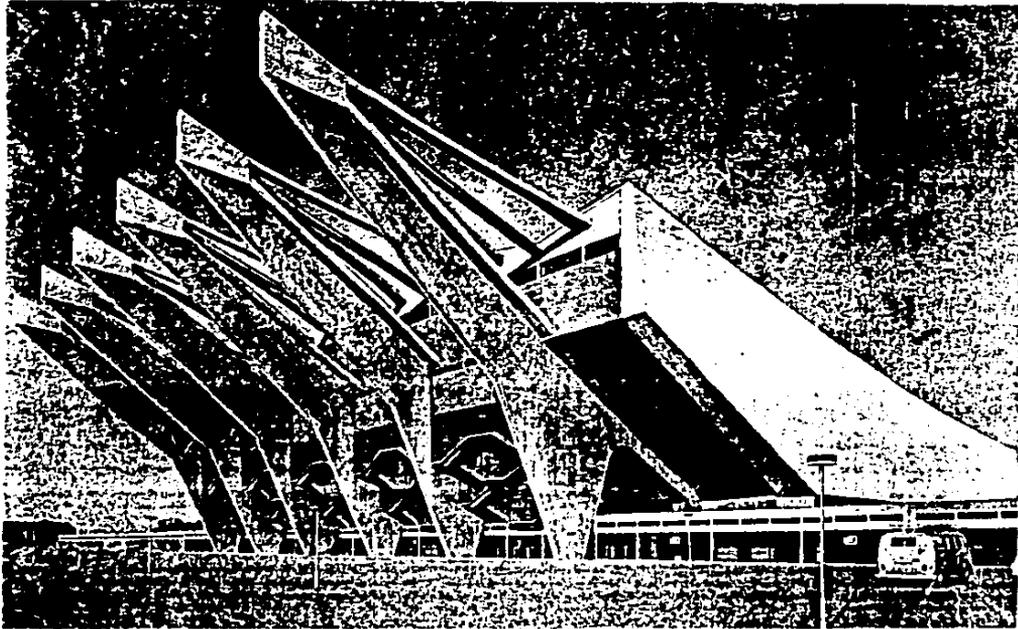


diagrama estático en corte



Stadthalle en Bremen

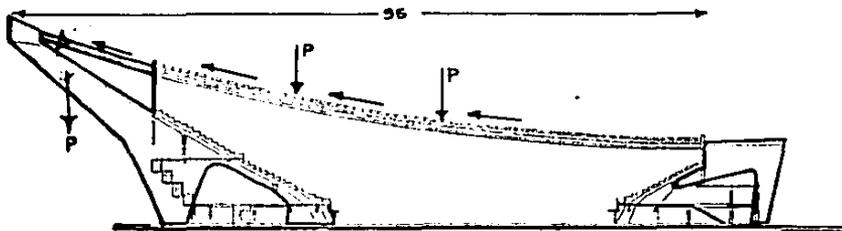
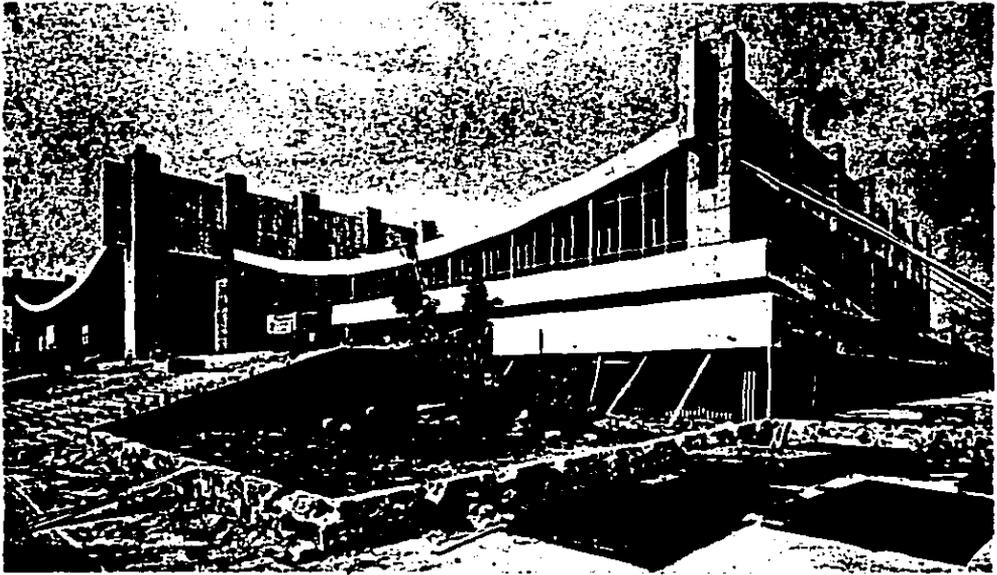


diagrama de transmisión de esfuerzos

DISEÑO DE VIGAS PARA TENSAR LA RED

Es interesante el cascarón con red de cables del Stadthalle en Bremen, pues en ésta obra, el Arq. Roland Reiner no sólo utiliza las graderías como anclajes. El va mas adelante con una solución espectacular, pues continúa las columnas inclinándolas como grandes voladizos para levantar y tensar la red de cables. El cascarón termina antes de llegar a las columnas pero los cables continúan formando un haz de tres elementos para anclarse a las columnas. Este detalle de separación entre losa y columnas fue utilizada posteriormente en la Alberca Olímpica de Mexico.

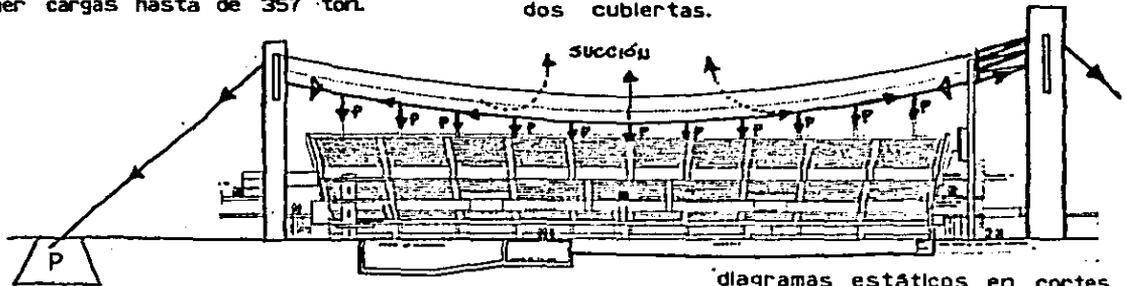


RIGIDIZACION POR PESO

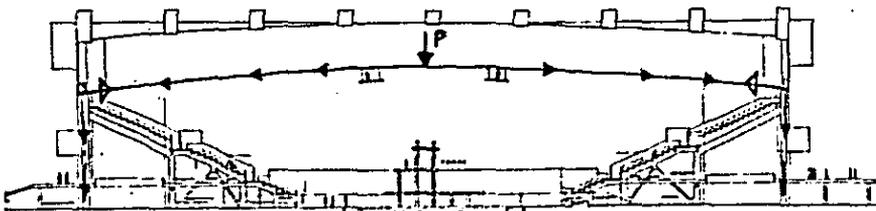
La Alberca y el Gimnasio Olímpicos en la Ciudad de México.

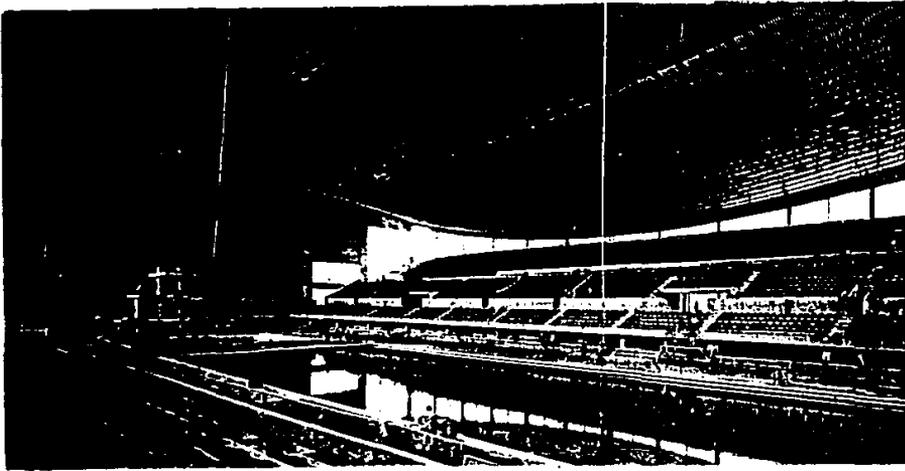
El concepto "cubiertas colgantes" se puede aplicar correctamente en estos dos edificios, puesto que la estructura consiste en cables colgantes rigidizados por peso. Aunque se forma una red de doble curvatura inversa, los cables transversales, sólo sirven para dar forma pues están tensados con solo 2 ton. mientras los cables soportantes tienen tensiones hasta de 30 ton. Estos cables no bajan directamente a la cimentación pues terminan en las columnas, para poder equilibrarlas fue necesario poner retenidas que llegaron a tener cargas hasta de 357 ton.

Las dimensiones de la alberca son de 99 por 101 m. las del gimnasio 66 por 77 m. La superficie construida de los dos edificios es de 39 mil m². Los cables se apoyan entre tres ejes de columnas y bajan por medio de las retenidas a grandes anclajes de concreto. Las columnas en el eje Norte tienen una altura de 26 m. mientras que en los ejes central y sur son de 34 m. La sección de las columnas extremas es de 2 por 3 m. mientras que las centrales tienen 3 por 5 m. Esta sección tan grande se debe a que las columnas centrales son comunes a la alberca y al gimnasio y deben soportar un momento adicional debido a la diferencia de peso y altura entre las dos cubiertas.



diagramas estáticos en cortes





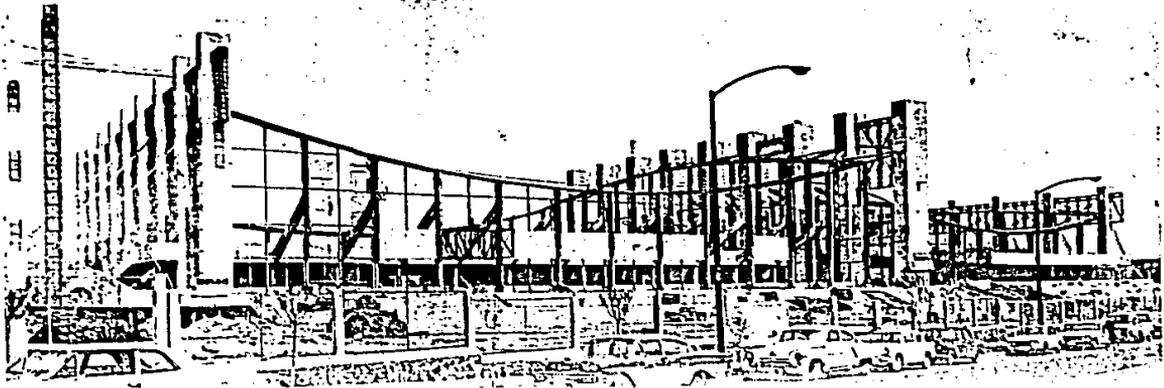
Los apoyos laterales y la red

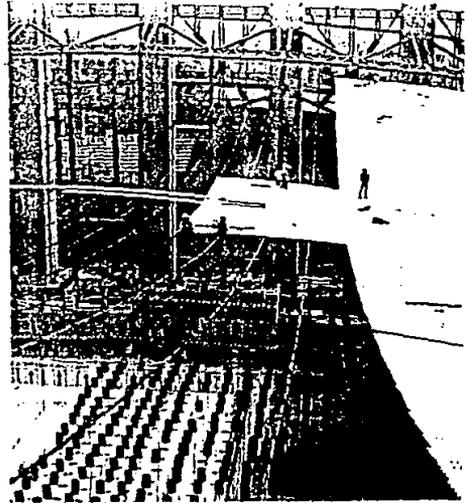
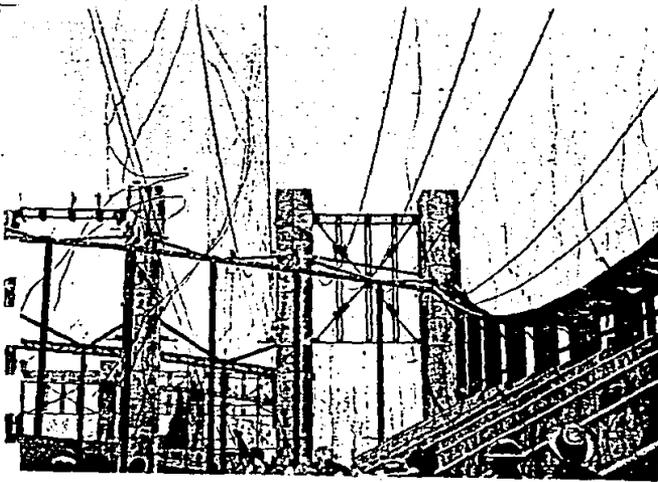
Una estructura forma las fachadas Oriente y Poniente y soporta la trabe de borde de la cubierta, esta formada por columnas metálicas con una alta relación de esbeltéz. La red de cables se forma por una retícula de cables de presfuerzo. Los cables soportantes en el gimnasio, están formados por 12 alambres de 7 mm. separados 1.59 m. entre sí. Los cables tensores, colocados en sentido transversal se integran con 4 alambres de 7 mm. y están separados 2.075 m.

Protección a la corrosión

Debido a que los cables son de acero de presfuerzo con un alto contenido de carbono y están sometidos a esfuerzos de

tracción en un ambiente húmedo de cloro gaseoso, se efectuaron pruebas en diversos laboratorios. De acuerdo a los resultados de estas pruebas, se decidió proteger los cables con un galvanizado electrolítico, el recubrimiento de zinc alcanzó un espesor de 0.001 mm. Se recubrieron además con una capa de vinilo de 1 mm. por el sistema de extrusión. El control de calidad del recubrimiento se llevó a cabo con un aparato que manda una corriente eléctrica a través del cable y registra fallas y rupturas en el forro. La adherencia entre vinilo y galvanizado se logra por la presión que ejerce el vinilo sobre el cable en el proceso de enfriamiento.

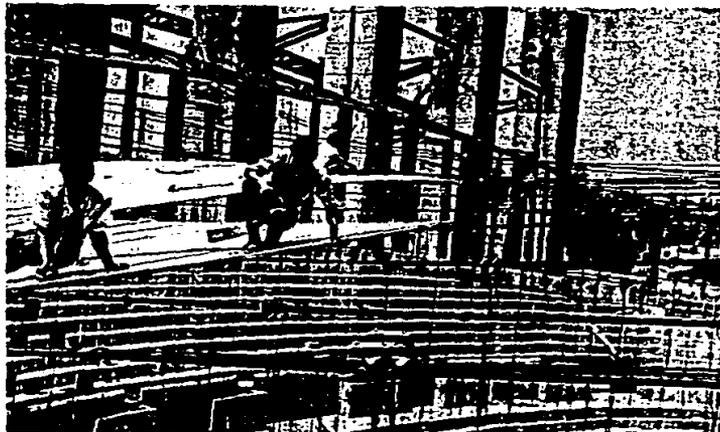




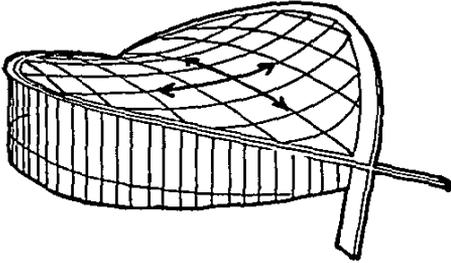
Montaje

El procedimiento constructivo de esta red de cables pesada fue completamente original, primero se cortaron los cables a la medida teórica de 102.9 m. en la alberca y 69.3 en el gimnasio y se anclaron en las traveses de borde en conectores ya dejados previamente en los cables, enseguida se colgaron botes de 200 litros de agua. Cuando se aplicó ese lastre, los cables de la alberca tuvieron un desplazamiento de 1.04 m. lo que provocó deformaciones en las columnas de hasta 4 cms. pero cada vez que la deformación alcanzaba este valor, se tensaban las retenidas hasta hacerla desaparecer.

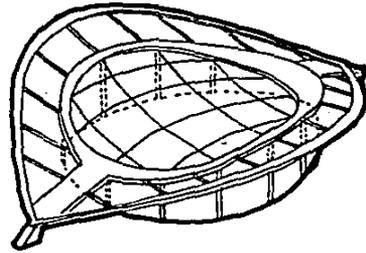
Las retenidas se anclaron a los anclajes de concreto de 300 m³. cada uno, algunas de estas retenidas alcanzaron una tensión total máxima de 357 ton. El objeto de lastrar los cables soportantes era obtener la forma de catenaria pesada antes de poner la cubierta. Esta consistía en una lámina galvanizada con dimensiones de 6.30 m. por 73 cms. Sobre ésta se coló un firme de concreto ligero. A medida que se iba colando el firme se quitaba el lastre, con lo que teóricamente se obtenía un postensado que evitaría posibles grietas. Este procedimiento equivale a una prueba de carga, pues la carga provisional que se aplicó, era equivalente a la definitiva.



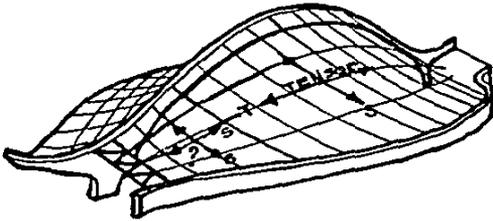
REDES SOBRE ARCOS



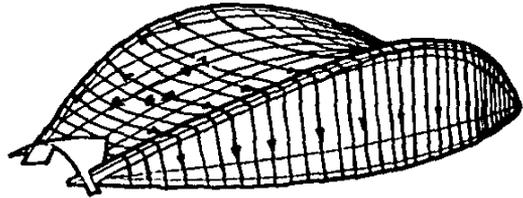
LA ARENA DE RALEIGH



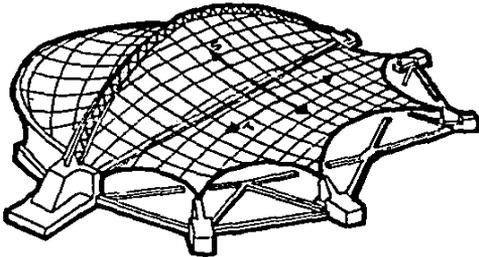
LA SALA DEL CONGRESO EN BERLIN



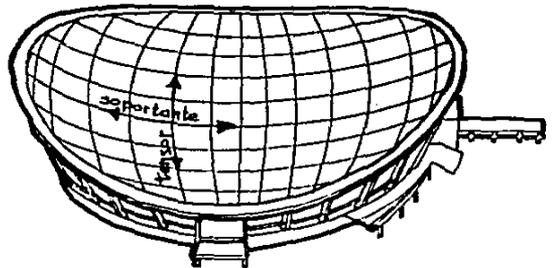
LA PISTA DE PATINAJE EN HIELO DE YALE



LA SALA OMNISPORT EN SAINT OUEN



ESTADIO EN SINGAPUR



CALGARY OLIMPIC SADDLEDOME

REDES ESTABILIZADAS POR SU GEOMETRIA

El diseño de la Arena de Raleigh en Nord Carolina, USA. es de singular importancia, pues con esta obra, se inicia la construcción de cubiertas de grandes claros utilizando redes de cables de acero con doble curvatura inversa. Matthew Nowicki diseñó por primera vez una red de cables de acero al tender un haz de cables soportantes apoyándolos en dos arcos inclinados y tensándolos con otra serie de cables tensores en dirección ortogonal, formando de esta manera una red. Su gran innovación no es solo la red de cables, sino la forma geométrica de doble curvatura inversa, esta forma de silla de montar le confiere a la red una rigidez espacial que la mantiene en equilibrio fácilmente. La construcción con velas de cables de acero abrió la posibilidad de cubrir auditorios, estadios y otros edificios de grandes claros con estructuras ligeras de bajo costo, pues la red de cables de acero, con solo 30 kilos de peso por metro cuadrado era diez veces mas ligera que cualquier otro sistema constructivo tradicional.

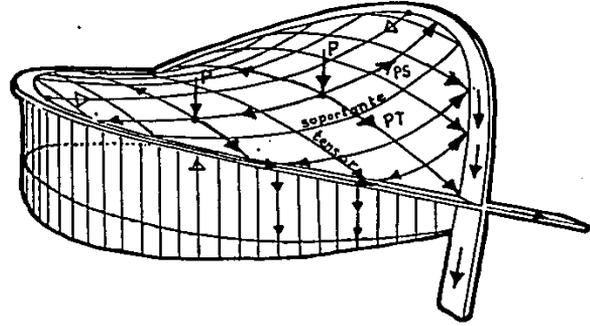
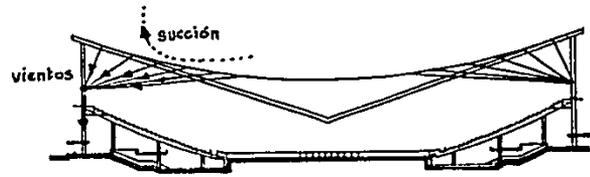
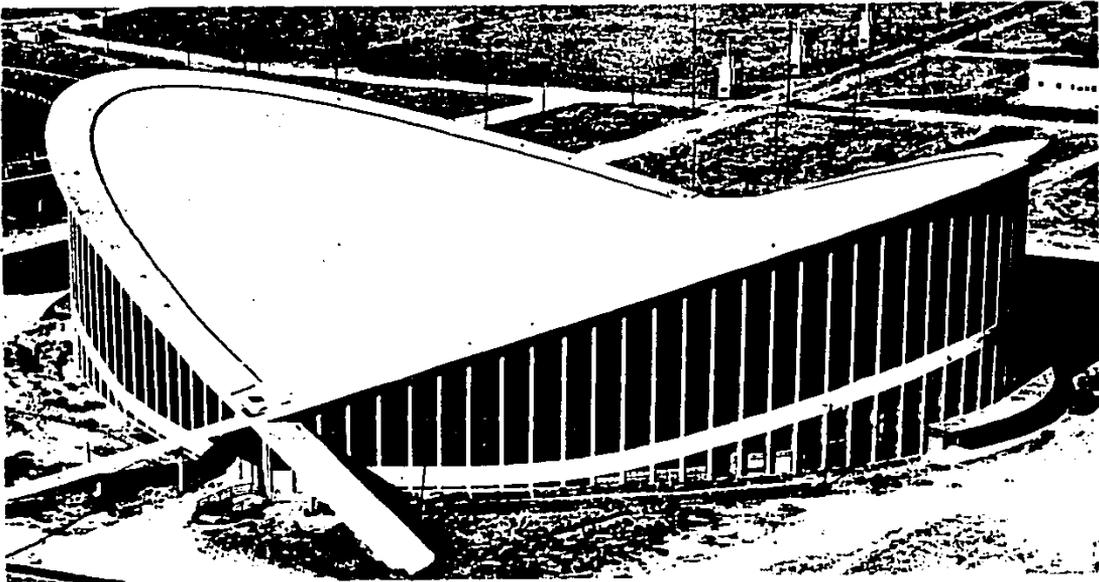
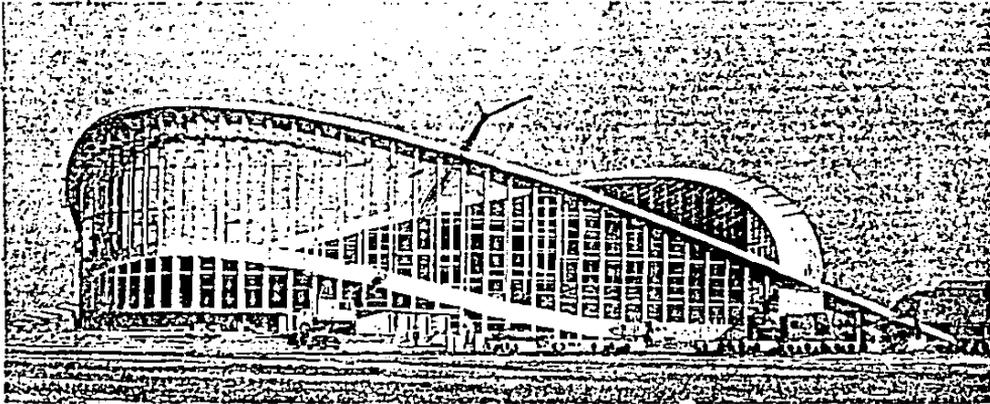


diagrama estático de la Arena de Raleigh



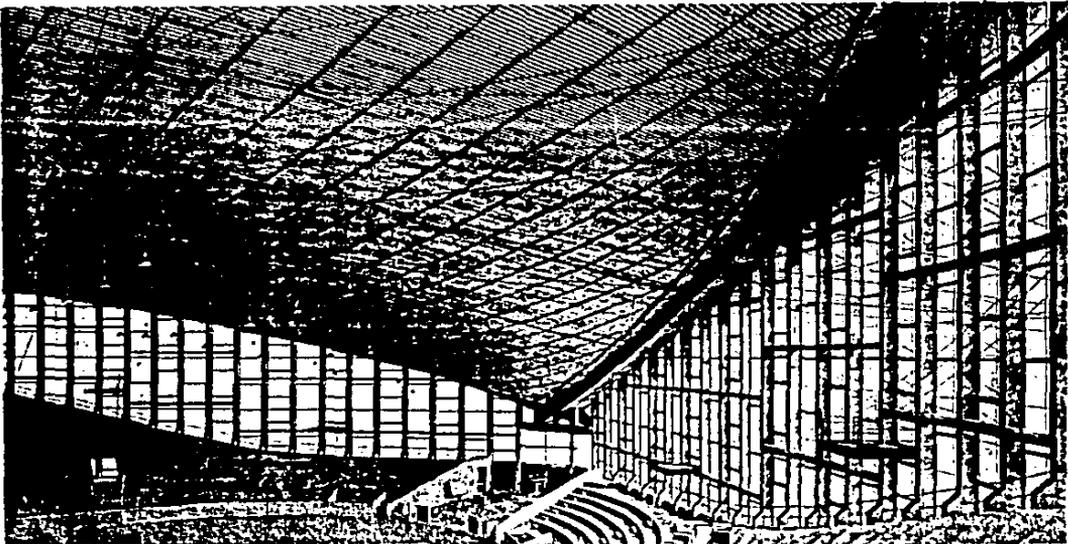
corte

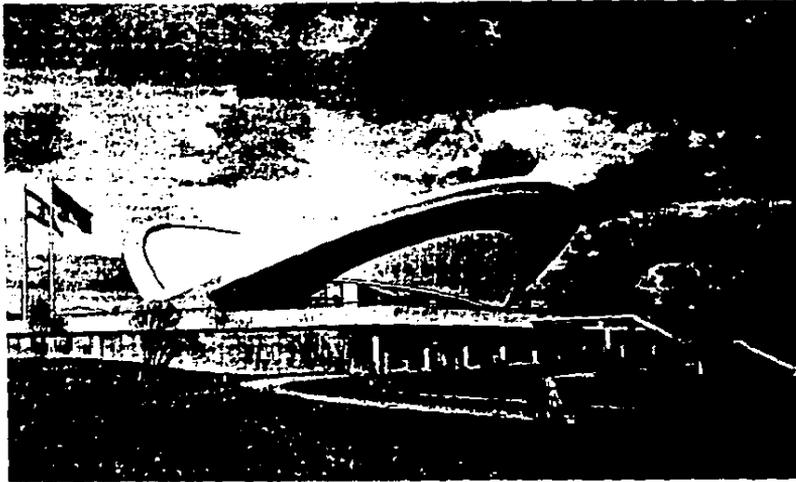




Los arcos inclinados que utilizó Nowicki en este edificio eran una idea arquitectónico-estructural que se venía manejando en los años 50 y que prometía grandes posibilidades de éxito. La Arena de Raleigh tiene algunos defectos derivados de su carácter innovador. La geometría de los arcos es arbitraria pues se usaron arcos parabólicos, que producen áreas planas cerca de los vértices, estas áreas oscilan con el viento, la oscilación se eliminó mediante vientos, que son cables que tensan esas áreas planas anclándolos contra las graderías, una solución mas limpia, hubiera sido utilizar arcos hiperbólicos, ya que por ser mas puntiagudos evitan áreas planas pues la superficie generada por ellos se acerca mas al paraboloides hiperbólico.

Proyectos posteriores utilizaron los apoyos con arcos con resultados buenos y malos. Así se obtuvieron variaciones interesantes que fueron desarrollando el sistema. Entre otros edificios que analizaremos están: la Sala de Congresos de Berlín Occidental, la Iglesia en Bremen-Groiland, la Sala de Saint-Ouen de René Sarger y el Calgary Olympic Saddledome en Canada, construido recientemente. La belleza y actualidad de este último edificio nos demuestra que no son los elementos estructurales los que pasan de moda, sino las copias mal realizadas. La forma arquitectónica derivada de los arcos cruzados no es fácil de diseñar, el arquitecto deberá entender mejor el sistema estructural para darle a la estructura un carácter más contemporáneo.





FORMALISMO ARQUITECTONICO Y ESTRUCTURA

El diseño de la Sala del Congreso en Berlín Occidental, del Arquitecto Hugh Stubbins fue excelente, y podemos considerarla como la velaria más bella sobre arcos cruzados, su autor, fue galardonado por esta obra con el premio de la Unión Internacional de Arquitectos, sin embargo, desde el punto de vista estructural, esta obra deja mucho que desear, pues no se entendió bien el sistema constructivo de la Arena de Raleigh, en el cual se inspiró. La estructura consiste en un cascarón de concreto armado con una red de cables. El problema fue haber dejado los arcos en voladizo y sin cruzarlos, esto produce una inestabilidad aerodinámica. La obra ganó en ligereza y belleza pero el sistema de rigidización era muy complicado y no funcionó: los muros de fachada soportaban una viga perimetral de la que salían unos voladizos para sostener los arcos. Otro error fue no cuidar los cables contra la corrosión, pues al moverse la estructura debido al viento, produjo grietas en el Impermeabilizante, por lo que la corrosión destruyó los cables y el edificio se colapsó. En la actualidad ya se produce cable de acero galvanizado, con aleaciones de cromo y níquel y con casi la misma resistencia que el acero normal, este cable debe especificarse en éste tipo de construcciones.

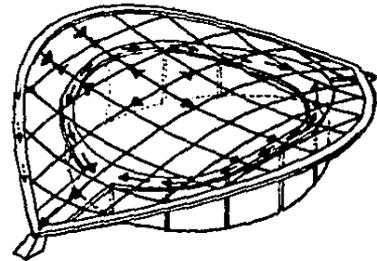
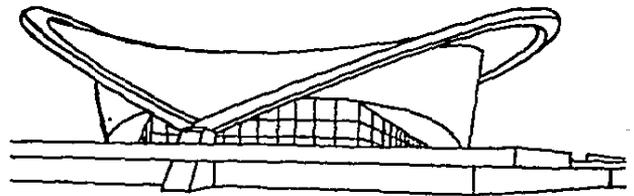
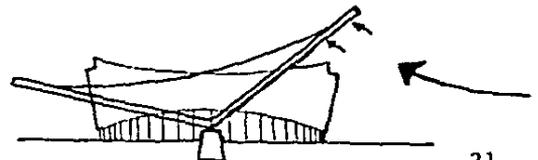
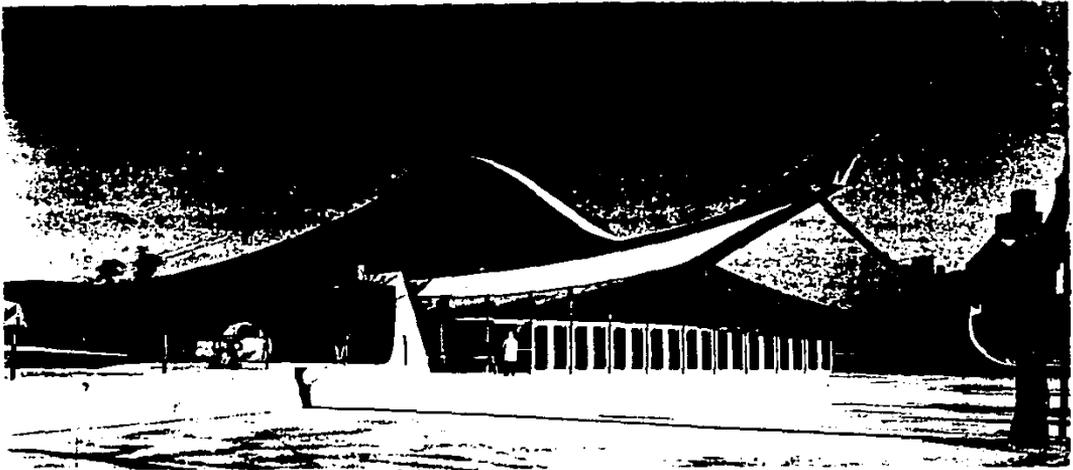


diagrama estático



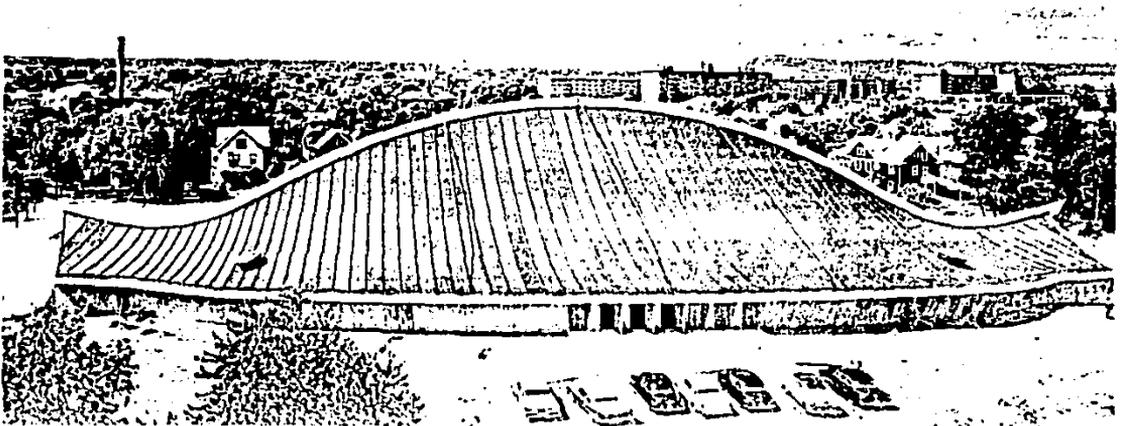
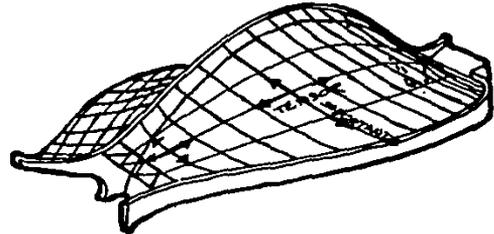
Inestabilidad aerodinámica





FORMALISMO Y GEOMETRÍA CONSTRUCTIVA

Eero Saarinen diseñó una de las primeras velarias sobre arcos en 1956, la pista de hockey sobre hielo en la Universidad de Yale. Los cables soportantes cuelgan de un arco central de concreto y se anclan en su punto bajo en un muro de concreto que sigue la misma forma del arco. Saarinen maneja con una gran maestría la forma curva del edificio, pero para dar mayor altura a la entrada, cambia la curvatura del arco soportante, con lo que pierde la doble curvatura inversa en la red, indispensable para la rigidez de la estructura, apareciendo áreas planas que tiene que soportar con armaduras, destruyendo de esta manera la limpieza del concepto estructural.



UNA RED INTEGRAL CONSTRUIDA CON ESTATICA DE MODELOS

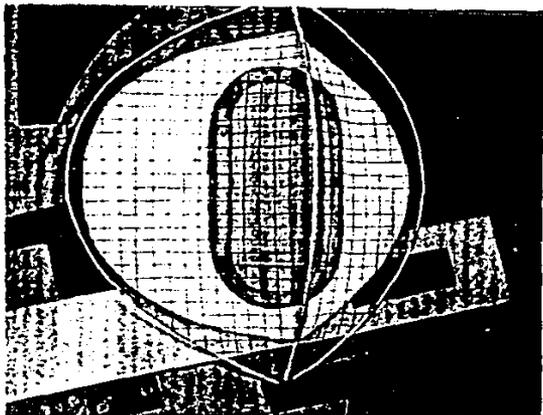
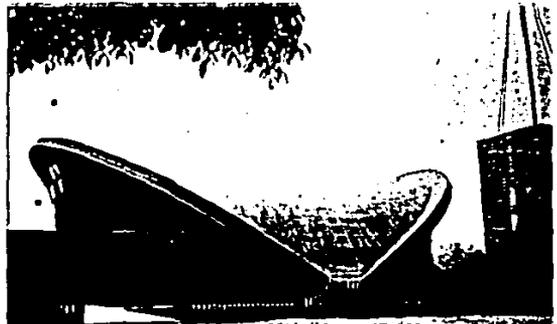
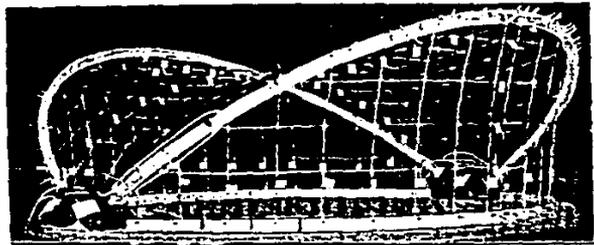
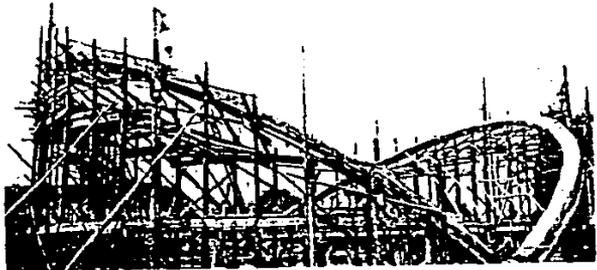
Este edificio es importante en el desarrollo de las estructuras en tracción pues por primera vez la red no es solo cubierta, sino baja al piso formando también los muros, de esta forma la red tiene un tensado integral.

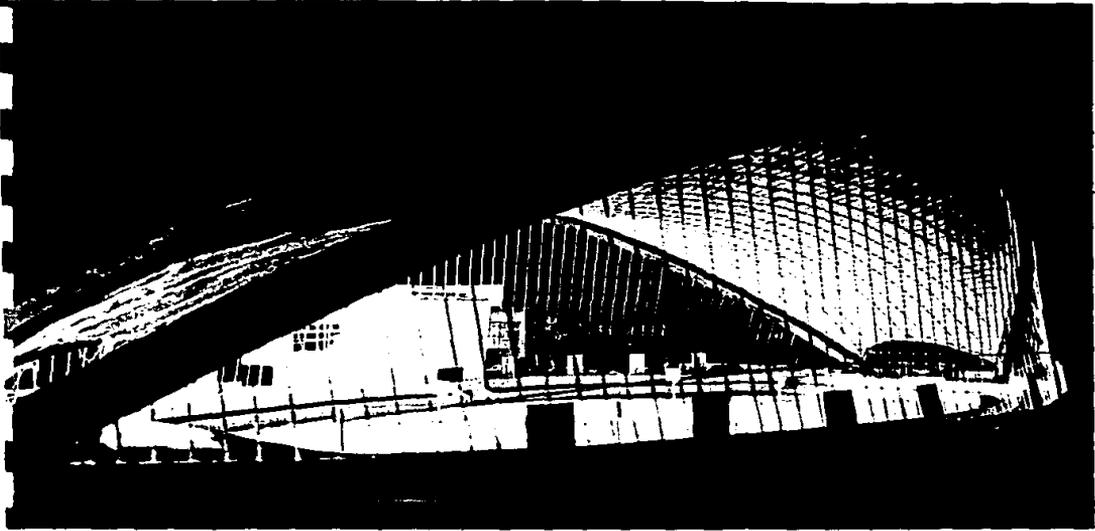
Frei Otto y Carsten Schrock diseñaron esta Iglesia en Bremen Grolland, es muy semejante a la Arena de Raleigh, una red en forma de silla de montar sobre dos arcos. En este caso los arcos están contruidos de madera laminada.

El claro de los arcos es de 24.5 m. y tienen 8.75 m. de altura, la red es prefabricada y la malla cuadrada se dispuso en tal forma en el momento de construir el modelo, que se acerca a la geometría de una superficie mínima.

Las mallas cuadradas de la red se van deformando en rombos a medida que se alejan de los ejes, esto permite que la red prefabricada ortogonalmente tome una curvatura anticlástica en el espacio. Este descubrimiento se realizó al diseñar los modelos para este edificio, lo que permitió la construcción de posteriores cubiertas con redes industrializadas. Por primera vez se utilizó una red completamente prefabricada de mallas uniformes, cuya forma fue exactamente determinada por medio de modelos. La malla era de 98 cms. y los cables dobles se dejaron aparentes.

Se recubrió la red con paneles de madera clavados unos con otros. La investigación en modelos aplicada a este edificio fue muy completa y permitió un avance en el desarrollo de las estructuras laminares. En la foto inferior se puede apreciar la deformación de la malla cuadrada en un modelo con tres arcos. Si el lector se interesa en estas investigaciones puede consultar los libros: Frei Otto, estructuras, pags. 60, 61 y Tensile Structures, pag. 57.





ARCOS SEPARADOS ESTABILIZADOS POR LA RED

En la Sala Omnisport de Saint-Ouen, para eventos deportivos, se presenta una interesante variación del diseño estructural, los arcos se separan y se estabilizan al presforzarlos con la misma red. Los arcos tienen un claro libre de 100 m. y están separados 41 m. en sus vértices y 10 m. en sus arranques, la altura máxima es de 28 m.

La superficie cubierta es de 1000 m². La velaria de cables, con forma de paraboloides hiperbólicos, está formada por 37 cables soportantes y 21 tensores, espaciados a 2 metros, los cables no se unieron en cada cruce suponiendo que al tensarlos toman una curva geodésica, la más corta entre esos puntos.

Los cables atraviesan los arcos en tubos dejados al colar, y se tensaron contra placas exteriores, hasta 11 ton. Se fijaron y ajustaron con una terminación en forma de cilindro roscado. Los cables galvanizados se recubrieron con polietileno negro con calor y a presión. Arquitectos: Metrich, Kopp y Chazanoff. Estructura: René Sarger, C.E.T.A.C. Paris.

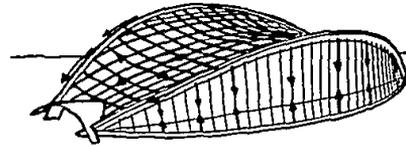
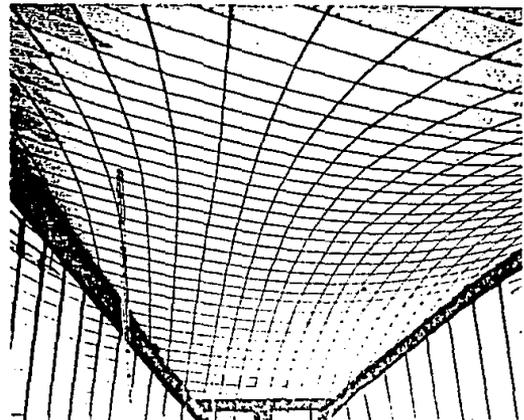
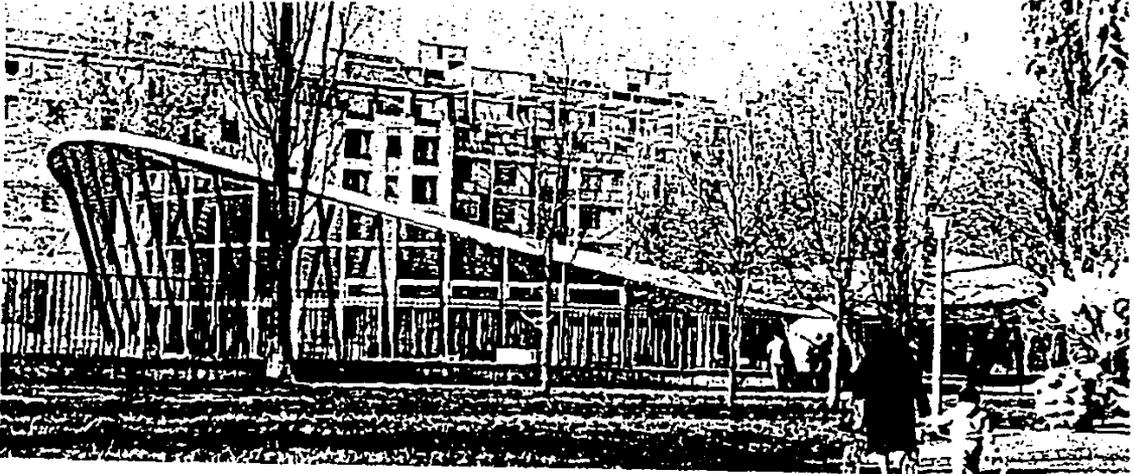


diagrama estático



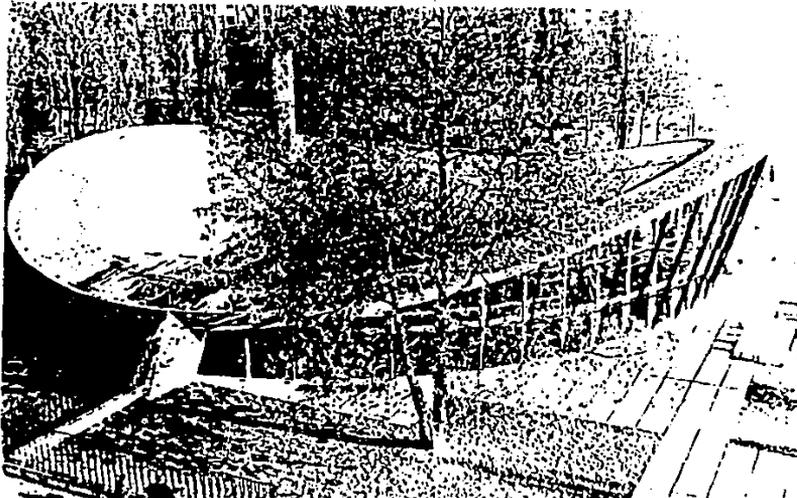


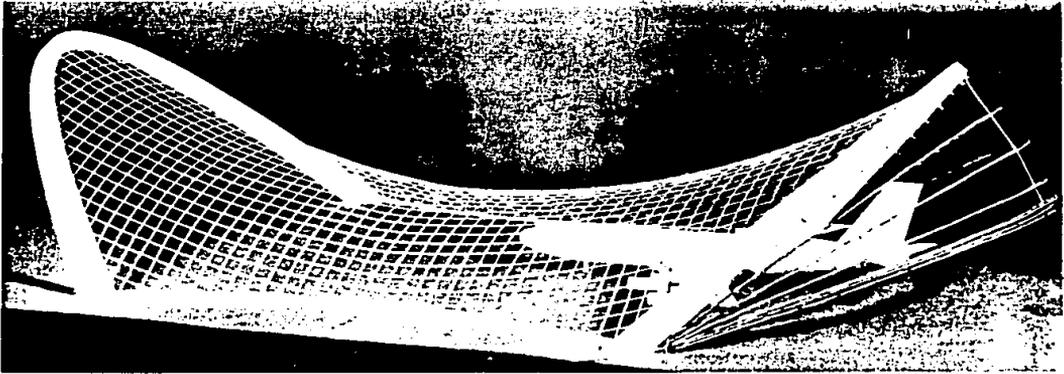
ARCO CIRCULAR SOBRE COLUMNAS

En la práctica se ha comprobado que los arcos hiperbólicos producen una superficie anticlástica mas rígida, a pesar de esto, se construyen arcos con todas las formas imaginables.

