



Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Arquitectura

**Fabricación e industrialización de sistemas estructurales con base en nodos y barras que sean elementos tipo y modulares para la construcción de cubiertas desmontables con claro y curvatura gaussiana variable.  
Construcción de un prototipo.**

PROYECTO PAPIIT IN 401502

Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas

**Informe de la investigación que para obtener el título de arquitecto presentan:**

Fernanda Sofía Gómez Loyo  
Eric Valdez Olmedo

**Sinodales**

Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas  
Arq. Rubén Camacho Flores  
Arq. Ángel Rojas Hoyo



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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 esta 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.

A nuestros Padres  
A nuestra Familia  
A nuestros Amigos  
A la Universidad  
y a todos los Solidarios

Gracias

Este trabajo esta dedicado a todas las personas con quien compartimos en el Laboratorio de Estructuras  
todo este tiempo.

## INDICE

|                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Introducción.....                                                                        | 1         |
| <b>1. Protocolo.....</b>                                                                 | <b>3</b>  |
| 1.1 Antecedentes del proyecto.....                                                       | 3         |
| 1.2 Estado del arte de la temática.....                                                  | 3         |
| 1.3 Objetivos.....                                                                       | 4         |
| 1.4 Hipótesis del proyecto.....                                                          | 5         |
| 1.5 Metodología del proyecto.....                                                        | 5         |
| <b>2. Orígenes de las estructuras de nodos y barras.....</b>                             | <b>6</b>  |
| 2.1 Orígenes.....                                                                        | 6         |
| 2.2 Armaduras en cubiertas.....                                                          | 8         |
| 2.3 Armaduras equivalentes a la viga y al arco para puentes.....                         | 12        |
| 2.4 Marcos rígidos.....                                                                  | 16        |
| 2.5 Marcos espaciales.....                                                               | 17        |
| <b>3. Geometría estructural.....</b>                                                     | <b>25</b> |
| 3.1 Antecedentes.....                                                                    | 26        |
| 3.2 Clasificación de las superficies por su forma.....                                   | 28        |
| 3.3 Superficies de traslación.....                                                       | 29        |
| 3.4 Programa GEOG.....                                                                   | 35        |
| 3.5 Sistema de nodos y barras para cascarones reticulados de traslación.....             | 37        |
| 3.5.1 Barras.....                                                                        | 38        |
| 3.5.2 Nodo.....                                                                          | 39        |
| 3.5.3 Diagonales.....                                                                    | 44        |
| 3.5.4 Borde.....                                                                         | 44        |
| 3.5.5 Propuestas constructivas de rigidización para problemas específicos.....           | 47        |
| 3.5.6 Cubierta.....                                                                      | 48        |
| 3.5.7 Fabricación y montaje.....                                                         | 49        |
| <b>4. Aplicaciones del sistema en cubiertas para patios de edificios históricos.....</b> | <b>50</b> |
| 4.1 Anteproyecto: Cubierta para la Antigua Escuela de Jurisprudencia.....                | 50        |
| 4.2 Anteproyecto: Cubierta para el Colegio de la Paz, Vizcaínas.....                     | 53        |
| 4.3 Propuesta constructiva de ambos anteproyectos.....                                   | 55        |
| 4.4 Metodología de análisis y diseño estructural.....                                    | 56        |
| 4.4.1 Descripción del sistema estructural.....                                           | 56        |
| 4.4.2 Proceso de análisis y diseño estructural.....                                      | 56        |
| <b>5. Construcción de prototipos.....</b>                                                | <b>59</b> |
| 5.1 Diseño y fabricación de piezas.....                                                  | 59        |

---

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1.1 Nodos.....                                                          | 60        |
| 5.1.2 Conectores y barras.....                                            | 62        |
| 5.1.3 Bases.....                                                          | 64        |
| 5.2 Prototipo 01.....                                                     | 66        |
| 5.2.1 Determinación de la forma de modelo sinclástico y anticlástico..... | 66        |
| 5.2.2 Montaje.....                                                        | 68        |
| 5.3 Prototipo 02.....                                                     | 69        |
| 5.3.1 Determinación de la forma de modelo sinclástico y anticlástico..... | 69        |
| 5.3.2 Montaje de modelo sinclástico.....                                  | 71        |
| 5.3.3 Montaje de modelo anticlástico.....                                 | 73        |
| <b>6. Fabricación e industrialización del sistema.....</b>                | <b>75</b> |
| 6.1 Modunam III.....                                                      | 75        |
| 6.2 Proceso de fabricación por fundición en acero.....                    | 78        |
| 6.3 Proceso con perfiles extruidos y troqueles.....                       | 79        |
| 6.4 Proceso por corte de placa con uniones soldadas.....                  | 82        |
| <b>7. Conclusiones.....</b>                                               | <b>84</b> |
| <b>Referencias.....</b>                                                   | <b>86</b> |
| <b>Anexo 01: Planos de taller del prototipo Modunam III</b>               |           |

## INTRODUCCIÓN

Es la Universidad semillero de nuevos profesionistas y la Facultad de Arquitectura cantera de aquellos que hemos decidido dedicar nuestro tiempo a dar solución a los hechos humanos habitables, en ella encontramos los elementos necesarios para afrontar los retos que ofrece el campo profesional, en un compromiso firme con nuestra realidad social, tan plural y controvertida como nuestra identidad. Si bien la arquitectura es *praxis*, no podría entenderse sin tener una base sólida que la provea del conocimiento adecuado a las nuevas tecnologías que demanda la época actual, por lo tanto, dentro de esta pluralidad científica y humanista que se nos ofrece, la investigación juega un papel preponderante al ser cuna y florecimiento del conocimiento, en pro de brindar mejores soluciones a las necesidades de habitabilidad del ser humano.

El Laboratorio de Estructuras esta dedicado desde el año de 1995 al desarrollo de proyectos de investigación en el área de tecnología. Durante estos 11 años se han realizado diversos proyectos a través de programas de apoyo que ofrece el CONACYT y el programa PAPIIT de la misma Universidad, además de proyectos externos a través del Departamento de Vinculación de la Facultad de Arquitectura. Cabe destacar que el Laboratorio obtuvo el 1ro. y 2do. lugares del concurso para cubiertas de patios en edificios inmuebles de la UNAM, y fue así como se diseñó y construyó la cubierta velaria para el patio central del Palacio de Minería.

El presente trabajo se muestra con la finalidad de obtener el grado de arquitectos, realizando un informe de nuestra participación en el proyecto de investigación PAPIIT IN 401502 "Fabricación e industrialización de sistemas estructurales con base en nodos y barras que sean elementos tipo y modulares para la construcción de cubiertas desmontables de claro y curvatura gaussiana variable. Construcción de un prototipo", que fué aprobado por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico iniciando en el año 2003, con una duración de tres años. Este proyecto se desarrolló en el Laboratorio de Estructuras del Posgrado de la Facultad de Arquitectura, sede del seminario permanente de investigación sobre Geometría Estructural y Cubiertas Ligeras.

El proyecto de investigación se realizó con un grupo interdisciplinario entre las facultades de Arquitectura e Ingeniería, conformado por el doctor Juan Gerardo Oliva Salinas como responsable, el ingeniero Lorenzo Miranda Cordero como corresponsable y un conjunto de colaboradores alumnos de ambas facultades y del que formamos parte.

Nuestro objetivo, al participar en este proyecto, fue involucrarnos en el desarrollo de la investigación relacionada con el avance de las nuevas tecnologías de la construcción de cubiertas ligeras, para ampliar nuestros conocimientos sobre el tema y aplicar los obtenidos durante la carrera.

Nuestras actividades como becarios fueron desde la generación de propuestas de tipo conceptual, técnico o constructivo para brindar soluciones al proyecto, hasta la supervisión y coordinación de los trabajos propuestos. Dos veces a la semana participamos en una reunión con todos los integrantes del laboratorio, en la cual revisamos el avance del proyecto y de cada participante; en estas reuniones cada quien manifiesta sus aportaciones personales, lo que integra y amplía el conocimiento en conjunto.

El objetivo del proyecto fue generar una innovación tecnológica susceptible de ser patentada y que brinde un servicio a la comunidad universitaria y a la sociedad, a partir de diseñar y fabricar un sistema estructural modular para la construcción de cubiertas desmontables, de geometrías y tamaños distintos, con la

capacidad de adaptarse a diversos usos como: exposiciones temporales, módulos informativos, aulas temporales, centros de acopio, etc.