En la Alberca del Parque Solari en Milán, el Arq. Arrighetti diseñó una velaria, donde los cables se pretensan sobre un borde de concreto que forma un círculo en proyección horizontal. Los bordes están determinados por la intersección de dos cilindros con directriz circular. Trabajan como arcos, pretensados por los cables que debido a esta forma les producen toda clase de esfuerzos. La superficie cubierta es de 3200 metros cuadrados.

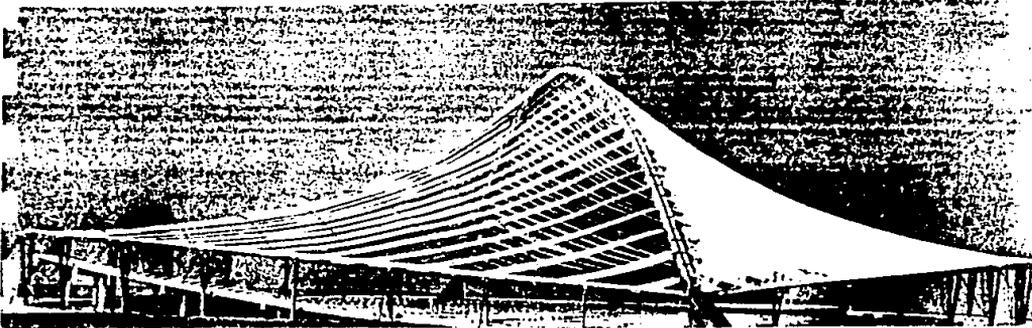
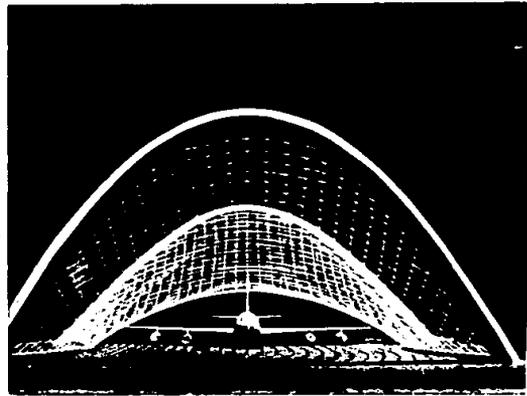
Como apoyos de la trabe se utilizaron columnas en V que toman los esfuerzos de torsión resultantes de la excentricidad de los arcos, al no estar situados en un mismo plano. La malla de la red es triangular, con una abertura de 150 m. y tiene una forma de doble curvatura inversa. Cada cable se forma por 37 alambres de 3 mm. de diámetro. La carga de ruptura del cable es de 40 toneladas. Al atravesar el arco, lo hace dentro de un tubo metálico, apoyándose en las caras exteriores por medio de placas. La red se cubrió con placas de lámina ondulada recubiertas de material plástico. El Ing. consultor fue Rene Sarger.

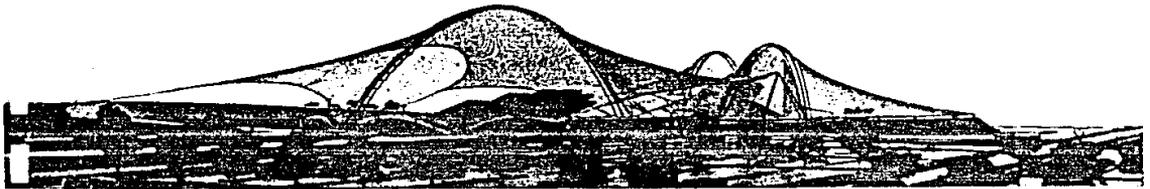




RED ESTABILIZADA POR PESO DE LOS ARCOS

En los dos proyectos que se presentari, el peso de los arcos contribuye en gran medida a tensar la red, sin embargo, la rigidización por peso es antieconómica y no siempre garantiza la estabilidad del edificio. El primer ejemplo, es un trabajo del Alumno Dieterhof en los seminarios organizados por el Prof. Siegel en Stuttgart, tenemos un hangar cubierto con una red, apoyada sobre dos arcos inclinados. Este proyecto puede ser inestable por la acción del viento. En el segundo ejemplo, el proyecto para la Exposición Nacional Suiza en Laussana en 1964, de los Arquitectos Lozeron y Michallet, consiste en tres arcos sobre los que se tensan dos paraboloides hiperbólicos. Los arcos horizontales, tensan la red y estabilizan el arco central, pero tienen que apoyarse en columnas y rigidizarse adicionalmente con retenidas. Una solución más moderna y económica consiste en tensar la red y estabilizar el arco por medio de cables de borde en tracción, como en el centro deportivo en Kuwait, que presento a continuación.

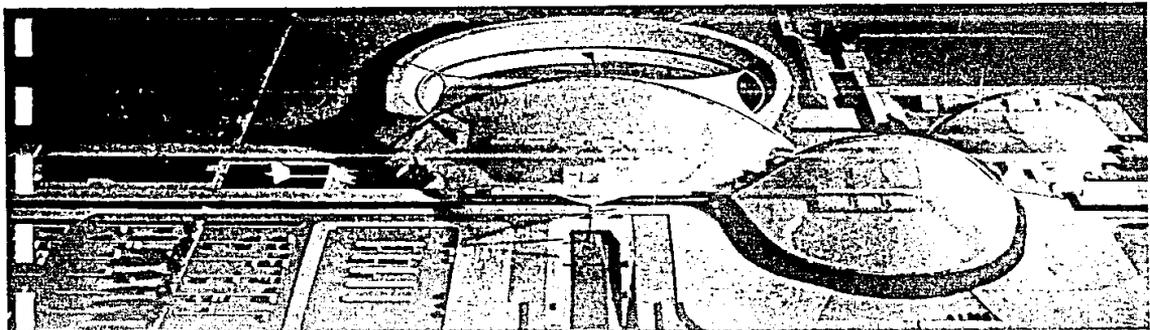
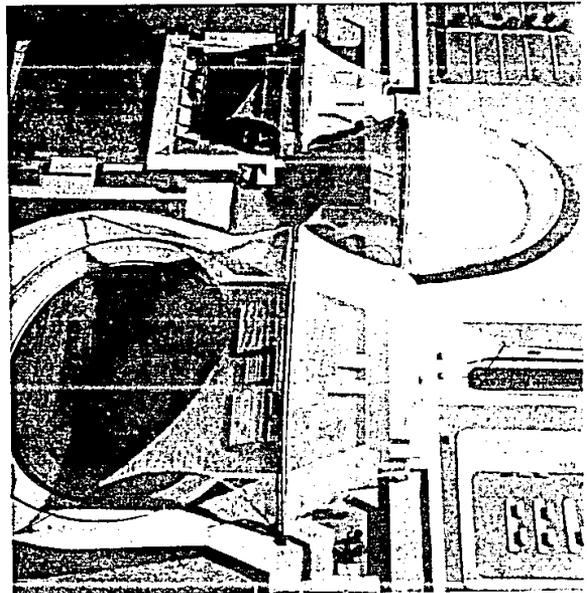


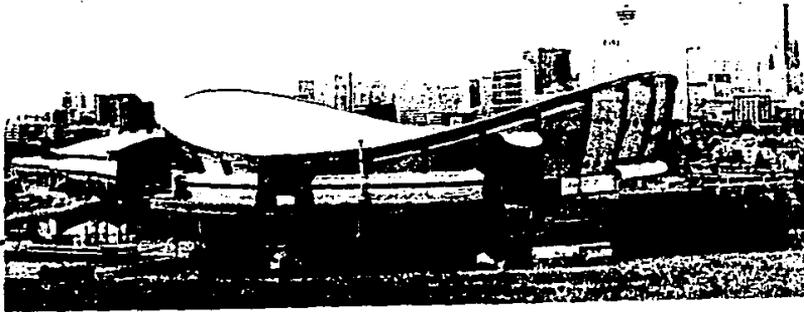


ARCOS Y REDES ABIERTAS

En el proyecto de Kenzo Tange y Frei Otto para un centro deportivo en Kuwait, se estabiliza el arco, al tensar la red con los grandes cables de borde. Este detalle es un avance muy importante que aún no se ha construido, pues el proyecto no se realizó. En el estado se tiene un gran cable de borde en tracción que hace posible salvar un claro de 240 m. con un arco tubular de una sección muy pequeña, 140 cms., que se logra al estabilizarlo con la red. Aplicando esta idea, Tange diseña un estadio en Singapur, que tampoco se llegó a construir.

El único problema era la forma asimétrica de los bordes de la red. El conjunto incluía también una alberca con un arco de 150m. de claro y un gimnasio con 120 m.





CONSTRUCCIONES ACTUALES CON ARCOS

Este edificio, inaugurado en Octubre de 1983, nos muestra la belleza de un diseño contemporáneo con arcos de borde.

Calgary's Olympic Saddledome es el nombre original en idioma inglés de este edificio y aparentemente entraña una contradicción, pues saddle es una forma de silla de montar, una doble curvatura inversa, mientras que dome es una cúpula, las cúpulas tienen siempre la doble curvatura en el mismo sentido. Sin embargo el nombre le fue dado debido a la manera en que se concibió el conjunto geométrico, pues según el concepto de diseño de Jan Bobrowski, intervienen varias formas geométricas: una esfera cortada por un plano para formar la planta. Esta esfera envuelve con las paredes a un paraboloides hiperbólico que forma la cubierta, que consiste en una red de cables tensada, anclada a un anillo de concreto y cubierta de paneles de concreto ligero. Las juntas se colaron en el sitio, lo que convierte a esta red en un cascarón ligero de concreto.

Se eligió este sistema constructivo por ser el más económico para cubrir el claro tan grande de 135 m. El elemento estructural en concreto más importante, es la viga perimetral, a ella se anclan los cables en dos direcciones formando una red de aproximadamente 6x6 m. Los cables soportantes están formados por pares de doce torones de 15 mm. cada uno. Los cuatro cables centrales que soportan los cincuenta torones del centro, además de la carga normal se componen de 15 torones cada uno. Los cables tensores se construyeron usando 19 torones. de 19 mm. cada uno.

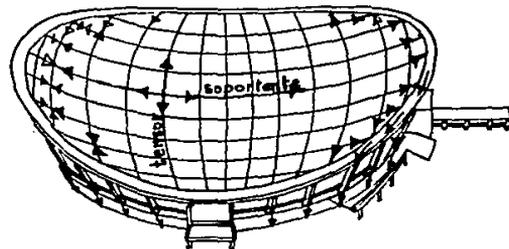
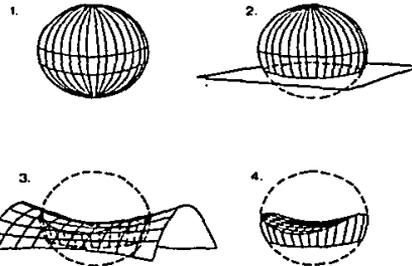
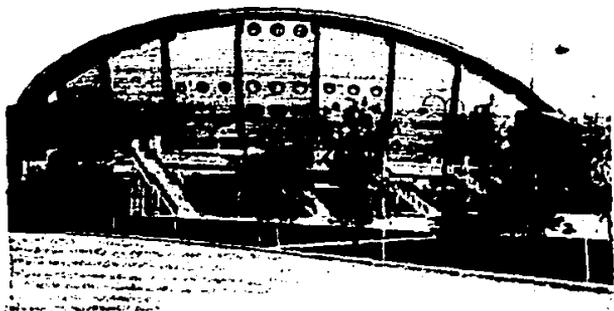
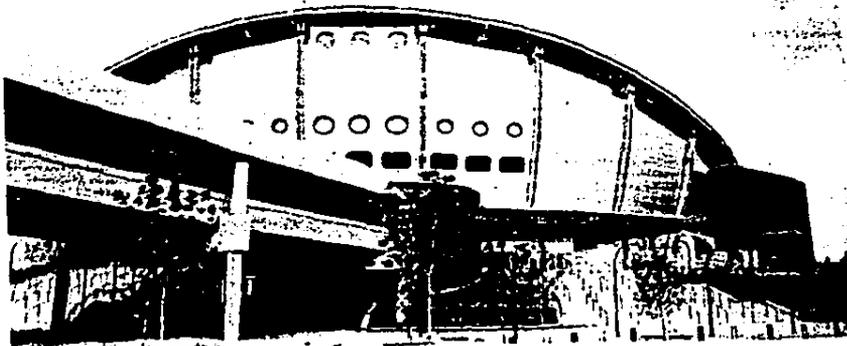


diagrama estático



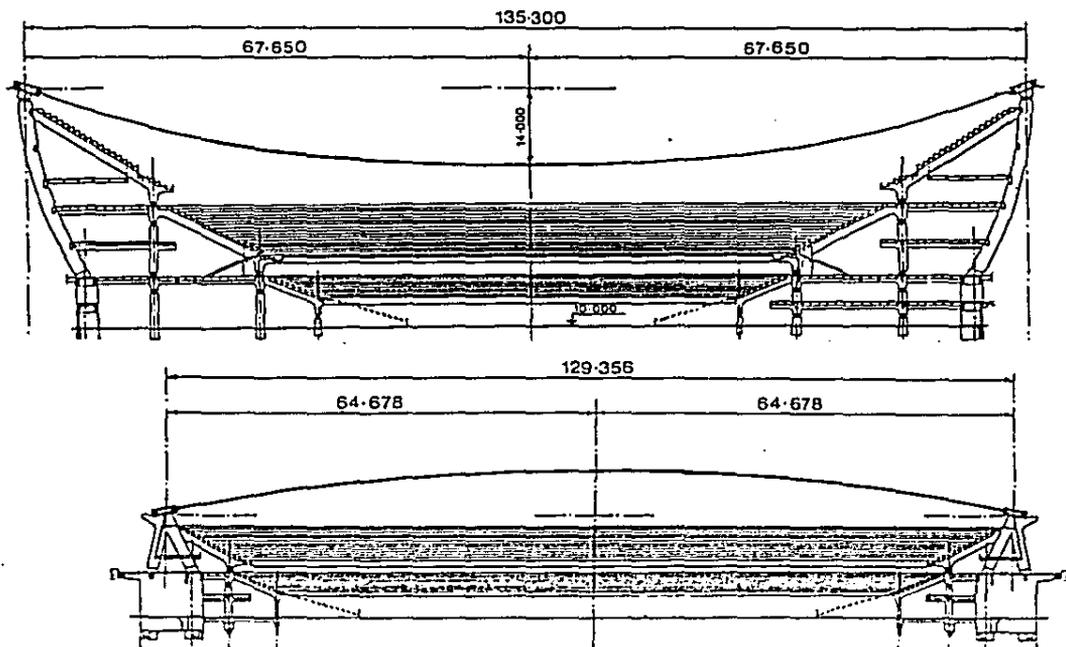
concepto geométrico de diseño

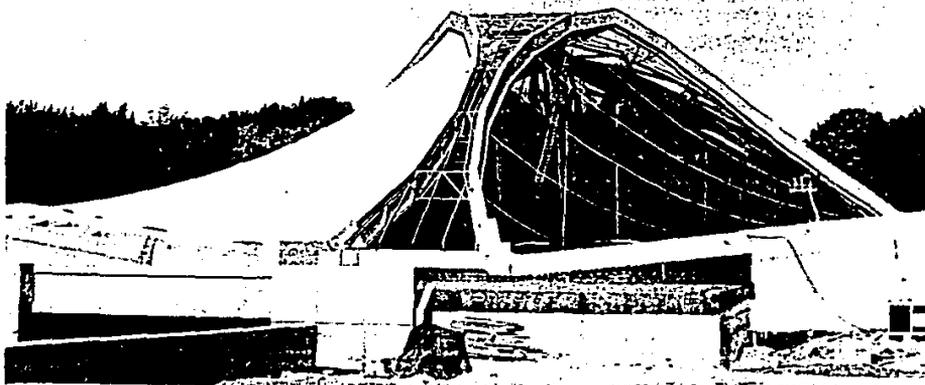




La secuencia en el montaje es muy importante en estructuras en tracción para evitar sobrecargas en los elementos estructurales, en este edificio fue la siguiente:

1. Se colgaron los cables soportantes.
2. Se colocaron los cables tensores.
3. Se estableció la geometría inicial tensando un poco los cables con 12.5 de flecha y 7.5 m. de peralte.
4. Se realizó el primer tensado en secuencia, resultando una flexión simétrica de la viga perimetral.
5. Se colocaron los paneles en secuencia resultando una flexión inversa simétrica de la viga perimetral.
6. Se llevó a cabo el segundo tensado.
7. Se colocaron los tensores no tejidos.
8. Se colaron las juntas de los paneles.





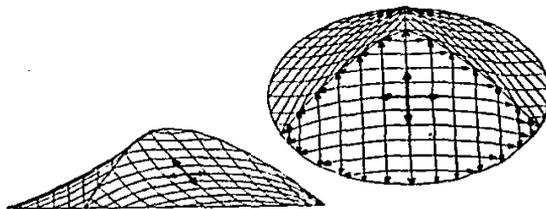
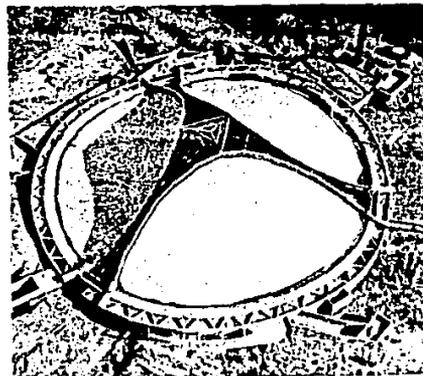
TRES ARCOS EN BOSTON

La cubierta del parque zoológico Franklin en Boston, Massachusetts, USA.

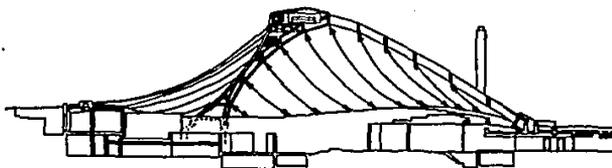
El problema a resolver era climatizar un pabellón para plantas tropicales y animales de la selva africana. En los fríos inviernos de Boston, debería conservar el calor y en los veranos ahorrar energía al enfriar el aire. Este requerimiento se obtuvo con una membrana de fibra de vidrio recubierta de teflón, cuya translucencia era del 18% y con posibilidad de reflejar la luz solar. Los Arquitectos Huygens & Tape de Boston tuvieron que olvidarse de los materiales convencionales y las técnicas tradicionales de construcción para lograr el efecto de "espacio al aire libre" que se requería para un pedazo de la selva africana. Las tres secciones de la membrana se apoyan en tres arcos estructurales y en la cimentación. Esta consiste en un anillo de concreto perimetral.

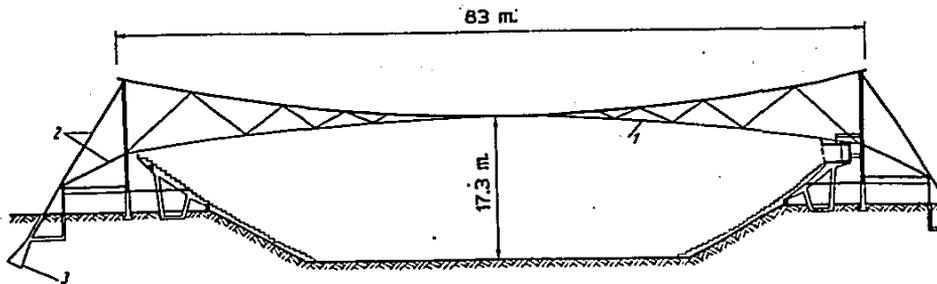
El proceso constructivo fue el siguiente:

Se montó cada uno de los arcos de acero en la cimentación perimetral, curvándose hacia adentro hasta casi juntarse en el centro del área. De cada arco se colgaron 11 cables de acero de 1 1/4 de pulgada de diámetro, que se tensaron al anillo de cimentación. Sobre los cables se desplegó la membrana, primero horizontalmente y luego verticalmente. El tensado de la membrana a los arcos y al anillo, se llevó a cabo mediante un sistema de tenazas formadas por dos placas de aluminio. Finalmente se unió la membrana a los cables cubriéndolos con una solapa del mismo material. El edificio mide aproximadamente 60 m. de diámetro y 21 de altura.



diagramas estaticos dibujados por computadores





REDES DE CABLES, ONDULADAS

Sistema de cables unidos y tensados.

Este sistema se compone de cuatro elementos:

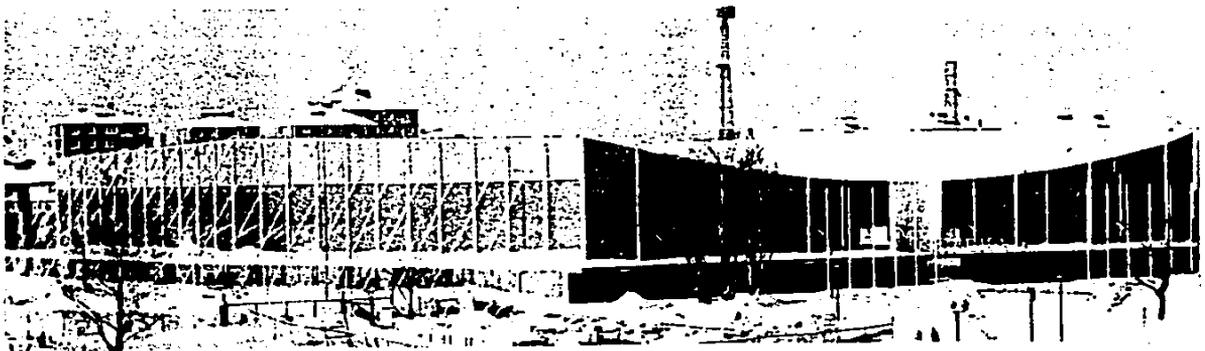
1. El cable soportante con curvatura hacia arriba.
2. El cable tensor con curvatura hacia abajo.
3. Los cables tensores transversales que unen a los dos cables anteriores formando triangulaciones.
4. Las retenidas o cables que van de los mástiles a la cimentación.

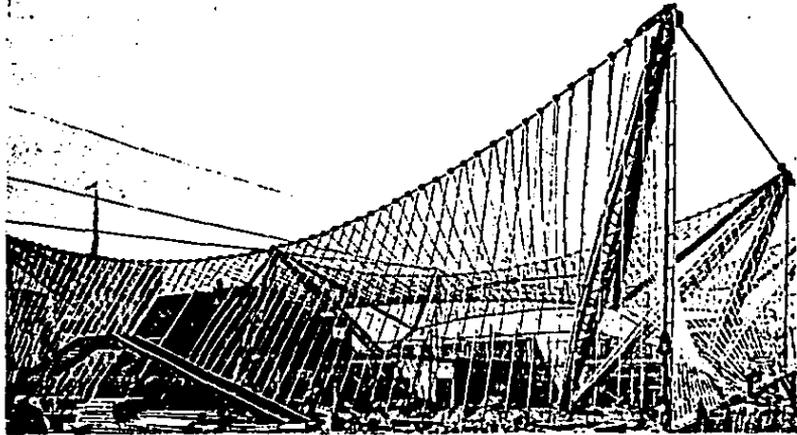
Este sistema puede usarse formando armaduras verticales independientes o uniéndolas en planos inclinados, formándose en este último caso velarias onduladas.

El estadio Estocolmo-Johanneshov

El Ingeniero Sueco David Jawert patentó bajo su nombre, el sistema de cables unidos y tensados.

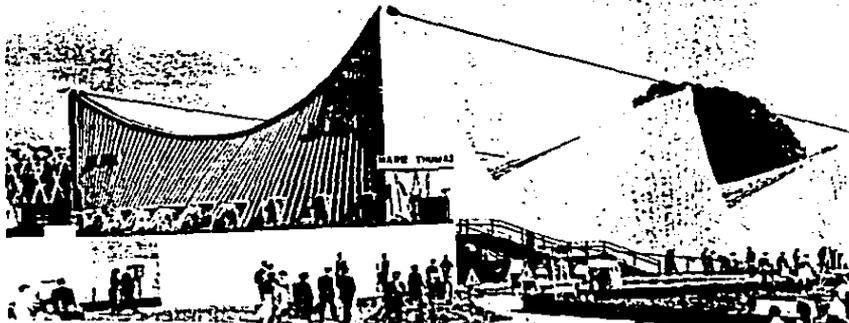
Entre las numerosas obras que ha construido con este sistema, tenemos el Estado en Estocolmo Johanneshov, que fue proyectado originalmente sin cubierta. Debido a su planta elíptica irregular, no se pudieron utilizar las graderías existentes para poder apoyar o anclar la estructura. Esta consiste de 21 armaduras de cables en tracción. El cable superior tiene un diámetro de 58 mm. y una carga de ruptura calculada en 341,000 kg. El cable inferior tiene 48 mm. de diámetro y una carga de 230,000 kg. Los cables tensores diagonales son varillas de 19 mm. de diámetro con rosca en los extremos. Las retenidas que van a los anclajes son 15 varillas de 26 mm. de diámetro cada una. La cubierta es de lámina acanalada galvanizada.

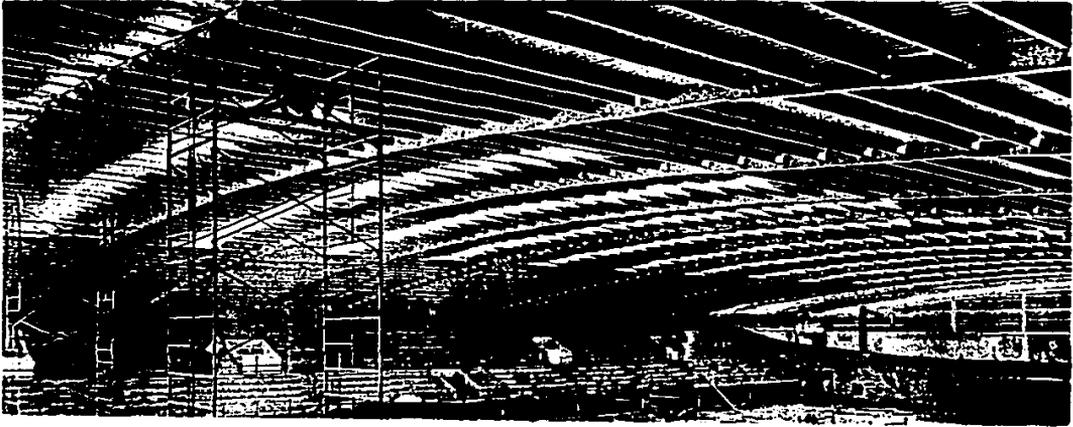




REDES ONDULADAS DE CABLES Y VIGAS

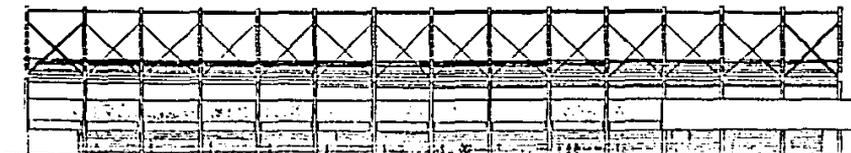
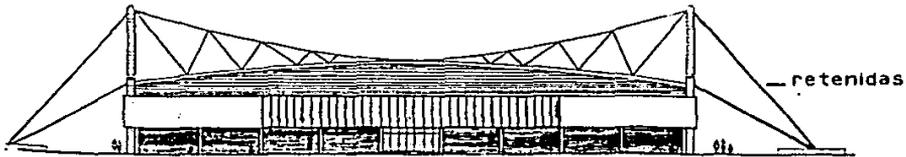
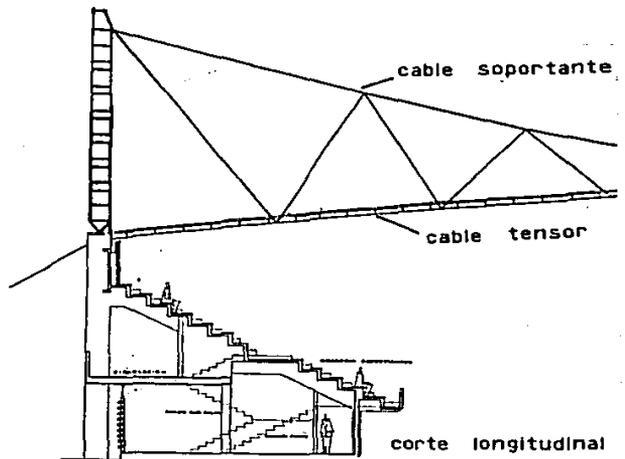
El Restaurant Marie Thumas en la exposición de Bruselas, construido en 1958 por el Ing. Rene Sarger, fue una de las primeras velarias onduladas de acero pretensado. Se les llama onduladas por la disposición inclinada de sus armaduras de cables unidos y tensados. La importancia de este edificio radica en la ingeniosa aplicación de su sistema estructural, que influyó notablemente en construcciones posteriores. Tenía un claro de 36.80 y se extendía 53 m. Su altura era de 12 m. Se apoyaba en cuatro puntos de donde salían 2 mástiles en forma de doble V inclinados 33 grados hacia el exterior. Tres cables soportantes con curvatura hacia arriba forman las cumbres, mientras que dos cables tensores, curvados hacia abajo, forman los valles. Estos cables tensores y portantes se unieron con placa metálica plana. La cubierta estaba formada por una membrana plástica suave de 0.4 mm. de espesor tensada y soldada en el lugar.

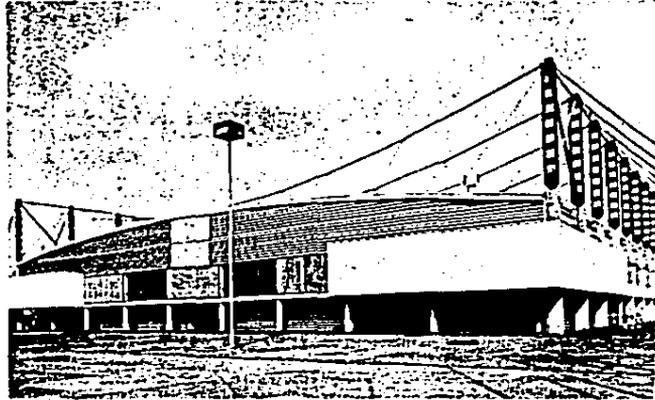
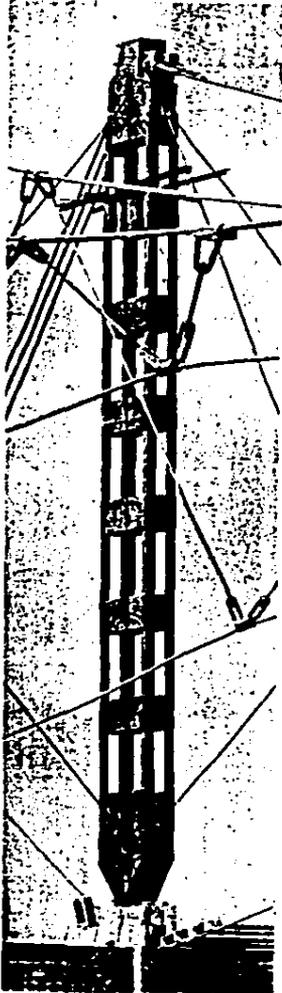




APLICACION EN MEXICO DEL SISTEMA JAWEHRT

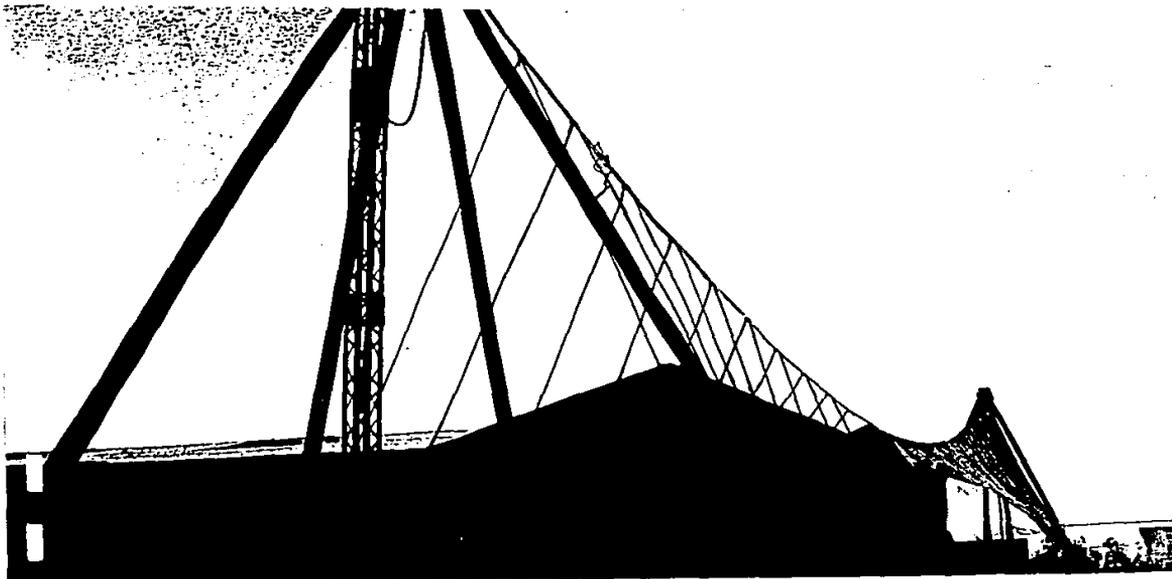
El Estadio de Esgrima de la Ciudad de México, se construyó para los Juegos Olímpicos de 1968. La estructura de 65 m. de claro, está formada por 15 armaduras de cable de acero con un peralte máximo de 9 m. situadas a 6.80 m. de distancia. Sobre el cable inferior de las armaduras se apoyan largueros para sostener la cubierta de lámina acanalada. Las columnas metálicas se apoyan en las graderías. Estando articuladas en su extremo inferior, se pueden mover en el plano de las armaduras para eliminar el momento de empotramiento. Esto reduce los esfuerzos horizontales que recibe la estructura inferior.





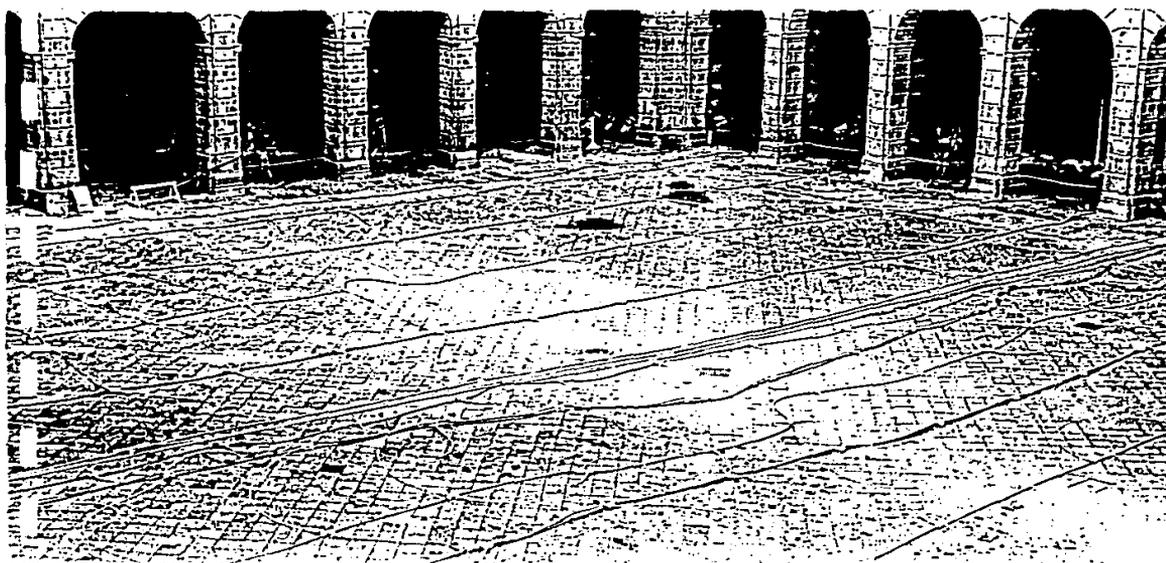
Los muros en los extremos tienen 12.20 m. de altura, para estabilizarlos se estructuraron de manera que pudieran apoyarse en su parte superior en la estructura. Los cables inferiores de las dos armaduras exteriores se ligaron formando una nueva armadura capaz de tomar esfuerzos horizontales. Para el cálculo se tomó una carga de granizo de 100 kg./m² sobre el cable superior, sin considerar la carga de succión del viento de 68 kg./m² que toma el cable tensor. En el cálculo se toma en cuenta el comportamiento elástico de los cables, por lo que antes de cargarse se estiran en frío para evitar deformaciones por acomodamiento de los torones y alambres que forman el cable.





fue necesario montar un módulo de la red para medir la resistencia del conector, ya que todas estas piezas tuvieron que fabricarse especialmente, pues no existían en el mercado. Se aprovechó este módulo para checar las medidas de la membrana, montando una sección simétrica.

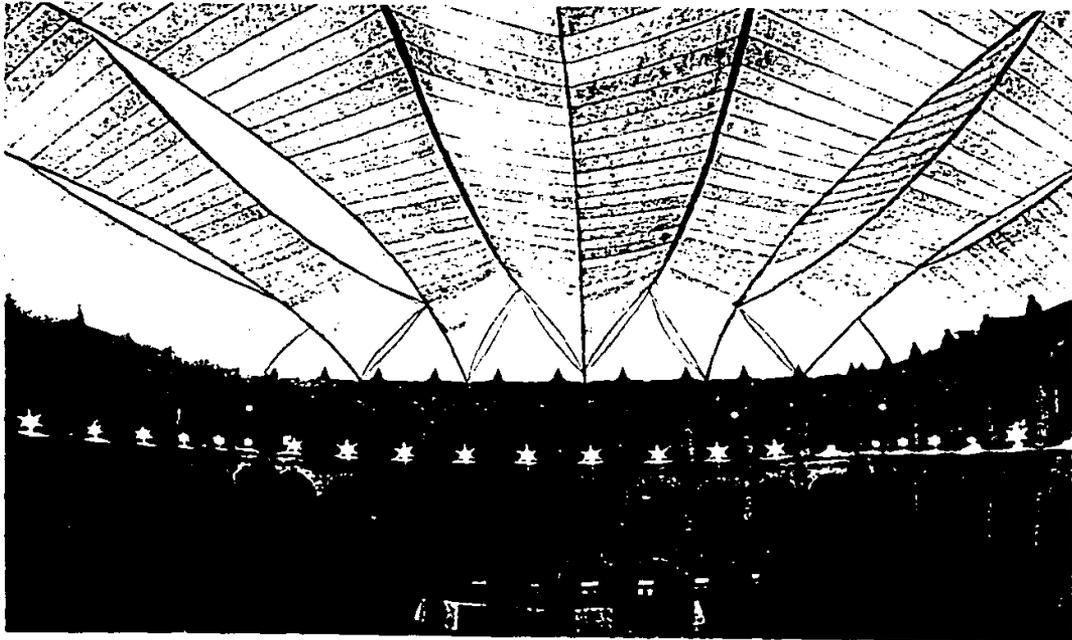
Debido a sus dimensiones, fue necesario armar la red de cables en el patio, sobre ella se fueron tejiendo las distintas secciones de la membrana, dándole un presforzado de 10%. Con ayuda de 12 montacargas se subió el conjunto y se anclaron los cables en la estructura de apoyo.

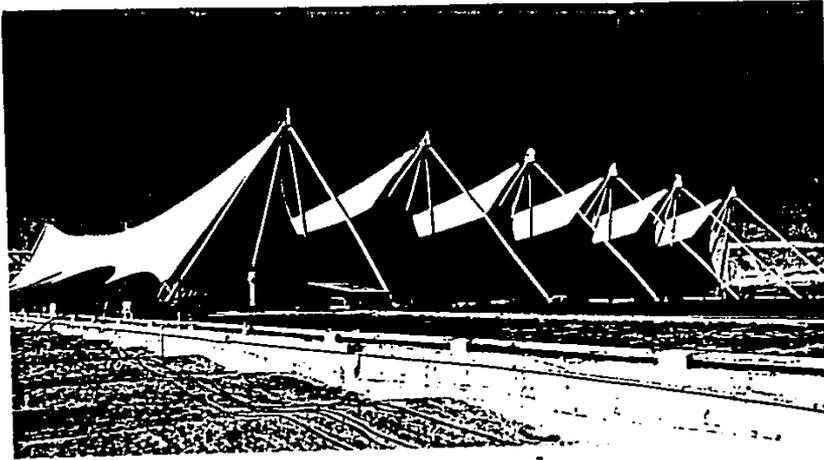




Onduladas de grandes claros

Una característica importante de las redes de cables onduladas es poder cubrir grandes claros a precios relativamente bajos. En 1972 tuve la oportunidad de diseñar y construir una de las más grandes. Esta cubierta tiene 70 por 64 m. y cubre totalmente el patio colonial del Palacio Nacional de México. El primer proyecto consistía en una red de cables ondulada, apoyada sobre 12 triplés de 12 m. de altura, ésta red se cubrió con una membrana de tejido poliéster, cubierta de PVC. que se tensaba con cables de borde en los extremos. La red estaba formada por cables soportantes y tensores de 2.5 cms. de diámetro, unidos por cables tensores transversales.

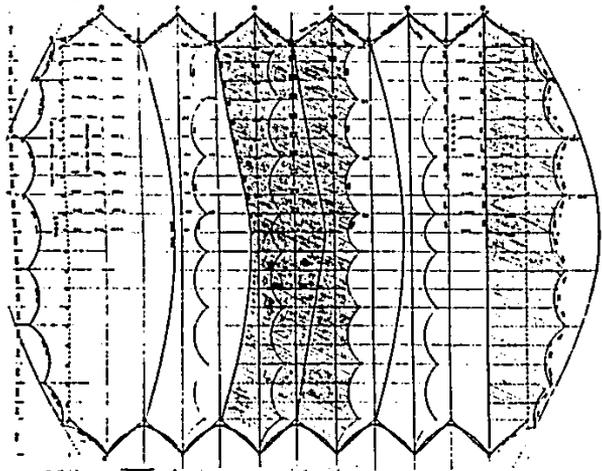


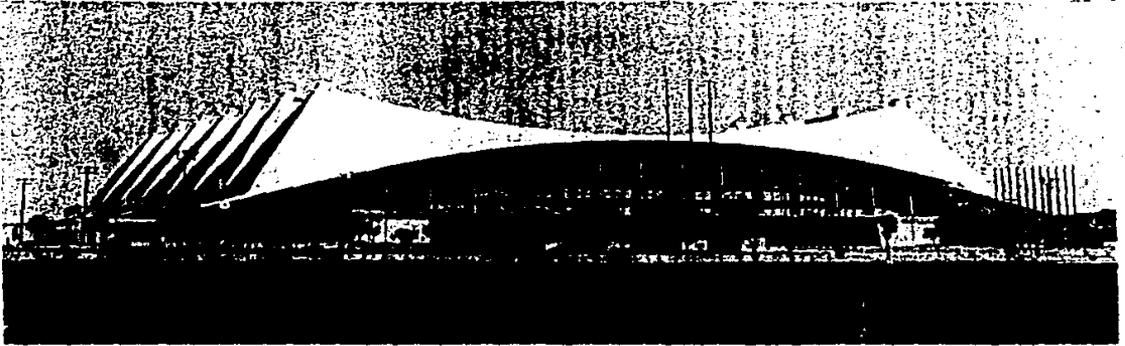


Para una segunda versión, se obtuvo una membrana de mayor resistencia, se suprimieron los cables tensores transversales, se incorporaron los cables a la membrana, formándose de esta manera una velaria textil, trabajando la membrana a la tracción.

El tensado fino en ésta versión, era mas complicado, pues se tenía que seguir una secuencia muy bien planeada para evitar esfuerzos suplementarios que pudieran desgarrar la membrana.

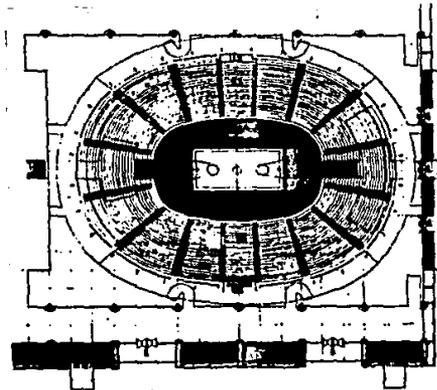
El tiempo de diseño, construcción y montaje, fue de sólo 30 días y se necesitaron más de 40 planos y 3 modelos para su realización.



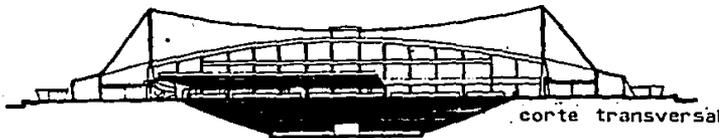


LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CABLES

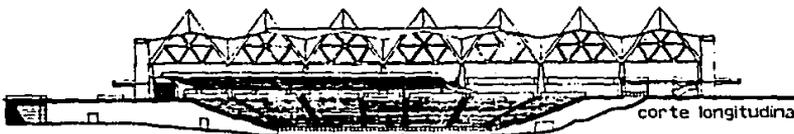
El Auditorio Jalisco en Guadalajara, México, estaba cubierto por un cascarón de concreto armado con una red de cables ondulada. El claro libre era de 90 m. y tenía 126 m. de largo. Era una sala de usos múltiples muy bien lograda, donde el sistema estructural estaba bien aplicado, desgraciadamente, tanto los cables tensores como portantes no tenían la protección adecuada a la intemperie ni eran del material indispensable para soportar la corrosión. La duración del edificio estuvo determinada por el tiempo que tardaron los cables en oxidarse. Como todo edificio de acero presforzado atacado por la corrosión se colapsó de un día para otro totalmente. Existen en México laboratorios de investigación capaces de determinar exactamente la protección que se deba dar a los cables. Ya se fabrican cables con aleaciones especiales para evitar la corrosión y con casi la misma resistencia que un cable de presfuerzo.



planta

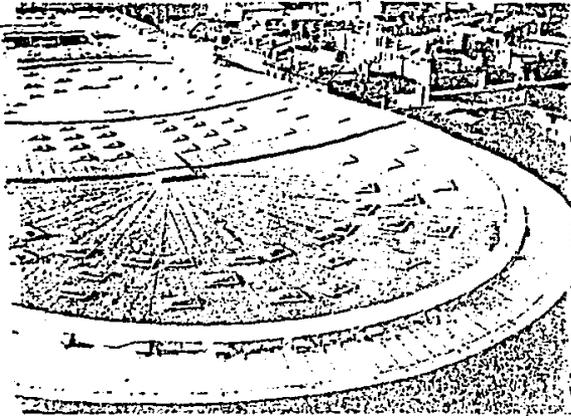


corte transversal



corte longitudinal

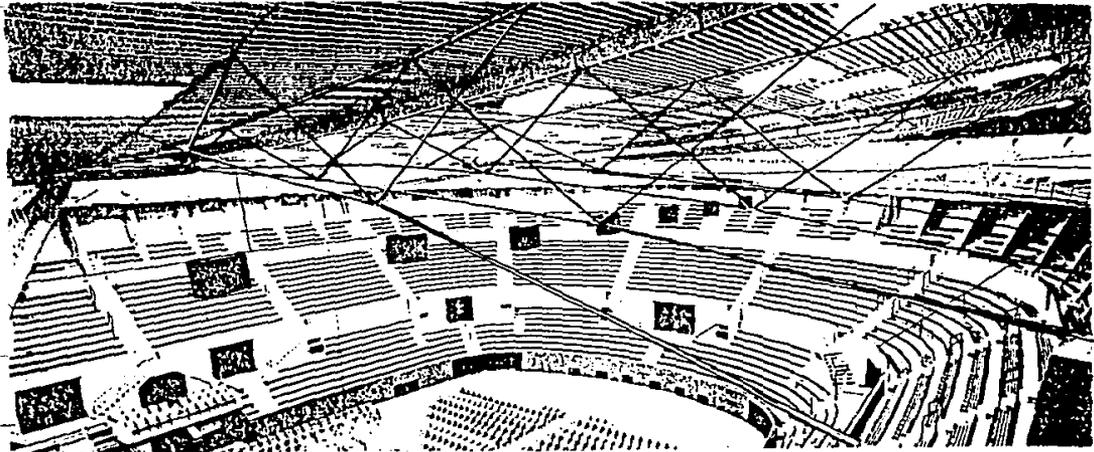
ARMADURAS DE CABLES SOBRE PLANTA OVAL



sala de deportes en Burdeos

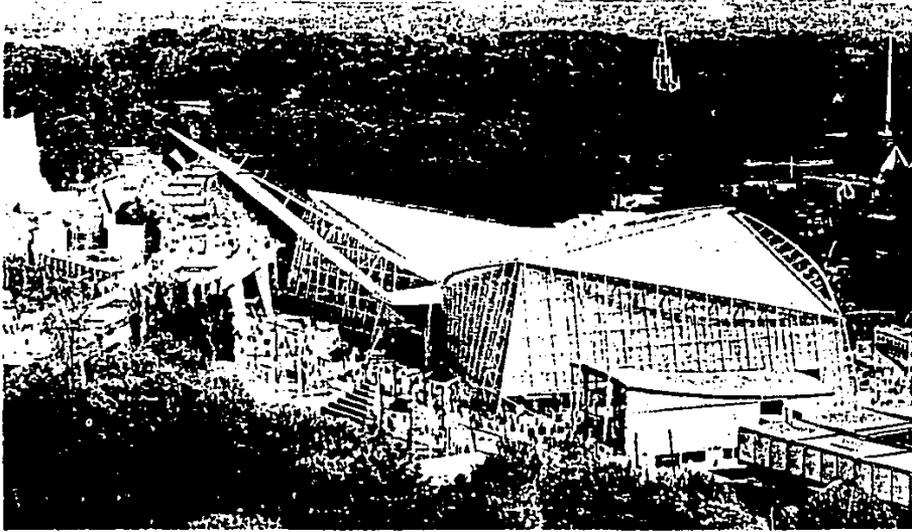
La posibilidad de cubrir una planta oval con armaduras planas de cables, se realizó en esta sala de deportes en Burdeos, Francia. Lo interesante en este proyecto, son los detalles tan sencillos, de la estructura formada con el sistema de cables unidos y tensados. La forma geométrica de la planta, son dos semicírculos separados el uno del otro una distancia de 20 m. El diseño de las partes circulares de la estructura se realizó por medias armaduras, fijas a medias coronas de acero y unidas por un cinturón de cables tensores. En la parte central, las armaduras paralelas de cables tienen un claro de 50 m. Los cables tensores y portantes se anclan en la parte exterior a dos cinturones de concreto armado que transmiten las cargas a un sistema de vigas y postes presforzados.

Toda la estructura se armó en el piso y se levantó sin grúa, con tan solo la ayuda de un tirfor de 3 toneladas. Debido al peso tan reducido del conjunto: 9 ton. o 3.4 Kg/m², sólo se necesitaron 6 hombres para esta maniobra. Los cables portantes tienen un diámetro de 18.22 mm. y los tensores de 30 mm. Se unen por medio de barras diagonales. Las armaduras de cables se cubrieron con lámina galvanizada, impermeabilizándose con el tradicional fieltro y asfalto. En esta obra David Jawerth fue el ingeniero consultor de los Arquitectos Lafitte y Dauriac.



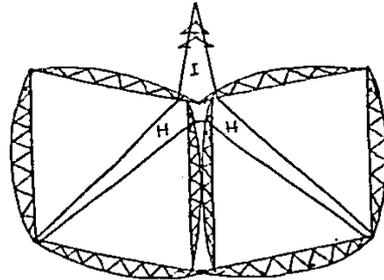
REDES CERRADAS

**PARABOLOIDES ENTRE ARMADURAS
REDES DE CABLES Y VIGAS
REDES EN TRES DIRECCIONES**



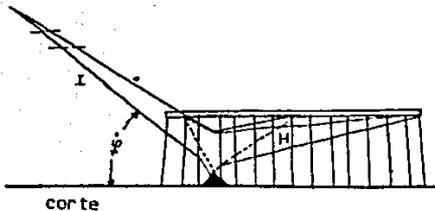
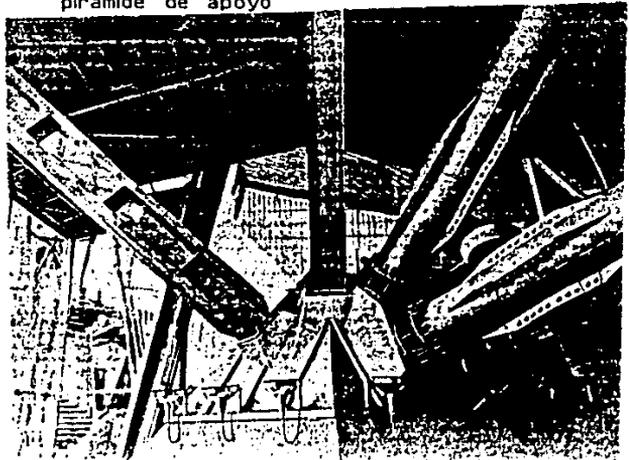
REDES ANTICLASTICAS TENSADAS ENTRE VIGAS DE ALMA ABIERTA

La velaria de acero del Pabellón Francés en la Expo 58 en Bruselas, está formada por dos paraboloides hiperbólicos unidos en un lado común. La innovación que presenta esta obra son los bordes, formados por armaduras reticulares de acero. Para formar los paraboloides, se inclinan las armaduras paralelas en dirección opuesta, estas armaduras se apoyan en otra estructura con forma de Y, en los brazos horizontales H, el brazo I está inclinado 45 grados y sirve de contrapeso a toda la cubierta, esto permite concentrar todas las cargas en un solo apoyo: una pequeña pirámide de concreto. El brazo inclinado funcionaba como antena de televisión, elevándose hasta 65 m. La superficie cubierta era de 12,000 m². y la altura máxima de 34 m. El peso de la cubierta incluyendo cables, cubierta y aislamiento térmico-acústico era de solo 20 kg. por m².

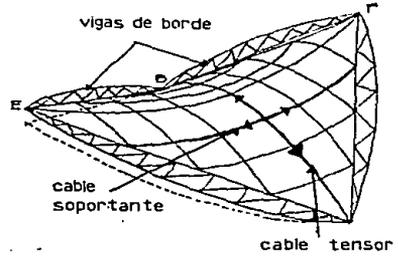
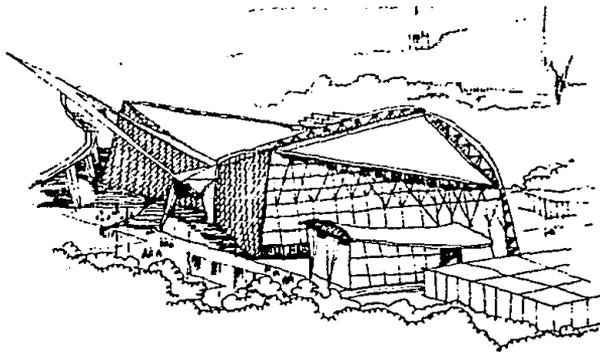


pirámide de apoyo

planta

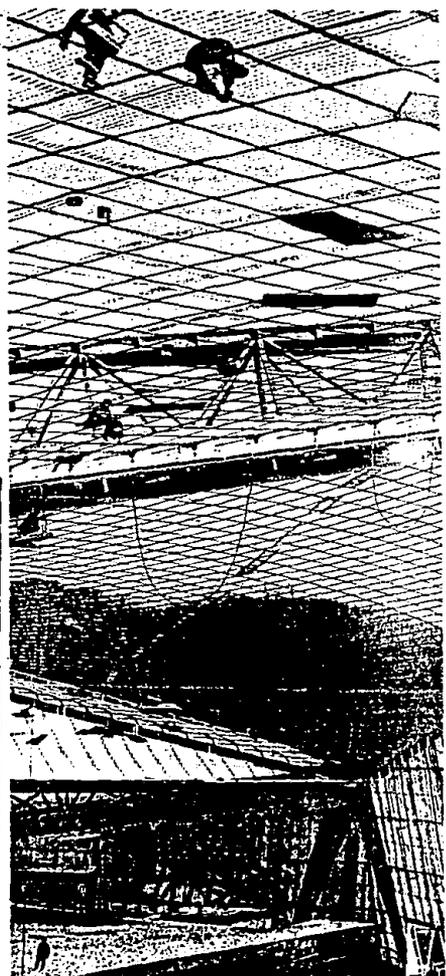


corte

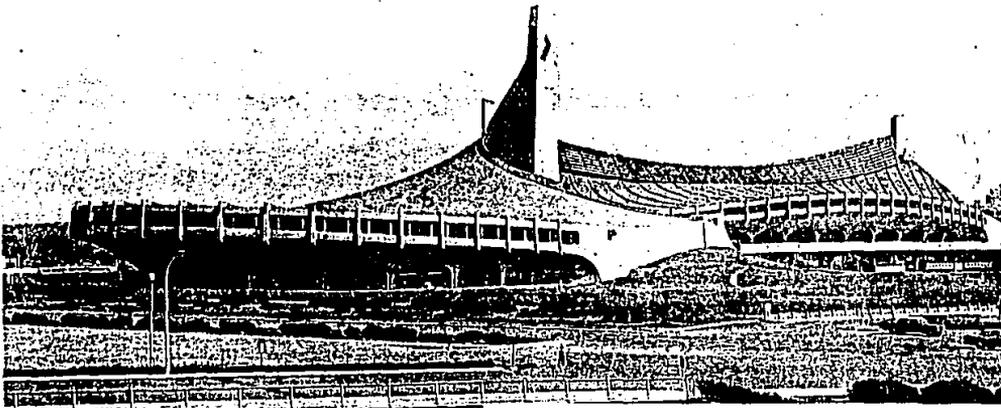


Debido a la ligereza de esta cubierta fue necesario realizar pruebas aerodinámicas en el túnel de viento de los "Anciens Etablissements Eiffel". Para conocer exactamente la magnitud de los esfuerzos se midió la dirección del viento normal a cada fachada, la base circular de la maqueta se debió a la necesidad de girarla. Se tomaron los valores sin los vidrios de las fachadas como protección durante el período de construcción.

El diseño arquitectónico lo realizó el Arq. G. Guillet, con la asesoría estructural del Ing. Rene Sarger.



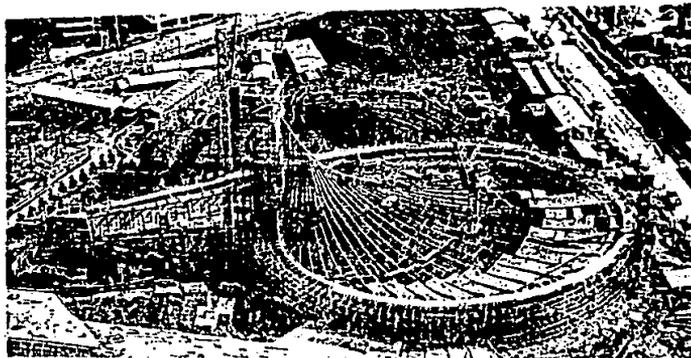
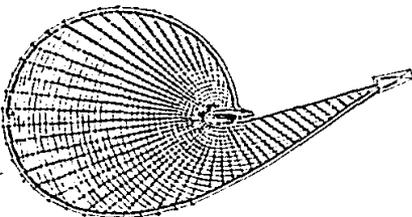
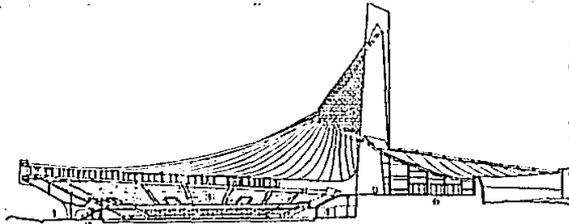
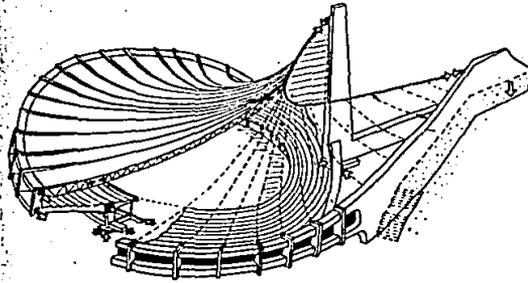
modelo para el túnel de viento

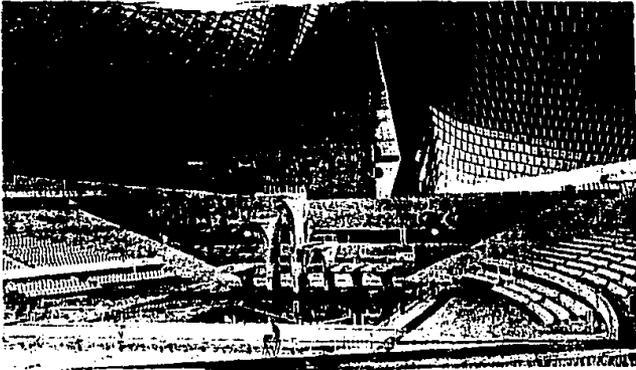


REDES DE CABLES Y VIGAS

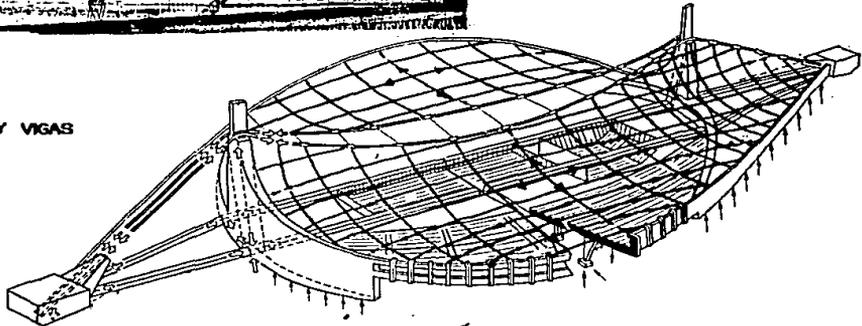
El Gimnasio Olímpico en Tokio está cubierto por una estructura de cables y vigas, éstas se apoyan en su parte superior en un cable en forma de U, que va descendiendo de un gran pilón de concreto hasta llegar a tensarse en un anclaje en el piso. Las vigas se apoyan en su otro extremo en las graderías. Para ayudar a estabilizarlas se colocan cables en sentido perpendicular tensados en las graderías. Si analizamos este edificio desde el punto de vista estructural, vemos que una red de cables hubiera funcionado mejor, pues las vigas trabajan en compresión y flexión.

Entre el cable y el pilón se forma un lucernario que acentúa la belleza de la estructura en el interior. Es obvio que se buscó un gran contraste entre el peso del pilón y la ligereza de la estructura. Este contraste se explota con fines arquitectónicos con una gran maestría, pues estructuralmente bastaría un mástil de acero para sostener una red de cables.





RED DE CABLES Y VIGAS

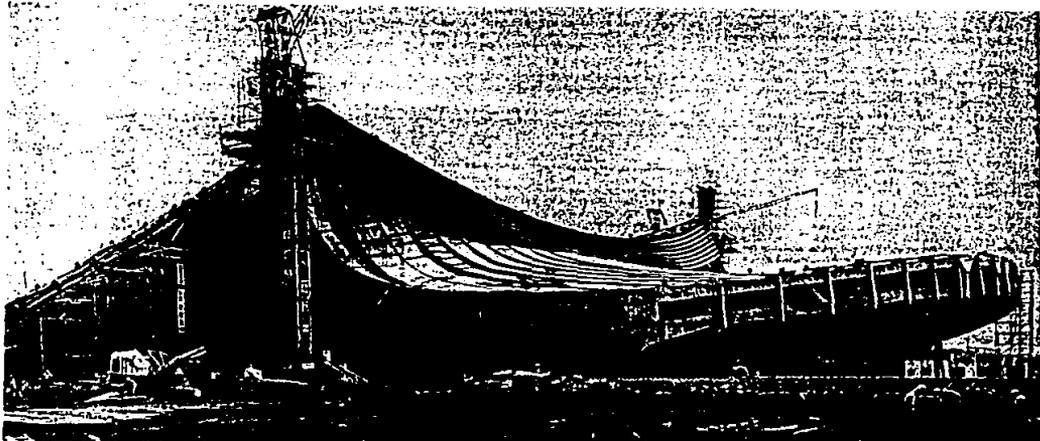


El diseño estructural que realizó el ing. Tsuboi en la Alberca Olímpica de Tokio, resuelve muy bien los requerimientos del diseño arquitectónico formal de Kenzo Tange. Es posible que Tange deseara obtener en la cubierta, la curvatura tan pronunciada que tienen las pagodas de la arquitectura Shinto temprana y por esto, utilizara vigas de acero en la curvatura soportante, en lugar de cables. Con la velaria de cables y vigas, se obtiene la curvatura deseada formalmente, pero deja de ser óptima al no poder aprovechar la economía de una red de cables ligera.

Las redes de la cubierta, están soportadas por dos cables de acero apoyados en dos pilones de concreto que salvan un claro de 126 m. Los cables tienen una flecha en el centro de más de 9 m. En este punto se separan entre sí casi 17 m.

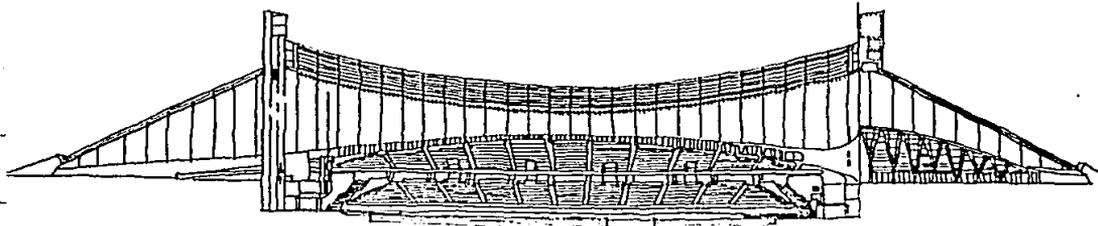
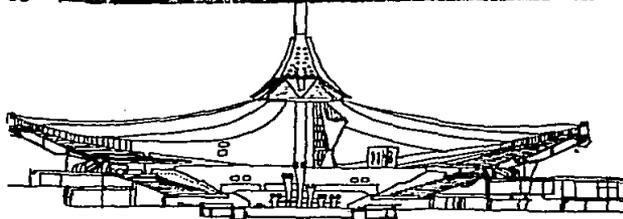
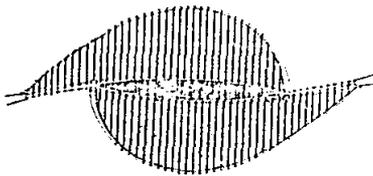
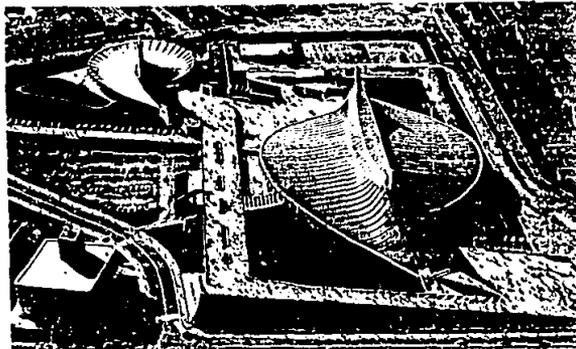
Las vigas soportantes de la velaria, cuelgan de los cables de cumbre y en su otro extremo, se apoyan en las graderías a las que transmiten las cargas. El sistema tensor se forma con los cables que atraviesan a las vigas y se tensan en las graderías.

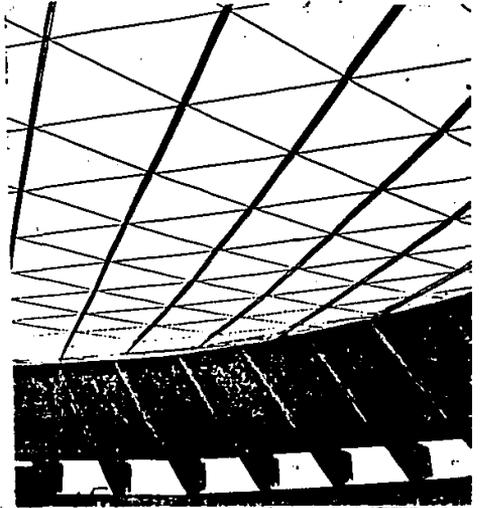
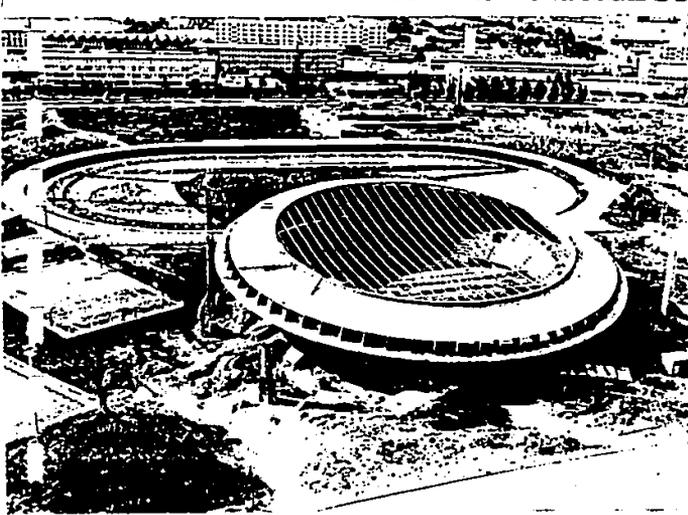




Montaje

Primero se montaron los cables soportantes, en seguida se colgaron y anclaron las vigas, una vez que éstas estuvieron en su lugar, se montaron los cables tensores y se les dio una tensión de 20 toneladas. Esto aumentó considerablemente la resistencia de la cubierta. Los esfuerzos de tracción en los cables principales alcanzaron después del tensado 1350 Ton. Estos cables tienen 33 cms. de espesor y están formados por 3 cables de 52 mm. y 6 cables de 34.5 mm. de diámetro. El peralte de las vigas varía entre 50 a 100 cms. Los cables tensores tienen 44 mm. de diámetro. La estructura se cubrió con una lámina de acero de 4.5 mm. de espesor.





Redes en tres direcciones

Sala de deportes del Grand Marais en Saint-Nazaire, Francia.

Arqs: Vissuzaine, Longuet, Rivière
Consultores: R. Sarger, J.P. Batellier

Esta sala de deportes tan original, tiene la forma de un casquete esférico inclinado 13° en el eje superior. Es un enorme cascarón de 65 m. de diámetro con una capacidad de 2500 localidades. La cubierta de esta estructura es una red de cables en tres direcciones, con forma de paraboloides de revolución, los triángulos equiláteros de la malla tienen 2.70 m. de base. La red se cubrió con lámina galvanizada ondulada sobre la que se colocó una losa de concreto de 4.5 cms. de espesor, el aislante térmico y el impermeabilizante.

Los cables tienen 279 mm². de sección, con un módulo de elasticidad de 17,500 kg/mm² y una carga de ruptura de 45 ton. Los 66 cables que forman la red tienen un largo total de 5000 m. y cubren una superficie de 3100 m². Se protegieron de la corrosión por galvanización y por una funda de polietileno, trabajan a una tensión máxima de 20 ton. El sistema de construcción de esta cubierta es muy original: en la corona superior se fijan tubos de acero y placas de apoyo que dirigen a los cables a la geometría preestablecida. Los cables se unen por conectores formados por medias conchas soldadas, que permiten que los cables se puedan desplazar por temperatura.

REDES ABIERTAS

**LAS PRIMERAS REDES
EL CABLE DE BORDE
DESARROLLOS EN INSTITUTOS**



tienda abrigo Sahara 58 en Paris

REDES ABIERTAS

Se llaman redes abiertas, aquellas estructuras tensadas en sus bordes con cables de acero. La gran eficiencia del cable nos permite llegar a una optimización del sistema estructural, con diseños mas ligeros y económicos.

Hasta hace pocos años, la construcción de redes abiertas presentaba problemas de diseño y cálculo. El análisis de un elemento de borde en tracción, implicaba un conocimiento del comportamiento exacto de la forma geométrica óptima de la membrana de acero (superficie mínima). Con el advenimiento de los sistemas de análisis estructural por computadores este problema se ha resuelto y ya no es necesario recurrir a modelos a escala de una gran exactitud, que resultaban sumamente caros.

Es por esta razón que las primeras velarias de acero con bordes en tracción se desarrollaron en los institutos de investigación estructural. En este capítulo se presentan tres obras producidas en esos institutos: La tienda abrigo "Sahara 58" en Paris,

la cubierta del estadio Farahabad en Teherán y la sala de deportes Rey Abdul Aziz en Jeddah. En todas ellas, los institutos desarrollaron sus propias tecnologías.

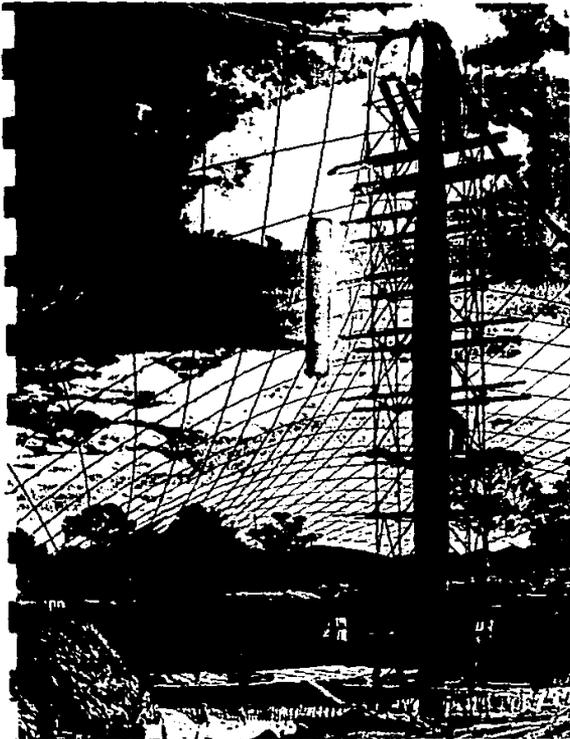
En el siguiente capítulo se pone a consideración del lector la metodología para el diseño estructural y construcción de redes abiertas desarrollada por el Instituto de Estructuras Laminadas Ligeras de la Universidad de Stuttgart, donde el autor colaboró durante tres años como colaborador científico.

La tienda abrigo "Sahara 1958" en Paris

Rene Sarger, director del C.E.T.A.C. en Paris, diseñó una de las primeras velarias de acero con cables de borde en tracción. Esta velaria tiene forma de paraboloide hiperbólico triangular, es una red de cables de acero pretensada. La red esta cubierta de un tejido de fibra de vidrio plastificado, mide 20 por 30 metros, con dos puntos altos de apoyo y dos bajos de anclaje.



Sydney Myer Music Bowl

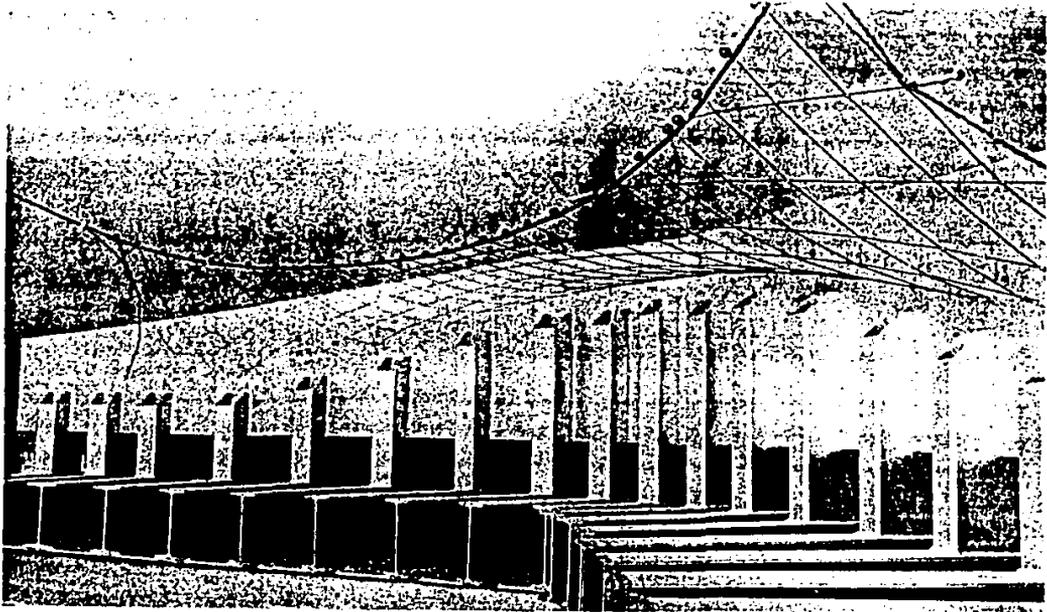


EL CABLE COMO ELEMENTO DOMINANTE

El diseño estructural del Sydney Myer Music Bowl es importante, por su cable de borde principal, de 170 m. de largo, situado al frente del auditorio. Esta posición se utilizó en diseños posteriores, con grandes cables de borde, contribuyendo de esta manera al desarrollo de la tecnología en redes abiertas. Este cable se apoya en dos grandes mástiles de 21 m. de altura separados 55 m. entre sí. Se forma por 7 cables de 9 cms. cada uno, mientras que los cables de la red son solo de 3.5 cms.

Esta fue de las primeras velarias de acero, el Ing. Molyneux la construyó en 1958, en un parque de Sydney, Australia, como cubierta del auditorio para conciertos al aire libre. La planta es triangular con lados de aproximadamente 80 m. La superficie cubierta es de 3700 m². La red de cables de acero se cubrió con una membrana de madera contrachapada y aluminio.

montaje de la red



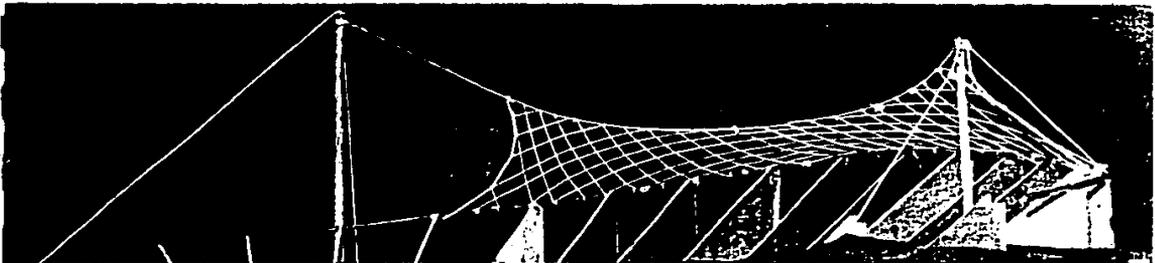
LA INVESTIGACION DE REDES EN EL SPACE STRUCTURES RESEARCH CENTRE

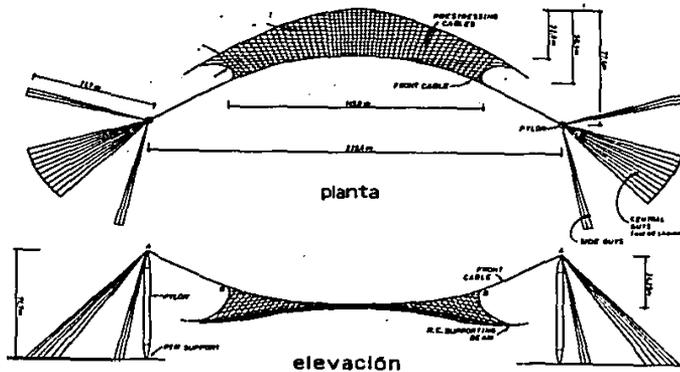
La solución estructural dada por el Dr. Makowski a la cubierta del Estadio Farahabad en Teheran, es similar a la del auditorio en Sydney:

Un cable principal, de 145 m. de longitud, que sostiene la red de cables de acero, se apoya en dos grandes pilonos de 72 m. de altura, separados entre sí 235 m.

Existe una necesidad comprobada de métodos seguros de diseño y cálculo de estructuras de grandes claros, formadas por cables de acero de alta resistencia. El Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Surrey llevó a cabo una investigación para comprobar los métodos de cálculo matemático por medio del estudio experimental de dos modelos construidos con cable de acero.

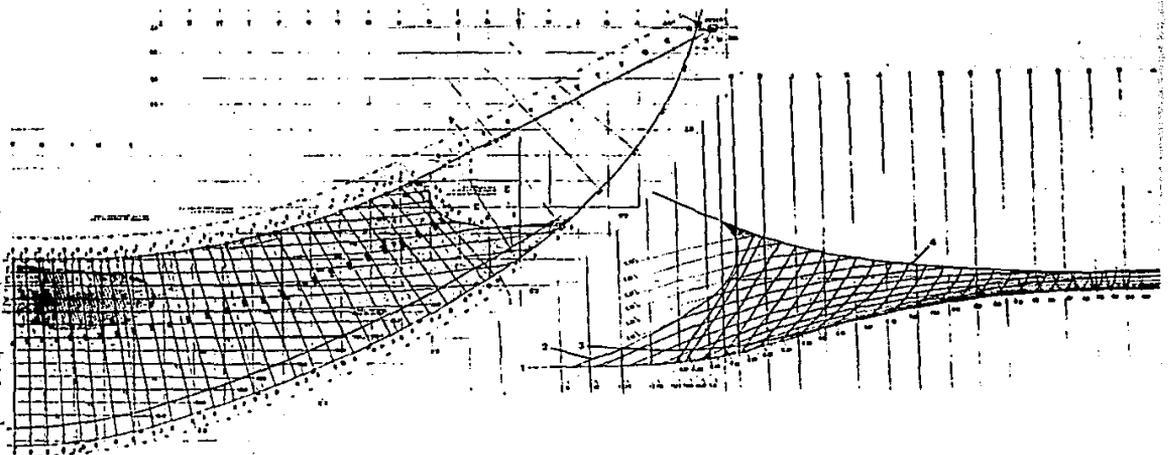
Un modelo escala 1:50 se construyó con cables de una gran precisión a la misma escala. En éste modelo, cada cable se podía ajustar en su longitud, además se utilizó para hacer las pruebas de carga y temperatura. Los esfuerzos de tracción en los cables se midieron con un aparato convertidor de sonido desarrollado especialmente en el Centro de Investigaciones de las Estructuras Espaciales, de la misma Universidad. La geometría deformada de la red se midió por fotogrametría, utilizando cámaras estereo. Para medir la distribución de la presión y succión de viento se utilizó un segundo modelo escala 1:500. Los resultados de estas investigaciones permitieron dimensionar con una gran exactitud los elementos estructurales.





El cable de borde está formado por 23 cables de 3.6 cms. de diámetro cada uno y tiene una resistencia garantizada de 3450 ton. La red se forma por cables tensores y portantes con una separación de 2.5 m. Los cables son de acero galvanizado de 3.5 cms. de diámetro con una resistencia de 94 ton. cada uno. Los cables de borde laterales están formados por 6 cables de 3.6 cms. de diámetro y toman los esfuerzos de los cables tensores. Es interesante hacer notar que los cables de la red no están unidos, ya que tanto los cables tensores como los soportantes están situados sobre la curva geodésica de la superficie. La cubierta está formada por varias capas, la inferior es de elementos de lámina de acero ondulada, fijados al cable tensor

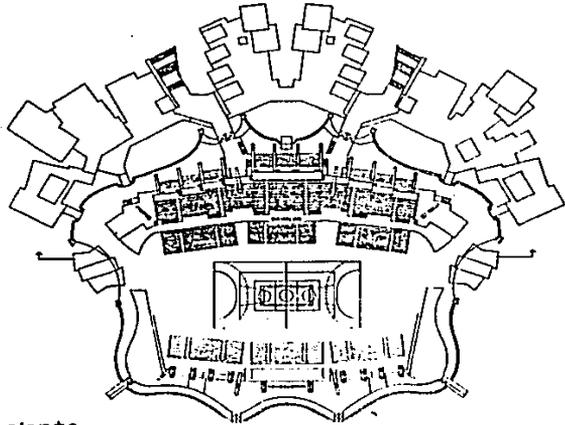
sobre esta capa se colocan placas de concreto prefabricadas de 6 cms. de espesor, como aislante térmico que proporcionan una carga de 50 kg/m². La cubierta se impermeabilizó con varias capas de un granulado mineral. Los mástiles de 72 metros de altura, que también son depósitos de agua, descansan sobre rótulas esféricas de 1.35 m. de diámetro y transmiten una carga de 2880 ton. Los cables se protegieron de la corrosión por galvanizado y se barnizaron con dos capas de resina epóxica. Las fotografías muestran los modelos de la red donde se probaron todas las hipótesis de comportamiento estático y aerodinámico, antes de proceder a la construcción.



REDES INTEGRALES

Sala en la Universidad Rey Abdul Aziz en Jeddah. Arabia Saudita.

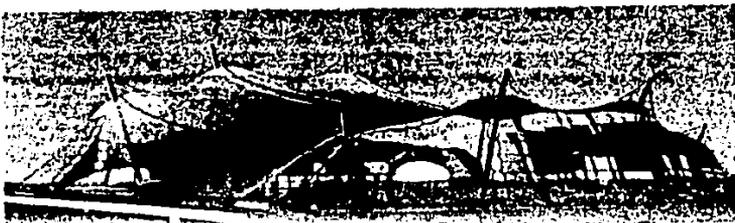
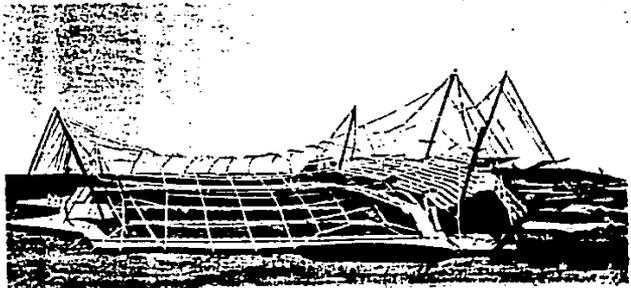
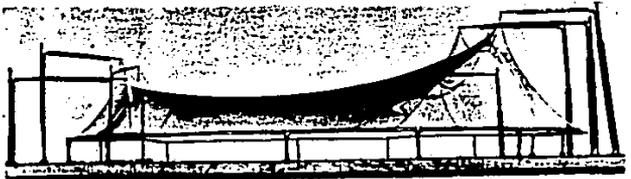
Frei Otto construyó en 1980 esta gran sala de usos múltiples. Está cubierta con una red de cables de acero en forma integral, pues es al mismo tiempo cubierta y fachada. Su diseño recuerda las tradicionales tiendas árabes. La red cubre 7500 m². Está sostenida por 8 mástiles de hasta 30 m. de altura y se cubre por una doble membrana. En el interior se colgó otra membrana como aislante acústico. El mayor problema lo representó la climatización con medios naturales a través de la membrana y de las cabezas de los mástiles.



planta

El proceso de diseño en el IL

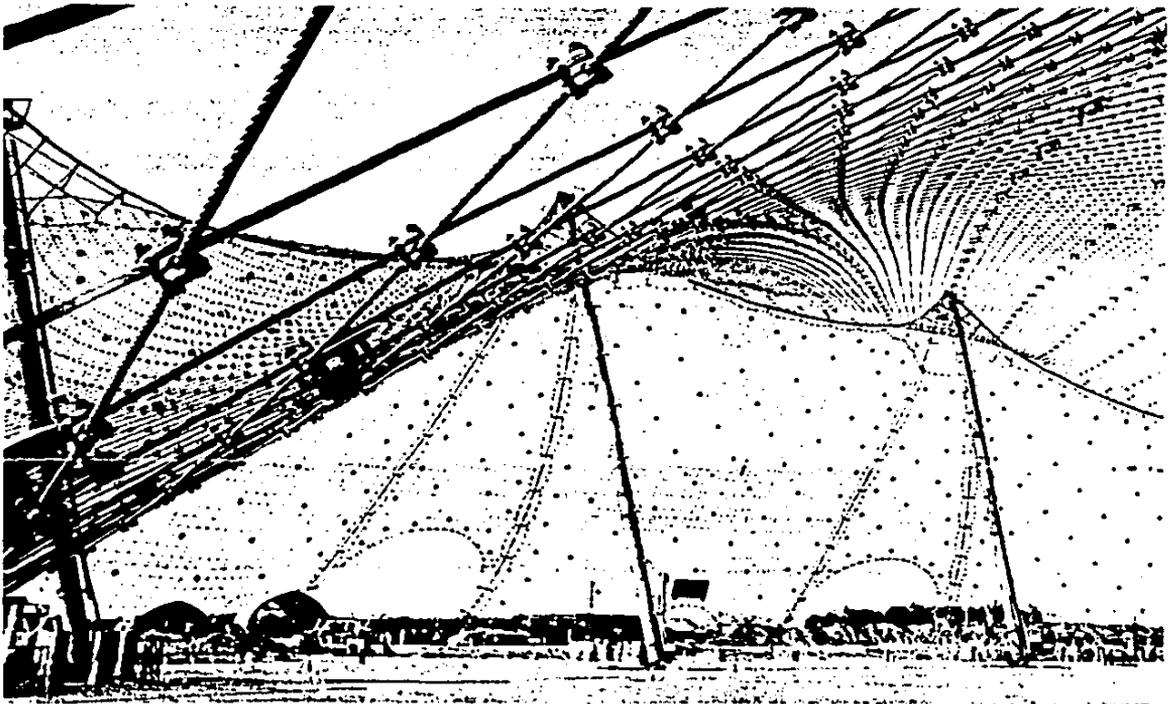
El proyecto arquitectónico se obtuvo de la construcción de varios modelos experimentales. En el primero se determinó la forma con una superficie mínima obtenida de una película de agua jabonosa. Esta forma se rectificó con un modelo construido con una red de cadenas colgantes, este modelo produjo una delicada forma armoniosa. El tercer modelo fue construido con una red de cables y seda poliéster, de este último modelo se tomaron las medidas definitivas para la construcción. La forma que se obtuvo con este proceso experimental de diseño fue de una gran originalidad.

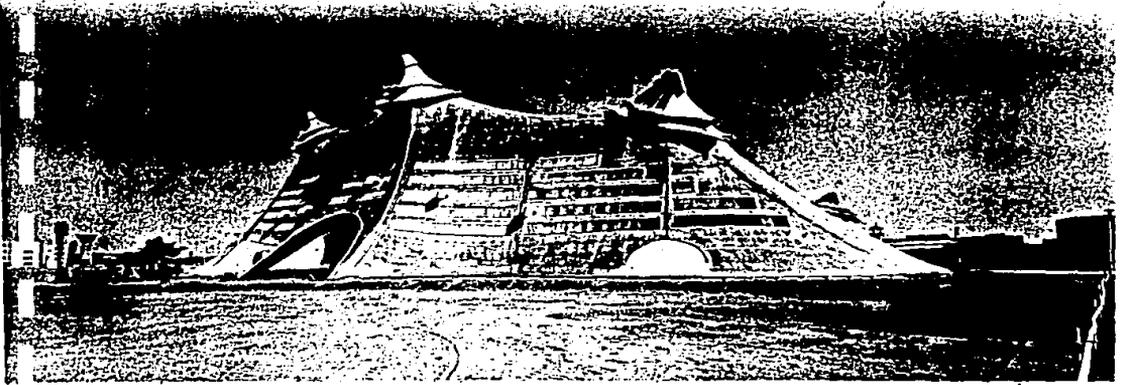


MONTAJE

Se siguió la siguiente secuencia:

La red de cables prefabricada, con una abertura de malla de 50 cm. se llevó en secciones a la obra, donde se fue conectando entre sí y a los cables de borde, al mismo tiempo se levantaban los ocho mástiles sobre la losa de cimentación, se estabilizaron al piso por medio de vientos y se conectaron sus cabezas entre sí. La red completa con un peso de 80 ton. se extendió plana alrededor de la base de los mástiles y a lo largo de la viga de borde de cimentación en forma de anillo. A continuación se fue elevando la red simultáneamente en los ocho puntos por medio de poleas situadas en las cabezas de cada uno de los ocho mástiles. La red se conectó a la cimentación sólo hasta que se había elevado dos terceras partes. La maniobra duró solo siete días, aunque la planeación del montaje duró mucho más. El pretensado final de la red se obtuvo elevando los mástiles 40 cms.

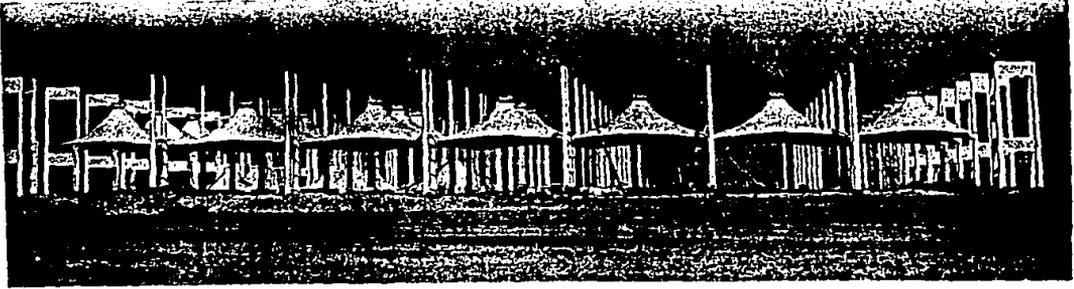




LA CIMENTACION

consiste en un anillo de concreto reforzado apoyado en anclas de diez metros de largo. Los cables se pretensaron contra 24 bloques de concreto reforzado masivo de 1.50 m. de profundidad, cada block se fijó con siete anclas. La tienda formada por la red de cables cubre el conjunto deportivo con un total de 8500 m². La red de cables y el montaje tuvieron un costo de 2.5 millones de libras. La red fue construida por el contratista Suizo Habegger con planos de la compañía alemana "Planung Leichtbau" que entregó las plantillas de corte con una tolerancia de 3 mm. en todos los cables.