El presente reporte describe el avance del proyecto de investigación desde un enfoque arquitectónico. En primer lugar, se describen de forma general los antecedentes sobre los sistemas estructurales de nodos y barras y, de manera particular, los cascarones reticulados de traslación, tema desarrollado por el doctor Oliva para su tesis doctoral en la Universidad de Stuttgart en Alemania, con la que obtuvo una patente por el diseño de un nodo universal para la construcción de cubiertas. En segundo lugar, se presentan los antecedentes y conceptos generales sobre geometría estructural y su aplicación a la concepción, diseño y construcción de cubiertas ligeras. Posteriormente, se mencionan las posibilidades de aplicación de un sistema específico, ejemplificado en anteproyectos de cubiertas para edificios históricos y los modelos a escala 1:1 realizados para hacer pruebas geométricas y del funcionamiento de las piezas del sistema. Finalmente, presentamos el diseño del prototipo al que llamamos Modunam III, que actualmente se encuentra en proceso de construcción.

Nuestra colaboración como becarios de este proyecto de investigación, a lo largo de estos tres años, ha sido ininterrumpida y hemos colaborado en todas las actividades llevadas a cabo inherentes al mismo. Este documento es la compilación del trabajo realizado, resultado de la suma de esfuerzos de un grupo consolidado que brinda un servicio a través de la investigación en beneficio de la Universidad, de la sociedad y de México.

Ciudad Universitaria, mayo del 2006

Fernanda Sofía Gómez Loyo  
Eric Valdez Olmedo



## 1. PROTOCOLO

### 1.1 Antecedentes del proyecto

En el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Arquitectura de la UNAM se han desarrollado a la fecha y desde el año 1995 cuatro proyectos de investigación PAPIIT y uno CONACYT que a su vez han producido innovaciones tecnológicas como son el MODUNAM I, MODUNAM II (1ª y 2ª etapa) y el panel TIES. Estos proyectos han permitido el fortalecimiento del seminario permanente de investigación sobre geometría estructural aplicada al diseño arquitectónico.

También han surgido proyectos de tecnología aplicada a la arquitectura, como es el MODUTEATRO, el anteproyecto para el edificio que albergaría al Telescopio Infrarrojo Mexicano de Nueva Tecnología, en Baja California o bien diversas cubiertas para cubrir patios de edificios históricos, como es el Palacio de Minería, ubicado en el centro histórico de la Ciudad de México.

Para esta solicitud de proyecto PAPIIT, propusimos conformar un grupo bidisciplinario entre las facultades de arquitectura y de Ingeniería, para industrializar y construir prototipos de cubiertas con sistemas de nodos y barras que permitan que las cubiertas puedan variar su geometría con superficies con curvaturas gaussianas positivas, negativas o nulas, utilizando un solo tipo de nodos y barras de longitud constante. Estas metas se analizaron por el responsable de este proyecto desde su disertación de doctorado en la Universidad de Stuttgart Alemania, en el año de 1982. Consideramos que las experiencias acumuladas en Modunam I y Modunam II, y así como en otros proyectos en los que hemos generado innovaciones tecnológicas, nos permitirán hacer nuevas propuestas de cubrir espacios con elementos tipo modulares que brindaran a la UNAM la posibilidad de contar con nuevas opciones de cubiertas desmontables aplicadas a las muchas actividades varía que se desarrollan en la misma, como son: ferias, exposiciones, conciertos, aulas provisionales, etc.

### 1.2 Estado del arte de la temática

Siendo el responsable de este proyecto miembro activo de la "International Association for Shell and Spatial Structure" (IASS), el mismo ha tenido oportunidad de participar cada año en los congresos internacionales que se llevan a cabo en diferentes países de los cinco continentes, dentro del grupo de trabajo bajo el tema de Morfología Estructural y donde se presentan los avances e innovaciones tecnológicas más importantes en lo que se refiere al diseño y construcción de estructuras. En estos foros se han presentado las innovaciones tecnológicas que el doctor Oliva Salinas ha encabezado en los proyectos antes descritos.

La participación en estos foros permite conocer al responsable del proyecto el estado actual del arte en lo que se refiere al desarrollo y diseño de sistemas estructurales nacional e internacionalmente. Por otro lado en septiembre del 2001, el doctor Oliva Salinas fue invitado como conferencista magistral al congreso anual de la Confederación de Escuelas y facultades de Arquitectura (CLEFA) que se celebró en la ciudad de Sao Paulo, Brasil. Participo en el 2do. Congreso Latinoamericano sobre Tensoestructuras en Caracas Venezuela en 2005, en donde también tuvo oportunidad de exponer y observar los avances tecnológicos a la fecha desarrollados en América Latina y el Caribe.

### 1.3 Objetivos

- Diseñar y fabricar elementos tipo y modulares para construir cubiertas ligeras de claros y curvaturas gaussianas variables.
- Construir con ese sistema tipo y modular un prototipo para cubrir una superficie entre 200 y 300 m<sup>2</sup>, con el cual se muestren por lo menos dos alternativas formales diferentes.
- Explorar la posibilidad de que los elementos tipo y modulares desarrollados propuestos, puedan tener una aplicación mayor en otros campos de la arquitectura y de la ingeniería como pueden ser en cimentaciones y muros de contención, entre otras posibles aplicaciones.
- Generar una innovación tecnológica susceptible de ser patentada y que brinde un servicio a la comunidad universitaria y así como a la sociedad.
- Impulsar el grupo de investigación bidisciplinario entre las facultades de Arquitectura y de Ingeniería de la UNAM y fortalecer el seminario permanente de investigación sobre geometría estructural de la Facultad de Arquitectura.
- Continuar con la formación de jóvenes investigadores y con la generación de nuevo conocimiento en el área tecnológica de la Arquitectura y la Ingeniería.
- Fortalecer la infraestructura de equipo del Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Arquitectura de la UNAM.
- Diseño y construcción de elementos tipo y modulares para elaborar cubiertas desmontables multiusos y construcción de un prototipo donde se apliquen dichos elementos y ejemplifique dos alternativas formales diferentes.
- Detectar posibles aplicaciones de los elementos tipo y modulares en otras áreas de la arquitectura y de la ingeniería como pueden ser cimentaciones o muros de contención, entre otras.
- Brindar durante tres años al seminario de investigación permanente sobre geometría estructural, la posibilidad de continuar generando nuevo conocimiento en el área tecnológica de la arquitectura y la Ingeniería, así como continuar formando jóvenes investigadores dentro de esa misma área.
- Brindar a la sociedad un servicio a través de la investigación que se genera en la UNAM.

#### 1.4 Hipótesis del proyecto

Mediante un adecuado control de la geometría en el diseño y construcción de cubiertas desmontables es posible cubrir espacios con elementos tipo y modulares con claros y formas variables esta versatilidad en el claro y en la forma permitirá dar respuesta y solución a la necesidad constante que tiene la UNAM de cubrir espacios de manera temporal y permanente y en diferentes lugares para llevar a cabo las diversas funciones propias de la misma Universidad.

#### 1.5 Metodología del proyecto

El trabajo dentro del seminario permanente de investigación sobre geometría estructural que llevamos a cabo diariamente en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, se desarrolla de la siguiente manera. Todos los lunes como inicio de la semana tenemos una junta con todos los participantes presentes, donde se exponen dudas, problemas, avances y todo lo relacionado con el desarrollo del proyecto. El trabajo se encuentra programado y previamente dividido entre los diferentes participantes, quienes a su vez son apoyados por alumnos que cumplen con su servicio social y con la práctica profesional supervisada. También se fortalece en estos grupos con alumnos que llevan a cabo su estancia durante los dos meses que corresponden al verano de la investigación científica, convocado por el CONACYT cada año. El Laboratorio de Estructuras recibe de dos a tres alumnos de diferentes instituciones del país anualmente. Ocasionalmente hemos contado con alumnos de la Universidad Politécnica de Aquisgrán, Alemania con base al Convenio de Intercambio Académico que tiene la UNAM con dicha institución. Diariamente el responsable del proyecto está al pendiente del trabajo que se desarrolla en el Laboratorio de Estructuras, resolviendo dudas y discutiendo con los participantes alternativas de propuestas. El corresponsable con sitio en la Facultad de Ingeniería a menudo es consultado entre la semana y asiste al sitio de trabajo o al lugar que se requiera para supervisar avances y la fabricación de elementos.

Con la metodología descrita hemos culminado exitosamente los proyectos a la fecha desarrollados por este seminario permanente de investigación.

## 2. Desarrollo histórico de los sistemas estructurales de nodos y barras<sup>1</sup>.

Una búsqueda constante en la historia de la arquitectura ha sido lograr claros cada vez más grandes, aplicando el desarrollo de las tecnologías y materiales del momento histórico. Hasta mediados del siglo XVIII, los materiales usados en las construcciones de gran escala eran piedra, madera y tabique. La piedra y el tabique son materiales resistentes a la compresión pero débiles a la tensión, mientras que la madera es resistente a la tensión pero tiene el inconveniente de ser flamable y de no tener un comportamiento uniforme. Con estos elementos se lograron construcciones como la cúpula de Santa María de las Flores, en Florencia (1420-1434), con un diámetro aproximado de 41 m de base, y la de la Basílica de San Pedro, en Roma (1588-1593) con un diámetro de 43 m, (Fig.2.1).

El desarrollo de nuevos materiales capaces de resistir la tensión necesaria para lograr claros más grandes planteaba la exigencia de un mayor entendimiento de las acciones estructurales. Hasta el siglo XIX había poco entendimiento de cómo trabajaban los sistemas de nodos y barras, por una lado porque no existían los elementos formales para el análisis y, por otro lado, debido a que se habían desarrollado pocos materiales resistentes a la tensión. Es a partir de esta fecha con la aplicación del acero<sup>2</sup> que se desarrollan nuevos sistemas estructurales de grandes claros.



Fig. 2.1 Vista interior de la cúpula de la Basílica de San Pedro, Roma, 1506-1626. Fuente: [www.encyclopedia.us.es](http://www.encyclopedia.us.es)

Estos sistemas han sido utilizados como una manera eficiente para librar grandes claros, más grandes que los que se habrían logrado con un solo elemento sólido.

### 2.1 Orígenes.

Ninguno de los dos principios estructurales de estos sistemas de nodos y barras, que son la triangulación y el uso de nodos rígidos, están fácilmente a la vista en la naturaleza como para permitir copiarlos. Hizo falta un largo proceso de prueba y error para lograr su desarrollo como sistema estructural.

El desarrollo de sistemas de viga-columna que utilizaran nodos rígidos capaces de transmitir los momentos flexionantes fue pospuesto durante mucho tiempo debido a que los materiales de construcción no garantizaban la rigidez necesaria del nudo, y porque se utilizaban otros métodos para estabilizar esas estructuras, por ejemplo rellenando el marco con muro.

Los primeros nodos (uniones entre elementos estructurales) que se registran en la historia fueron amarres con lazos entre barras de madera, sin embargo, no eran totalmente rígidos ni capaces de transmitir los esfuerzos eficientemente (Fig. 2.2 y 2.3).

<sup>1</sup> Este capítulo está basado en la traducción del capítulo 9 del libro *Developments in structural form* de Rowland Mainstone.

<sup>2</sup> En 1855, Henry Bessemer (1813-1898) patentó un proceso para producir acero a más bajo costo mediante la descarbonización del hierro fundido a través de la inyección de oxígeno.



Fig. 2.2 Construcción tribal formada por amarres de varas en África. Fuente: Alejandro Bacón, Arquitectura Textil.



Fig. 2.3 Esqueleto de una vivienda primitiva. Fuente: [www.apalice.org](http://www.apalice.org)

Con el tiempo estos nodos fueron evolucionando, sobre todo en la industria de la construcción de barcos y muebles, cada vez con una mayor capacidad de transmitir los esfuerzos. (Fig. 2.4)

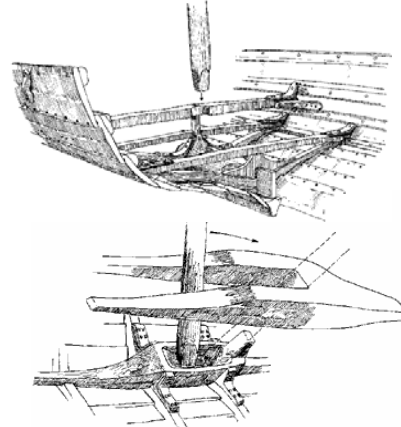


Fig. 2.4 Detalles del sistema de unión del mástil de un barco antiguo de velas. Fuente: [www.gallery.bcentral.com](http://www.gallery.bcentral.com)

El uso de estructuras triangulares también fue obstaculizado por los problemas de unión entre sus elementos, aunque en menor grado porque en el triángulo los nodos pueden no ser totalmente rígidos pues, por su geometría, es una figura estable. Esta idea de triangular se desarrolla también en la construcción de barcos y de muebles, en los que no era posible solucionar los problemas de estabilidad mediante métodos alternativos, como el relleno del marco con muros de soporte.

Los muebles egipcios de la XVIII dinastía (S. XVI a XIV a.C.) son algunos ejemplos de estos primeros sistemas estructurales. (Fig. 2.5) Pero las conexiones, en este caso, estaban hechas de tal manera que era poco seguro que el nodo resistiera la tensión que debía transmitir. Es probable que sólo en las estructuras que recibían las velas de los barcos las diagonales fueran efectivas al trabajo de tensión.

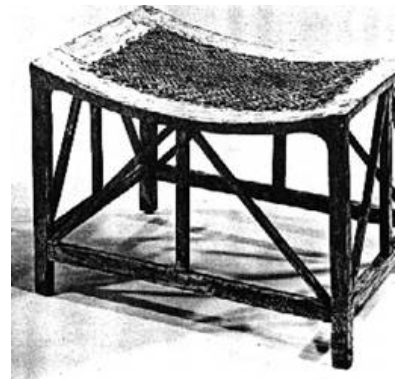


Fig. 2.5 Mueble egipcio formado por barras de madera. Fuente: [www.kingtutshop.com](http://www.kingtutshop.com)

Una armadura capaz de librar un gran claro, sin ejercer un empuje

horizontal a los apoyos (coceo), depende de que los nodos sean capaces de transmitir y resistir los esfuerzos de tensión a los elementos que toman dicho empuje. Las estructuras con nodos capaces de transmitir los esfuerzos de tensión no aparecen sino hasta el surgimiento de la República de Roma.

**2.2 Armaduras en cubiertas.**

La primera descripción de lo que parece ser un techo de armadura, construido a partir de dos barras diagonales unidas por una barra horizontal a tensión, es el de la iglesia del monasterio de Santa Catarina en el monte Sinaí, Egipto. (Fig. 2.6)



Fig. 2.6 Estructura de la cubierta de la Iglesia del Monte Sinaí. Fuente: Rowland Mainstone, *Developments in structural form*.

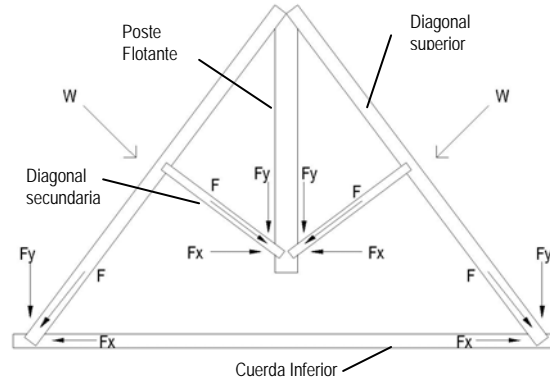


Fig. 2.7 Esquema del funcionamiento de la estructura. Fuente: Autores

Al parecer los techos de las grandes basílicas romanas y de la era cristiana que no tenían forma de bóveda eran construidos de esta manera.

En esta estructura los extremos del tirante horizontal (la cuerda inferior) están ensamblados con las barras diagonales superiores, de modo que la componente horizontal de la carga diagonal es tomada por el tirante horizontal, transmitiendo a los apoyos solamente la componente vertical. Además de la configuración de armadura básica triangular, existe un sistema secundario que consiste en un poste central que se une machimbrado a unas barras diagonales secundarias que trabajan a compresión y que, a su vez, están unidas a las barras diagonales superiores. El poste central no descansa sobre la cuerda inferior, termina antes, y funciona como un tirante a tensión que soporta los extremos de las barras inclinadas.