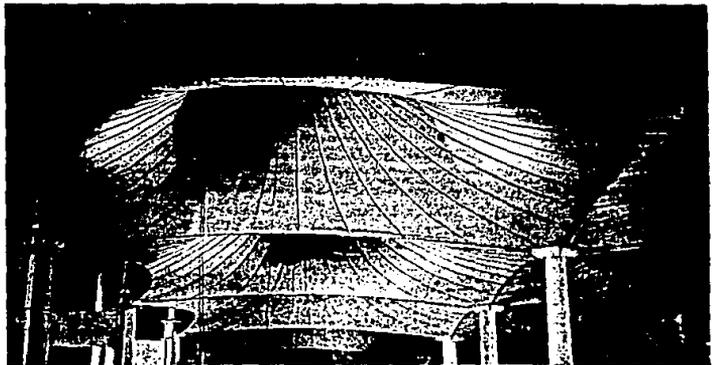
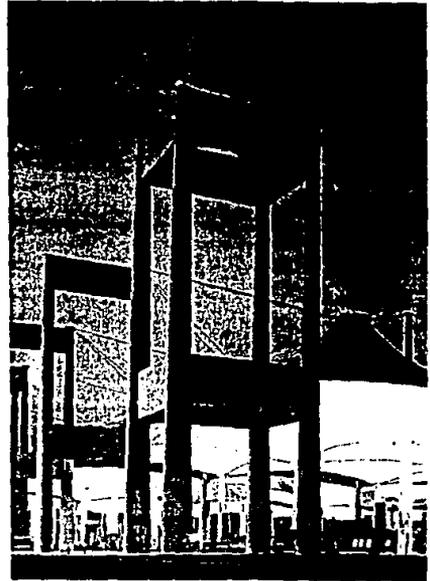


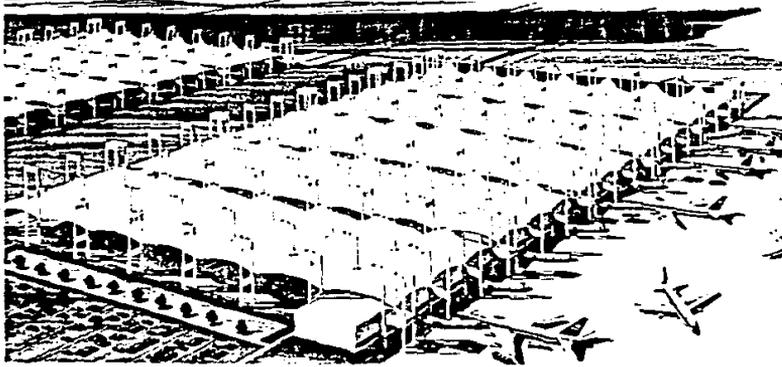


EL DESARROLLO ACTUAL DE LAS REDES

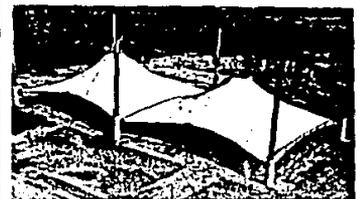
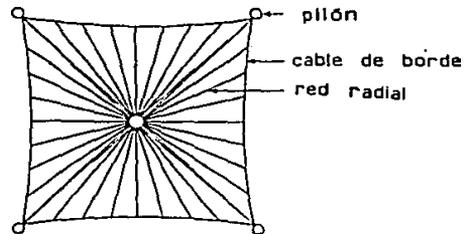
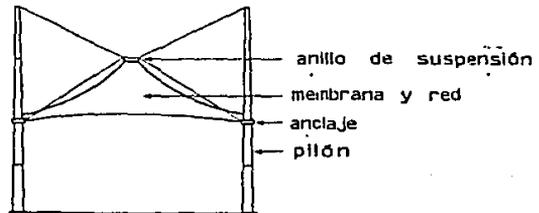
Walter Bird, el pionero en las estructuras neumáticas, con una gran experiencia obtenida en la construcción de las cubiertas de radares, los famosos "radomes", y mas tarde con la construcción del Pabellón Norteamericano en Osaka, hizo posible la construcción de las grandes estructuras ligeras, actuales, como las cubiertas de los grandes estadios en los Estados Unidos y Canadá, la climatización de grandes espacios, como Florida Festival y el Aeropuerto Haj en Jeddah, Saudi Arabia.

Este aeropuerto nos muestra las posibilidades actuales (1982) de la construcción con redes de cables. Durante los 70 días que duran las peregrinaciones a La Mecca, cientos de miles de musulmanes pasan por el aeropuerto mas grande del mundo. Está formado por 210 velarias en plico, de planta cuadrada, de 45 por 45 m. cada una y cubren en total 420,000 m². El área mas grande cubierta hasta la fecha.





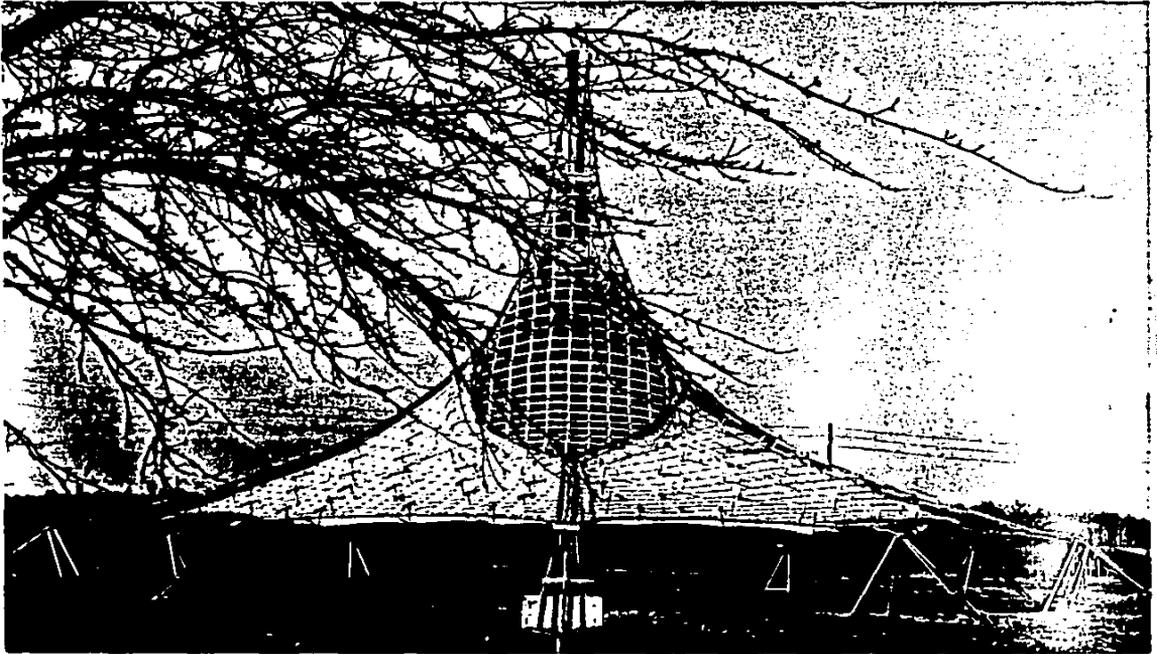
Las velarías terminan en su pico en un anillo de suspensión, que está cargado por cuatro cables soportantes que van a grandes pilones de 45 m. de altura. Se estabilizan por otros cuatro cables tensores, que también se anclan en los pilones. Los cables de cumbre unen los diferentes módulos, en los extremos se utilizan cables de borde. Del anillo de suspensión en la parte superior, cuelga una red de cables radial, que se tensa a los cables de borde y de cumbre. En el proceso de diseño de la estructura fue indispensable la construcción de un modelo para el túnel de viento y un prototipo escala 1 a 1 con dos módulos. El montaje se simplificó al dividir el anillo de suspensión en dos partes: el superior se colgó con los cables soportantes, el inferior se fijó a la red de cables y a la membrana. Los anillos se unieron atornillándolos. La membrana se protegió con una red al montarla, para evitar que el aire la pudiera volar. El edificio fue diseñado por la firma Skidmore, Owings and Merrill y fue prefabricado por Birdair Structures con 510,000 m² de un tejido de fibra de vidrio recubierto de teflón.





METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

**EL EDIFICIO EXPERIMENTAL EN STUTTGART VAHINGEN
EL PABELLON ALEMAN EN LA EXPO 67 EN MONTREAL
LA CUBIERTA DE LAS INSTALACIONES OLIMPICAS EN MUNICH**



Investigación en la estática de modelos

El edificio experimental en Stuttgart Vaihingen

La construcción de este edificio marca el inicio de un nuevo sistema estructural: las estructuras de redes de cables de acero abiertas. Para construir el Pabellón Alemán en la Expo 67 en Montreal, fué indispensable construir este prototipo para desarrollar un sistema constructivo basado en la estática de modelos y comprobar la exactitud de ésta última. No se trataba de probar la factibilidad de la construcción del pabellón, pues de antemano se sabía que era perfectamente posible. En este modelo a escala real se probarían además todos los detalles constructivos, desde el diseño de la herrería de la red, como conectores y abrazaderas de los cables, hasta el diseño de los mástiles de apoyo y la cimentación.

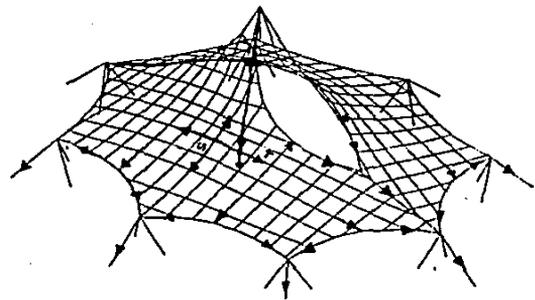
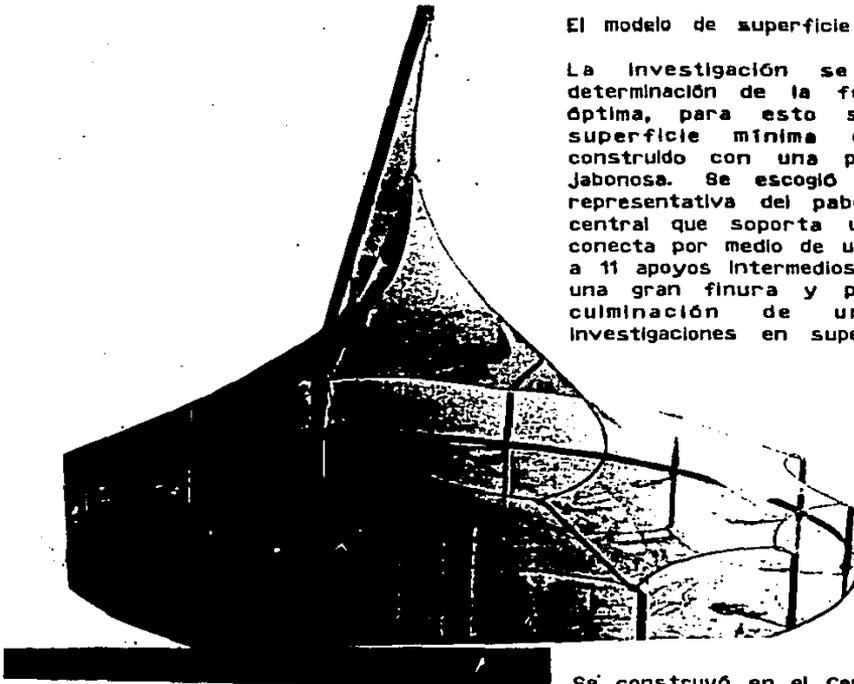


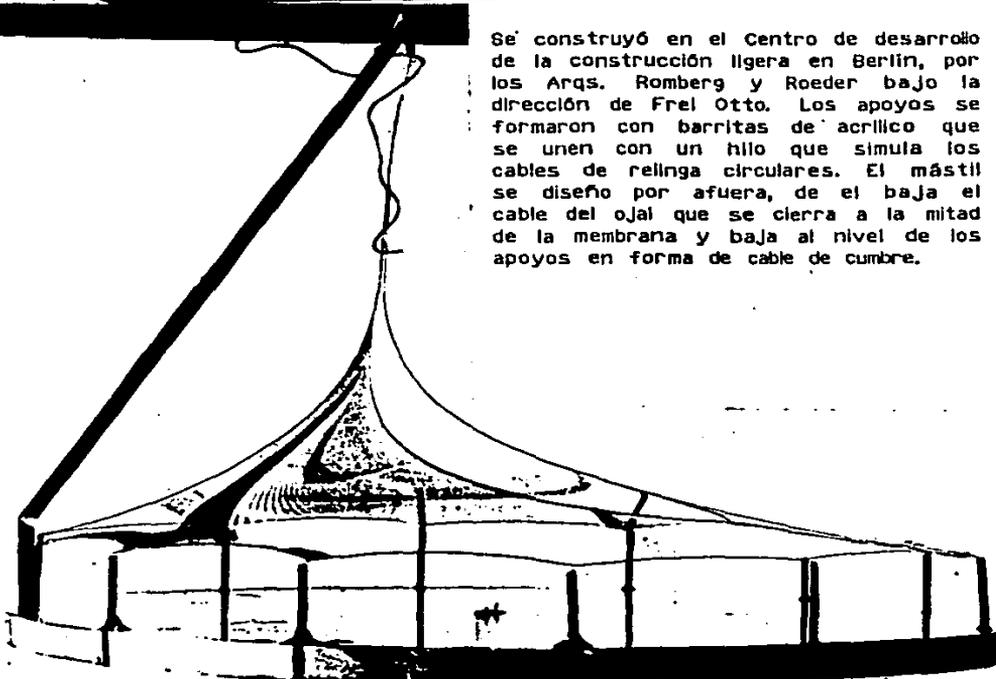
diagrama estático

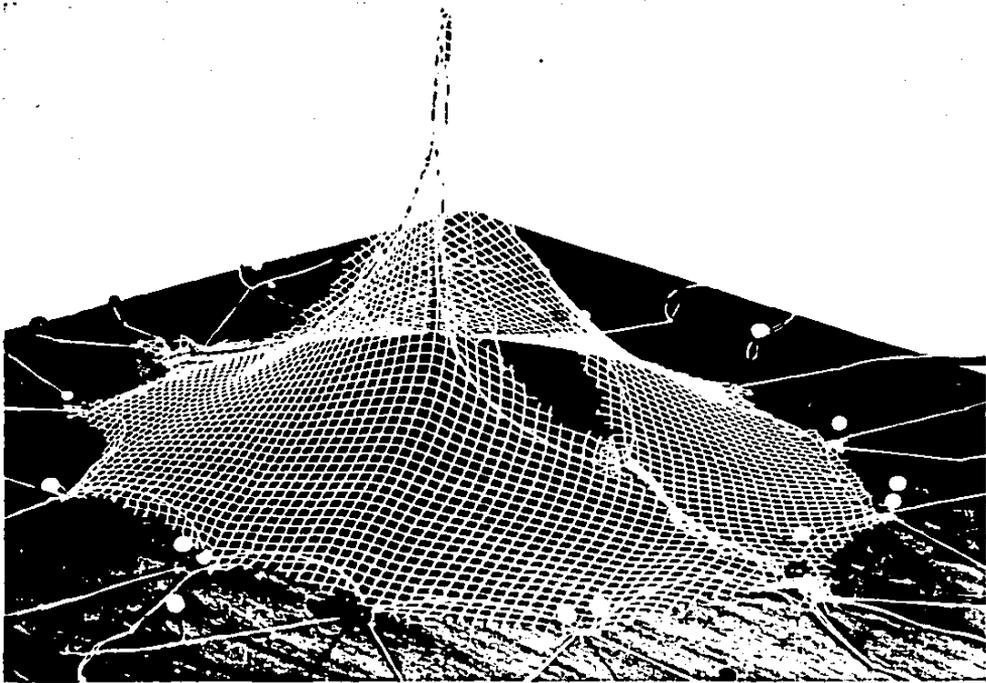
El modelo de superficie mínima

La investigación se inició con la determinación de la forma geométrica óptima, para esto se investigó la superficie mínima en un modelo construido con una película de agua jabonosa. Se escogió una parte muy representativa del pabellón: un mástil central que soporta un ojal que se conecta por medio de un cable de cumbre a 11 apoyos intermedios. Este modelo de una gran finura y precisión fue la culminación de una serie de investigaciones en superficies mínimas.



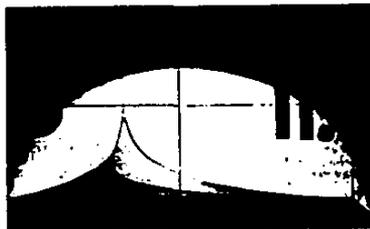
Se construyó en el Centro de desarrollo de la construcción ligera en Berlín, por los Arqs. Romberg y Roeder bajo la dirección de Frei Otto. Los apoyos se formaron con barritas de acrílico que se unen con un hilo que simula los cables de relinga circulares. El mástil se diseñó por afuera, de él baja el cable del ojal que se cierra a la mitad de la membrana y baja al nivel de los apoyos en forma de cable de cumbre.

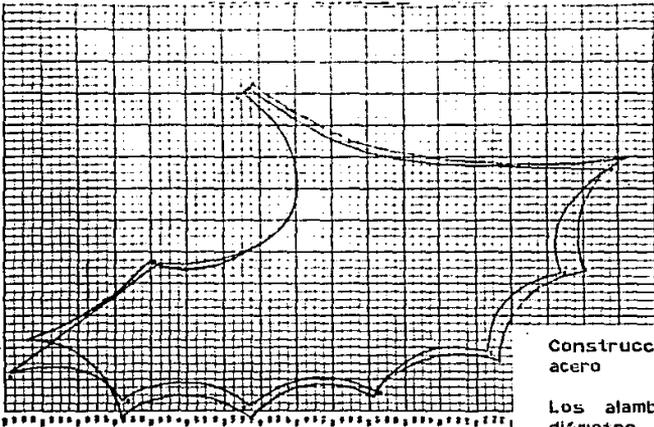




El modelo textil

Su función es obtener el corte de la red. Se construyó este modelo con una tela que se utiliza para cortinas, es un tul poliéster cuyo tejido forma una pequeña cuadrícula. La forma geométrica de este modelo se obtuvo midiendo el modelo de superficie mínima construido con una película de agua de jabón. Esta medición se llevó a cabo por medio de fotogrametría. Para evitar errores por perspectiva, la membrana de jabón se fotografía con la luz paralela de un polariscopio, el contorno de la foto, nos muestra la curvatura exacta de la superficie mínima. Aunque el modelo textil se acercaba bastante a esta superficie, no se logró reproducirla exactamente debido a la influencia del material, pues este tejido no se puede tensar igual en los dos sentidos.



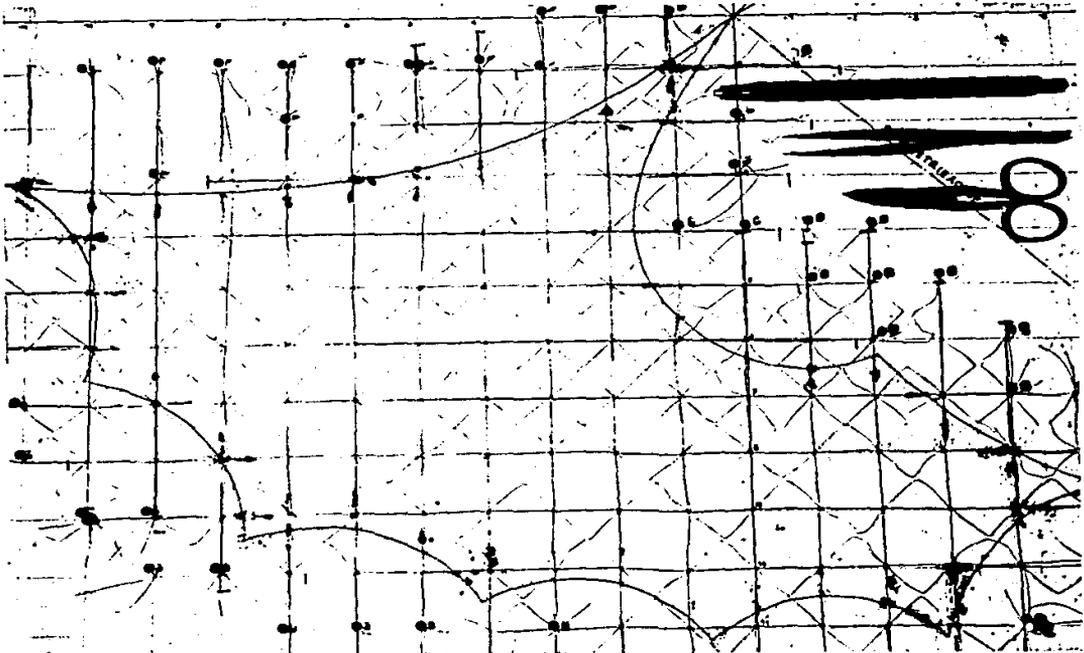


Construcción del modelo en alambre de acero

Los alambres de acero de 0.2 mm. de diámetro se tensionaron sobre una base de madera en la que se había dibujado el corte de la red, se les dió un pretensado de 750 g. que correspondía a 1000 kg. por cable en el edificio original. Sobre esta red se tendió otra de alambre de cobre a 45 grados, que después se cortó, anudó y soldó a la red de acero, formando así los nodos. La distancia entre ellos era de 2.6667 que correspondía a 50 cms. del edificio original.

Corte de la red

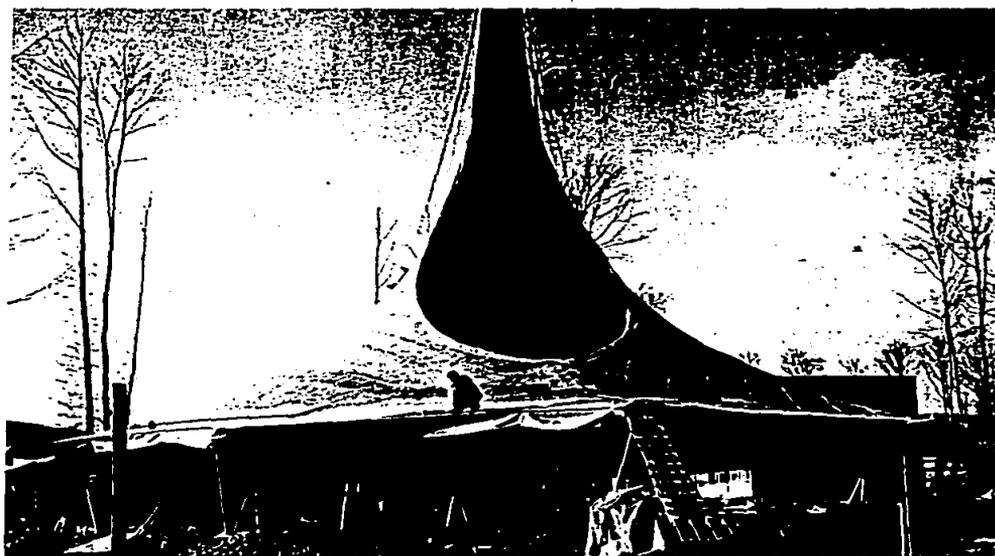
Se llama "corte de la red" al perímetro formado por los cables de borde, que delimita el área de la red de cables. Esta configuración se obtiene midiendo el modelo textil con una gran precisión, sin embargo, se presentaron diferencias con el modelo de alambre de acero ya tensado, debido a la diferencia en la elasticidad de los dos materiales.

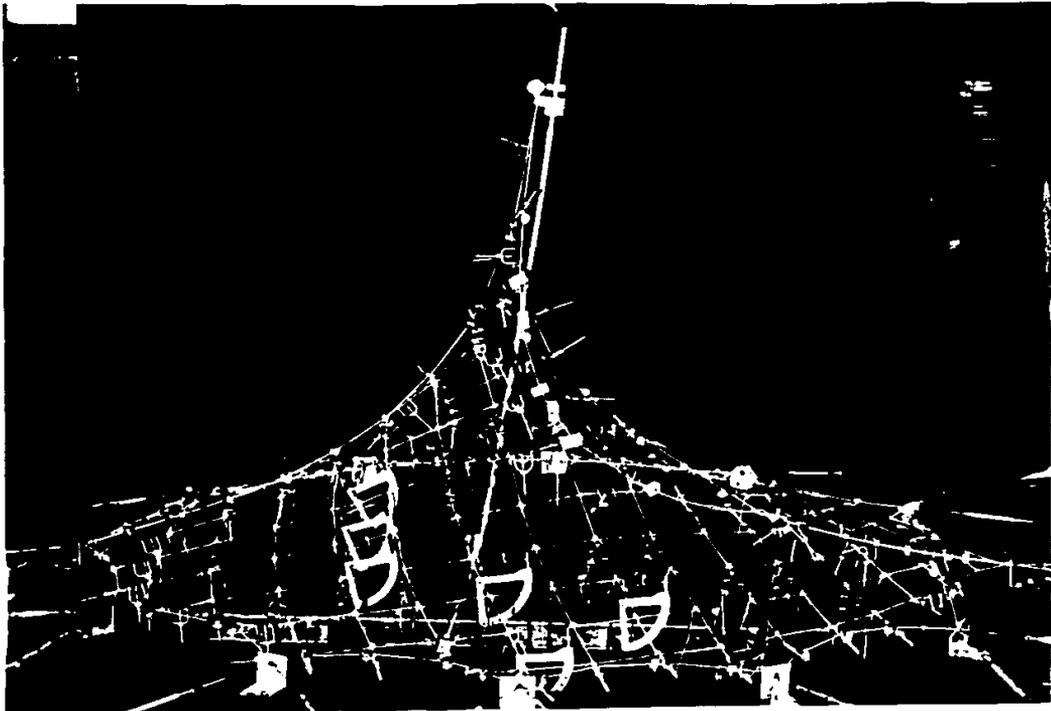




El cascañón de madera sobre la red

Impermeabilizando con membranas plásticas



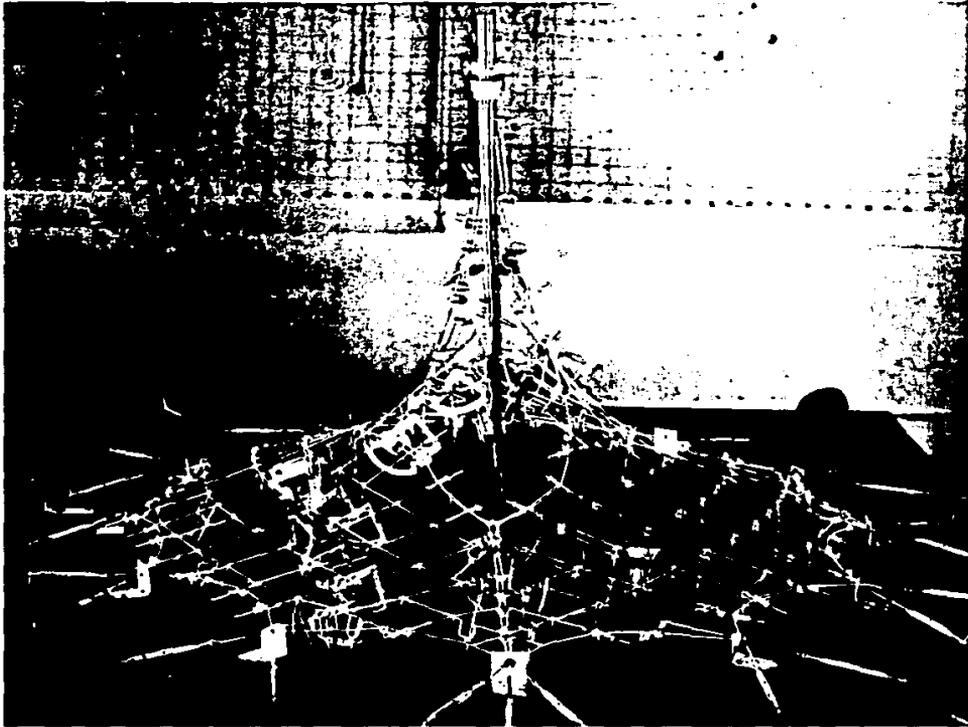


Requerimientos básicos de los modelos de medición

Para que un modelo sea realmente útil, es indispensable que reúna los siguientes requerimientos: Analogía geométrica, Analogía Estático-elástica, capacidad de cuantificar cargas y posibilidad de obtener medidas reales.

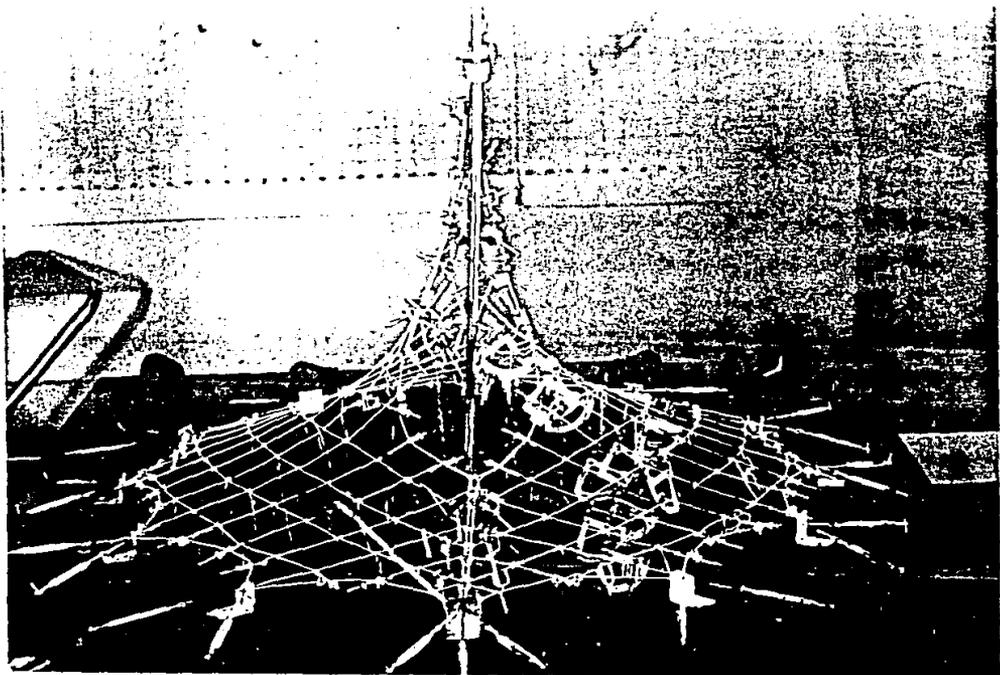
El objeto de construir modelos de medición es reproducirlos en la realidad. Para esto es indispensable encontrar la forma geométrica exacta para condiciones de borde dadas, así como determinar la distribución y magnitud de los esfuerzos.

Las condiciones de borde son geométricas y estáticas, estas últimas determinan la magnitud de los esfuerzos en los cables de borde. Las condiciones geométricas son: la posición de los puntos de anclaje, el largo de los mástiles y su ubicación, la dirección y el largo de los cables de borde, de cumbre y de ojal y la posición de los puntos de cruce de los cables de borde. Además de estas condicionantes, la forma geométrica de la red quedó determinada por la no homogeneidad en el diámetro de los cables y en las aberturas de la malla.



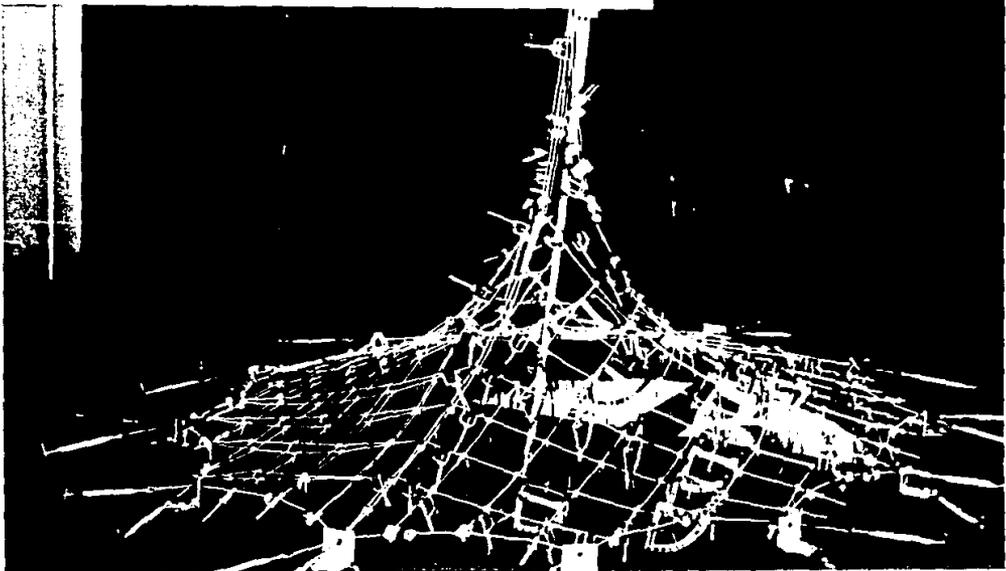
Modelo de medición.

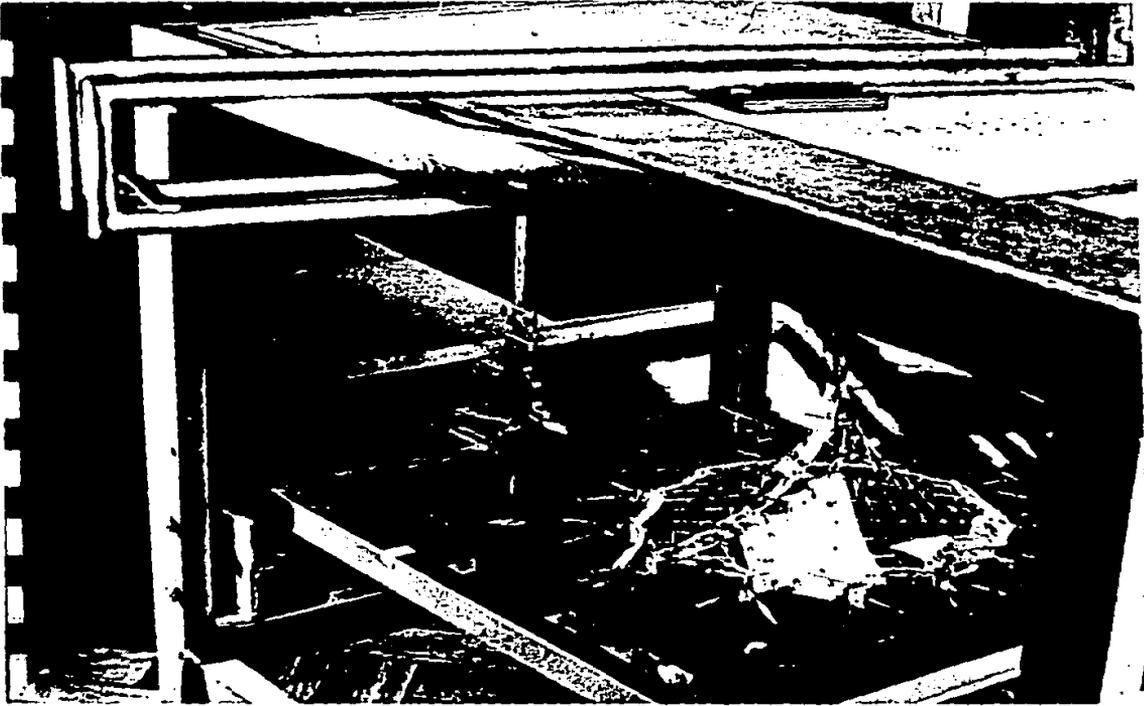
En este modelo escala 1 : 75, construido en alambre de acero, se hicieron las pruebas de carga instalando una pesa en cada nudo. Así se midieron esfuerzos y deformaciones, las fotos nos muestran el modelo antes y después de cargarlo. En la foto doblemente expuesta, se puede apreciar la flecha en los cables. La exactitud de las mediciones se comprobaría mas tarde al comparar los esfuerzos con los de la construcción real. El error se cuantificó por medio de gráficas que permitirían en lo sucesivo aplicar el procedimiento de una manera confiable.



Pruebas de carga en el modelo de medición

Fotografía con doble exposición que muestra la flecha

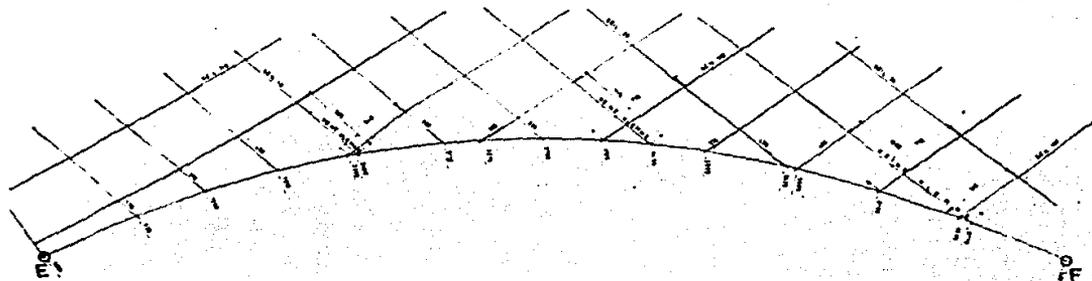




Medición y planos

La curvatura anticlástica del modelo hace que no sea desarrollable en un plano, para medirlo es necesario un mecanismo de medición en 3 dimensiones. Este mecanismo, desarrollado en el Instituto era sencillo pero con una exactitud de un décimo de milímetro. Un mecanismo similar se describe mas adelante, en la medición del modelo del Pabellón Alemán en Montreal. Para obtener los planos de fabricación de la red, se midió el modelo con este mecanismo.

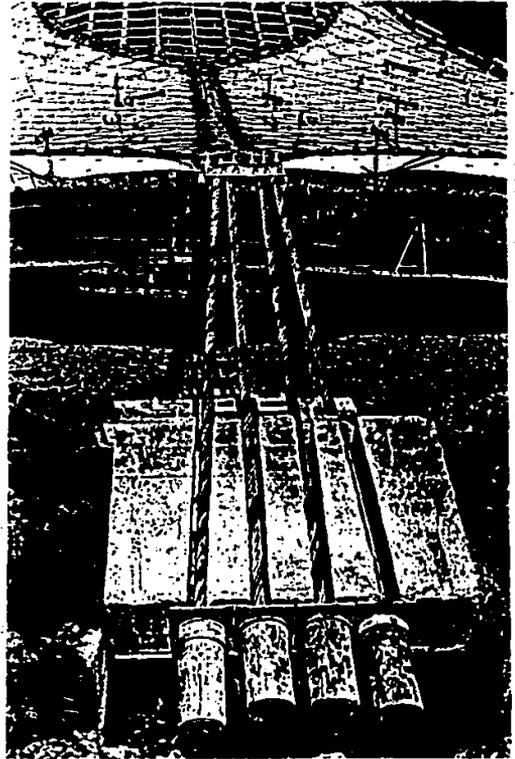
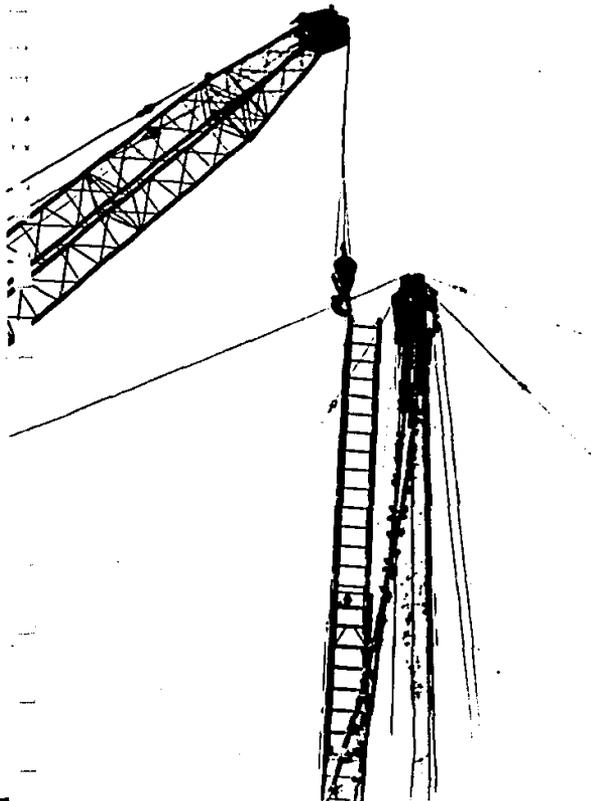
Los cables que llegan a los bordes y que no forman ya una malla completa, se midieron con regla y compás. Al mismo tiempo se indicaban en el plano las medidas sistemáticas de los cables de borde, cumbre y ojal, (estas medidas indican los lugares donde se fijan las abrazaderas que unen al cable de borde con los de la red). La medición en la parte superior del ojal, fue especialmente cuidadosa debido a la dificultad que presentaba. La foto nos muestra un ejemplo de estos planos.



Montaje y tensado de la red

Para el montaje se siguió la secuencia siguiente:

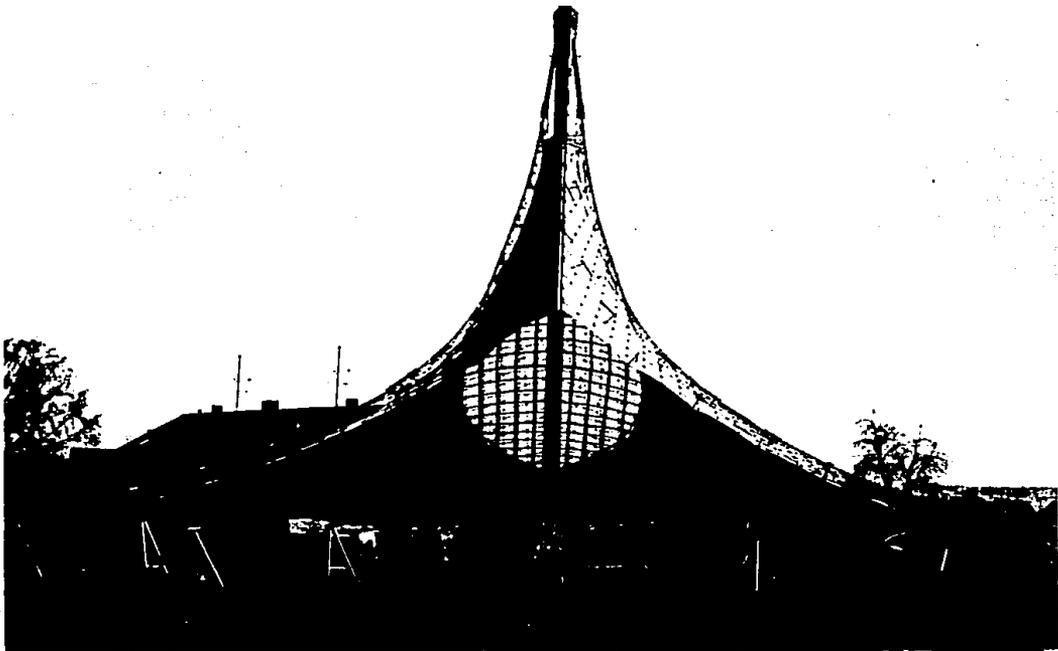
1. Una grúa montó el mástil sobre su apoyo ajustable y lo fijó con vientos.
2. Se extendió la red prefabricada alrededor del mástil y se unió por medio de templadores.
3. Se elevó el cable del ojal fijándose a la cabeza del mástil.
4. Se fue uniendo la red al cable de cumbre por medio de las abrazaderas que ya iban colocadas de fábrica.
5. Con un sistema de presforzado, se pretensó la red contra la cimentación de concreto, jalando los cables de cumbre y tensando los puntos bajos con gatos, hasta obtener el pretensado de diseño obtenido del modelo de medición.



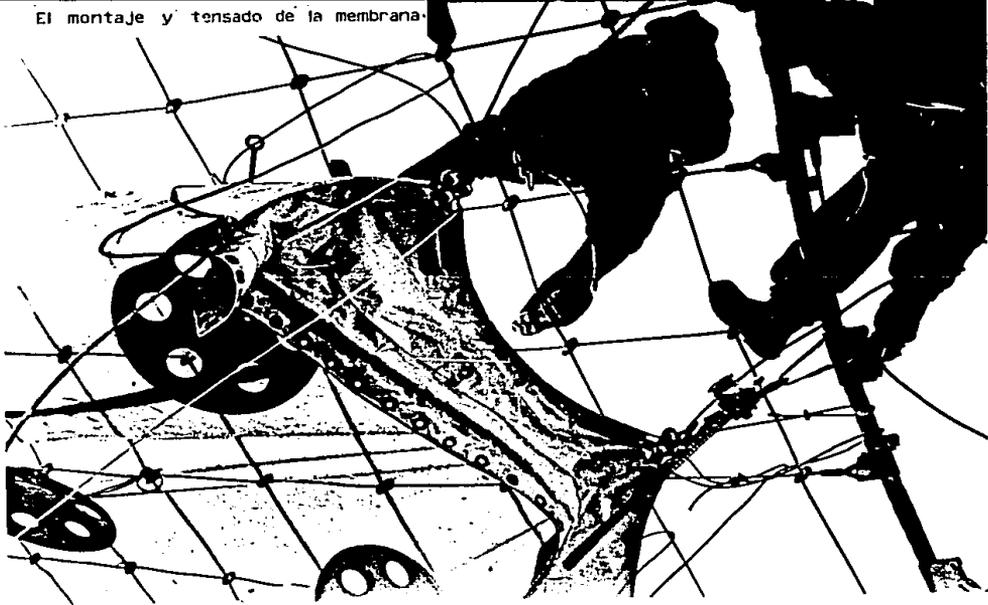


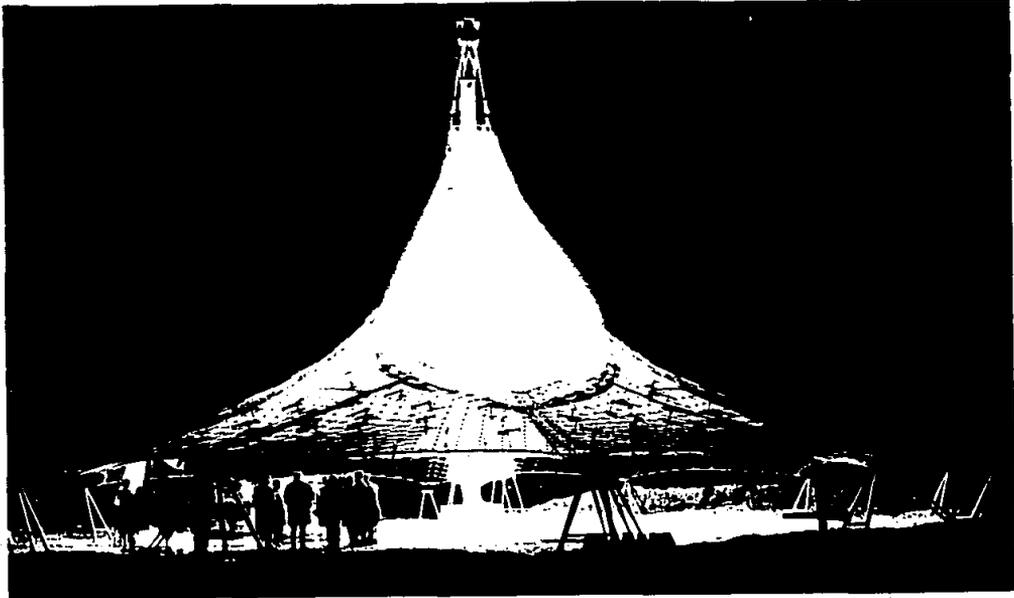
El presforzado de la red





El montaje y tensado de la membrana.





Medición de la iluminación

La membrana de cubierta

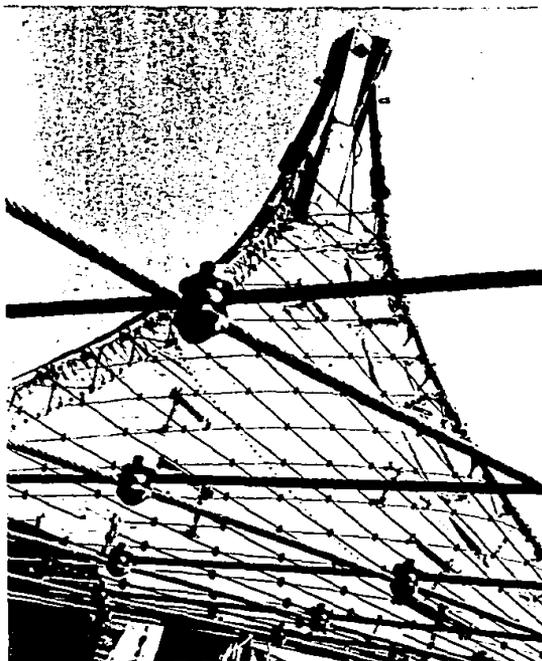
De la red de cables se colgó una membrana plástica, de poliester recubierta de PVC. El ojal era de astralón, un material plástico transparente resistente a los rayos ultravioleta, cosido en cuadrados con cintas de la misma membrana. Se montó la membrana para definir los siguientes detalles: métodos de corte de la membrana, sistema de fijación a la red, procedimiento de montaje y medición de la iluminación.