Estas barras secundarias proporcionan un apoyo intermedio a las barras diagonales superiores para disminuir la flexión. El que el poste central sea flotante es para no transmitir carga a la cuerda inferior (lo que le induce flexión). De ese modo las diagonales secundarias transmiten una carga inclinada, cuya componente horizontal se equilibra con la del otro lado, mientras que la componente vertical sólo le produce tensión al poste. (Fig. 2.7)

Las únicas armaduras de este estilo que sobrevivieron el tiempo suficiente para que hubiese un registro de su existencia (antes de ser demolidas por Urbano VIII, para convertirlos en cañones a principios del siglo XVII)

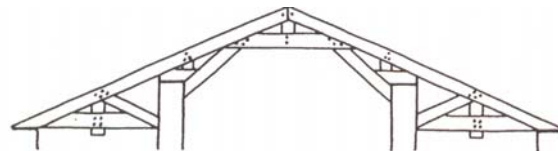


Fig. 2.8 Diagrama de una armadura del Panteón de Agripa. Fuente: Rowland Mainstone, *ibidem*.



fueron las del pórtico del Panteón de Agripa, en Roma, construidas a principios del siglo II d.C. Los diagramas de Palladio indican la forma general que tenían. (Fig. 2.8)

Parece ser que tanto las barras diagonales como las cuerdas horizontales y las barras diagonales secundarias eran fabricadas de placas de bronce y remachadas entre sí. Aunque no es evidente como estaban interconectadas, en todo caso se supone que la interconexión era bastante rígida al menos en los casos cuyos miembros estaban sujetos a compresión.

Sin embargo, en estas armaduras del Panteón había una falta de claridad en el funcionamiento estructural de cada elemento, comparado con las armaduras del Monasterio de Santa Catarina. Pero las fallas son mínimas si se toma en cuenta que probablemente había poca o ninguna experiencia previa en la construcción utilizando metales.

Más tarde, las armaduras de los techos en Italia y en el Imperio Bizantino oriental siguieron muy de cerca el modelo de Santa Catarina. Se sabe que Palladio utilizaba muy frecuentemente una forma muy parecida (Fig. 2.9). Sin embargo, este modelo resultó menos apropiado y con menor posibilidad de aplicación en el diseño de los techos con mayor pendiente en las grandes iglesias y salas construidas en Europa noroccidental a partir del siglo XI.



Fig. 2.9 Dibujo de una armadura del Teatro Olímpico de Vicenza. Siglo XIV. Fuentes: [intranet.arc.miami.edu](http://intranet.arc.miami.edu) y Rowland Mainstone, *ibidem*.

Los techos más antiguos que sobreviven, que no son cubiertas de mampostería, son los que emplean una viga horizontal (cuerda inferior) como soporte de las barras diagonales. La forma resultante es parecida a una armadura y, hasta cierto punto, funciona como tal, aunque no fue concebida con ese propósito. A diferencia de techos que cubría un cañón apoyado con pares de diagonales reforzadas con una cierta cantidad de soportes para evitar el pandeo, esta forma actuaba más como arco que como armadura, pues le inducía coqueo a los apoyos. (Fig. 2.10)

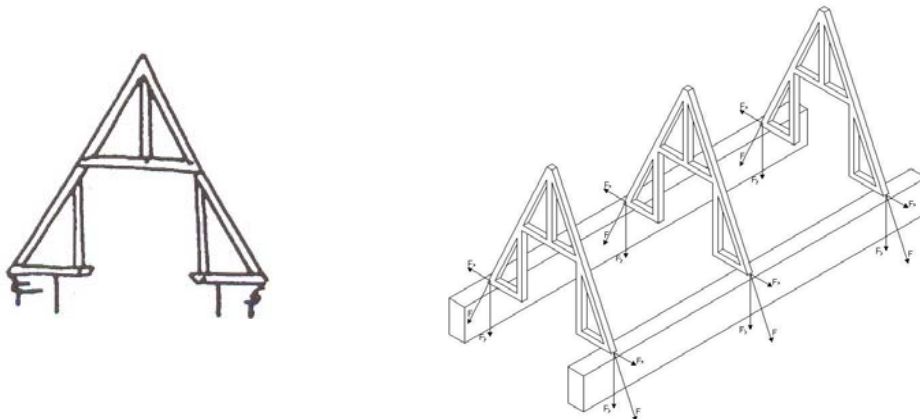


Fig. 2.10 A la izquierda, un dibujo tomado del carnet de croquis que dejó el maestro de obra y diseñador francés Villard de Honnecourt (siglo XIII), en el que describe las técnicas de construcción de la época. A la derecha, un diagrama de fuerzas de este tipo de armadura que fue utilizado en algunas catedrales góticas. Fuente: Autores

En el siglo XIII, se diseñó una forma más desarrollada de armadura, en la que la barra horizontal inferior era tensionada deliberadamente con el empuje horizontal de las diagonales principales, con el objeto de contrarrestar la flexión que le producen los postes verticales apoyados en ella y su propio peso. Un ejemplo son las armaduras utilizadas en el coro y la nave principal de Notre Dame en París, Francia. (Fig. 2.11)

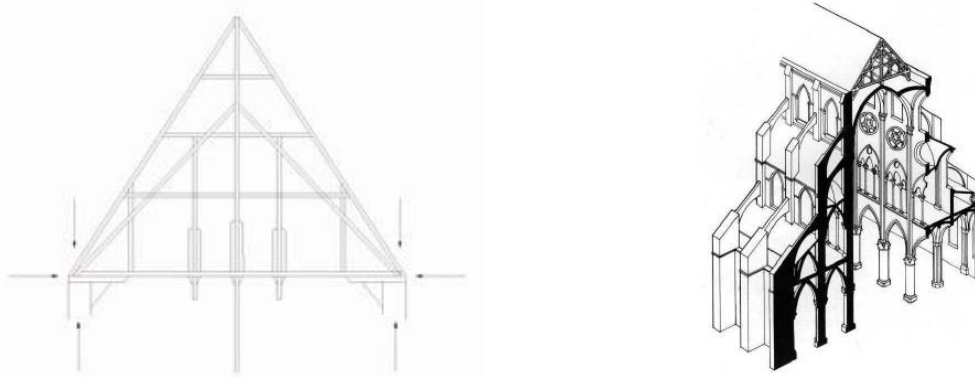


Fig. 2.11 Dibujo de la armadura de la catedral Notre Dame, París. Fuentes: Autores y [www.bc.edu](http://www.bc.edu)

A principios del siglo XV, Hugh Herland desarrolló una singular innovación en Inglaterra, la armadura "Hammerbeam". Esta armadura de madera se utilizó para librar todo el ancho de la Sala del Westminster Hall. Este claro (que resultaba de la eliminación de dos filas de columnas que previamente habían dividido la sala en una nave central y dos laterales) era más grande que cualquiera de los techos franceses contemporáneos y se aproximaba más a los techos más amplios de la era Romana y Cristiana temprana. (Fig. 2.12)

En esta armadura se sustituyó la cuerda horizontal inferior (traccionada), que se venía utilizando, por elementos que forman un arco. En ella se hace uso extensivo de la triangulación pero, más que como armadura, en realidad estaba funcionando como un arco, debido a que las barras que conforman el arco inferior trabajan a compresión y generan un empuje horizontal en los apoyos.

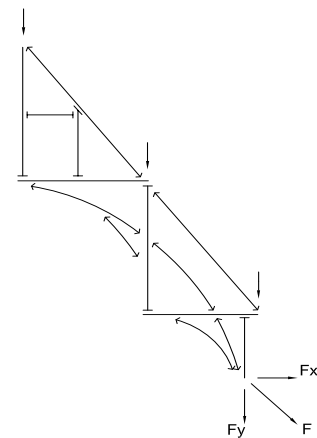
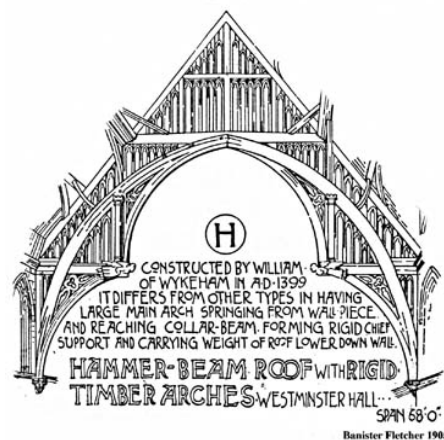
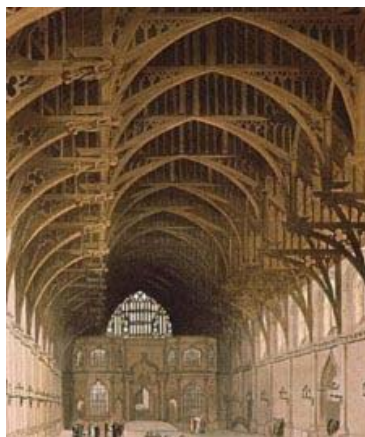


Fig. 2.12 A la izquierda, imagen del interior de la sala. Al centro, dibujo original de la armadura "Hammerbeam" y a la derecha, el diagrama de fuerzas. Fuente: [www.brynmawr.edu](http://www.brynmawr.edu) y autores



En los siglos XVII y XVIII se fue perfeccionando la configuración de armaduras en madera. Como ejemplo se puede ver el diseño de Christopher Wren para la cubierta del Teatro Sheldonian en Oxford, Inglaterra (Fig.2.13). En este ejemplo se insistía en considerar la cuerda inferior como una viga.

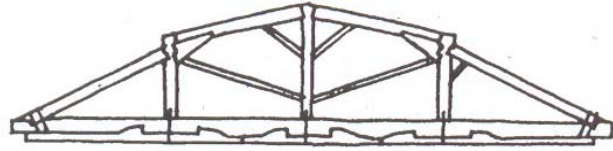


Fig. 2.13 A la izquierda, el Teatro Sheldonian, Oxford, Inglaterra (Siglo XVII) y a la derecha, dibujo de la armadura utilizada en la cubierta. Fuente: [images.encarta.msn.com](http://images.encarta.msn.com) y Rowland Mainstone, *ibidem*.

Posteriormente, aparece el diseño de Samuel Wyatt para el Royal Hospital de Greenwich, en donde es más claro del comportamiento de cada uno de los miembros

Finalmente, en el siglo XIX se presentan ejemplos de las primeras armaduras de hierro forjado, en donde es mucho más claro el principio de triangulación y la diferencia, en la sección transversal, entre los elementos que trabajan a tensión y los que trabajan a compresión. En el diseño de estas armaduras se descubrió que los elementos que llevan la compresión deben ser los cortos, para evitar el pandeo. Este descubrimiento permitió que a mediados del siglo XIX se lograra un claro sin precedente de 46 m (Fig. 2.14), lo que significó un gran progreso en la ingeniería, como resultado de la aparición de nuevos materiales, técnicas de construcción y una mayor comprensión del comportamiento estructural. Su forma de media luna aunque parece un arco podía lograr grandes claros sin ejercer empujes horizontales, debido a que permitía el libre desplazamiento lateral entre los apoyos, o se pretensaban las cuerdas inferiores para lograr que trabajaran a tensión.

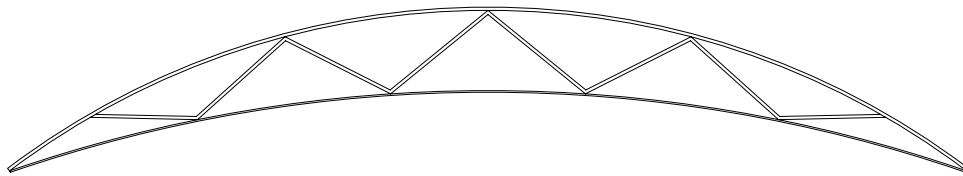


Fig. 2.14 Armadura utilizada en la Estación de Trenes Lime Street, en Liverpool, Inglaterra y fotos de la cubierta. Fuente: [www.liverpoolpictorial.co.uk](http://www.liverpoolpictorial.co.uk) y autores.

### 2.3 Armaduras equivalentes a la viga y al arco para puentes.

Simultáneamente al desarrollo de las armaduras para cubiertas, a lo largo de la historia se fueron desarrollando, de manera independiente, armaduras para puentes que se parecen más a la viga simple y al arco. Es hasta mediados del siglo XIX que el desarrollo de armaduras para librar grandes claros se comienza a utilizar en edificios.

A fines del siglo XV, Leonardo Da Vinci hizo algunos diseños de armaduras de madera con forma de arco que eran utilizados, posiblemente, como cimbras en la construcción de arcos de mampostería para puentes, es decir que la armadura estaba cargada en la cuerda superior. Aunque no era claro cómo eran contruidos, en el diseño la propia forma de los elementos nos hace suponer cómo trabajaban. Por ejemplo, las barras que interconectaban radialmente el arco superior y el inferior eran más gruesas que el resto de las barras porque transmiten carga trabajando a compresión, las diagonales, una trabajaba a compresión y otra a tensión, pues el sistema de piso era sostenido por el arco inferior. Es posible que las diagonales fueran cables de hierro. (Fig. 2.15). Sin embargo, aunque Leonardo suponía que el par de cables trabajaban a tensión, una de las diagonales se aflojaba y resultaba redundante. Este diseño era muy adelantado para su época, pues mostraba cómo, utilizando un arco formado por pequeñas barras, sujetas sólo a tensión o a compresión., se libran grandes claros.

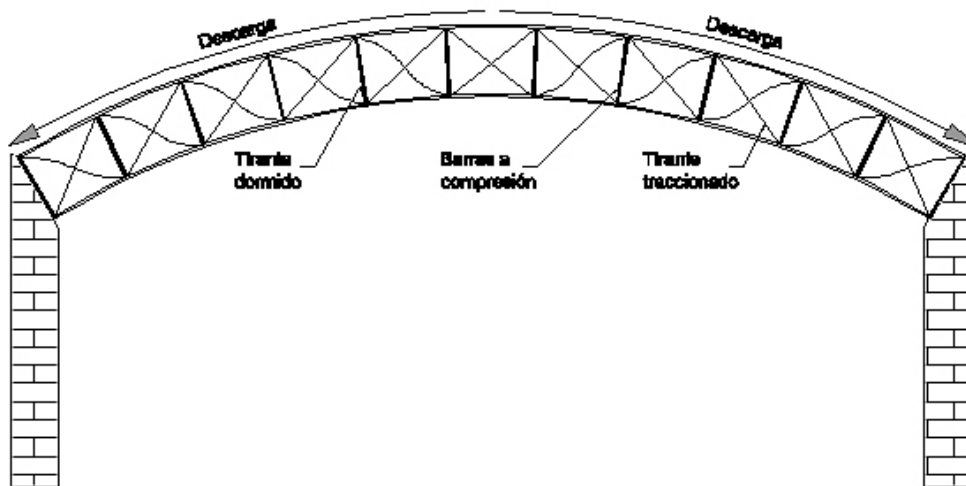


Fig. 2.15 Diseño de armadura de madera posiblemente utilizada como cimbra para puentes de mampostería finales del siglo XV. Fuente: Autores

Los diseños de armaduras de puentes más tempranos que sobreviven fueron los publicados por Palladio en 1570. Son de madera con uniones o abrazaderas de hierro.

En el siguiente ejemplo (Fig. 2.16) era difícil salvar claros más grandes, ya que la cuerda inferior funcionaba como una viga continua que aunque tuviera dos sistemas interconectados de armaduras independientes (Fig. 2.16 a y b), presentaba flexión.

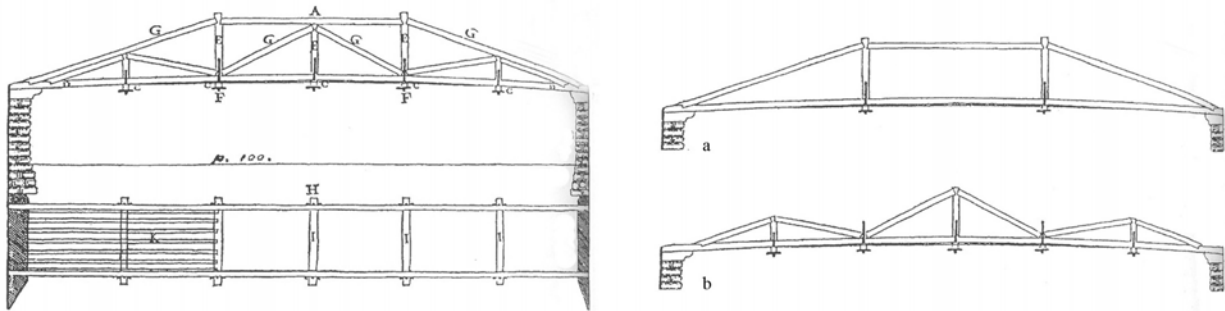


Fig. 2.16 Puente de armadura diseñado por Palladio para el río Cismone. Fuente: Rowland Mainstone, *ibidem*.