Montaje y tensado de la membrana

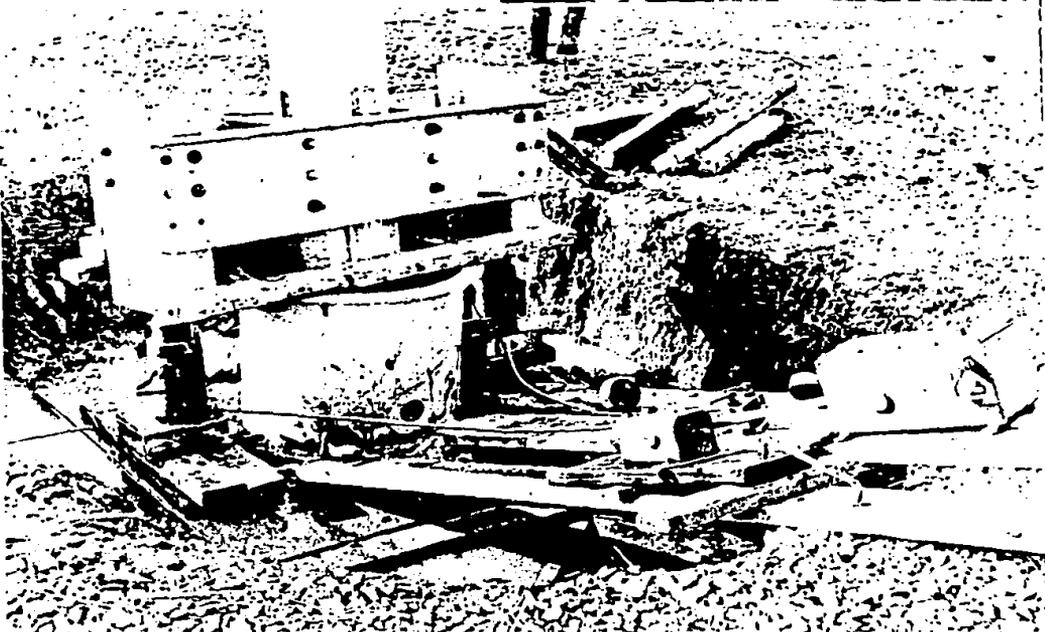
La membrana se extendió en el piso para unirla en una sola pieza. Una vez unida, se fijó a un cable guía para subirla y colgarla de la red. Los extremos de la membrana se cortaron en semi-círculos y se armaron con cables de borde. Estos cables se fijaron al cable de borde de la red para pretensar la membrana. La membrana cuelga en todos sus puntos a 35 cms. de la red y se mantiene pretensada mediante templadores que se apoyan en la red. En su punto bajo el templador se conecta a unos patillos que sirven de apoyo a la membrana. En Montreal estos patillos se sustituyeron por rosetas formadas por cuatro tubos circulares. Este sistema es más ligero y permite mantener mejor tensada la membrana.

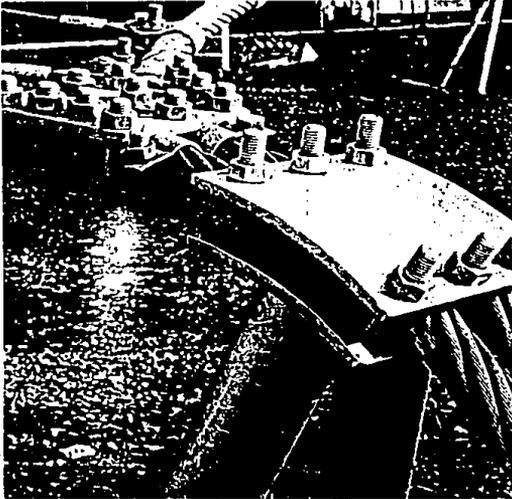
Detalles: El mástil

Está formado por un tubo de acero galvanizado de 42 cms. de diámetro. La parte superior tiene una cabeza formada por dos placas, con un orificio, donde se fijan los cables de cumbre de la red que terminan en un cilindro con un estrobo en el extremo. El pie del mástil tiene soldada una placa que penetra en un bote de arena, entre la placa y la pared del bote hay un empaque que evita que se salga la arena. La parte inferior del mástil, encima del bote, está fija a unas viguetas que se levantan con dos gatos. De esta manera puede subirse o bajarse el mástil para tensar la red de una manera muy exacta, pues para bajarlo unicamente se requiere abrir el orificio localizado en la parte inferior del bote y dejar salir la cantidad de arena que sea necesaria.



Detalles de la base del mástil



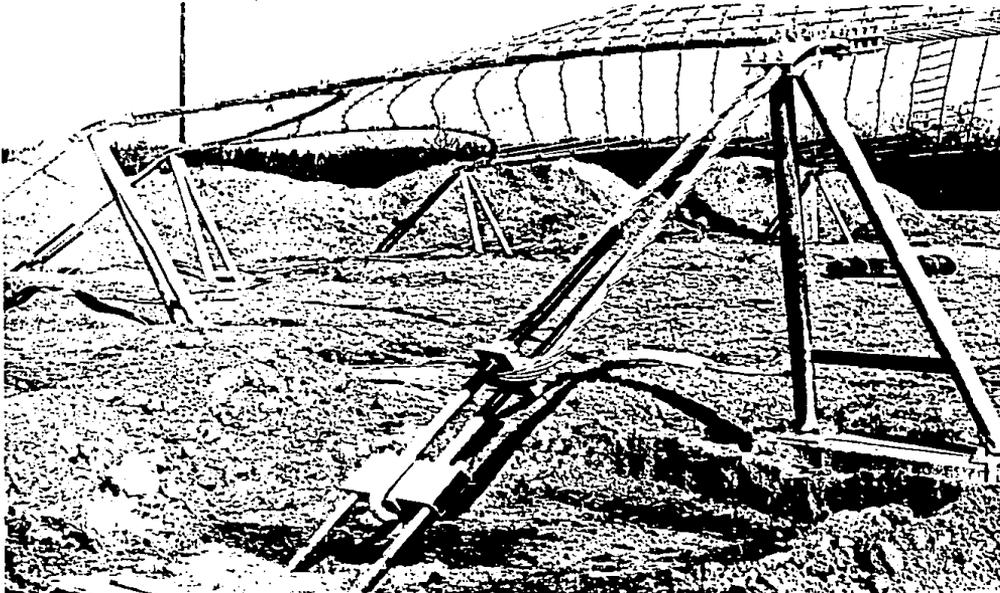


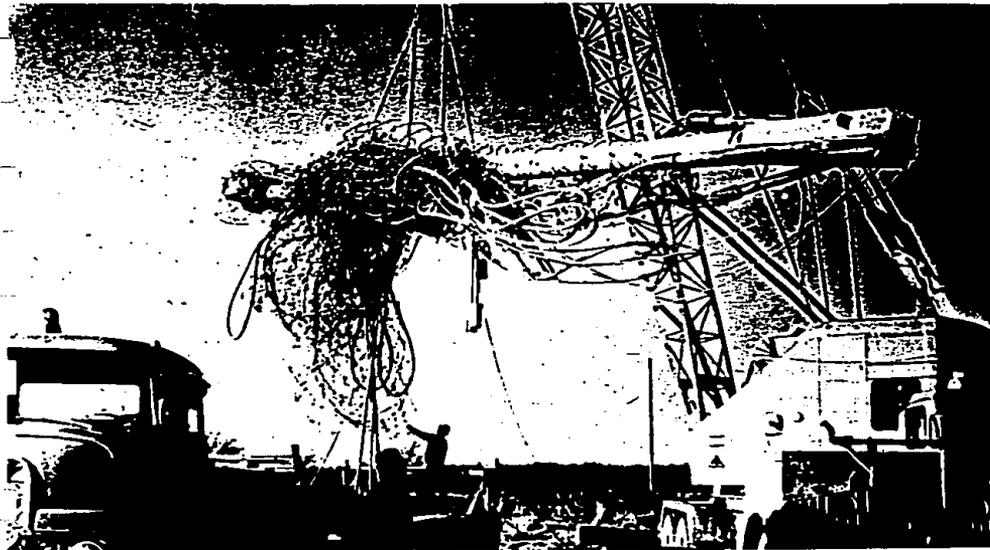
Detalles: Apoyos, guías y tensores

Los apoyos son tubos de acero galvanizado en forma de V, están inclinados hacia los anclajes. Esta cimentación consistía en una zapata corrida, perimetral, de concreto armado, trabajando en compresión. El pié de los apoyos puede girar un poco para disminuir el momento flexionante.

Los dos cables de borde son continuos, cada uno recorre la mitad de la planta y no deben cortarse en los apoyos. Para dirigirlos, se diseñaron placas guías que evitan los quiebres. Estas placas se curvan en la parte superior de los apoyos, para dirigir los cables hacia la cimentación.

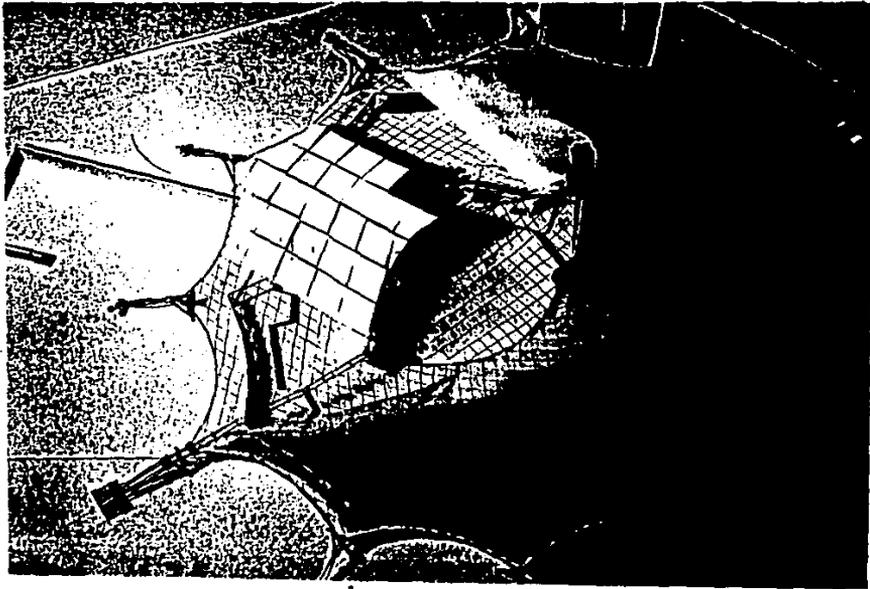
Para lograr un tensado exacto en los cables de borde, se utilizaron en los anclajes, tornillos en U ajustables.





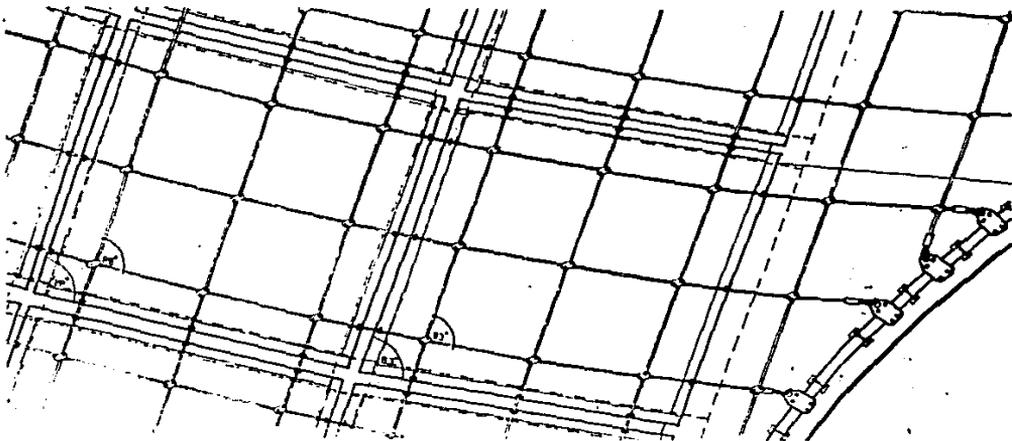
Adaptabilidad

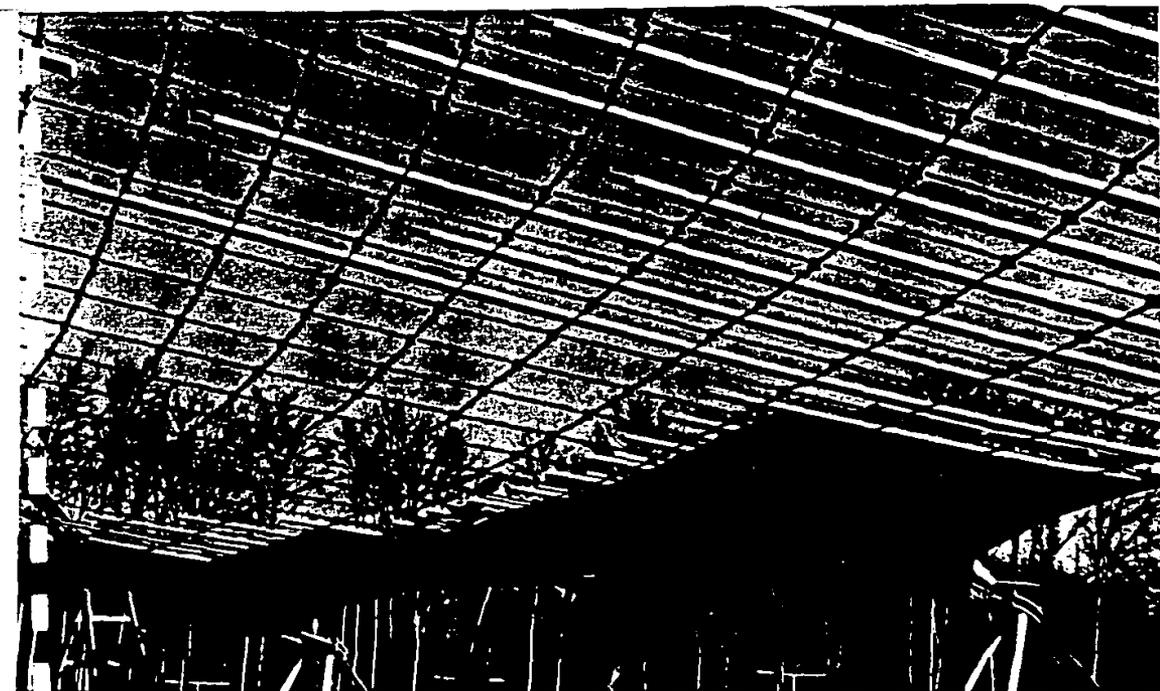
Una de las grandes ventajas de la construcción adaptable es su posibilidad de cambiar de lugar. Se decidió utilizar la red de cables de este edificio experimental para cubrir el Instituto de Estructuras Laminares Ligeras. El terreno destinado a este fin, se habia localizado en otro sitio, por lo que fue necesario trasladar la estructura. El desmontaje fue relativamente fácil: se soltaron los anclajes y una grúa levantó el mástil girándolo para enrollar la red. De esta manera lo transportó unos 3 km. hasta el lugar definitivo, donde lo montó en la nueva cimentación.



Estudios para la cubierta

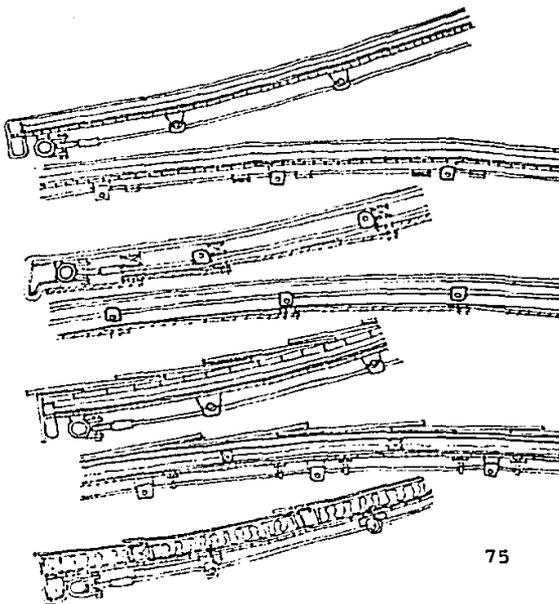
Una vez tensada de nuevo la red, se llevó a cabo un estudio de las posibilidades de cubierta. Se utilizó el modelo a escala 1:75 para diseñar un sistema de cubierta a base de placas. Este sistema es excelente para edificios de grandes claros, pero en un edificio tan pequeño como este, se tendrían que hacer placas muy pequeñas, de lo contrario se provocarían quiebres difíciles de solucionar.





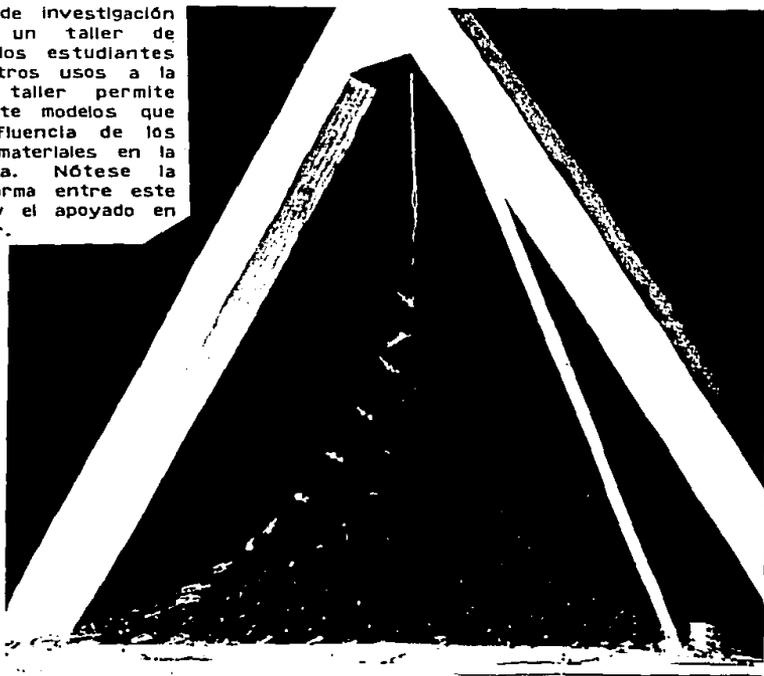
El cascarón de madera

Se estudiaron algunas alternativas de cubiertas continuas, de éstas, se eligió un cascarón de madera, por ser la más interesante a investigar. De inmediato se procedió a la construcción de la nueva cubierta. Sobre los cables se engraparon largueros de madera, que por su elasticidad tomaron la curvatura exacta de la red. Sobre éstos se fue clavando duela hasta cubrir totalmente la red, con excepción del ojal, que se cubrió con acrílico. Se puso especial cuidado en la protección de la madera contra el fuego y las plagas. En el aislamiento térmico-acústico, y en la impermeabilización. Se recubrió todo con teja plana de asbesto cemento colocada a la alemana.



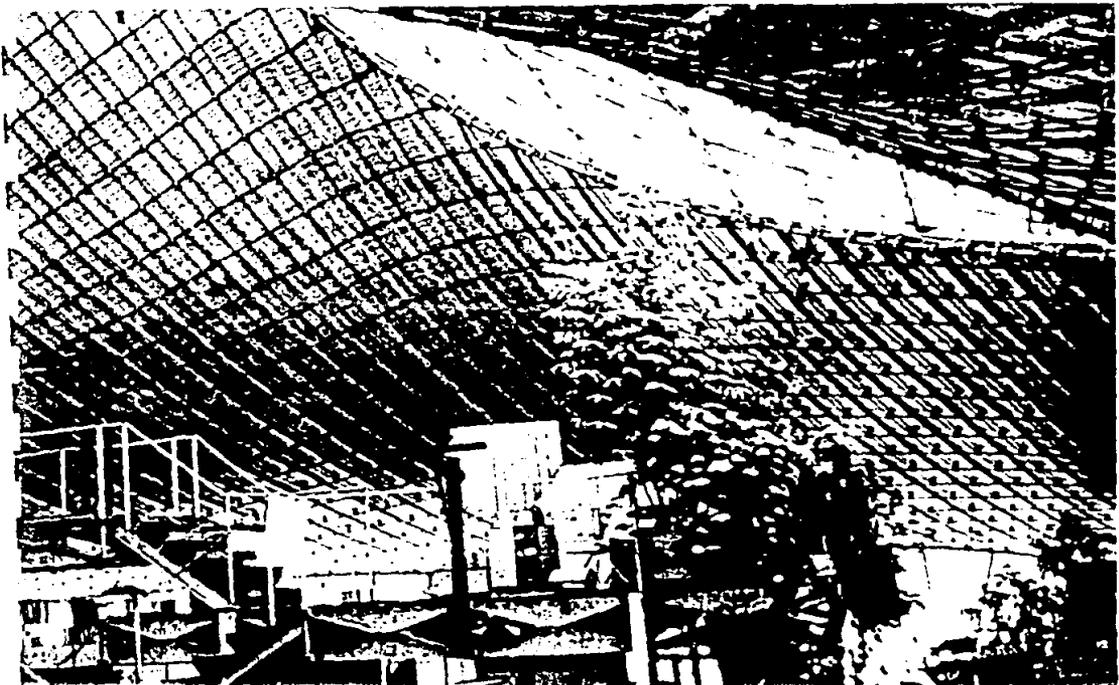


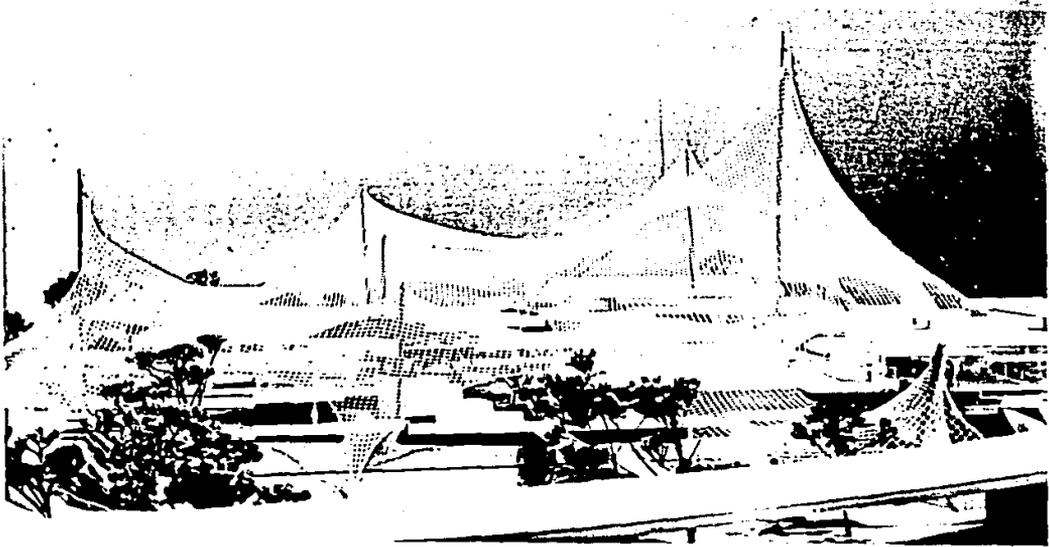
En los institutos de investigación es indispensable un taller de precisión, (aunque los estudiantes a veces le den otros usos a la herramienta), el taller permite construir rápidamente modelos que nos indiquen la influencia de los apoyos y de los materiales en la forma geométrica. Nótese la diferencia de la forma entre este modelo suspendido y el apoyado en un mástil interior.





Recubrimiento con teja de asbesto cemento

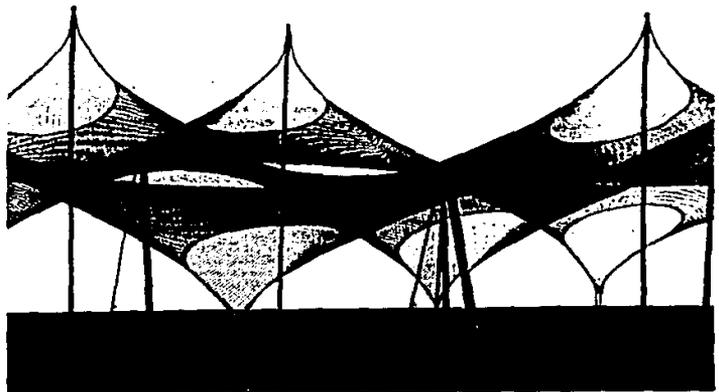


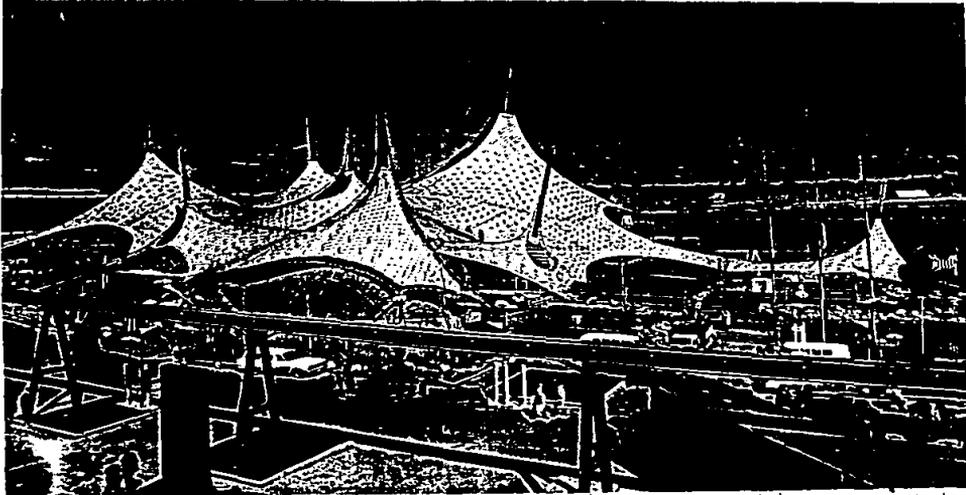


El modelo del concurso

Basándose en un modelo de puntos altos y bajos construido por Larry Medlin, el Arquitecto Rolf Gutbrod diseñó el pabellón totalmente asimétrico y con mástiles a diversas alturas. Para el diseño estructural de esta gran tienda fue necesaria la construcción de siete modelos enteros y docenas de partes aisladas, procurándose obtener el diseño arquitectónico lo más apegado posible a superficies de área mínima. El modelo perfeccionado se presentó a concurso.

En este concurso participaban numerosos arquitectos alemanes. Pero la gran calidad del proyecto le valió el primer premio y la ejecución. El diseño arquitectónico-estructural fue una colaboración entre los Arquitectos Frel Otto, Rolf Gutbrod y sus equipos. Las investigaciones estructurales fueron realizadas en el entonces recién fundado Instituto de estructuras laminares ligeras de la Universidad de Stuttgart en la RFA.

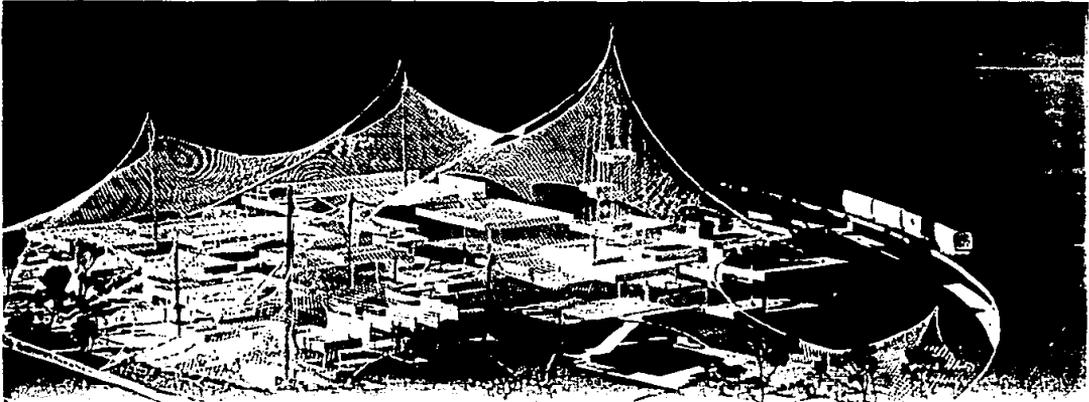
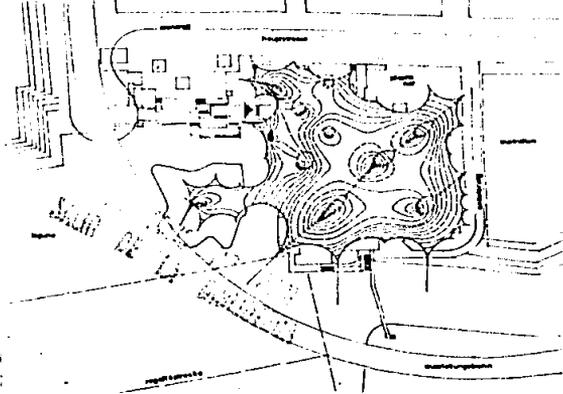


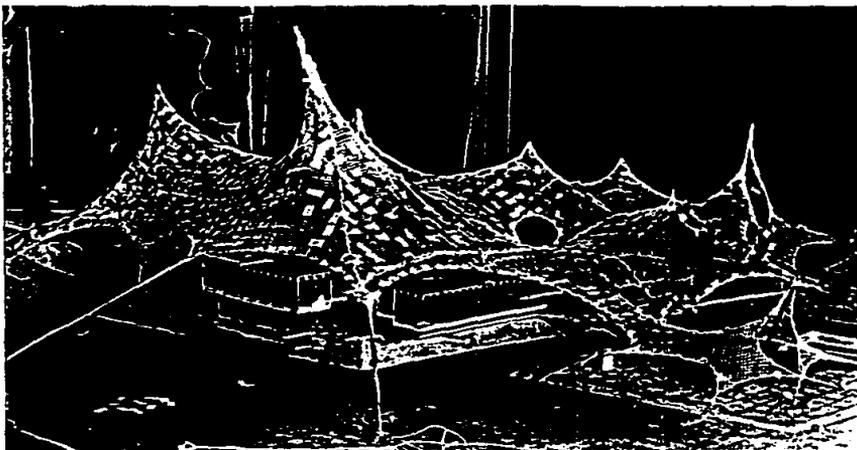


APLICACION DE LA ESTATICA DE MODELOS

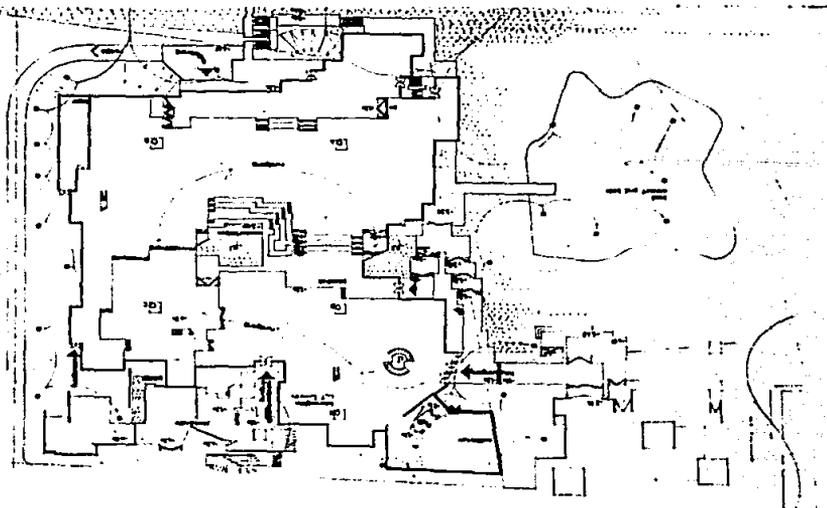
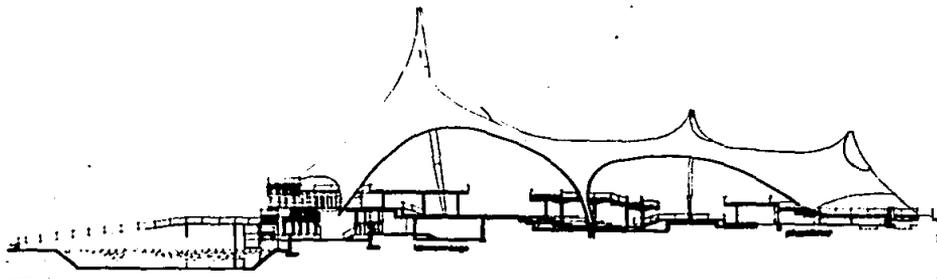
El Pabellón Alemán en Montreal

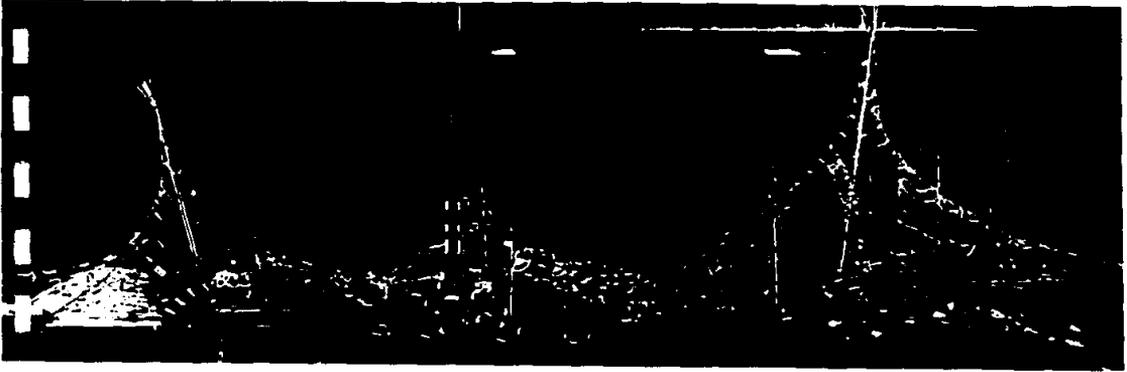
En 1967 tuvo lugar en Montreal la Expo 67 bajo el tema: "El hombre y su mundo". La idea arquitectónica dominante en el Pabellón Alemán, era la construcción de un panorama de la cultura alemana. Esta idea se materializó por medio del panorama que ofrecían las terrazas de exhibición, cubiertas por una gran tienda. El pabellón estaba situado en la Isla de Notre Dame, al borde de la laguna de regatas del Rio San Lorenzo. Su estructura se prolongaba hasta cubrir una pequeña isla que así se incorporaba a la exhibición.





El modelo de trabajo para obtener las medidas de la red

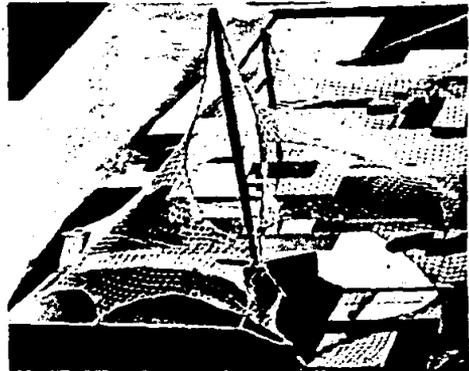


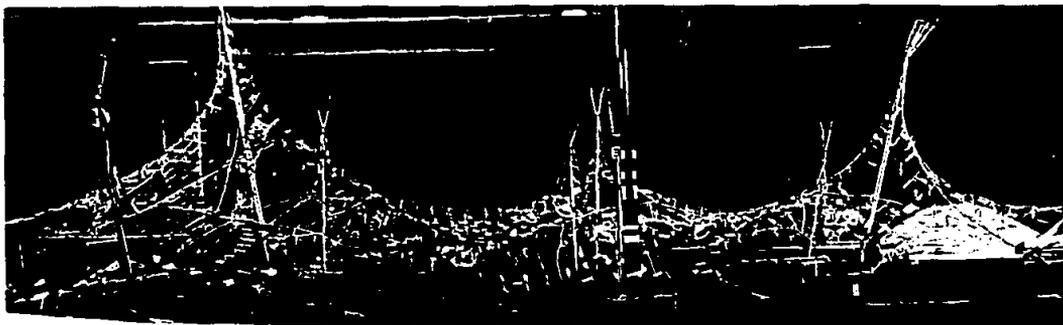


Diseño del modelo de medición

No todos los días se desarrollan en los institutos de investigación nuevos sistemas constructivos. La importancia de la construcción de este modelo reside en la metodología utilizada por Frel Otto y su equipo para llevar a la práctica consideraciones teóricas. El primer paso en la construcción de este modelo era encontrar la forma geométrica óptima. Fue necesario hacer muchas modificaciones al modelo textil a fin de encontrar el ángulo de inclinación de los mástiles que fuera estáticamente correcto, para lograrlo se hicieron muchas correcciones al diseño de los cables de borde.

Hasta fue necesario cambiar un ojal por un cable de cumbre, lo que mejoró definitivamente la tensión en la red. Originalmente se había planeado la inclinación de los mástiles de manera que todos ellos concurrieran en un punto virtual en el espacio, sin embargo, para esto hubiera sido necesario construir prácticamente un nuevo modelo. Por otra parte, la influencia de los esfuerzos de los cables de borde, ojal y cumbre, hacían que esta consideración puramente teórica, no fuera tan sencilla ya que no era posible cambiar de lugar las bases de los mástiles en Montreal, puesto que ya estaban en construcción.



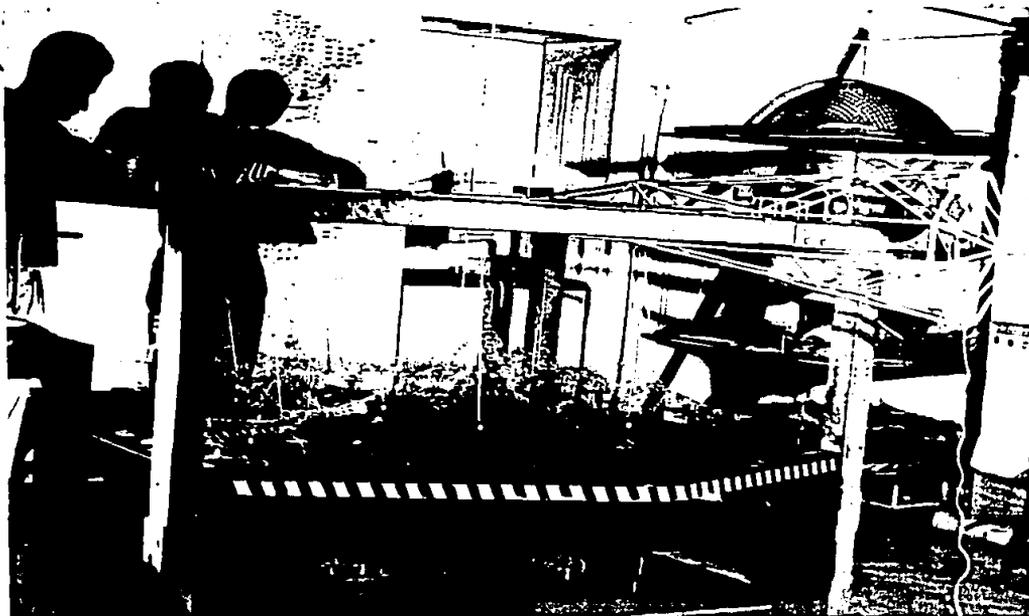


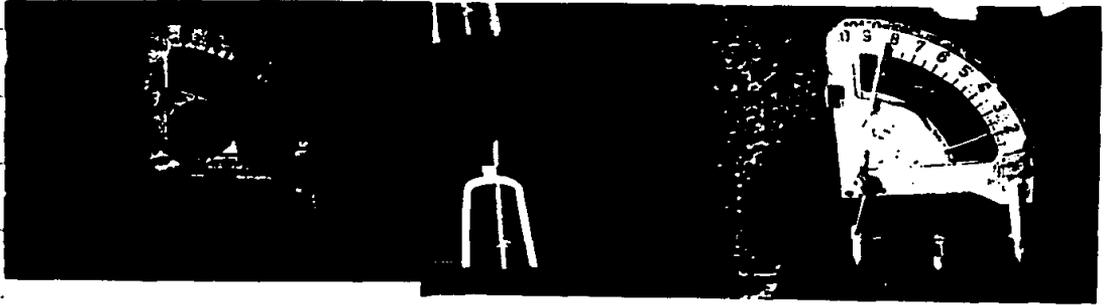
Construcción del modelo de medición

Era indispensable conocer la forma exacta de la red pretensada para proceder a la fabricación. Para esto se construyó un modelo de medición en alambre de acero de 1.60 m. por 2.00 m. En este modelo cada alambre representa cuatro cables del original y una exacta tensión fue dada a cada uno de ellos al soldarlos al cable de borde. El modelo se construyó sobre un marco de acero en una mesa de medición en 3 dimensiones.

La mesa de medición en 3 dimensiones.

Para construir un modelo con exactitud es indispensable un mecanismo de medición en 3 dimensiones. El que se diseñó para el modelo de medición, consistía en una placa de dibujo en mármol, pulida a un décimo de milímetro, que estaba colocada sobre el bastidor de acero donde se construyó el modelo. Una armadura unía la placa y el modelo a modo de pantógrafo, pues la plumilla con la que se dibujaba sobre la placa, correspondía exactamente abajo, con una plomada que medía al modelo.

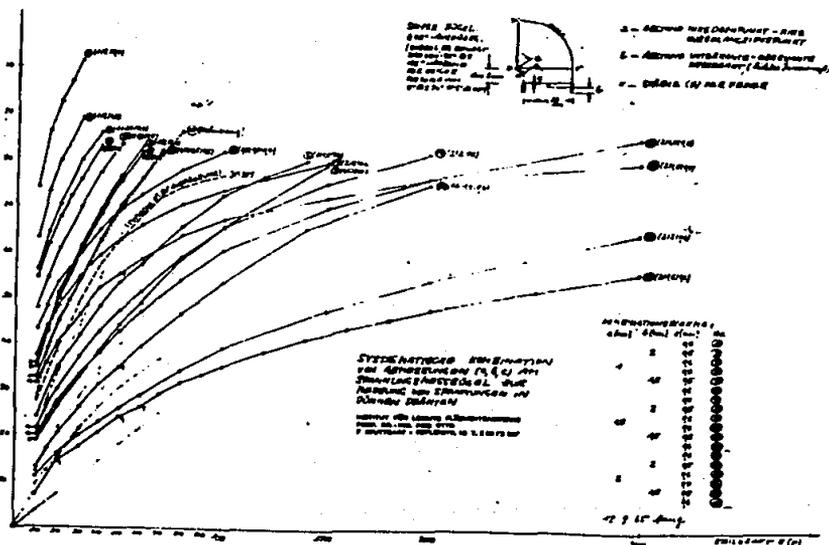




Mecanismo de medición de esfuerzos en los alambres del modelo.

La fuerza de tracción en los alambres de la red debería ser medida con un aparato medidor de tensiones. Puesto que no existía en el mercado ningún aparato de esta clase, se tuvo que desarrollar uno nuevo que fuera capaz de medir esfuerzos en los alambres de 0.2 mm. de espesor. Para esto se utilizó el principio de medición de la resistencia a la desviación en alambres tensados. Esta desviación se transmitiría a una escala por acción de una palanca. Estos medidores de esfuerzos miden absoluto, pueden ser utilizados en cualquier malla, cambiados de lugar rápidamente y ser utilizados en otros modelos.

La foto muestra una doble exposición, en la primera, con una tensión mínima, la aguja marca 2 en la escala. En la segunda exposición, después de haberse apretado la tuerca del templador a la izquierda, la aguja marca algo más de 8. Los medidores se calibraron exactamente para conocer con gran precisión la equivalencia en kilogramos. Los medidores fueron desarrollados por el Instituto y la Fabrica Staeger y fueron indispensables para acercarse a la propiedad más importante de una superficie mínima: tener esfuerzos iguales en todos sus puntos. Las gráficas nos muestran una combinación sistemática de mediciones.





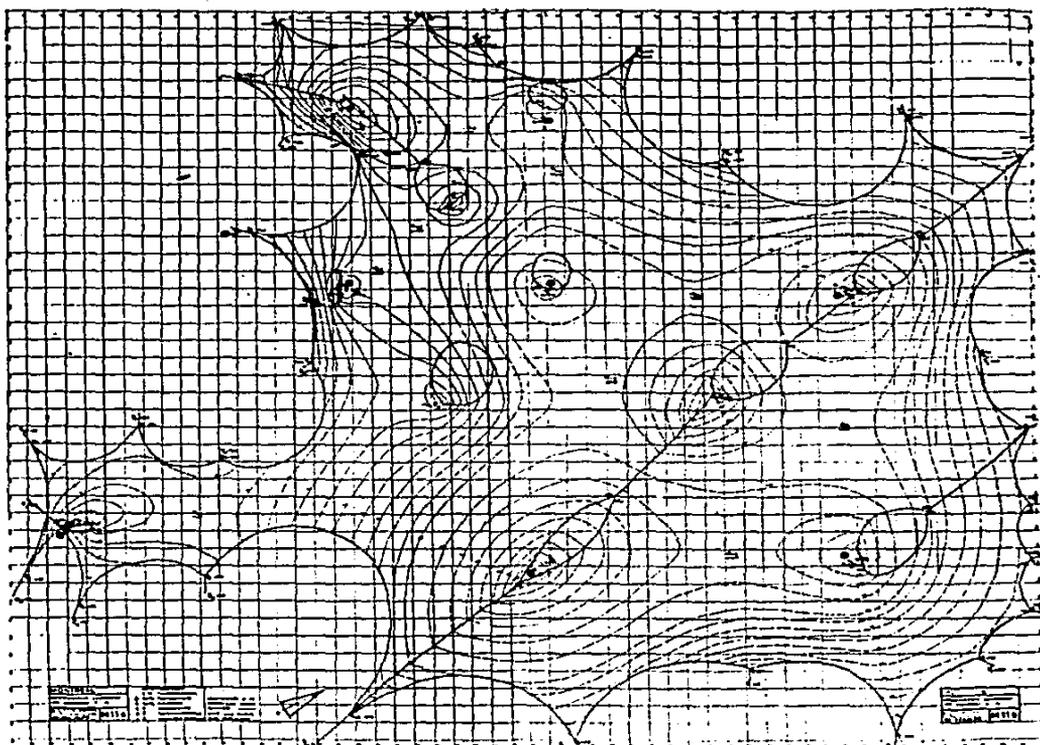
Construcción de la red

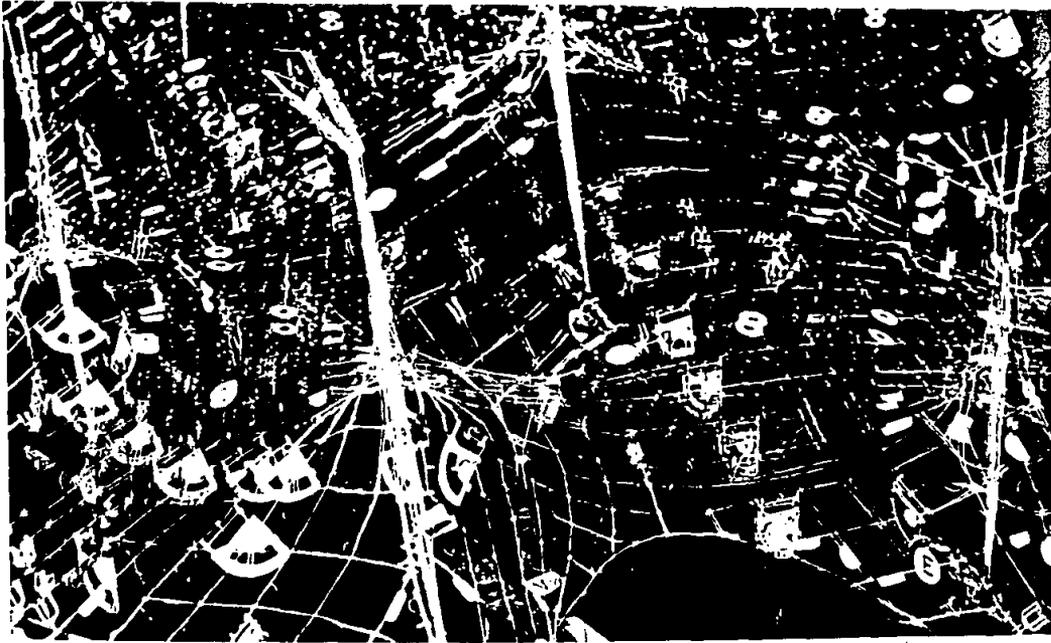
El modelo se construyó con una red de alambre a escala 1 a 75. El corte de la red, esto es, la distancia entre la última malla de la red y los cables de borde, cumbre y ojal se tomó de un modelo textil escala 1 a 100. Las medidas de este modelo son sólo aproximadas, su inexactitud reside en que se comporta muy diferente a una red de alambre de acero, pues en la red textil las mallas tienen medidas diferentes en las dos direcciones, tienen también diferentes elongaciones en las dos direcciones y es muy fácil equivocarse dándole una tensión muy grande al modelo, lo que provoca elongaciones exageradas. Si consideramos además que la geometría es anticlástica y no desarrollable en un plano, el corte textil tuvo que ser modificado en todas sus partes.