Durante los dos siglos siguientes se construyeron puentes que utilizaban formas de armaduras, sin embargo, ninguno con la claridad estructural de los diseños de Palladio.

Los hermanos Grubenmann, en la segunda mitad del siglo XVIII, construyeron unos puentes, en parte arco y en parte armadura (Fig. 2.17), dando como resultado un marco rígido altamente redundante. Si embargo, constituyen un avance respecto a los de Palladio pues la cuerda inferior ya no trabajaba como viga sino como un tirante horizontal a tensión.

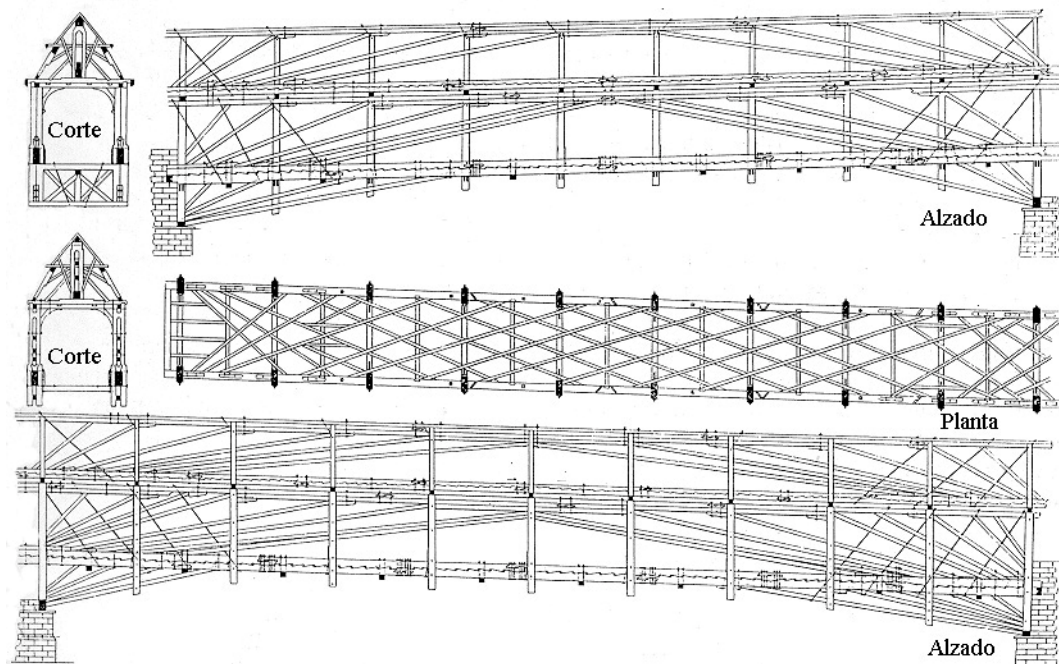


Fig. 2.17 Diseño del puente Schaffhausen, Suiza, de los hermanos Grubenmann en la segunda mitad del siglo XVIII. Fuente: Rowland Mainstone, *ibidem*.

Fue hasta mediados del siglo XIX que se empiezan a utilizar armaduras como las que conocemos ahora, para la construcción de puentes para ferrocarriles y carreteras. En un principio eran de madera, hasta el inicio de la producción industrial del acero.

Uno de los primeros ejemplos es la armadura tipo Howe (1841) (Fig. 2.18 a) en que se concreta el concepto básico de la armadura tipo arco de Palladio, pero como una viga sin el empuje del arco, en donde la cuerda inferior trabaja como tirante.

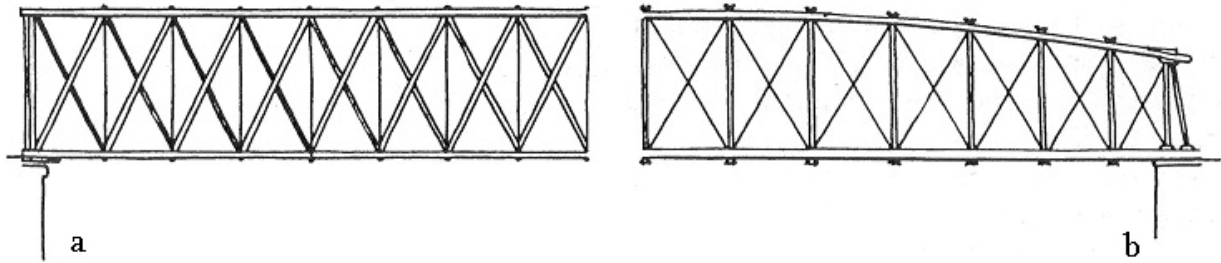


Fig. 2.18 Izquierda (a) armadura tipo Howe; derecha (b) armadura tipo Pratt. Fuente: Rowland Mainstone, *ibidem*.

La armadura tipo Pratt (1844) (Fig. 2.18 b) introduce un cambio importante al convertir las diagonales en tirantes, e incorpora por primera vez una cuerda superior poligonal, lo que producía un peralte total variable, de acuerdo al momento máximo flexionante de una viga análoga.

Sin embargo, el hecho de que todavía se diseñaran con diagonales cruzadas en cada panel mostraba la poca comprensión que se tenía de la diferencia entre la compresión y la tensión de las diagonales. Lo que ocurría era que al final del claro las diagonales inclinadas en sentido catenario hacia el centro estaban a tensión, y las diagonales inclinadas hacia los apoyos, que estaban sujetas a compresión, eran demasiado débiles para resistirla, y podían ser eliminadas.

Whipple (1846) (Fig. 2.19 c) fue el primero en tomar en cuenta el efecto de las cargas móviles. Su armadura estaba diseñada con diagonales cruzadas al centro del claro (donde los desplazamientos de los paneles individuales era mayor), para reducir la deformación producida por la fuerza cortante que cambiaba de dirección al paso de la carga.

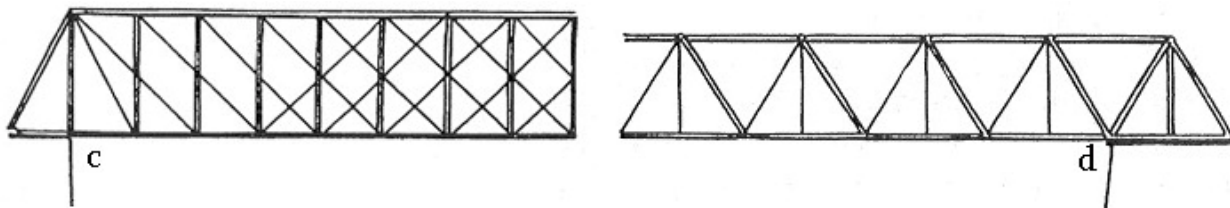


Fig. 2.19 Izquierda (c) armadura tipo Whipple; derecha (d) armadura tipo Warren. Fuente: Rowland Mainstone, *Developments in structural form*.

Poco después, Warren (1848) (Fig. 2.19 d), en Inglaterra, propuso una forma alternativa mucho más eficiente, tal vez la primera construida totalmente de hierro fundido y forjado. Tal como lo propuso originalmente, sólo tenía elementos diagonales interconectando las dos cuerdas. Al paso de la carga, los elementos más cerca del centro estarían sujetos alternativamente a tensión y compresión. Pero los elementos cerca de los extremos siempre estarían sujetos a uno u a otro. Sin embargo, en la construcción tal como realmente se realizó, se introdujeron postes verticales, como se muestra en la figura. Durante las siguientes décadas, se siguieron diseñando armaduras, pero realmente ninguna llegó a mejorar las armaduras de Warren y Pratt, que más tarde fueron mejoradas al eliminar las diagonales redundantes.

La armadura Bollman marcó, por ejemplo, una regresión a una armadura altamente redundante e hiperestática, (Fig.2.19).





Fig. 2.19 Armadura Bollman, puente ferroviario en Savage, Maryland, EU. 1869. Fuente: users.ce.ufl.edu

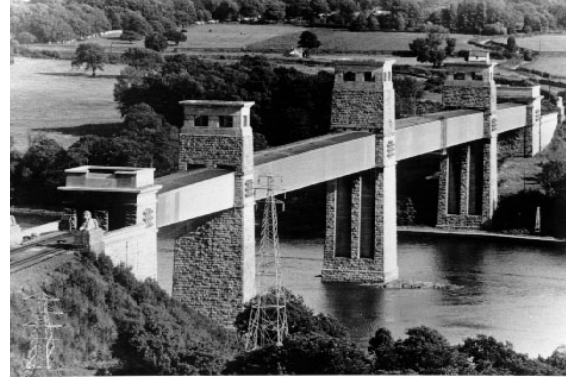


Fig. 2.20 Puente Britannia, 1848. Fuente: user.chollian.net

Finalmente, en comparación con la armadura Bollman y su derivada la Fink (con múltiples tirantes en forma de V e hiperestáticas), se diseñaron armaduras claramente isostáticas, que permitían un análisis más fácil de los esfuerzos máximos en sus elementos y ensambles más sencillos.

A fines del siglo, estas ventajas se aprovecharon, particularmente en Estados Unidos, donde la comprensión del comportamiento de los sistemas hiperestáticos había sido más lenta y en donde la experiencia en la construcción con hierro y acero hizo posible reproducir la articulación de los nodos mediante la utilización de pernos en las uniones.

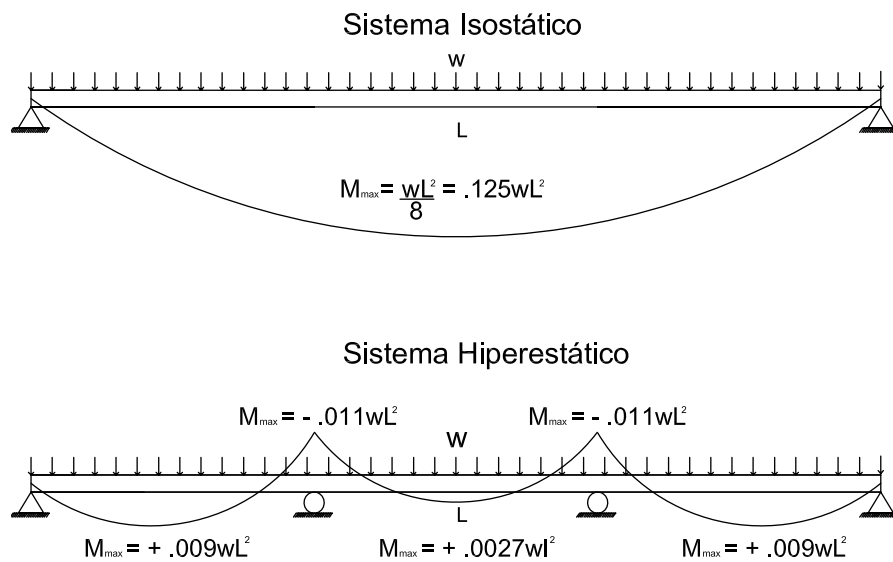


Fig. 2.21 Comparación del momento máximo entre un sistema isostático y uno hiperestático. Fuente: Autores

En Europa fue distinto, en primer lugar, porque estaban más familiarizados con algunas de las ventajas de los sistemas hiperestáticos. (Fig. 2.21). En particular, ya habían probado con la construcción del puente Britannia en 1848 (Fig.2.20) las ventajas de construir vigas continuas sobre varios apoyos, reduciendo de

este modo los momentos máximos flexionantes. En segundo lugar, las uniones se hacían con cartabón de placas y remaches en lugar de pernos, lo que introducía un cierto grado de hiperestaticidad, es decir que hacían uniones rígidas que transmitían los momentos flexionantes. Se observó que el momento dañaba a los elementos unidos en ángulos demasiado agudos. Por esa razón se prefería la simple triangulación de las armaduras Warren o Pratt. En éstas era aceptable un cierto grado de hiperestaticidad debido a la colocación de elementos continuos sobre soportes intermedios para lograr claros más grandes.

Los desarrollos posteriores introdujeron elementos cortos en armaduras de gran peralte que servían como soportes intermedios en los puntales principales y en la cuerda a compresión, reduciendo las longitudes para evitar el pandeo. En todas estas formas el material se concentra en un número relativamente pequeño de barras a tensión y a compresión en proporción a las fuerzas que soportan. Esto tiene como efecto optimizar la cantidad de elementos y el volumen de material y, por lo tanto, extiende considerablemente el alcance de los claros que podrían ser librados cuando actúan solamente cargas verticales sobre los apoyos.

En el caso de los arcos de acero (en que las cuerdas superior e inferior están a compresión y el empuje horizontal es inevitable), el tipo de configuración utilizado en las armaduras Pratt y Warren también prevaleció sobre el de los sistemas de diagonales cruzados, parecidos a los que propusieron Leonardo y Paladio. Al proporcionarse un contrafuerte adecuado, fue posible construir arcos de alcances mucho mayores, como es el caso del puente Bayonne Kill van Kull en Nueva Jersey (Fig. 2.22).



Fig. 2.22 Puente Bayonne sobre el estrecho Kill van Kull, Nueva Jersey, EU, 1931. Fuente: statenislandtalk.com

## 2.4 Marcos rígidos

El marco de unión realmente rígida es una forma relativamente nueva debido al desarrollo de nuevos materiales, como el acero y el concreto armado, que garantizan dicha unión y debido al progreso en los métodos de análisis de estructuras hiperestáticas. Estos marcos tienen dos ventajas sobre las armaduras articuladas. En primer lugar, porque proporciona una rigidez en su propio plano ante cargas laterales (como las fuerzas de viento y sismo), sin la necesidad de colocar diagonales, que en el caso de la armadura son indispensables. Esta rigidez se puede lograr también articulando los apoyos de las columnas. (Fig. 2.22). En segundo lugar, la unión rígida reduce en los miembros el momento flexionante al centro originado por

cargas perpendiculares al eje de la barra, teniendo así el momento máximo en los extremos. Esto permite una reducción en el peralte de la barra, aunque ahora le transmite el momento de los extremos a la columna. Estas características hacen del marco rígido una forma apropiada para tener claros libres, como en la construcción de auditorios y fábricas; y es estéticamente notable por la pureza de sus líneas.

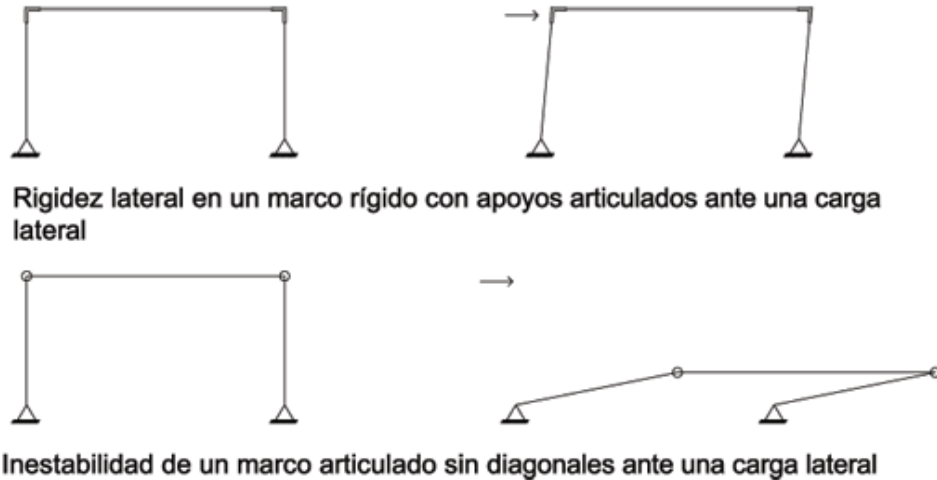


Fig. 2.22 Diagrama de la diferencia de rigidez lateral entre un marco rígido y uno articulado. Fuente: Autores

Antes del desarrollo de uniones suficientemente rígidas en acero y concreto, la unión rígida sólo podía realizarse de manera aproximada, porque constructivamente no era posible.