Sólo pretensando la red de alambres, se encontró su verdadero corte, primero se tensó en la punta de los mástiles continuando en los anclajes, después de numerosos intentos se logró eliminar todas las partes flojas de la red, con lo cual se terminó el tensado burdo. El tensado fino se logró eliminando las diferencias de esfuerzos en los alambres, comparando las lecturas de los medidores de tensión y soldando y desoldando los alambres repetidas veces a los cables de borde. La forma final que tomó la red de alambres, sorprendentemente se acercó más a una superficie mínima que a la del modelo textil.

Plano de curvas de nivel

Utilizando el mecanismo de medición en 3 dimensiones, se obtuvo este plano, tomando directamente las medidas del modelo de medición. Este plano es muy importante pues de él se toman las medidas para dibujar cortes, alzados y la planta definitiva.

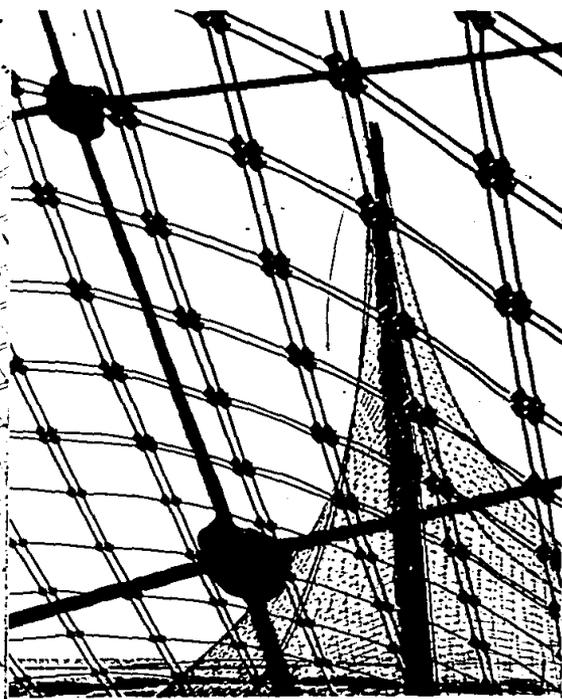
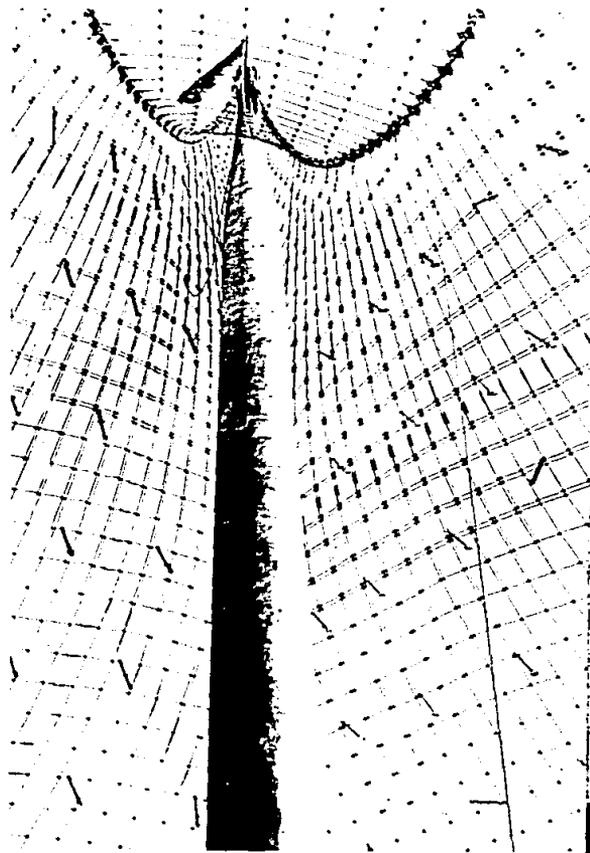




Pruebas de carga

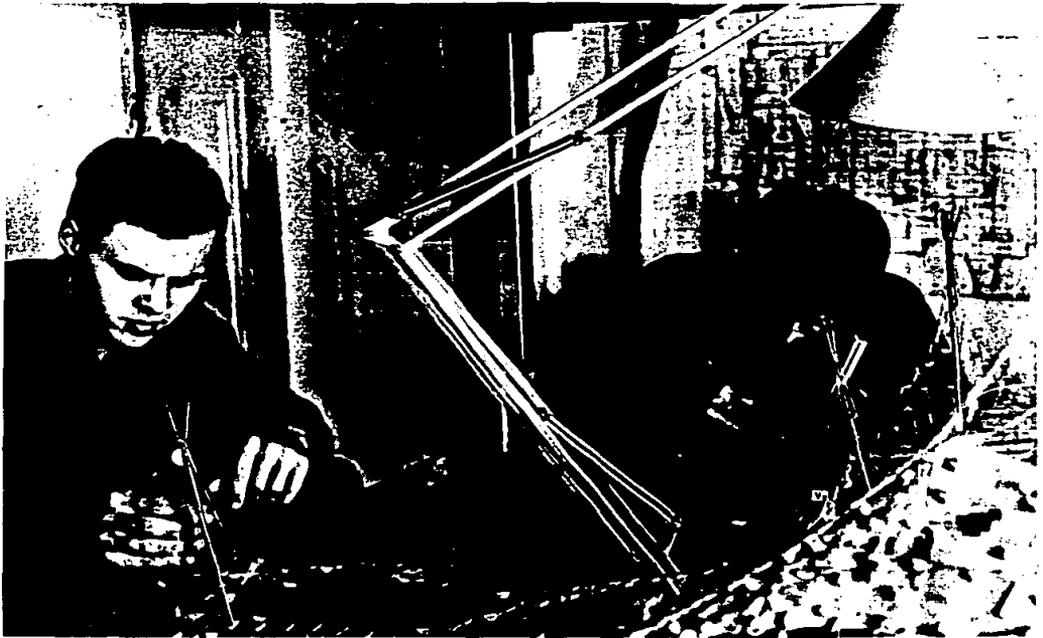
Con el propósito de cuantificar la deformación producida por la carga de nieve, se hicieron pruebas de carga en el modelo de alambre de acero. Se cargó cada nudo con 70 g. correspondientes a una carga real de 100 kg/m². La lectura e interpretación de estas pruebas se hizo por dos procedimientos, en el primero se leyeron en los aparatos medidores los esfuerzos resultantes. En el segundo se midió en la red la flecha producida por las pesas. La medición se llevó a cabo por medio de fotografías doblemente expuestas.





Correspondiendo con la carga, a cada nudo de la red se le colgó un alfiler con cabeza redonda blanca. La distancia vertical entre dos puntos blancos es la flecha del nudo. En las fotos doblemente expuestas pueden apreciarse las dos lecturas de los medidores. En el plano se muestra la posición de éstos y la magnitud de los esfuerzos. El resultado de estas pruebas obligó a reforzar la red colocando cables dobles en las secciones con mayor carga.

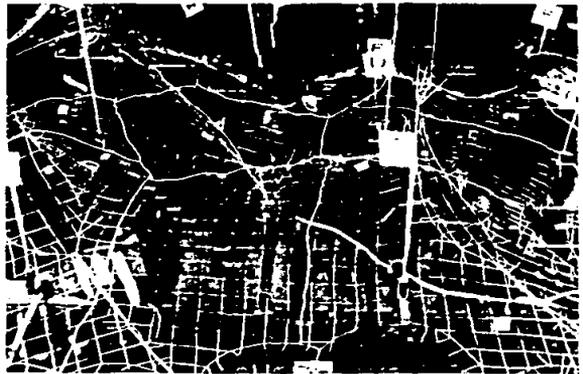


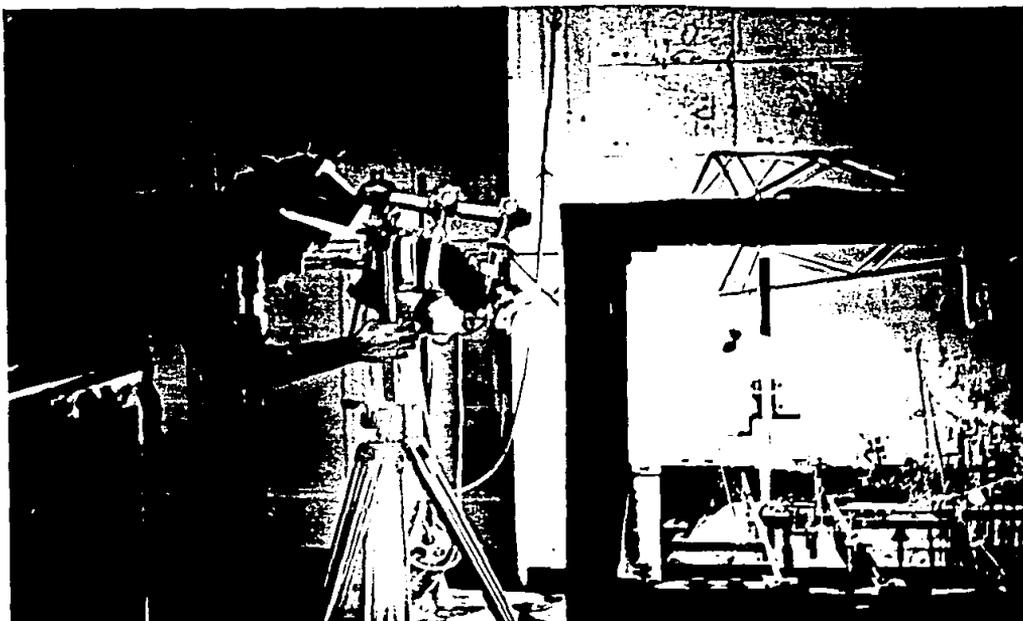


Medición del modelo
Sistemas manual y fotográfico.

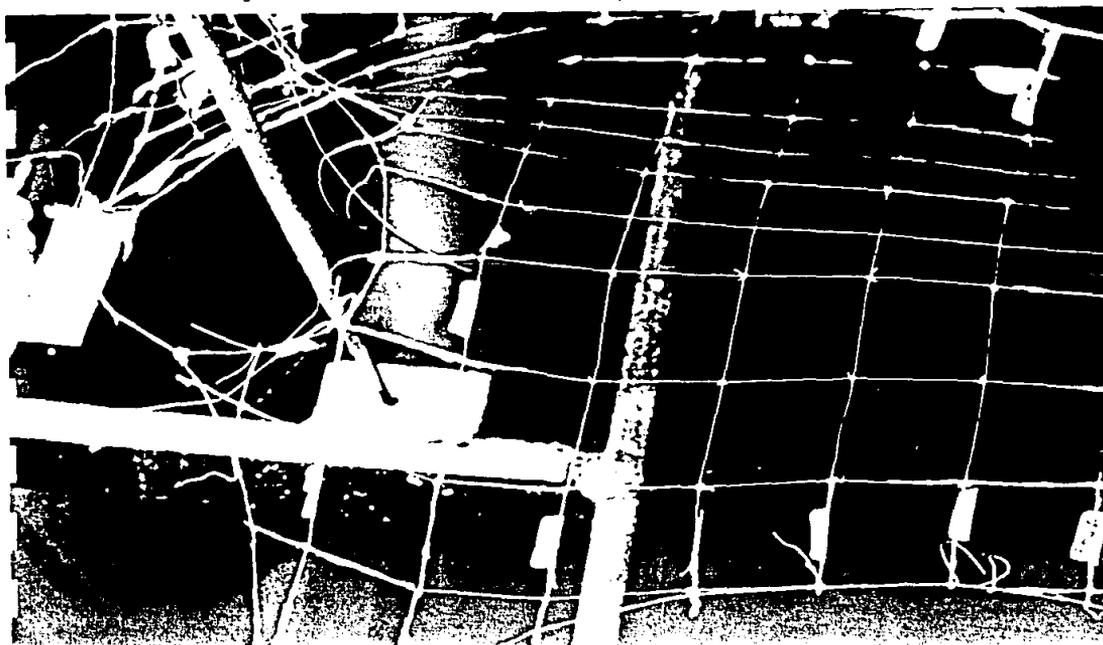
Para obtener los planos constructivos de la red de cables, fue necesario medir el largo de cada cable, para esto se cuenta el número de mallas y se le añade la distancia del último nodo al cable de borde. Es también muy importante medir el ángulo con que los cables de la red llegan al cable de borde. La medición manual se realizaba simplemente con compás y escalímetro, pero como se detectaron muchos errores de apreciación subjetiva, se decidió compararla con una medición fotográfica.

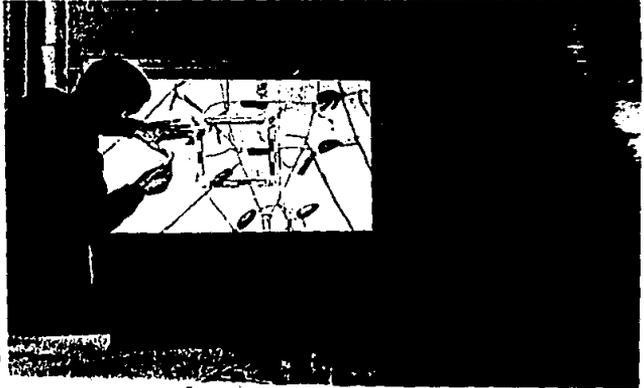
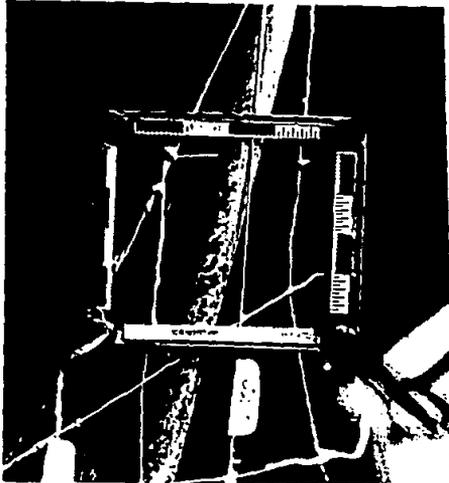
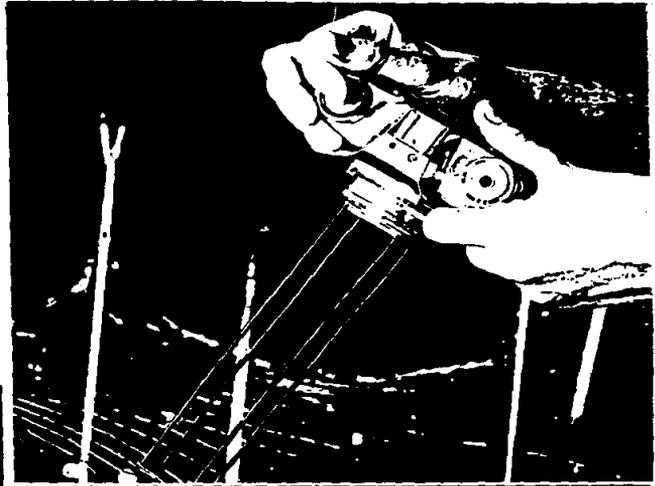
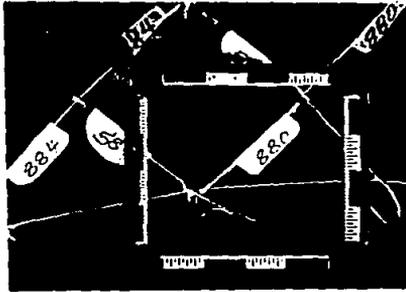
Esta se realizó fotografiando el modelo con una cámara de banco óptico y con una cámara reflex a la que se le había adaptado un marco de medición y con la cual se iban tomando fotos del borde a cada 8 centímetros. Las fotos muestran la medición del cable 880, nótese que el siguiente cable es el 884, pues los cables intermedios se interpolaron al dibujar los planos. La comparación entre los dos sistemas de medición eliminó casi completamente los errores.





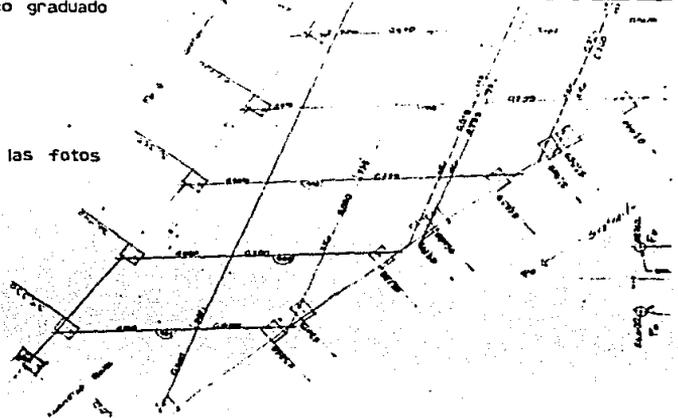
Medición fotogramétrica con cámara de banco óptico





Medición de la red con un marco graduado
instalado en una cámara reflex

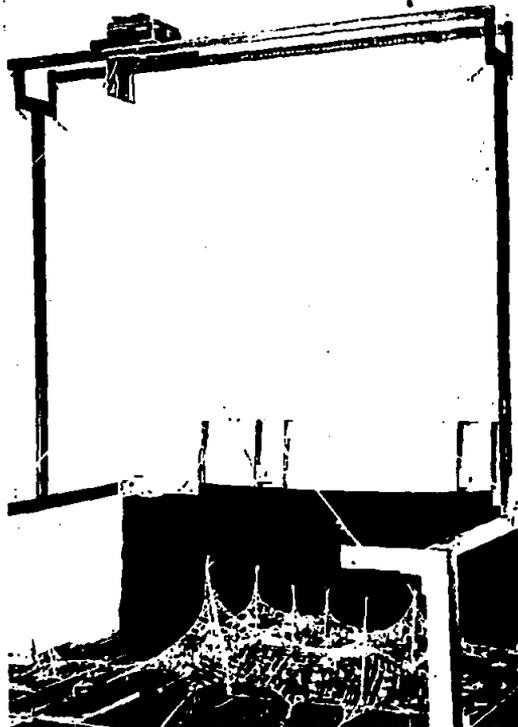
Proyección a escala 20 a 1 de las fotos
de medición y planos obtenidos





Dibujo por medio de computadores

En el año de 1966 las computadoras estaban comenzando, por lo que el sistema nos parece ahora muy rudimentario. El modelo de medición se fotografió según el principio de la fotogrametría estereoscópica. Se tomaron fotos desde dos puntos separados con ejes de exposición verticales. Estas fotos sirvieron de base a la evaluación en 3 dimensiones con el aparato Stereo-autograph Wild A-8. Las coordenadas espaciales se registraron automáticamente en banda perforada, estas coordenadas se transformaron en un modelo digital del pabellón por medio de un computador. Este modelo sirve de base para calcular cualquier corte que se requiera, el cual es dibujado por una máquina automática de dibujo.



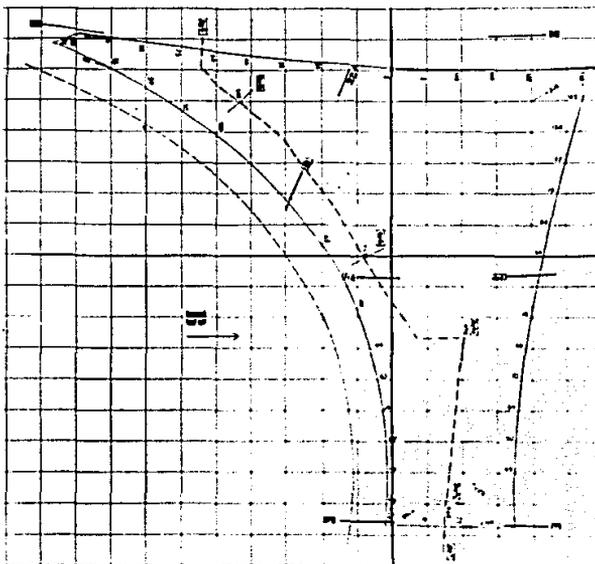


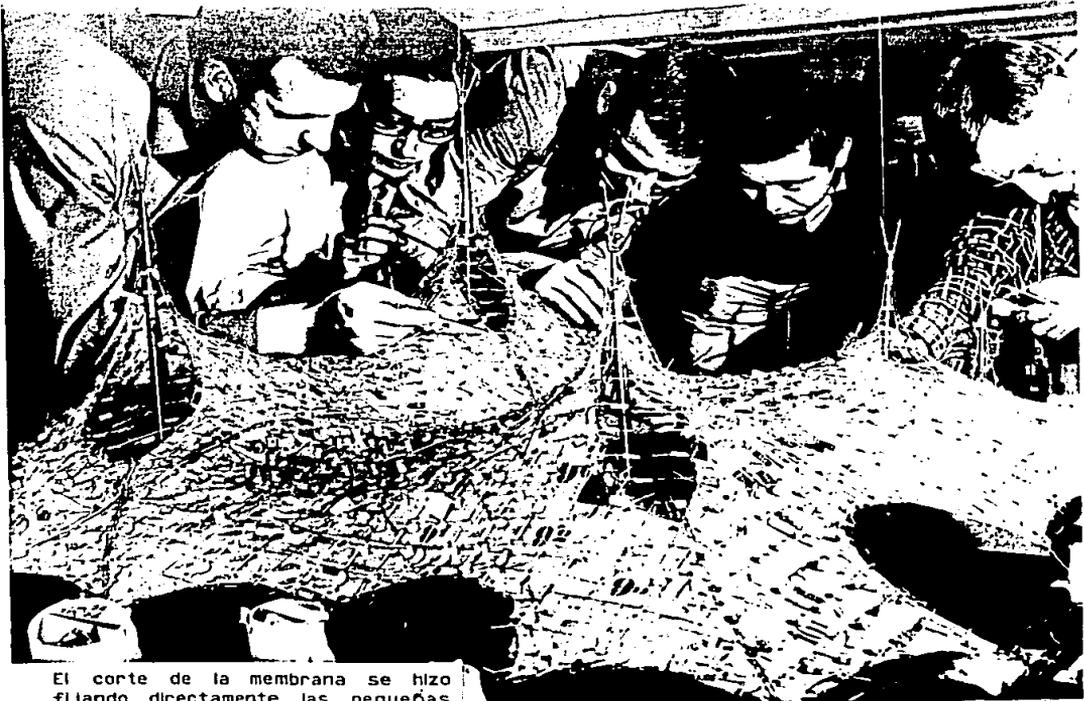
Medición de la membrana

La medición de la membrana presentó algunas dificultades, pues por su forma anticlástica, no es desarrollable en un plano. Fue necesario montarla en el modelo de medición en pequeños tramos reticulados que se superponían unos con otros y se fijaban a la red con pequeños discos de madera que representaban a los templadores de unión. La membrana se midió manualmente por medio de compás y escalímetro, obteniéndose de esta manera los planos constructivos que se enviaron a la fábrica.

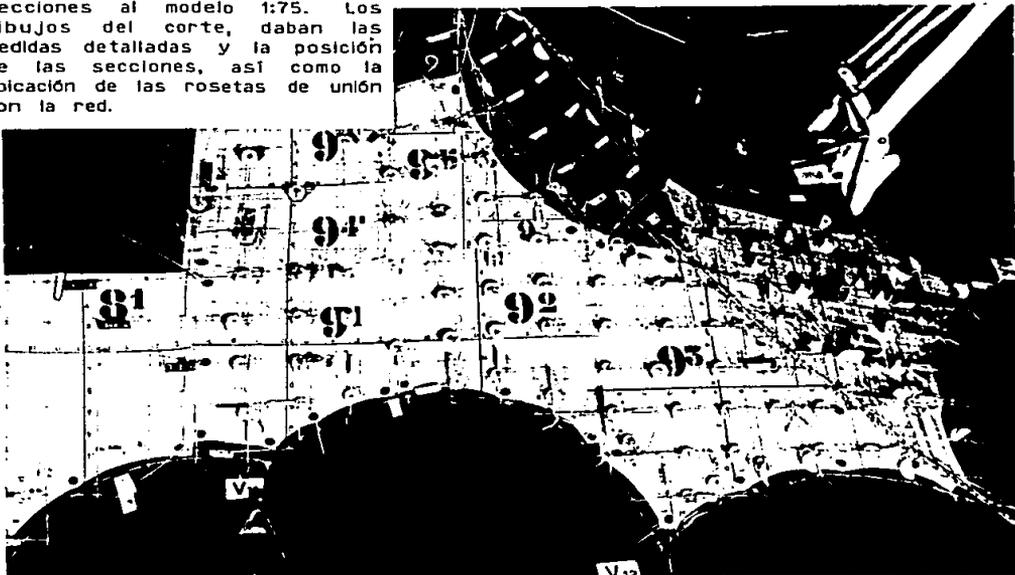
Planos constructivos de la membrana

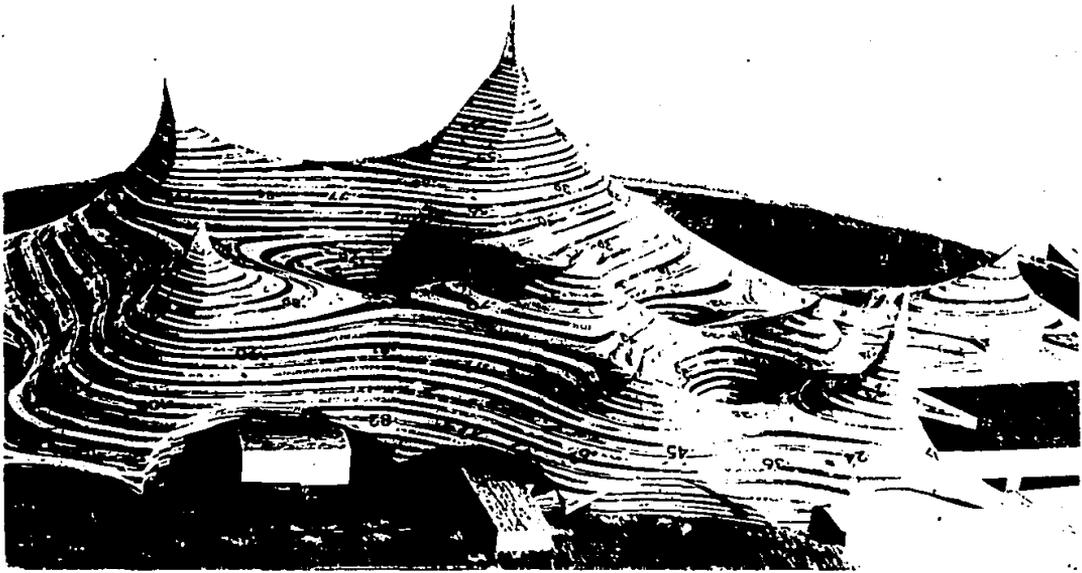
Se dibujaron con una gran precisión, haciéndose especial incapié en la claridad de las cotas para evitar errores, se detalló la unión de la membrana con la red de cables por medio de círculos negros. Estos planos, junto con los de la red, se enviaron a la fábrica Stromeier en Konstanz para su fabricación.





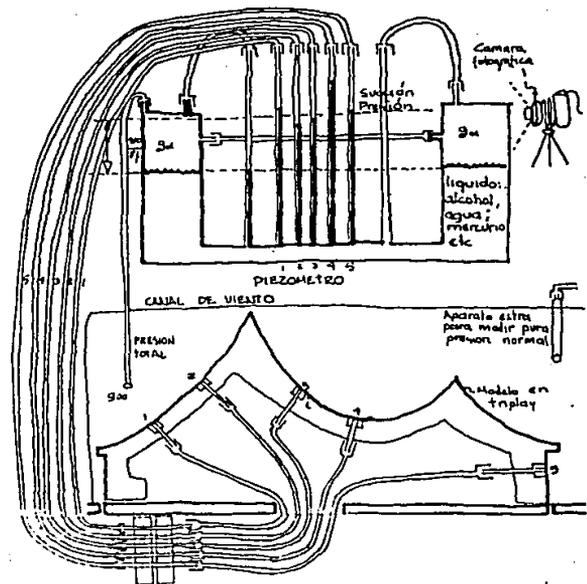
El corte de la membrana se hizo fijando directamente las pequeñas secciones al modelo 1:75. Los dibujos del corte, daban las medidas detalladas y la posición de las secciones, así como la ubicación de las rosetas de unión con la red.





Mediciones en el tunel de viento
 Construcción del modelo

Para investigar la presión y succión del viento y obtener una base sobre las condiciones de las corrientes y zonas donde podrían afectar a la estructura, se llevó a cabo un experimento en el túnel de viento con un modelo rígido a escala 1 a 150, construido en madera contrachapada en capas de 1.3 cms. de grueso, que corresponden a las líneas de nivel a cada 2 m. de altura. Estas capas fueron aserradas, encoladas unas sobre otras y lijadas, hasta obtener exactamente la misma forma que se obtuvo en el modelo de red de alambre de acero.

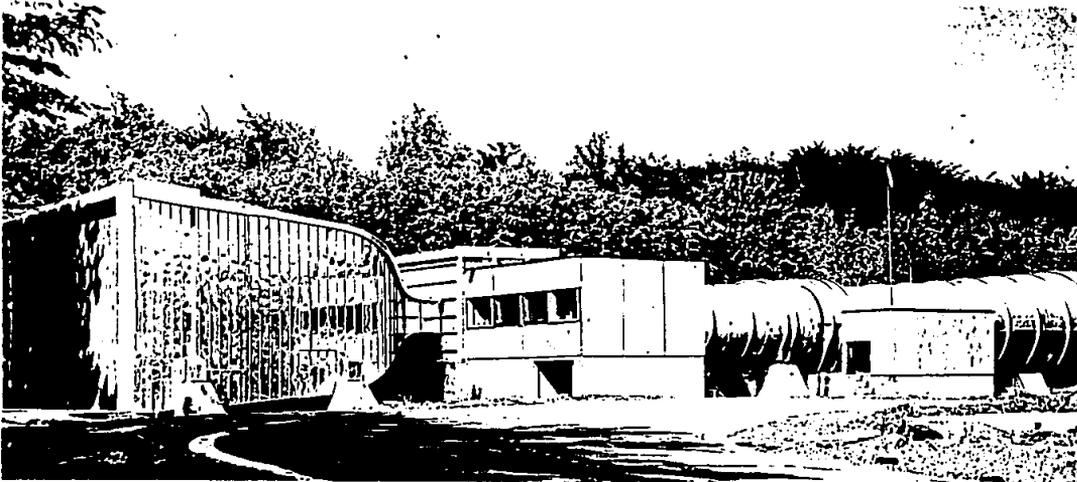




Planta del pabellón con gráficas en los puntos investigados que muestran la magnitud en la presión y succión del viento

El modelo en el túnel de viento

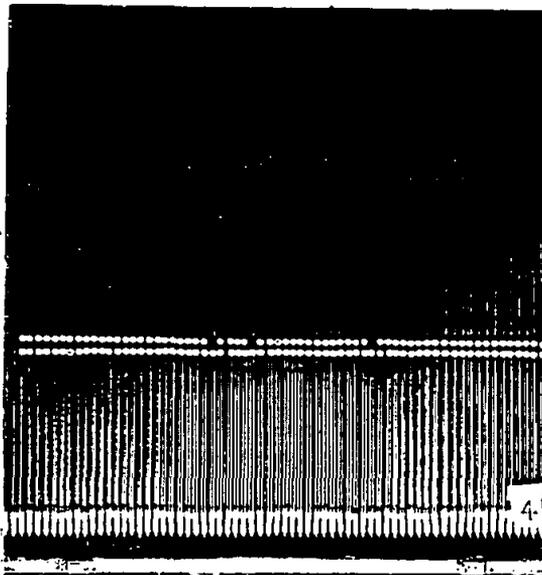




El túnel de viento de la Universidad de Stuttgart RFA.

Medición en el túnel de viento

En la superficie del modelo se midió la presión del viento en 130 lugares por medio de barrenos de presión, que son perforaciones perpendiculares a la superficie que se unen con mangueras de plástico al tablero de piezómetros. La lectura de los valores de presión y succión se llevó a cabo fotografiando los piezómetros, este sistema permite una mayor rapidez y en consecuencia el análisis de un mayor número de puntos. Para estas investigaciones se utilizó el túnel de viento del Instituto de Aerodinámica de la Universidad de Stuttgart.





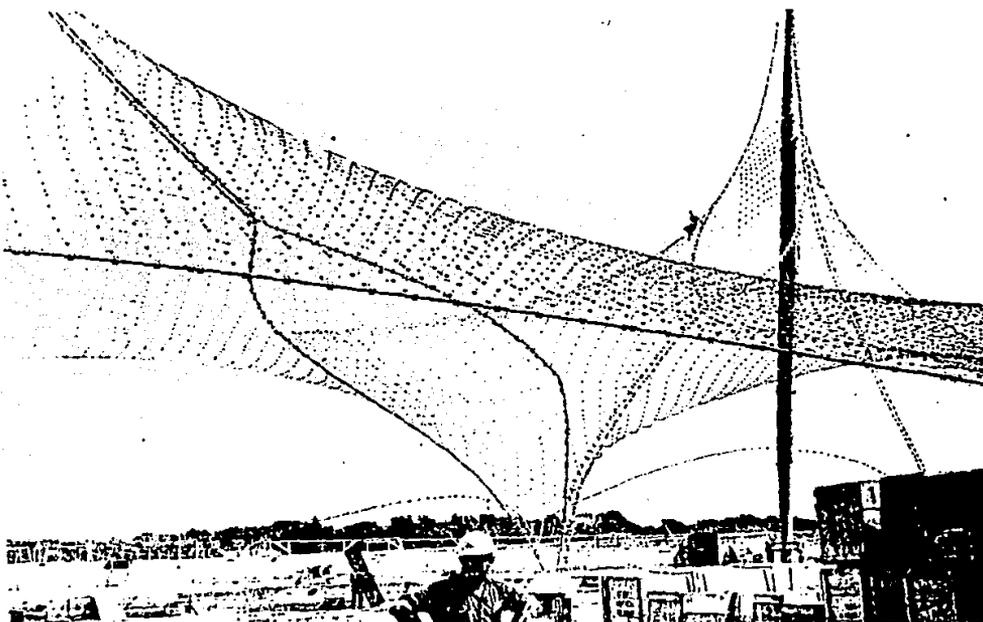
Prefabricación de la red

El armado de la red se llevó a cabo en la Fábrica Stromeyer en Konstanz, primero se cortaron los cables a su medida final y se colocaron los estrobos en los extremos, a continuación se armaron las secciones, formando la retícula con los conectores de unión especialmente diseñados, se clasificaron todos los cables etiquetándolos, por último se enrollaron las secciones y se empacaron en cajas. Los cables de borde se enviaron por separado con todas las abrazaderas donde entrarían los estrobos.

Fabricación de la membrana

Los diferentes lienzos que forman una sección de la membrana, todavía se unieron cosiéndolos con máquina y sellando la costura por medio de una tira de lona pegada con sellador, ya que en 1956 los aparatos de sellado electrónico no eran aún muy confiables. Las diferentes secciones se unieron tejiéndolas con cable de nylon, para lo cual, se dejaron ojillos en los extremos de las secciones. Con ésta solución se tenía un margen para corregir cualquier error.



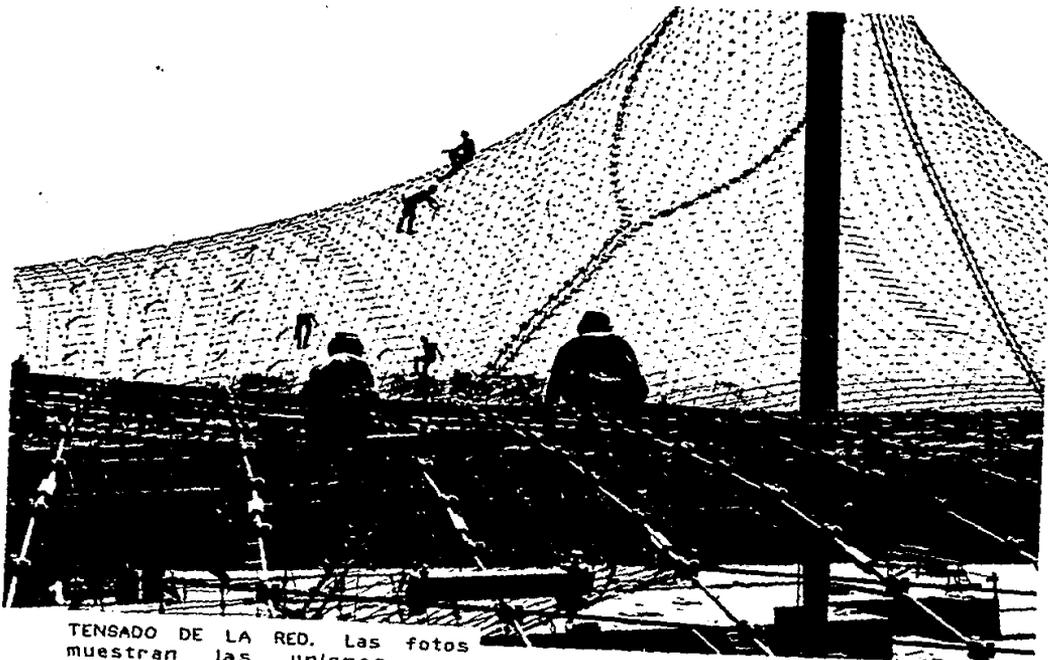


El montaje de la red

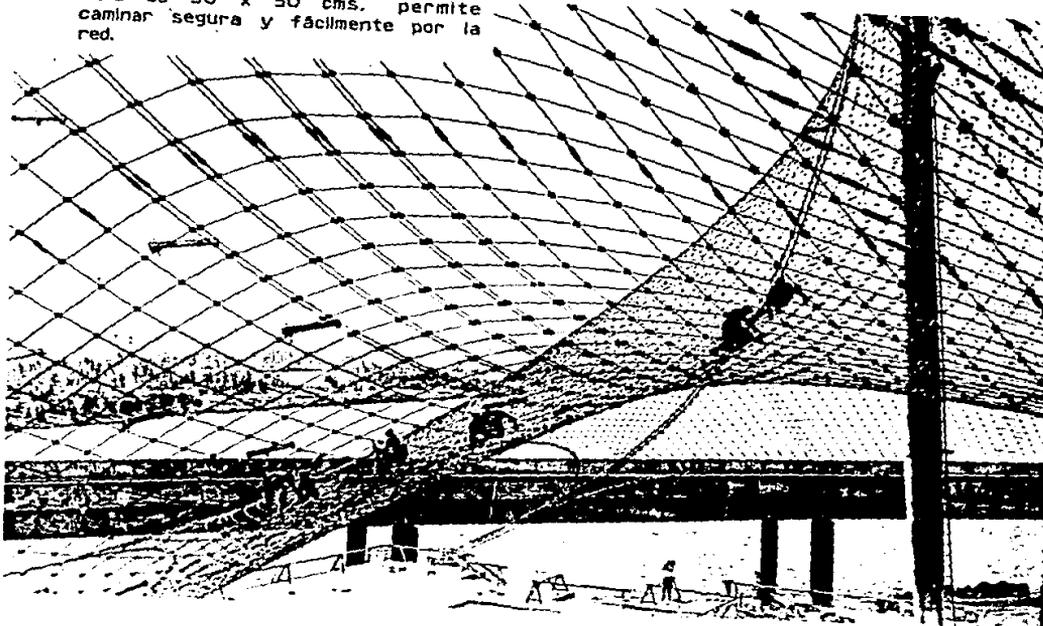
Primero se desenrollaron los cables de borde de 54 mm. de diámetro y se colocaron de acuerdo con la forma de la red. Este cable que pesaba 20 kg. por metro se llevó enrollado en una bobina giratoria para evitar las uniones. Desde la fábrica, este cable ya llevaba colocadas las abrazaderas donde entraban los extremos de los cables de la red. Estos extremos terminaban en un estrobo numerado.

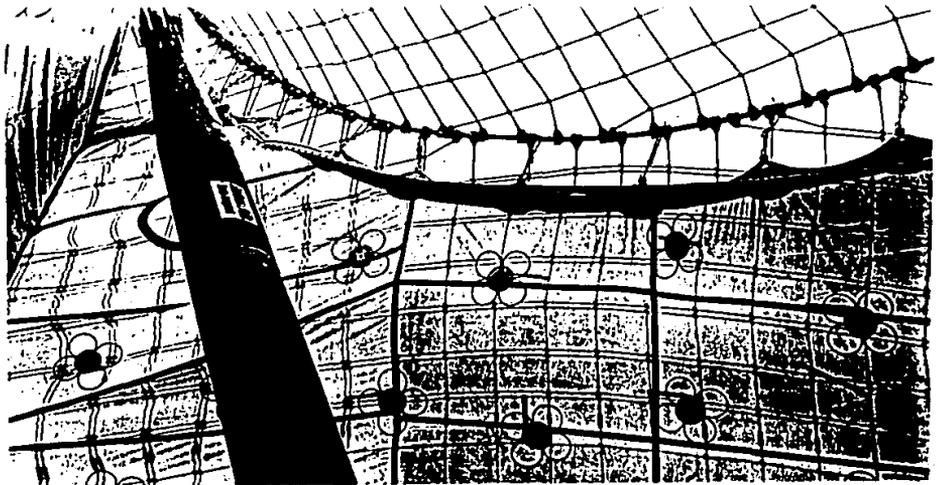
Este número coincidía con el de las abrazaderas, de esta manera se chequeaba que coincidieran y se atornillaban. Los cables de borde terminan en un copie cilíndrico que remata en un estrobo, de éste se levantó el cable, jalándolo con cables auxiliares que pasaban por las cabezas de los mástiles; al llegar los estrobos de los cilindros a unas placas en la cabeza de los mástiles, se fijaron a éstas con un perno.





TENSADO DE LA RED. Las fotos muestran las uniones con templadores y el refuerzo con cables dobles. La abertura de la malla de 50 x 50 cms. permite caminar segura y fácilmente por la red.

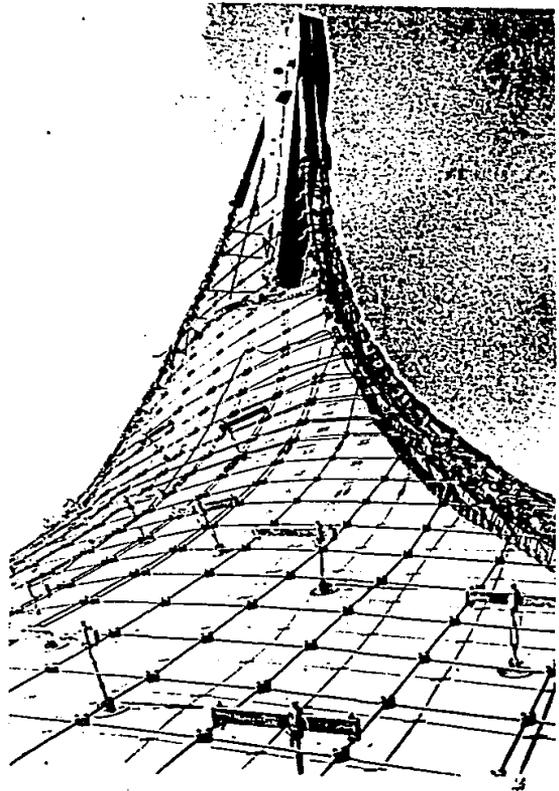


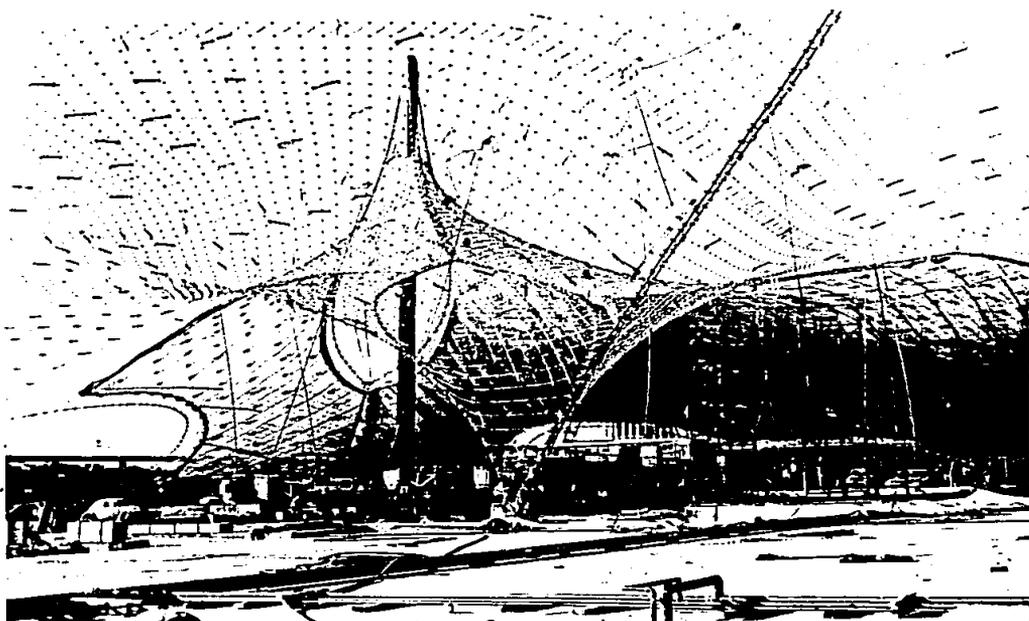


El montaje de la membrana

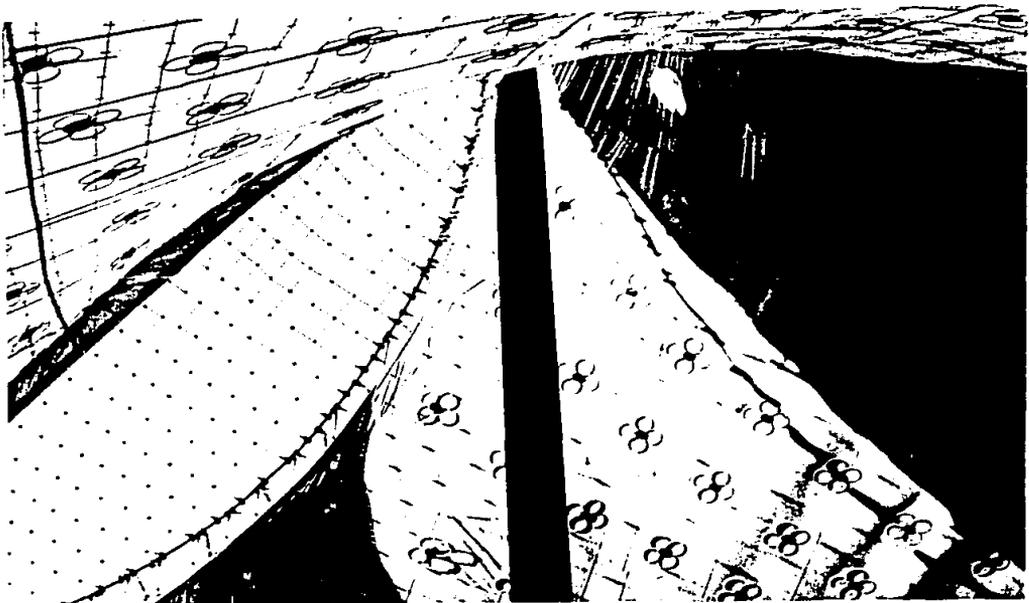
La membrana fue suministrada por la fábrica en 24 secciones prefabricadas, sin contar las cubiertas transparentes de los ojales, todas las secciones tenían ojillos en sus extremos para poder unirlos, tejiéndolos con cable de nylon y cubriendo la unión con una solapa. Este era el mismo procedimiento ensayado en el edificio experimental. Con este tipo de unión se formaron ocho grandes superficies. Para su montaje y tensado se siguió la siguiente secuencia:

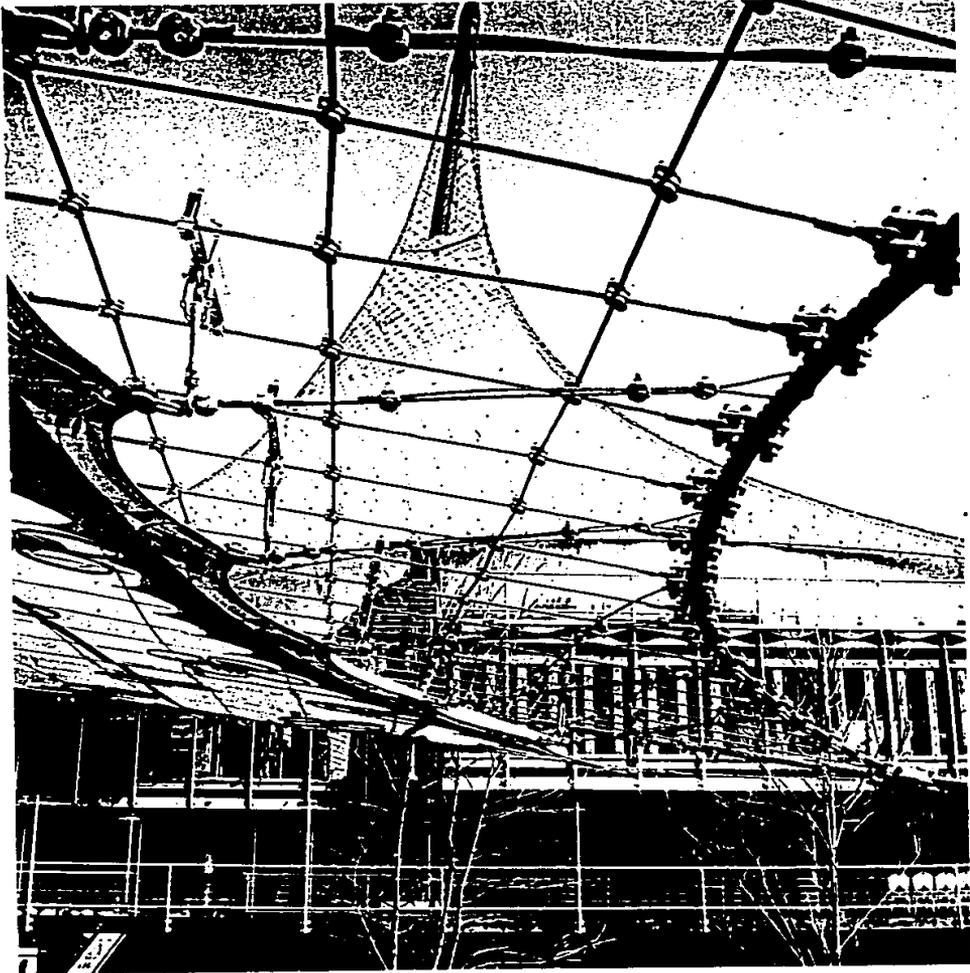
1. Se preparó el piso, con una lona de protección, para poder extender cada tramo de la membrana bajo su correspondiente tramo de red, evitando así que se ensuciara.
2. Una vez extendida en el piso se le colocó la herrería para unirlos a la red.
3. Se fue subiendo cada tramo con ayuda de grúas, poleas y malacates.
4. Tan pronto como la membrana llegó a 30 cms. de la red, se fijaron provisionalmente, las rosetas de sostén de la lona a las transversas de la red con un cable políester, a continuación se tensó la membrana principiando en la parte superior de los mástiles y terminando en los bordes, al mismo tiempo que se iban uniendo las ocho secciones, al final se ajustaron los templadores pretensando de esta manera la membrana.





El tensado de la membrana

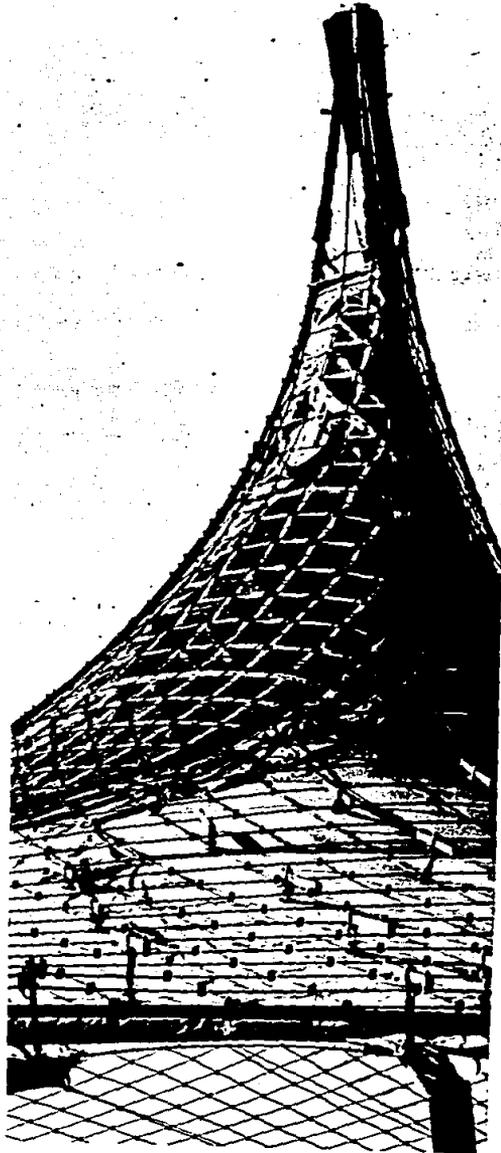




Cortinas

El primer y segundo nivel del pabellón se cerraron con ventanas de madera desmontables. El tercer nivel estaría abierto en el verano durante la exposición. Para poder trabajar confortablemente en la preparación de la exposición durante el invierno, se montaron provisionalmente, cortinas que cerraban el tercer nivel, algunas de ellas permanecieron durante la exposición como rompevientos.

Frel Otto y Rolf Gutbrod alcanzaron el objetivo que se habían propuesto en el modelo de concurso: crear un nuevo paisaje arquitectónico. El volumen encerrado por la velaria en el interior era enorme y cubría las terrazas en estructuras espaciales a diferentes niveles, con esto se lograba dar un panorama completo de la cultura alemana. El reconocimiento a su labor le fue dada por la Unión Internacional de Arquitectos, al otorgar a Frel Otto, el primer premio por el edificio más importante realizado ese año.



APLICACION A MACRO ESTRUCTURAS

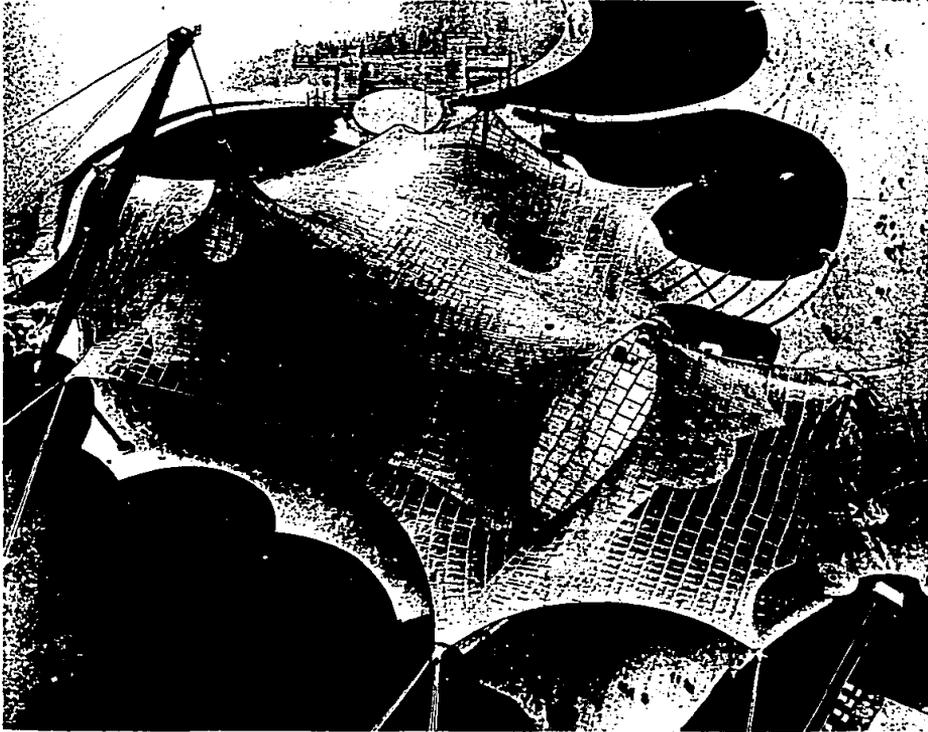
La investigación coordinada de 14 institutos de la Universidad de Stuttgart (SFB 64) para la construcción de la cubierta de las instalaciones Olímpicas de Munich.

La construcción de esta velaria confirmó al diseño experimental de redes de cables pretensadas, como un sistema constructivo universal, el ejemplo de Montreal, considerado por muchos como un caso único en la construcción arquitectónica, se convierte así en sólo un precedente en el diseño experimental de estructuras de grandes claros.

La dificultad en el diseño estructural de estas velarias era el gran costo que representaba la construcción de modelos muy elaborados, este problema disminuye considerablemente al aparecer los computadores electrónicos. En este proyecto aparece por primera vez, la interacción de los dos sistemas, el experimental en modelos y el de proceso electrónico de datos.

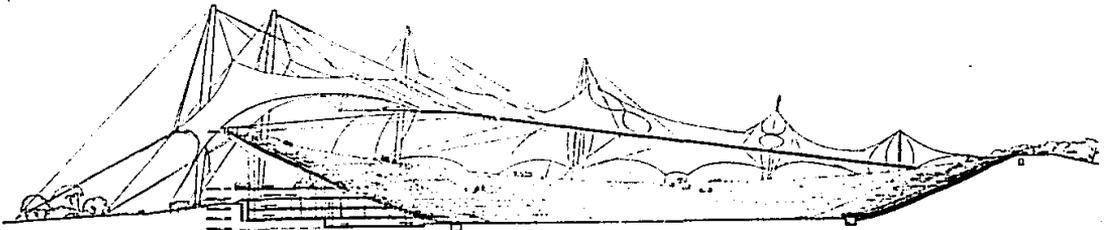
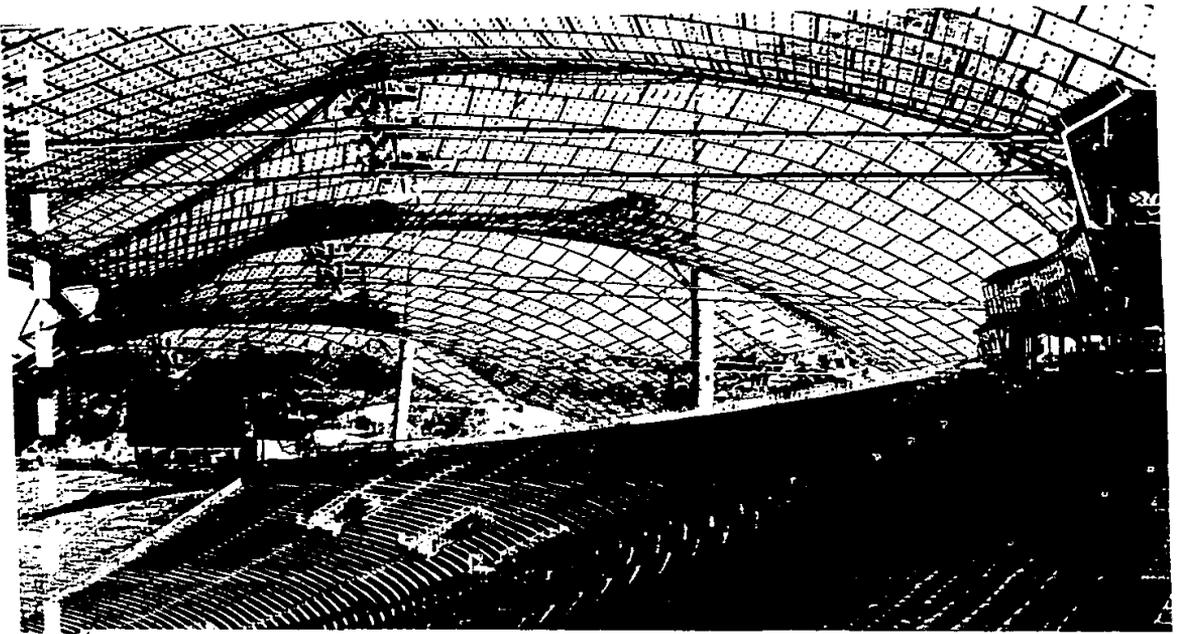
Como la continuación de un proceso de investigación, el proyecto Munich es de suma importancia, baste considerar que 14 institutos de la Universidad de Stuttgart, lo tomaron como un proyecto de investigación aplicada formando el "campo de investigación de la construcción ligera".





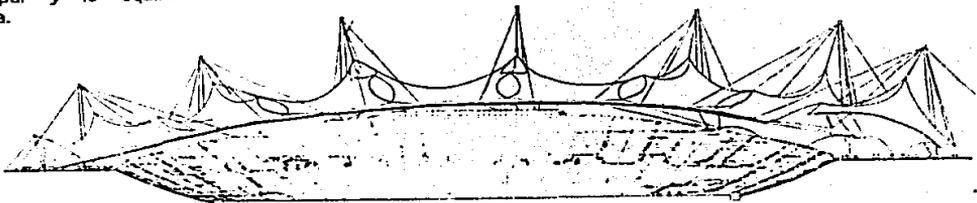
Ahora ya no es necesario repetir ese enorme trabajo de investigación para construir proyectos similares, pues basta al arquitecto sentarse unas horas frente a su computador y diseñar la construcción de una enorme velaria como la de Munich, utilizando la tecnología desarrollada en los institutos de investigación, como el algebra formex de la Universidad de Surrey, los avanzados programas de análisis estructural como el Pam-Lisa, de Informatique Internationale de Paris, o los del IAGB o ISD de la Universidad de Stuttgart. El constructor podrá diseñar gráficamente en tres dimensiones, separadas por color, los esfuerzos internos que determinan la forma de su estructura. Esta forma de diseño, hubiera parecido una utopía a los que colaboramos en la construcción del Pabellón Alemán, sin embargo ahora es de uso corriente. Esta evolución no se dio de una manera fortuita, es el producto de muchos años de investigación

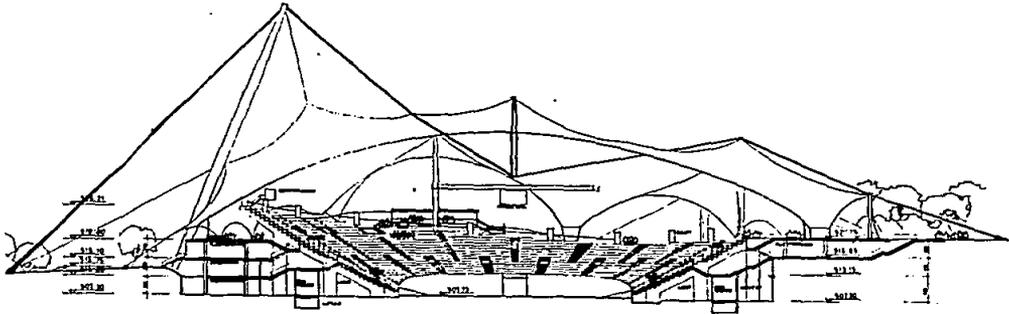
investigación en el diseño experimental y en los grandes programas de análisis estructural, para citar un ejemplo, el programa MASL fue implementado en la UNAM desde 1973 como programa de biblioteca, del Laboratorio de Estructuras Laminadas, por su autor Eberhard Haug, al mismo tiempo que lo perfeccionaba en varias universidades europeas y norteamericanas. El proyecto de investigación de Munich vino a acelerar el proceso de desarrollo de esta tecnología y aunque todavía fue necesario construir grandes y muy costosos modelos, el gasto no fue en vano, pues lo justifica el avance en la estática de modelos y en la investigación de matemáticas aplicadas. Por otra parte, la comprobación en la obra de la exactitud del análisis computarizado basado en la construcción con modelos, proporciona una gran confiabilidad en este procedimiento de análisis.



EL ESTADIO

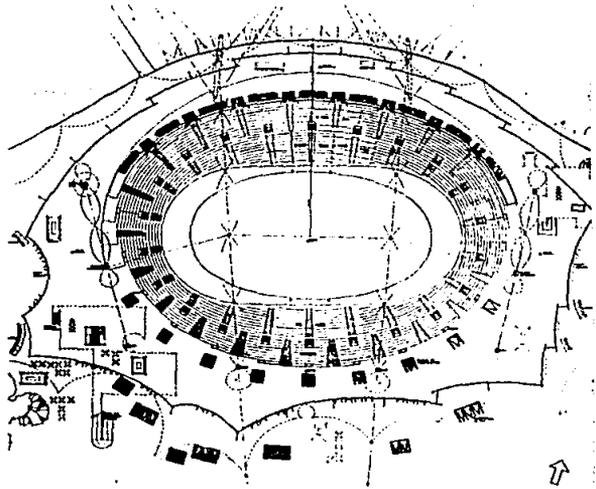
El elemento estructural más importante es el cable de borde principal que tensa la red hacia el interior. Este cable tiene 140 mts. de longitud, pesa 350 ton y puede tomar hasta 5000 ton. La superficie que cubre es de 34,500 m². 8 grandes mástiles cargan el cable principal y lo equilibran tirando hacia afuera.



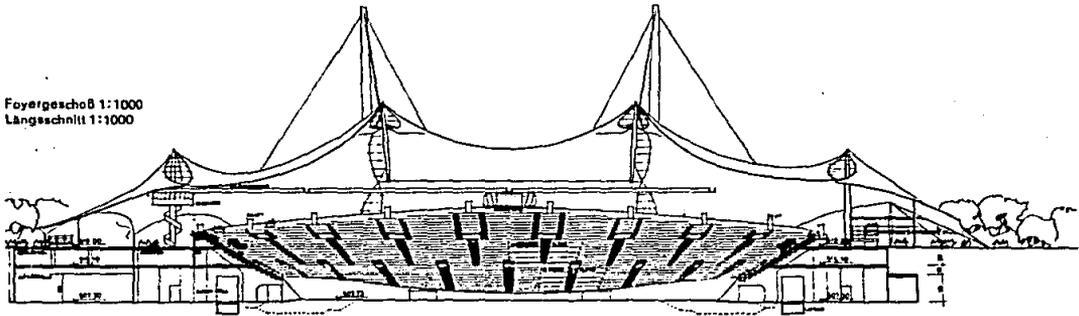


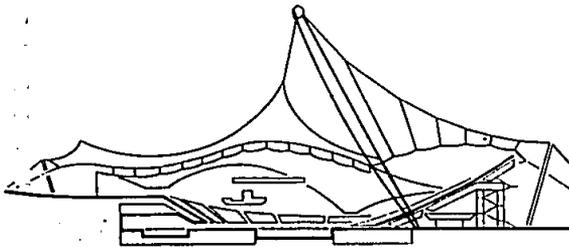
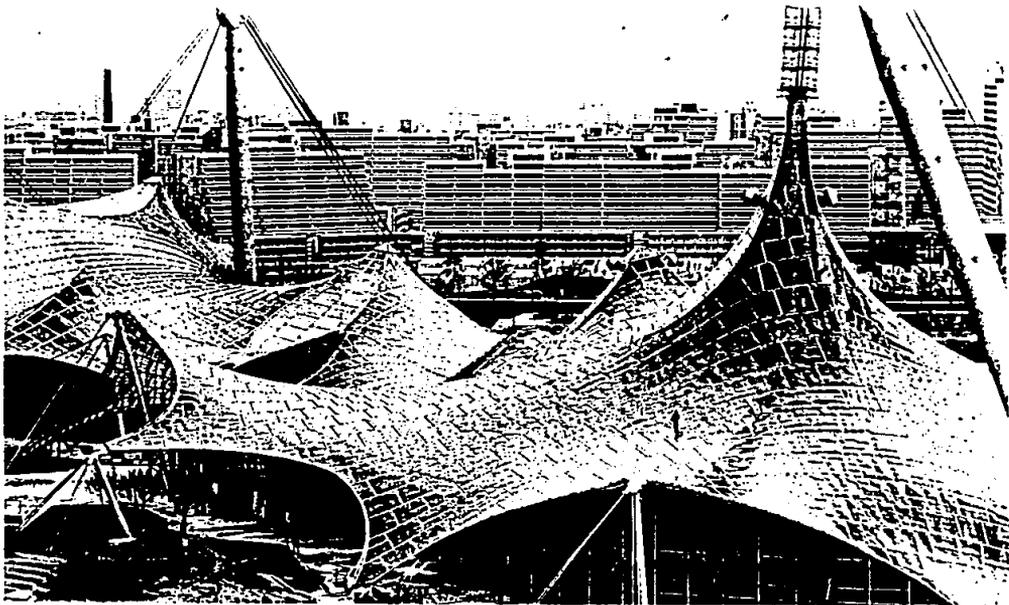
EL GIMNASIO

La característica estructural mas interesante del Gimnasio son los tornapuntas que ayudan a salvar el gran claro. Los tornapuntas se apoyan en un cable soportante que sube a la punta de los mástiles y baja a grandes anclajes. Las velarias de acero se apoyan en la parte superior de los tornapuntas equilibrando las fuerzas, se unen unas con otras por medio de cables de borde circulares formando ojales. Tiene una capacidad de 11,000 espectadores, 7000 sentados.



Foyergeschoß 1:1000
Längsschnitt 1:1000





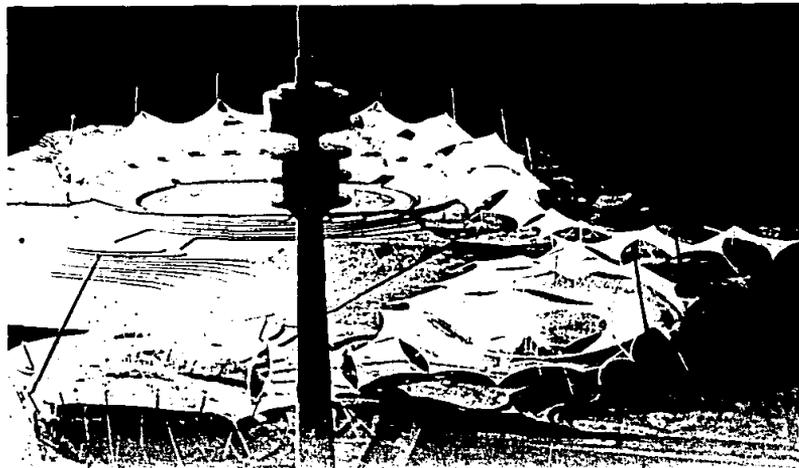
LA ALBERCA

El elemento dominante en la estructura es un gran mástil de 80 m. de altura del cual cuelga la velaria. Este mástil ha sido muy controvertido por su elevado costo, sin embargo, no pudo ser sustituido por ser un elemento importante en el diseño arquitectónico original. Durante los Juegos Olímpicos se amplió la capacidad con tribunas provisionales cubiertas con una velaria textil apoyada en el mástil.



EL MODELO TEXTIL

Este modelo es el más importante en el proceso de diseño, pues en su construcción se hacen las modificaciones más importantes, tanto arquitectónicas como estructurales. De aquí se toman las medidas finales para construir el modelo de medición y los datos para las computadoras, digitales y analógicas. Las medidas obtenidas con el mecanismo de medición en 3 dimensiones, son la base para los planos constructivos.





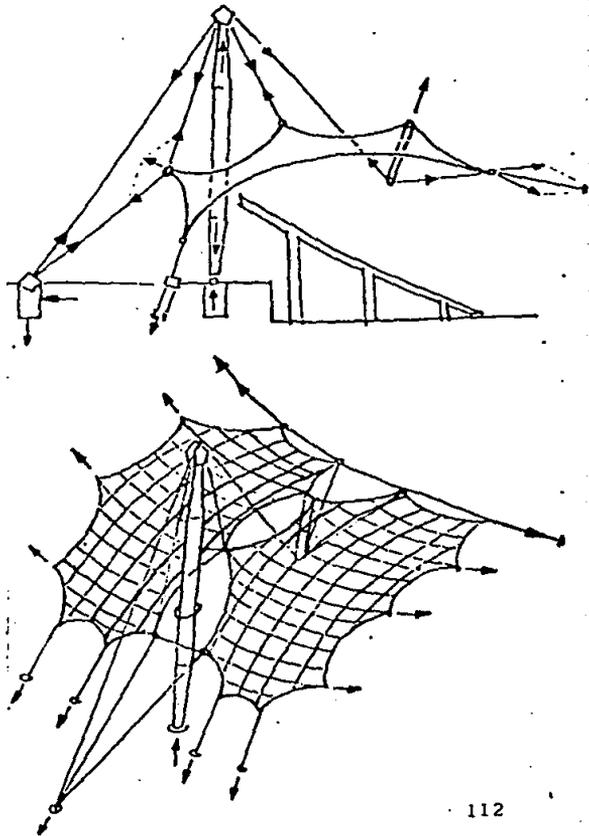
LA ESTRUCTURA DEL ESTADIO

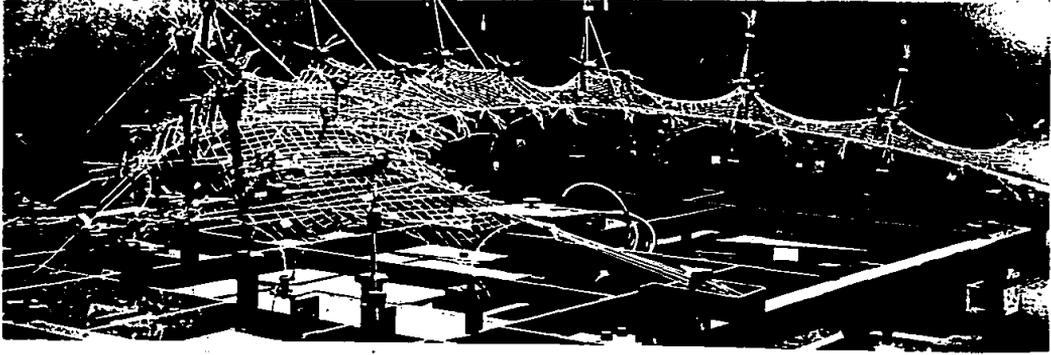
La cubierta del estadio es la más interesante del conjunto, no solo por sus grandes dimensiones, sino también por la ingeniosidad en su diseño estructural.

El elemento estructural dominante es un gran cable de borde de 440 m. de longitud que corre a lo largo de todo el estadio, este cable se estabiliza por medio de dos cables primarios, el superior lo levanta hacia los mástiles y el inferior lo pretensa a los anclajes.

La cubierta se forma con nueve velarias de acero con forma de silla de montar. Los cables de la red llevan las cargas a los cables de borde, éstos las transmiten a los cables principales que van a los mástiles y a la cimentación. Las nueve velarias se unen con sus cables de borde, contrarrestando así las fuerzas horizontales. En sus puntos de unión, las velarias se levantan por el cable principal hacia el mástil. En el frente se pretensan por el gran cable de borde hacia abajo y adelante.

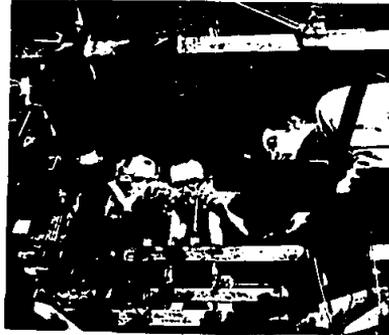
Otro detalle interesante es el tornapunta. Para alcanzar a cubrir la totalidad de las graderías, fue necesario introducir un tornapunta que eleva en el centro la velaria permitiéndole además una mayor curvatura. Este tornapunta se sostiene por tres cables en su punto bajo, dos van hacia el gran cable de borde y el tercero lo levanta hacia el mástil. Para estabilizar el mástil y equilibrar la fuerza hacia el frente, se continúa el cable primario, de la cabeza del mástil a un anclaje en el piso en la parte de atrás.

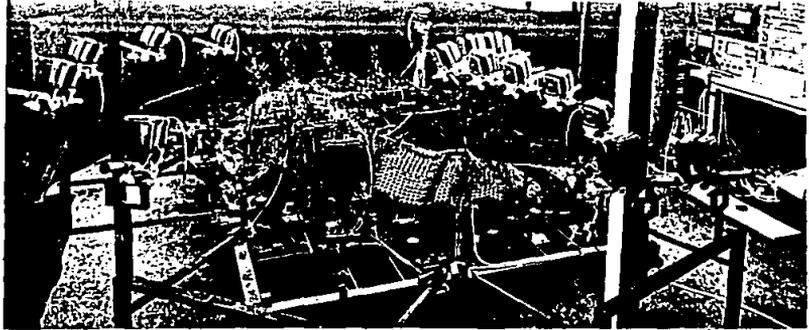




LA CONSTRUCCION DEL MODELO DE MEDICION.

La construcción de un modelo tan complicado exigió un trabajo muy metódico. Fue construido por técnicos muy experimentados. En la foto vemos a Burkhardt, a Hennicke y a Bubner, uniendo los cables de borde a la red burda, a continuación tensaron cada cable de la red y de borde, para darle el presfuerzo y que la red vaya tomando su geometría. Para evitar que se pierda la geometría prestablecida, pusieron guías en los puntos más importantes. El cable de borde, descansa sobre barras que indican los puntos predeterminados, posteriormente las barras se retiran. Las coordenadas se tienen que estar comprobando desde el momento en que se monta la red en la base de acero, cada vez que se mejora el modelo y al final. Para esto se utiliza un mecanismo de medición en 3 dimensiones, digital, especialmente diseñado en el IL.



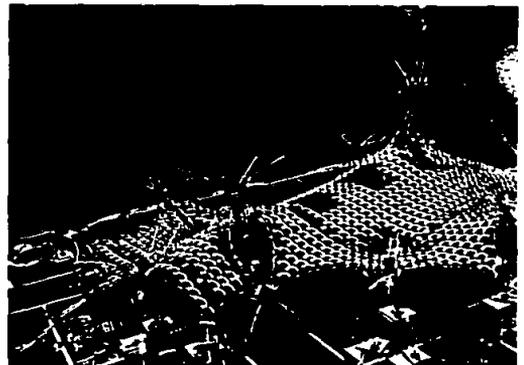
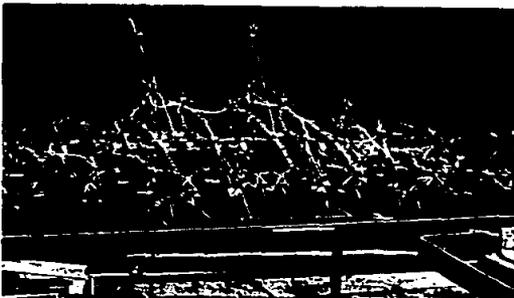
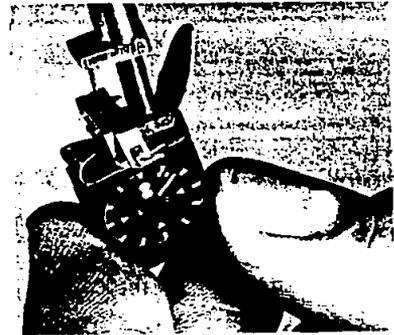


MEDICIÓN Y PRUEBAS DE CARGA EN EL MODELO

Para la medición de modelos tan grandes se diseñaron nuevos mecanismos, desde una nueva mesa de medición, hasta nuevos medidores de tracción en los cables. Estos trabajan bajo el principio de transmisión de la deformación del cable, la exactitud en las medidas basada en la media de una curva de calibración es de aproximadamente 1,35 %

Para realizar las pruebas de carga se tuvo que montar una pesa en cada nudo, esto representa 3600 pesas para la red del estadio. En el caso de no tener carga, las pesas descansan sobre una placa equilibrada neumáticamente. La placa se va bajando lentamente y va alcanzando, peso propio, carga parcial y al final las cargas totales.

Con la ayuda de numerosas cámaras, se hizo una comprobación de las fuerzas y deformaciones medidas en una prueba total final. Los esfuerzos en los cables de la red se llevaron a cabo con los nuevos medidores de tracción desarrollados en el I.L. Los esfuerzos en los cables soportantes principales se realizaron con medidores de esfuerzos del Instituto de Estática de Modelos.



MEDICION DE LA RED POR FOTOGAMETRIA

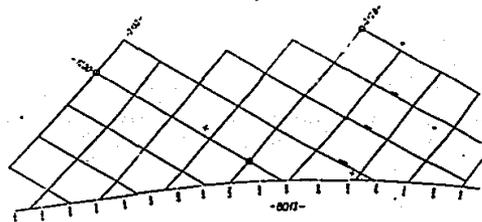
Otra medición de la red se efectuó por medio de fotogrametría estereoscópica en el Instituto para la utilización de la Geodesia en la Construcción. (IAGB) que dirige el Dr. Klaus Linkwitz.

Los modelos producidos en el Instituto de Frei Otto, fueron medidos por medios estereo fotogramétricos. Primero se fotografian los modelos desde dos puntos distintos que permitan una reconstrucción espacial del modelo.

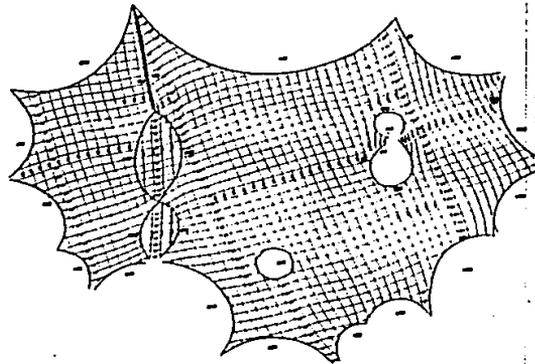
Para la reconstrucción del modelo existen dos posibilidades:

1. En un aparato de evaluación analógica se reproducen las fotografías y se reconstruye el modelo, por medio de un procedimiento óptico mecánico. Este procedimiento produce gráficas de una gran exactitud que se utilizan para obtener los planos de curvas de nivel.

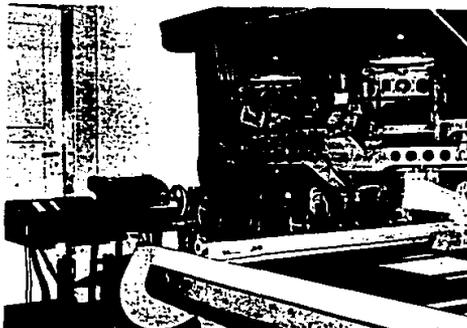
2. En un aparato de evaluación estereoscópica se miden las coordenadas del modelo con una exactitud de un milésimo de milímetro y con estas coordenadas se reconstruye el modelo.



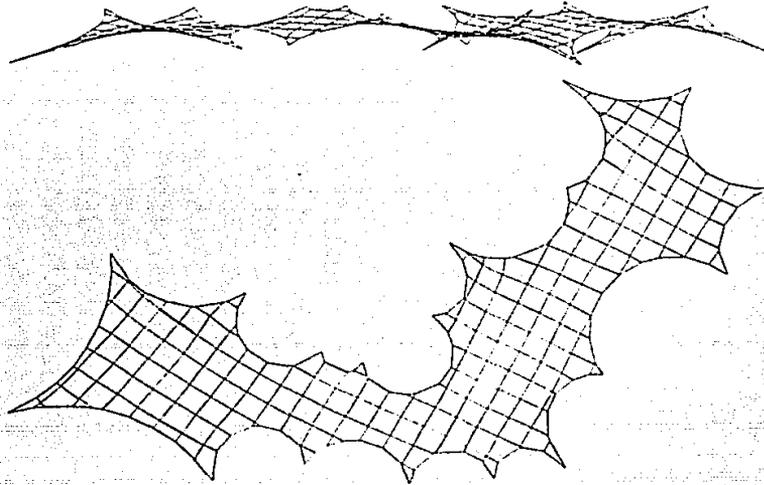
Dibujo de una parte del borde de la red del estadio, reelaboración gráfica de los planos dibujados por la máquina.



Planta de la red de la alberca, resultado de la evaluación con el comparador estereo.



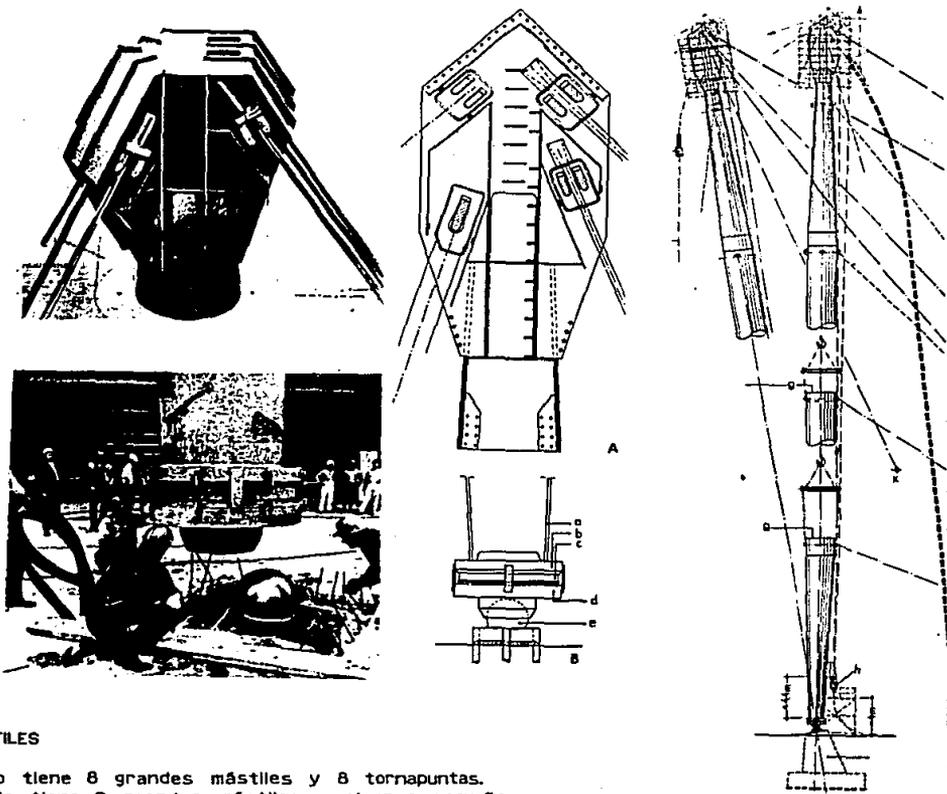
Aparato estereoscópico de evaluación analógica Wild A 8 (establece analogía entre situaciones físicas y matemáticas) acepta datos directamente de los instrumentos de medición sin necesidad de convertirlos a símbolos o códigos lo que le permite procesar información a gran velocidad. Con este aparato se reconstruye espacialmente el modelo que fue impreso por medios fotogramétricos.



Planta y alzado de los pasos de peatones, reelaboración gráfica de los planos dibujados por la máquina.

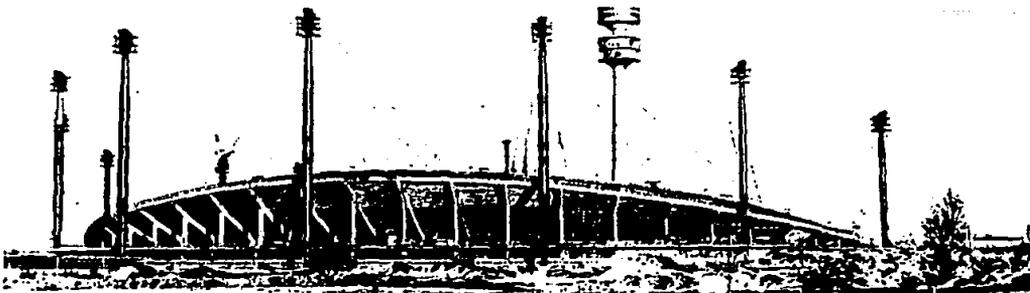
Planta de las velarias del estadio dibujada por fotogrametría

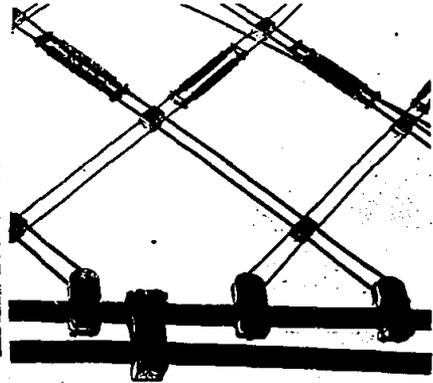
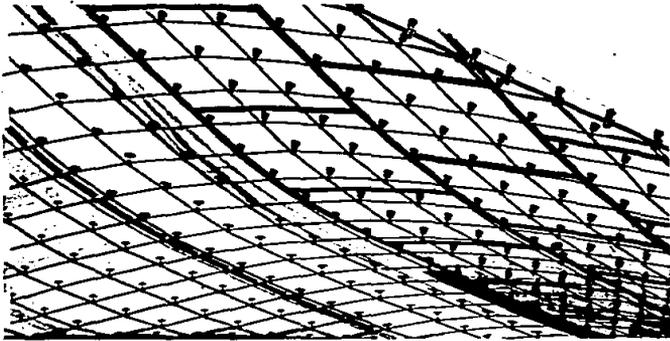




LOS MASTILES

El estadio tiene 8 grandes mástiles y 8 tornapuntas.
 El gimnasio tiene 2 grandes mástiles y algunos pequeños.
 La alberca tiene un gran mástil que pesa 359 ton.
 Estos mástiles varían entre los 50 y 80 m. de altura y soportan cargas hasta de 5000 toneladas, son tubulares, cilíndricos y tienen hasta 3.5 m. de diámetro y 7 cms. de espesor de la pared. Las cabezas son de placas soldadas y pesan hasta 72 ton. Se apoya en una rótula para el montaje. A cabeza del mástil, B pie del mástil, a espesor, b placa colada, c caja de equilibrio, d placa del pie, e rótula.



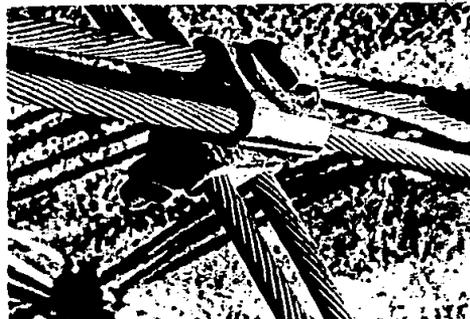
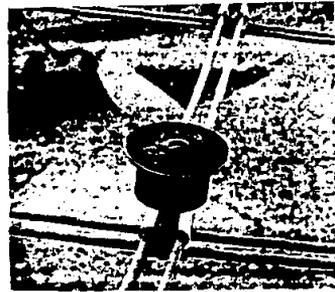
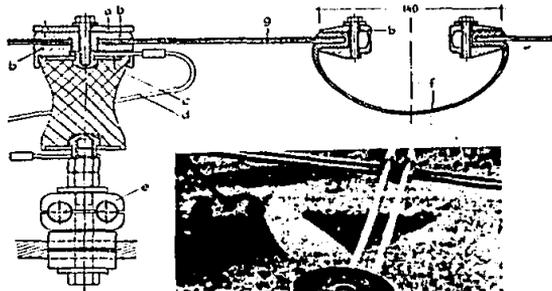


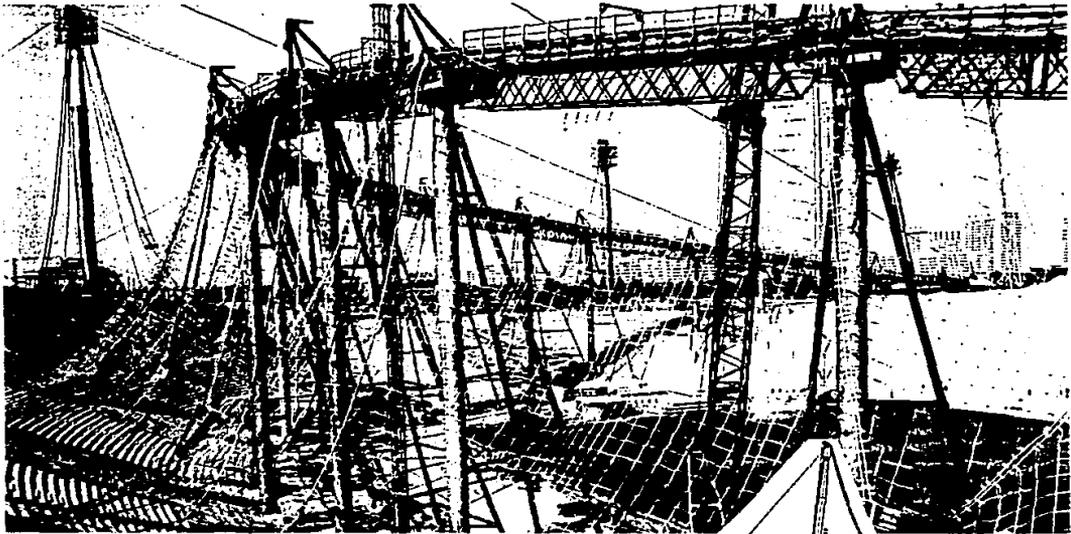
LA RED DE CABLES

Cubre 74,800 m². Para su fabricación fueron necesarios 210 kilómetros de cable. Los cables se forman con 19 alambres de 2.3 a 3.4 mm. de espesor, y a diferencia de la red en Montreal, aquí se pusieron dobles y se unen al cable de borde en una polea. La abertura de la malla es de 75 cms. La red se forma con 300,000 conectores de aluminio. Los cables de borde son de construcción cerrada de 81 mm. de espesor. El esfuerzo de tracción permitido es de 300 ton. con seguridad al doble. Cuando los esfuerzos sobrepasaban las 300 ton. se acopiaron varios cables, en bordes, cumbres y ojales.

El cable principal tiene una longitud de 440 m. se forma con 10 torones de 120 mm. pesa 350 ton. y puede tomar una carga hasta de 5000 ton.

El conector está formado por cuatro placas unidas por un tornillo, estas placas aprisionan cuatro cables en sentido ortogonal, formando así la red. Este conector sirve también como apoyo para la cubierta de acrílico y para sostener el aislamiento término acústico en la alberca y en el gimnasio. En la ilustración a es una rondana de aluminio que presiona a b un perfil de clorofeno que sujeta la hoja de acrílico, c es un empaque de clorofeno, d es un cable de acero que toma la fuerza de succión, e es el conector, f es una junta.

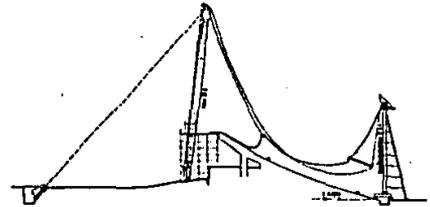




EL MONTAJE

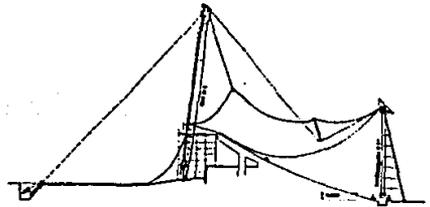
Fase 1

Se construye un apoyo para el cable de borde y se arma en el sitio.
 Se montan los 8 mástiles.
 Se extiende la red sobre las tribunas.
 Se conectan los cables soportantes a la cabeza de los mástiles y a los anclajes.



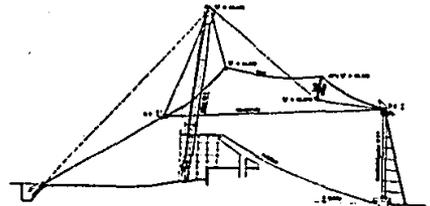
Fase 2

Se conectan los cables soportantes al cable de borde. Se comienza a subir de las tribunas, el tornapunta con la red. El cable auxiliar de montaje sube a la cabeza del mástil y empieza a levantar.



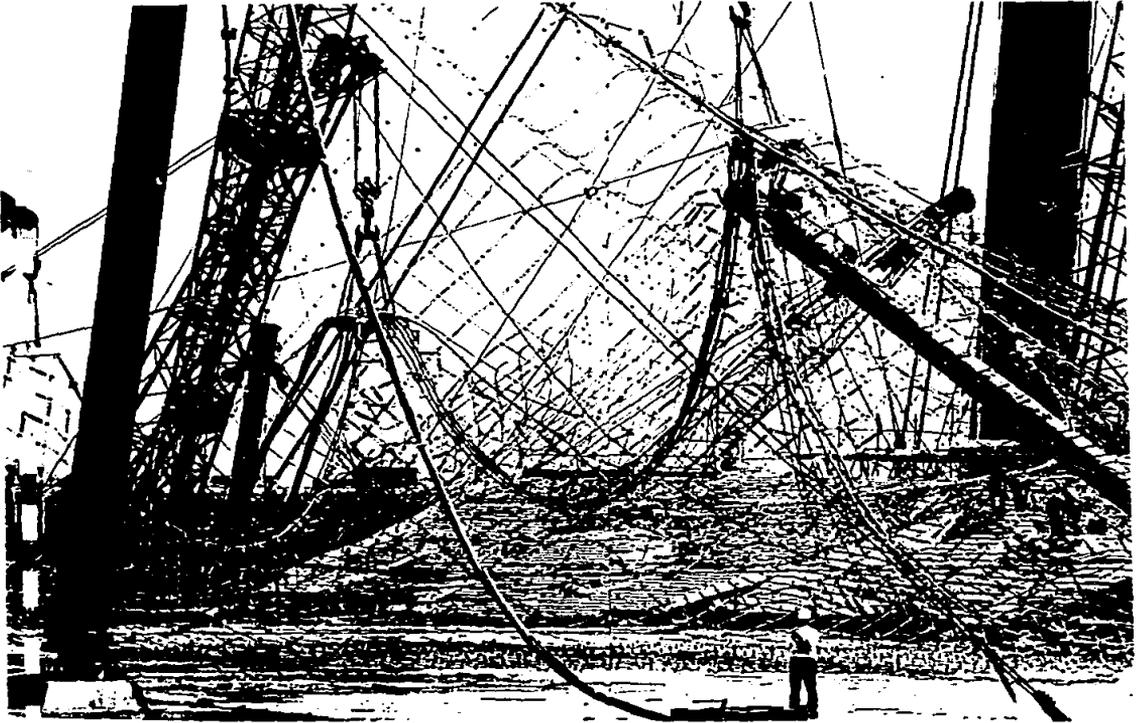
Fase 3

Se siguen subiendo el punto alto y el tornapunta, sobre el andamio, junto al mástil se pasan los puntos traseros de la red.



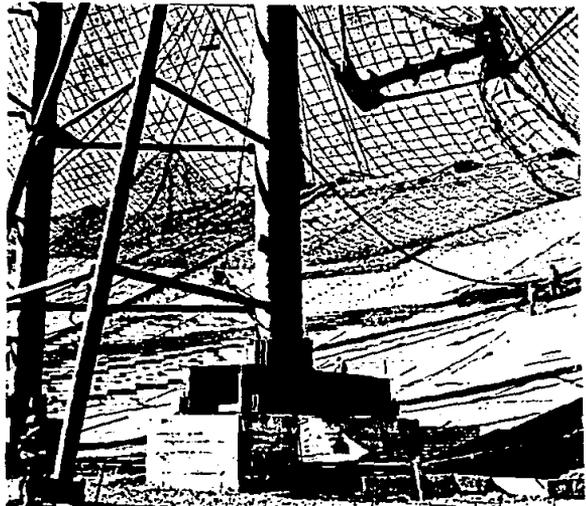
Fase 4

Se suben los cables del punto alto y del tornapunta, se tensa el cable de la cabeza del mástil al anclaje, con esto se elevan los puntos traseros de la red sobre el andamio y la unión de los cables se lleva a su punto final.



FASES 2 Y 3 DEL MONTAJE

Momento en que empiezan a subirse el punto alto de la red y el tornapunta. Estas son quizá las fases críticas del montaje, cuando se prueba si el cálculo de los elementos de soporte estuvo bien realizado. Si bien la red es muy ligera, su presforzado para equilibrar el cable de borde es considerable.



ANÁLISIS MATEMÁTICO EXPERIMENTAL Y COMPUTARIZADO

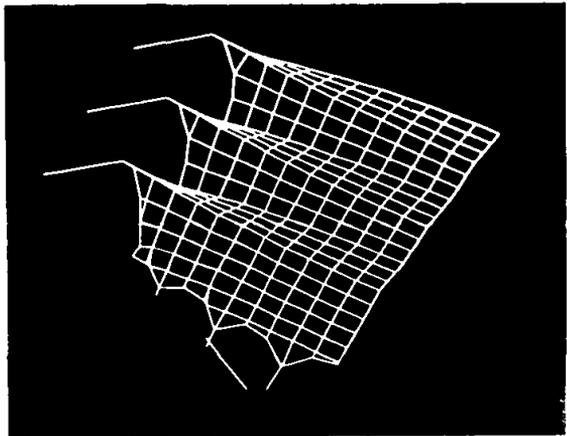
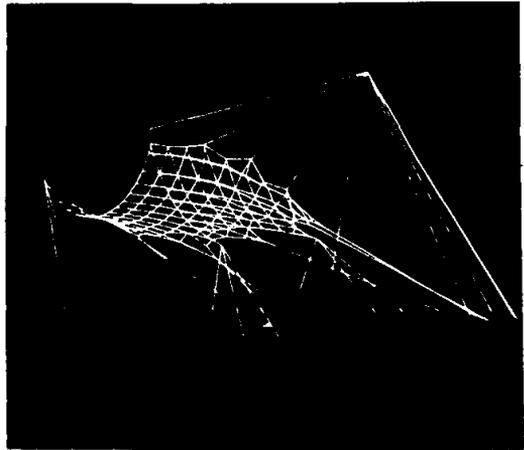
En 1966 Schleyer publica el cálculo matemático de cables y redes de cables de acero. Este cálculo teórico nos da una idea muy precisa del comportamiento matemático de la estructura, pero al presentarse deformaciones en su geometría espacial, materiales no homogéneos y cargas accidentales no consideradas: succión y presión de viento entre otras, el cálculo se complica a tal grado que frecuentemente el arquitecto se pierde en esta gran complejidad.

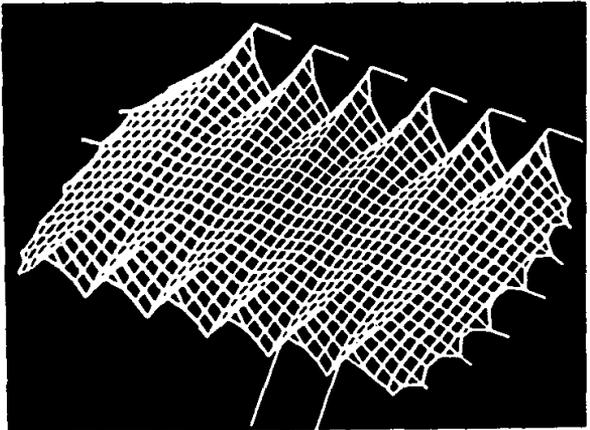
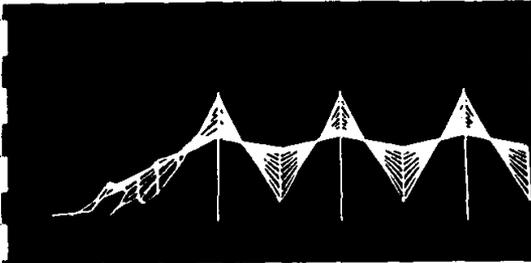
Análisis Experimental

Como hemos visto en el capítulo anterior, el análisis experimental de estructuras laminares ligeras, a base de mediciones en modelos fue un factor determinante para la construcción de las obras descritas. Cuando las estructuras crecen a macro-estructuras, los modelos a escala deben crecer para mantener su exactitud. Esto los hace sumamente costosos.

Análisis numérico experimental

E. Haug explica como "experimentos numéricos" el nuevo tipo de análisis estructural, basado en una actividad computacional que busca soluciones a problemas reales, prácticos, empleando calculadoras digitales y herramientas de programación. El programa MASL publicado por la UNAM y el programa Pam Lisa, escritos por Haug, están basados en aplicaciones estructurales del método numérico del elemento finito a las estructuras laminares. Este método es el que se usa mas universalmente en el análisis estructural, es especialmente adecuado para las estructuras laminares, especialmente para encontrar la forma geométrica óptima y para el análisis bajo cargas estáticas y dinámicas.





Los Programas MASL y Pam-Lisa

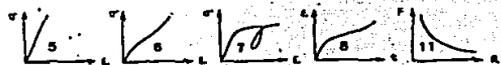
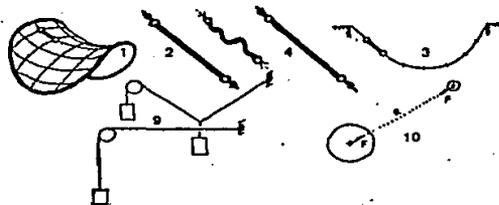
Una descripción detallada del programa MASL y su manual de uso en la B-7800 de la UNAM, se encuentra en 3 publicaciones del LEL, por lo que aquí solo expondré los conceptos básicos de diseño de los programas de Haug, tomándolos parcialmente de su ponencia en el 2o. simposio Internacional: Weitgespannte Flachentragwerke 1979 en Stuttgart.

De acuerdo con el método de elemento finito, las estructuras de cables se consideran hechas con elementos de cables, 1. El elemento de cable mas simple, linealmente elástico, tiene dos puntos nodales, 2 y se caracteriza por su longitud sin tensar, L , su módulo de elasticidad, E y su área, A . Para formar una estructura, los elementos se conectan en nudos, que pueden ser cruces de cables o puntos intermedios, como segmentos de curvas de un cable colgando libremente, 3.

Cada elemento de cable puede transmitir una fuerza de tracción de nodo a nodo, cuando transmite una fuerza de compresión se le llama un elemento barra.

Para un material linealmente elástico, las fuerzas de tracción o compresión se incrementan proporcionalmente al cambio en dimensión. También hay posibilidades no lineal, 6, plástica, 7, o deformaciones dependientes del tiempo o visco-elásticas, 8.

Los cables de presfuerzo son elementos indispensables durante el proceso de búsqueda de la forma de estructuras con redes de cables. Físicamente, estos elementos se comportan como cuerdas tensadas con una carga constante, ejerciendo un jalón constante por medio de una polea sin fricción, 9.

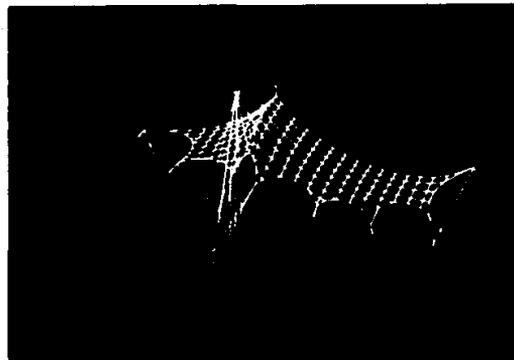
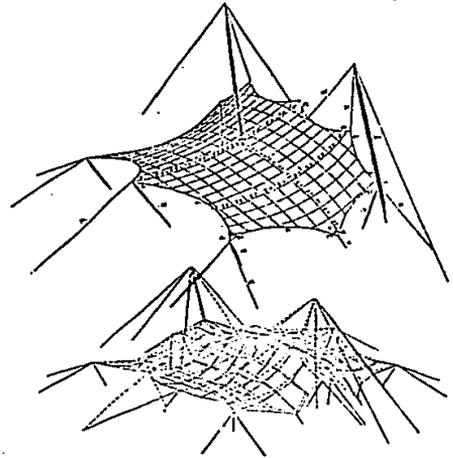
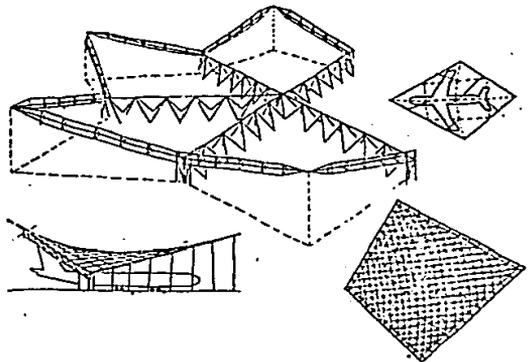


Los programas de computador usando el elemento finito

Numerosas universidades europeas y americanas trabajamos con programas escritos por E. Haug. En México los programas MASL y Pam-Lisa para el cálculo de estructuras ligeras son programas de biblioteca en la UNAM, documentados con publicaciones del Laboratorio de Estructuras Laminares.

Estos programas son manejados por los alumnos como una herramienta en el análisis de forma y esfuerzos en sus tesis de licenciatura. En la época actual es importante que los profesores enseñen a usar los programas de estructuras ligeras a sus alumnos de Ingeniería y arquitectura.

El programa MASL fue escrito por Haug en la Universidad de California en Berkeley, donde lo presentó como doctorado. Haug analizó algunos ejemplos interesantes, entre ellos tenemos una red plegable y el modelo numérico simplificado del edificio experimental en Stuttgart, Vaihingen, cuya construcción describo en esta tesis. Este programa fue usado posteriormente en varias universidades. Entre las numerosas obras analizadas, destacan una velaria ondulada diseñada por Goetz Schlerle en 1970 en la Universidad de California, Los Angeles. Un hangar para Jumbo Jets por John Puterbaugh en St. Louis Mo. en 1971. La cubierta del patio central del Palacio Nacional en México y el teatro al aire libre del Centro Acapulco, diseñados por José Mirafuentes en 1974. La cubierta de un estadio sobre hielo por Servais en Lieja y varios ejemplos más en la Universidad de Essen, por Ewald Bubner.

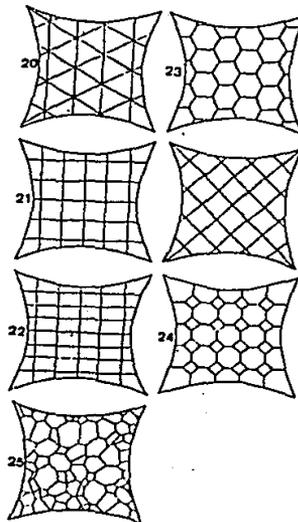


Los elementos cable pueden tener, carga muerta, 10, masa, 11, cambios de temperatura 12, cambios de dimensión, tipo templador, 13, fuerzas de presfuerzo, 16, fuerzas de arrastre, 17, (para movimiento dentro de medios viscosos, agua, aire), amortiguadores internos, 18, características de ruptura, 19, y otros tipos de carga.



Al incorporarse al programa, las opciones antes enumeradas permiten el análisis de un rango muy amplio de problemas con el misma herramienta analítica.

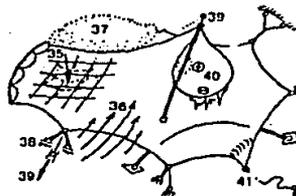
Redes de cables. Se pueden formar con redes regulares o irregulares: triangulares, 20, cuadradas, 21, rectangulares, 22, hexagonales, 23, octagonales, 24, y mallas aleatorias, 25 o cualquiera otra geometría interior.

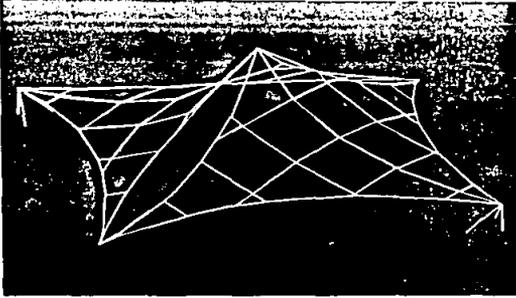


Estructuras con redes de cables. Se pueden formar numéricamente con elementos de cables y barras y pueden tener: redes de cables, 26, cables de borde, 27, de cumbre 28, de relinga, 29, de ojal, 30, barras soportantes, 31, mástiles, 32, arcos y otros elementos estructurales, 33. Pueden ser cargadas con cargas concentradas, 34, viento, 35, nieve, 36, soportes, 37, sistemas adicionales de tensado, 38, diferencias de temperatura, 39, cargas dinámicas, 40 y cualquier otra carga como si fuera una estructura real en servicio.

Redes presforzadas. Se puede encontrar numéricamente la configuración libre de esfuerzos introduciendo las fuerzas de presfuerzo deseadas, durante la fase de búsqueda de la forma.

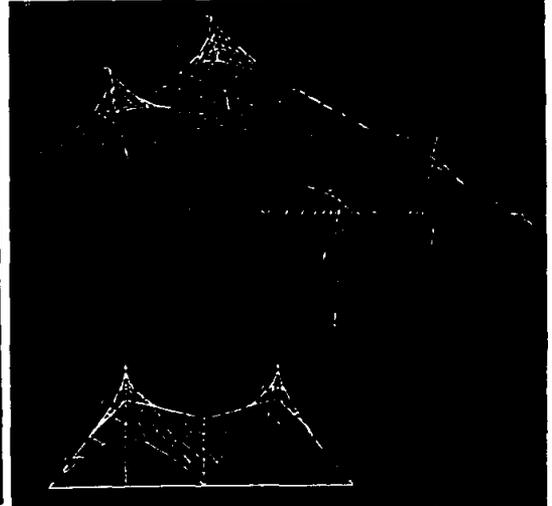
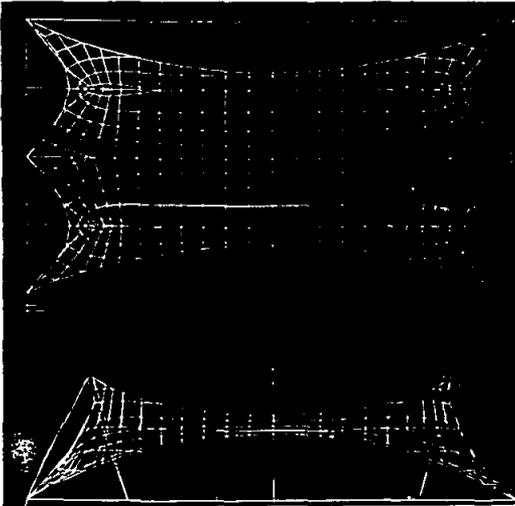
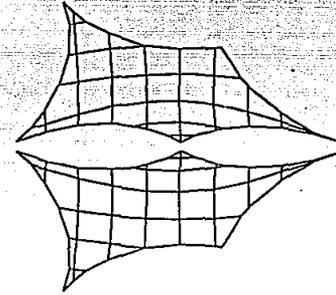
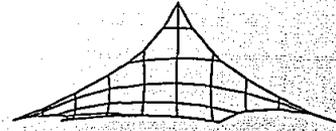
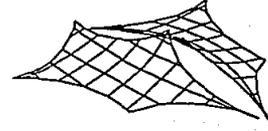
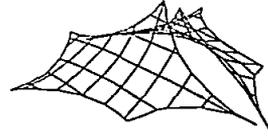
Redes mínimas. Se obtienen al diseñar la red entera con elementos de presfuerzo, considerando los cables continuos, sin nudos.

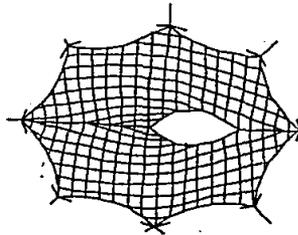
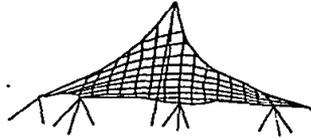
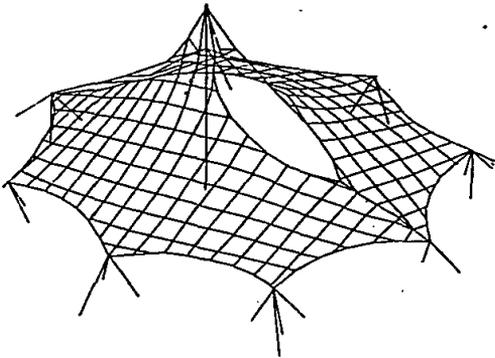




GRAFICACIONES CON MASL EN LA UCLA

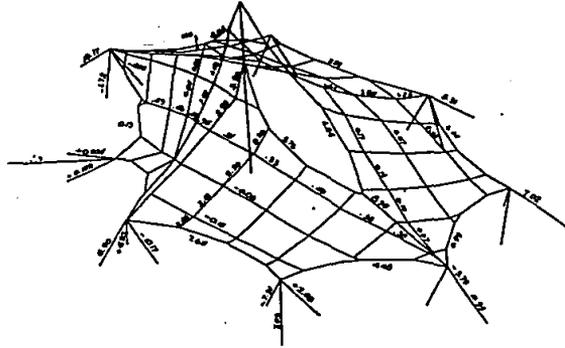
El profesor Goetz Schierle de la Universidad de California, Los Angeles, ha llevado a cabo interesantes investigaciones con el programa MASL, en el campo de las redes de cables presforzadas. Schierle fue uno de los profesores asistentes al Simposio Internacional: Estructuras Laminadas, que tuvo lugar en abril de 1983 en la Facultad de Arquitectura de la UNAM. Aquí presentó las investigaciones sobre curvaturas de alturas y bordes, en una red anticlástica y en una velaria ondulada. Las cuales ilustran ésta página. El proceso de diseño puede estudiarse en los manuales: Diseño Gráfico por Computadores, publicados por J. Mirafuentes en la UNAM.



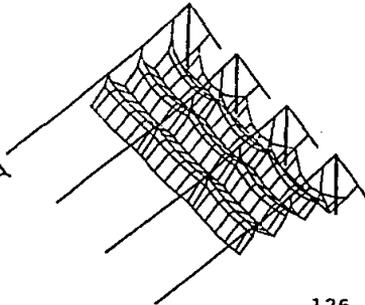
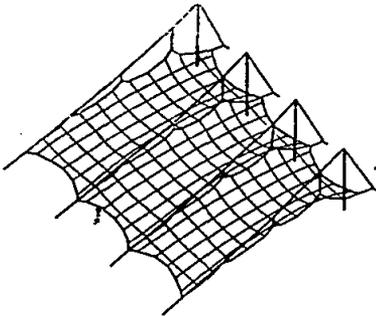


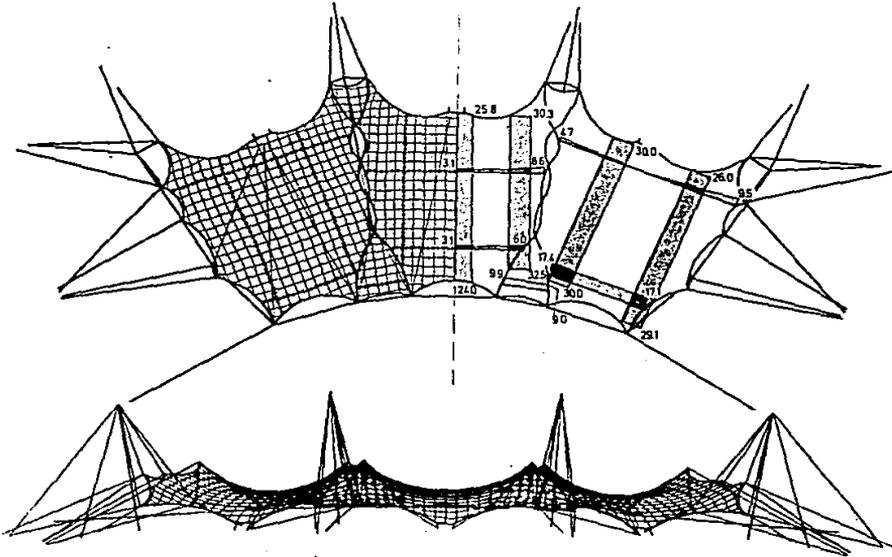
DISEÑO COMPUTARIZADO DE E. HAUG

Utilizando el programa MASL que escribí en la Universidad de California, Berkeley, Eberhard Haug hizo un estudio muy detallado del edificio experimental en Stuttgart, Vaihingen. En los diagramas graficados por computadores, se muestra la red fina en planta, alzado y perspectiva, así como una de las muchas opciones: la configuración de equilibrio de la red burda, con un cable de ancla roto, después de 40 pasos de iteración.



En la parte inferior se muestra una red de cables plegable, dibujada por el computador en el proceso de retracción de la red, en su configuración de operación y en una condición intermedia durante el plegado de la red.

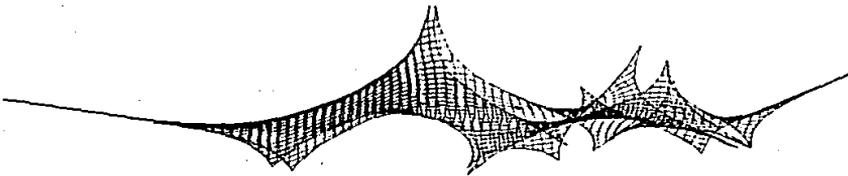




DETERMINACION DE ESFUERZOS Y GEOMETRIA

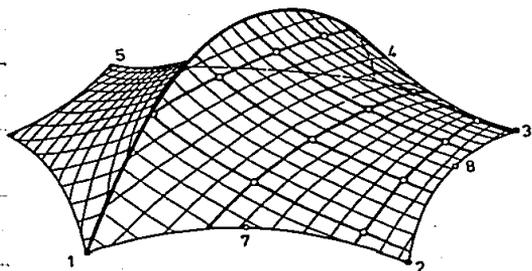
Para resolver estos problemas en la construcción de la cubierta de las Instalaciones Olímpicas en Munich, se agruparon 5 Institutos de la Universidad de Stuttgart. Los trabajos estaban dirigidos hacia el cálculo de cargas para garantizar la seguridad en la estabilidad de la cubierta. Además de dar solución a todos los problemas geométricos que se presentaban en la generación y cálculo de formas, se buscaba especialmente la determinación

del corte de las redes. Se desarrolló todo un sistema de programas para el cálculo y representación de esfuerzos y geometría con la ayuda de computadores. Las posibilidades del sistema de programas del ISD (siglas en alemán del instituto de estática y dinámica del aire y construcciones espaciales) se muestran en este diagrama, donde las franjas oscuras indican, en planta, la magnitud de los esfuerzos de tracción en los cables de las velarias del estadio.



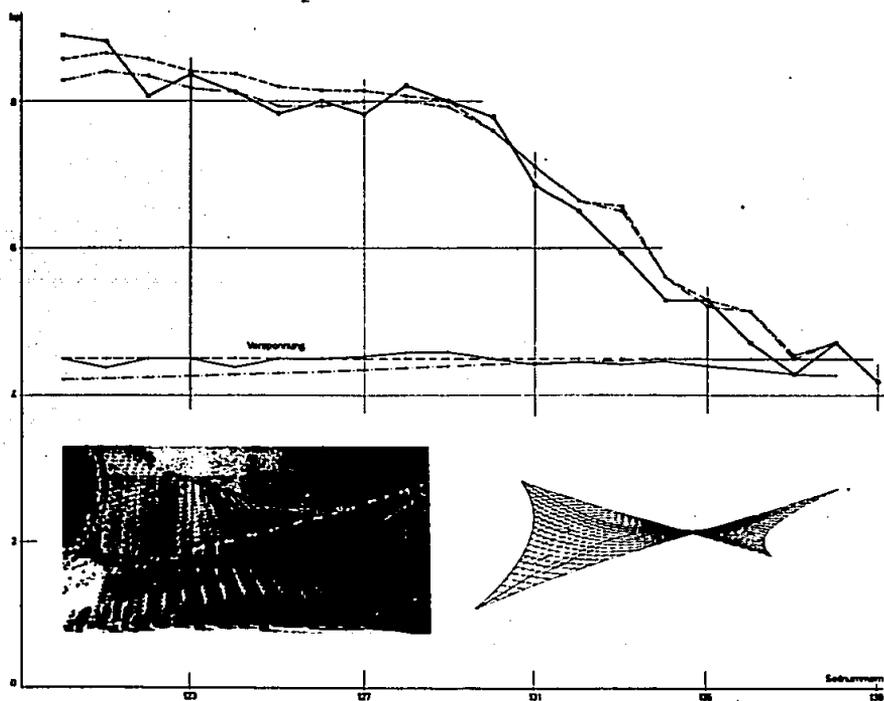
LA FORMA POR PROCEDIMIENTOS MATEMATICOS

El Profesor Argyris del Instituto de Estática y Dinámica, desarrolló un programa para la determinación de la forma geométrica por procedimientos matemáticos. El ejemplo que se presenta consiste en un red de cables apoyada en un arco, con forma de doble curvatura inversa y cables de borde.



METODOS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR ESFUERZOS

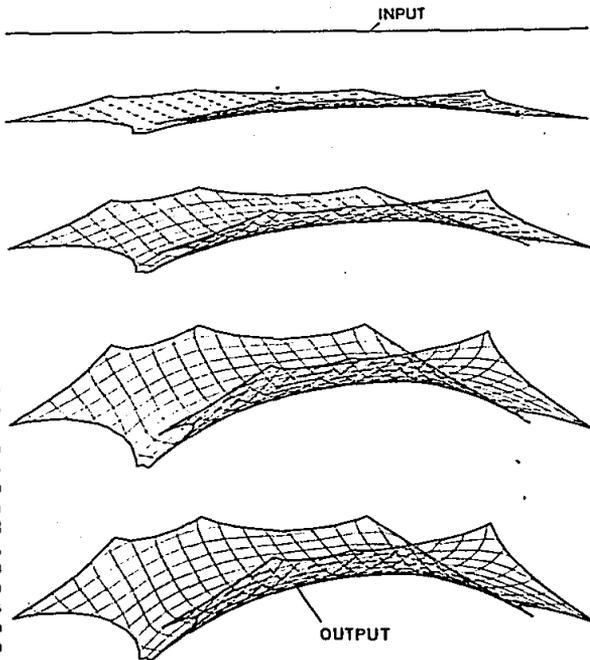
La complejidad para determinar los esfuerzos en las grandes redes de la cubierta de las Instalaciones Olímpicas en Munich era tan grande, que fue necesario comprobar la concordancia entre los diversos métodos numéricos con los experimentales. Tres institutos de la Universidad de Stuttgart se dedicaron a esta tarea: El Instituto de Estática de Modelos, el de Estática de la Construcción y de Utilización de la Geodesia en la construcción. Se construyó el modelo de un paraboloides hiperbólico con una red de cables presforzada, con 613 nudos, de 2m x 2m. En él se midieron esfuerzos y deformaciones. La gráfica del modelo físico coincide casi exactamente con las dos gráficas de los modelos matemáticos. Los modelos corregidos sirvieron de base a los programas por computadores.

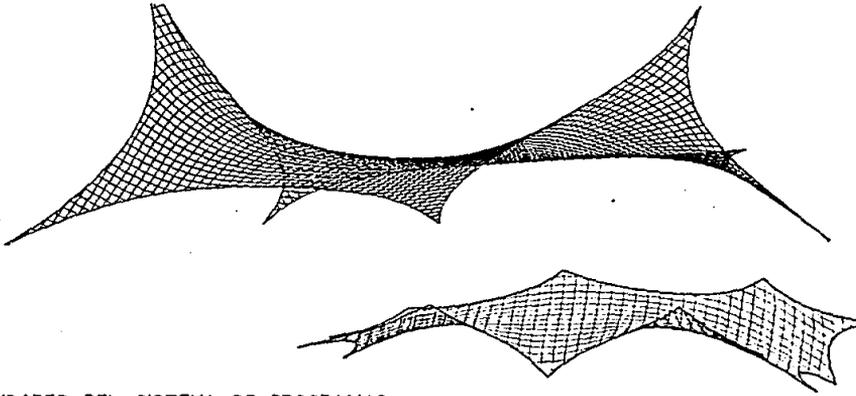


INVESTIGACION DE LA FORMA

El Prof. John Argyris del Instituto de Estática y Dinámica de la Universidad de Stuttgart, había desarrollado desde 1959 teorías básicas para el análisis de construcciones muy complicadas como aviones, puentes etc. Una de las más complicadas geometrías era la del Gimnasio Olímpico en Munich, que seguramente provocaría problemas en el corte. Usando computadores electrónicos sería posible obtener la gran precisión geométrica y estática que se requería, para definir los puntos del sistema y la longitud y tensión de cada uno de los cables. El programa diseñado por Argyris en el IED se basa en la matriz de rigidez de un sistema que describe la deformación de una red elástica y reforzada con una relación lineal entre cargas y deformaciones representadas por matrices. La matriz de rigidez de una red se construye para calcular la rigidez del elemento de las barras individuales tomando en cuenta sus conexiones cinemáticas. La influencia de las deformaciones en el estado de equilibrio de la red tensada, está dada por una rigidez geométrica suplementaria de los elementos de barra proporcionales a las fuerzas en las barras. En la geometría inicial de la red, los requerimientos de equilibrio no se conocen. El siguiente paso es pues una matriz de requerimientos de no equilibrio y se obtiene resolviendo un sistema de ecuaciones lineales formado por desviación de las matrices de carga y rigidez. Ellas deforman la red en tal forma que los requerimientos de equilibrio se conocen mejor que en la fase inicial. Cuando el proceso anterior se repite, se alcanza muy pronto una situación arbitraria muy cercana al equilibrio.

La ilustración nos muestra un módulo de la red del Estadio Olímpico de Munich, en iteraciones sucesivas, desde la red plana en la parte superior, hasta la curvatura máxima en la parte inferior.

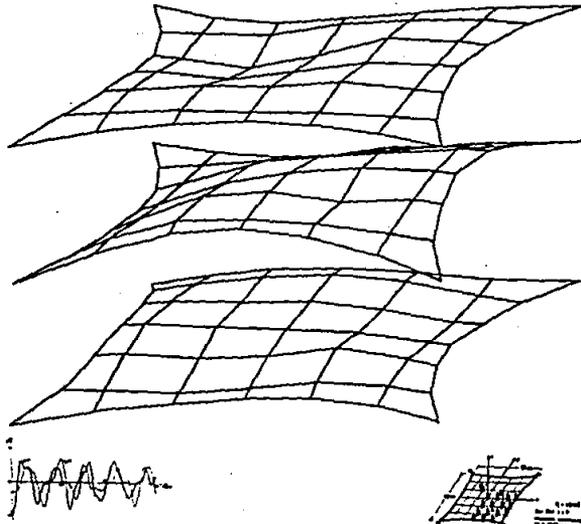




**POSIBILIDADES DEL SISTEMA DE PROGRAMAS
DEL INSTITUTO DE ESTÁTICA Y DINÁMICA.**

En la parte superior se muestra la proyección y elevación del paso de peatones y del gimnasio, en las instalaciones Olímpicas de Munich.

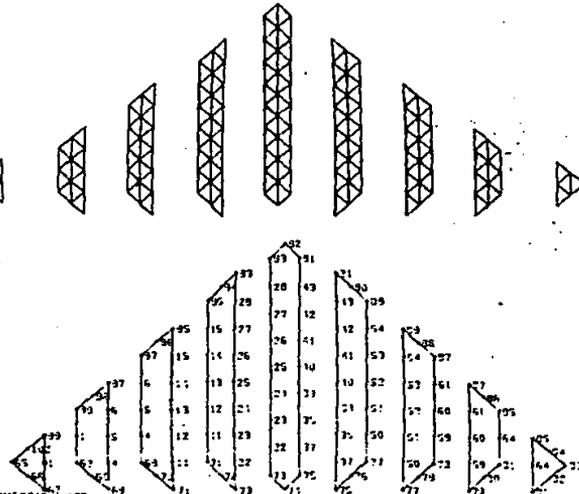
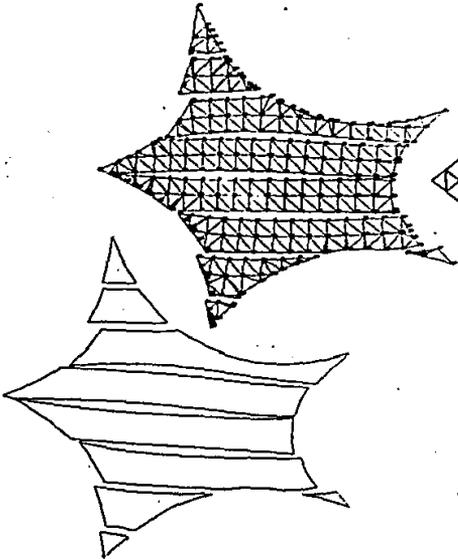
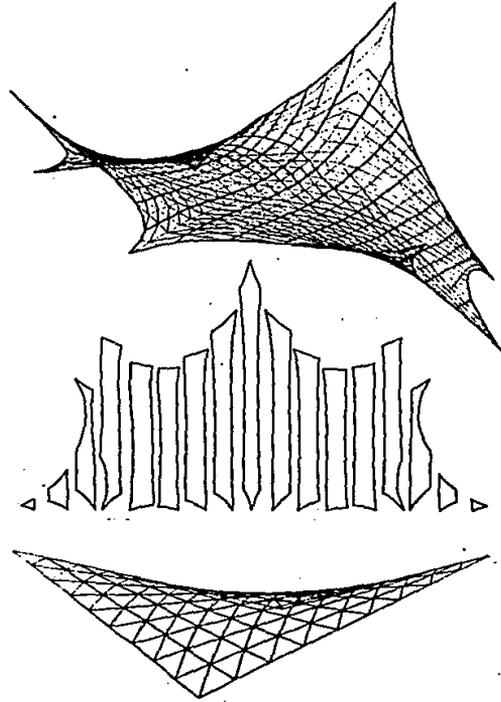
La parte inferior es la representación del proceso oscilatorio, en pantalla gráfica, del cálculo del movimiento oscilatorio que se produce en una sección de red de cables parcialmente cargada, al suprimir súbitamente la carga. (150 incógnitas).

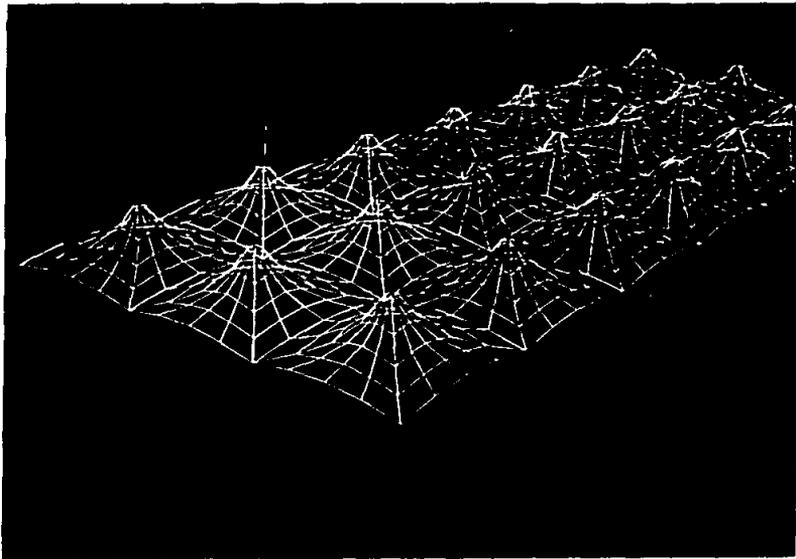


EL CORTE COMPUTARIZADO

Lo más importante de la geometría de una red es el desarrollo del "corte", esto es, las dimensiones exactas de cada uno de los cables. Con el corte en franjas de una membrana se obtienen las medidas exactas para la fabricación. Esta es la función más importante de todos los programas de computadores. Una superficie anticlástica no es desarrollable en un plano, de ahí la dificultad de ponerlas en franjas planas. Ull Hangleiter lo realiza con el programa MEMCUT. La parte principal de la aproximación es poner planas las franjas, las cuales están cubiertas por una red de mallas triangulares, bajo la condición de una distorsión mínima. Las fórmulas matemáticas básicas, la selección de la dirección de las franjas y como utilizar el programa, lo puede encontrar el lector en las ponencias del 3er. simposio internacional: Weltgespannte Flächentragwerke en 1985.

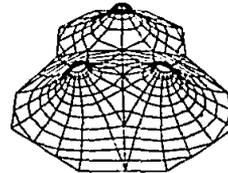
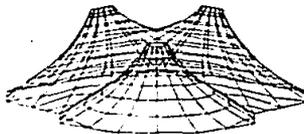
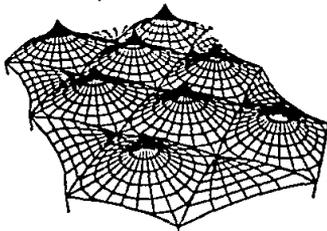
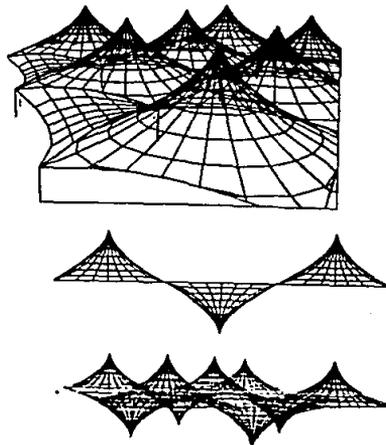
En la parte superior se ilustra el corte del desarrollo geométrico, de un modelo de membrana elemental, utilizando el método de cálculo de equilibrio. La superficie y los planos de corte fueron dibujados automáticamente.





ANÁLISIS COMPUTARIZADO POR GEIGER-BERGER

Birdair Structures ha diseñado y construido grandes estructuras con redes de cables y membranas de fibra de vidrio, entre las más espectaculares se encuentra el aeropuerto Haj en Jeddah, Saudi Arabia. En la parte superior se muestra la graficación de la estructura. Fue realizado por Skidmore, Owings and Merrill. Por primera vez, el análisis computarizado para la estructura usado por el Ing. Consultor Horst Berger de Geiger-Berger, se comparó con datos experimentales. La estructura consiste en una red de cables radial, colgada en su parte superior de cuatro cables de acero. Las graficaciones en la parte inferior muestran redes radiales, con puntos altos y bajos, soportadas por mástiles interiores en el centro. Con este sistema estructural se han construido numerosos edificios en los Estados Unidos.



CONCLUSIONES

Hasta hace pocos años, se consideraba a las velarias de acero como casos excepcionales en la construcción. Con los numerosos ejemplos que expongo en esta tesis, pretendo demostrar, como a través de la evolución de la construcción, se ha llegado a una nueva línea de desarrollo de la arquitectura moderna.

Algunos constructores consideran que el procedimiento constructivo experimental es caro y complicado y que solamente puede realizarse en laboratorios de investigación. A éstas personas va dirigida la segunda parte de este trabajo. En él se muestra la simplicidad del procedimiento experimental y la posibilidad de diseñar velarias por medio de sistemas computarizados.

La importancia que he dado a la metodología de la investigación utilizada para investigar el sistema constructivo del Pabellón Alemán en Montreal, es con el fin que, adaptada a nuestro medio, contribuya al desarrollo de nuevos métodos constructivos. Ya que esta metodología puede ser utilizada, tanto por institutos de investigación, como por constructores en la iniciativa privada y aún por el alumno de posgrado que realiza trabajos de investigación.

Es perfectamente factible, adaptar la tecnología desarrollada en la Universidad de Stuttgart, a países en desarrollo con menos recursos. Prueba de ello es la adaptación realizada en la UNAM para la construcción de obras como la Cubierta del patio central del Palacio Nacional o del estadio en Acapulco.

Esta tesis puede utilizarse como un manual de diseño pues abre la posibilidad al interesado de analizar sus proyectos de velarias, utilizando además los manuales de los programas de biblioteca sobre estructuras laminares, publicados por la UNAM.

Espero con ella haber alcanzado los siguientes objetivos:

El de informar, indicando en que consiste el sistema y como lo han interpretado los grandes constructores de nuestro tiempo, con sus errores y aciertos.

Enseñar la técnica, mostrando como se puede realizar una obra.

Motivar al estudiante de arquitectura a utilizar las velarias de acero, para incrementar su capacidad de diseño.

Pero con sólo despertar el interés del lector en éstos nuevos desarrollos en la construcción, este trabajo no habrá sido en vano.

BIBLIOGRAFIA

Born, Joachim: Rippenkuppeln, Faltwerke, Haengedaecher. Duesseldorf, Werner, 1964, 144 p. Vol. 3 , C6pulas reticuladas, Losas prismaticas y Cubiertas colgantes.

Boys, C.V.: Soap Bubbles, their colors and forces. New York, Dover Publications, Inc., 1959, 192 p. Membranas de agua Jabonosa, sus colores y las fuerzas que las moldean.

Bubner, Ewald y otros: Minimal Konstruktionen. Colonia, Rudolf Mueller, 1977, 327 p. Ponencias del Simposio de marzo 77 en la Universidad de Essen, RFA.

Drew, Philip: Frei Otto, Form und Konstruktion. Stuttgart, Gerd Hatje, 1976, 158 p. Síntesis de los trabajos realizados por Frei Otto.

Esquillan, N. y Y. Sallard: Hanging Roofs. Amsterdam, North Holland Publishing Co., 1963, 335 p. Ponencias del Coloquio del IASS en cubiertas colgantes, cascarones y laminares.

Graefe, Rainer: Vela Erunt. Mainz , Philipp Von Zabern, 1979, 221 p. Tesis doctoral, Investigación arqueológica, histórica y construcción -ligera.

Medlin, R. Larry: Experimental Tension Structures. St. Louis Missouri, Washington University, 1968, 38 p. Investigaciones sobre membranas y edificios colgantes con redes de cables.

Minke, Gernot: Zur Effizienz von Tragwerken. Stuttgart, Karl Kraemer, 1970, 57 p. Eficiencia de las estructuras, teoría, elementos, descripción.

Mirafuentes, José: Estructuras con redes de cables. México, UNAM, 1972, 69 p. Antologías sobre estructuras laminares ligeras, membranas y redes de cables.

Otto, Frei: Cubiertas Colgantes. Barcelona, Labor, 1962, 170 p. Original: "Das Haengende Dach", tesis doctoral, desarrollo de membranas y redes

Otto, Frei: Zugbeanspruchte Konstruktionen Vol. 1. Berlin, Ullstein, 1962, 320 p. Construcciones neumáticas, cálculo de membranas por Rudolf Trostel

Otto, Frei: Zugbeanspruchte Konstruktionen Vol. 2 . Berlin, Ullstein, 1962, 171 p. Construcciones en tracción, cálculo de cables y redes por Friederich Schleyer

Otto, Frei: IL 16 Zelte, Tents 1. Stuttgart, IL Redaktion, 1976, 150 p. Antología con contribuciones de Bird, Bubner, Burkhardt, Gutbrod y Schilling.

Roland, Conrad: Frei Otto: Spannweiten. Berlin, Ullstein, 1965, 168 p. Un panorama muy completo de las obras de Frei Otto hasta 1965.

Salvadori, Mario : Estructuras para arquitectos. Buenos Aires, La Isla, 1966, 374 p. Conceptos generales, estructuras en tracción, cables y membranas.

Sarger, Rene: Structures Nouvelles en Architecture. Paris, Musée des Techniques, 1965, 25 p. Publicación del Conservatoire National des Arts et Métiers, velarias.

Siegel, Curt: Strukturformen der Modernen Architektur. Muenchen, Georg D.W. Callwey, 1960, 308 p. Estructuras en general, cascarones, redes y tiendas especialmente.

Thompson, D'Arcy : On Growth and Form. London, Cambridge University Press, 1961, 346 p. La eficiencia mecánica de las construcciones naturales, esqueletos, células.