## 2.5 Marcos espaciales

Todas las formas que se han descrito hasta ahora son estructuras de dos dimensiones, compuestas por barras diseñadas fundamentalmente para soportar cargas (peso propio o cargas adicionales) que actúan en el mismo plano de la estructura. Sin embargo, toda estructura está en un espacio tridimensional y soportará cargas fuera de su plano (como el viento o el sismo) por lo que han tenido que ser fijadas en la dirección perpendicular al plano que las contiene para evitar torsiones o pandeos provocados por cargas transversales. En algunas ocasiones, sobre todo en las armaduras primitivas para techos, se utilizaban cuerdas entre las armaduras, para contrarrestar las fuerzas fuera del plano. Pero en las formas más maduras esto se logra directamente con un sistema contenido en otro plano. Tal sistema de soporte es comúnmente llamado contraventeo. En la medida en que esto ocurre, todos estos elementos, en conjunto, se consideran marcos espaciales, así como también las llamadas bóvedas esqueletales. Algunos ejemplos son: el Capitolio de Washington y el domo de la catedral de San Isaac de San Petersburgo. (Fig. 2.24)

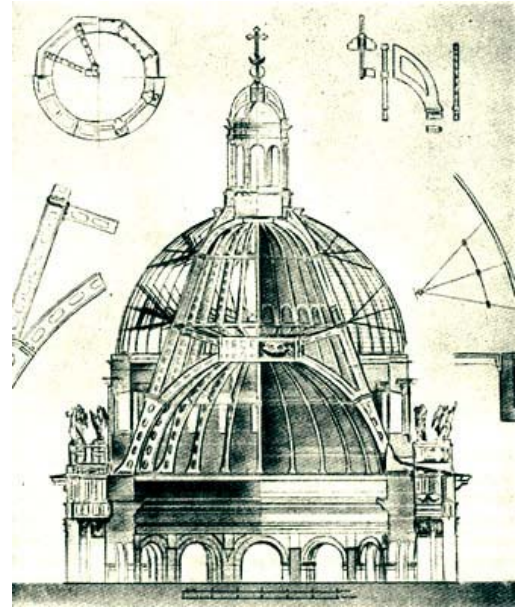
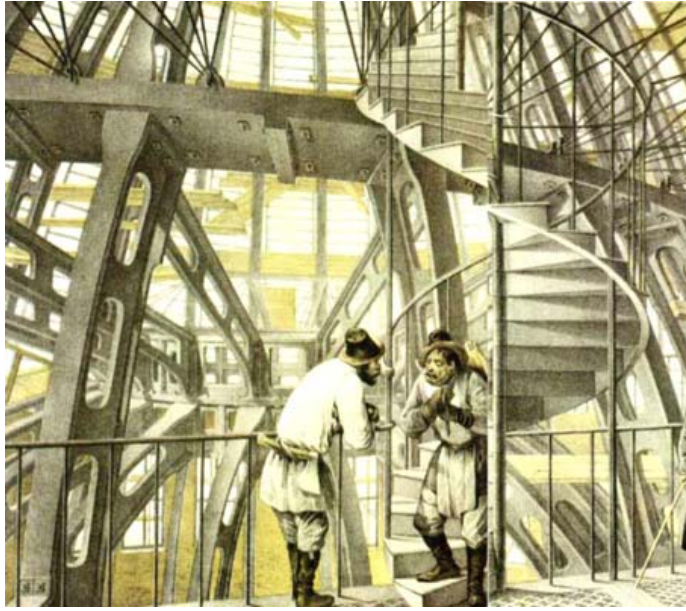


Fig. 2.24 Dibujos del interior y de la estructura de la cúpula de la Catedral de San Isaac, San Petesburgo. Fuente: Rowland Mainstone, *ibidem*. y [eng.cathedral.ru](http://eng.cathedral.ru)

Un sistema estructural se analiza tridimensionalmente cuando en los elementos que la componen se inducen fuerzas internas tridimensionales, esto ocurre cuando las cargas externas están en tres dimensiones o cuando los propios elementos están fuera del plano de carga. Actualmente, el término de marco espacial tiene que ver con el tipo de análisis tridimensional y no con su configuración geométrica, y se utiliza sólo en las armaduras o marcos de unión rígida (continua) que no pueden concebirse como un conjunto de elementos independientes de análisis bidimensional. Se pueden considerar tres tipos: el primero son estructuras trianguladas tridimensionales que conforman elementos individuales, como la viga, el marco o el arco (Fig. 2.25 c,f,i); el segundo son superficies espaciales constituidas por elementos tetraédricos independientes unidos entre sí; el tercero son las mallas espaciales de una o dos capas que constituyen un solo elemento tridimensional (Fig. 2.25 j,k,l). Todas estas formas son relativamente recientes, puesto que ninguna pudo ser concebida sin la comprensión del equilibrio tridimensional.

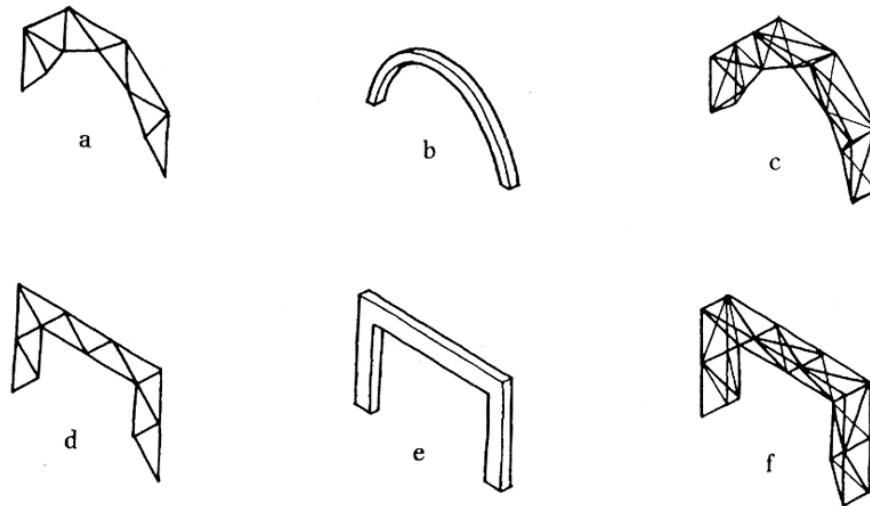


Fig. 2.25 Dibujos de marcos y armaduras espaciales análogos a las formas simples elementales. Fuente: Rowland Mainstone, *ibidem*.



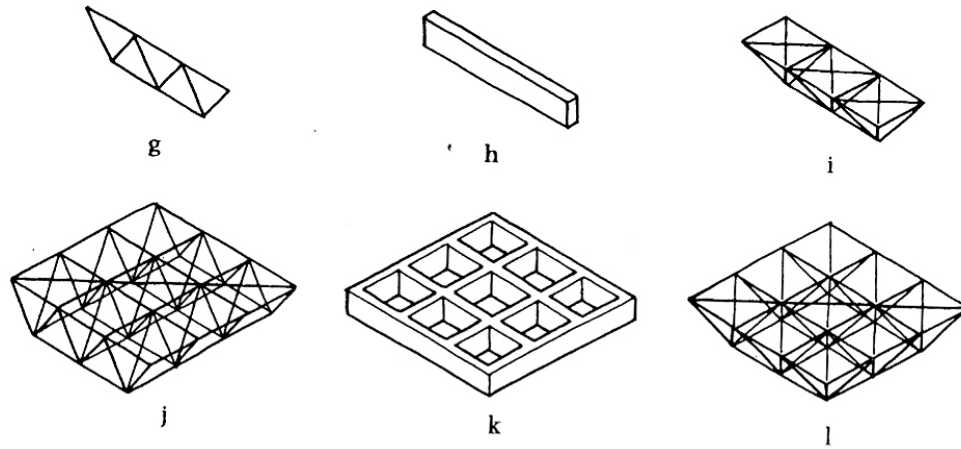


Fig. 2.25 Dibujos de marcos y armaduras espaciales análogos a las formas simples elementales. Fuente: Rowland Mainstone, ibidem.

La comprensión de estas formas se adquirió a finales del siglo XIX, para resolver algunos casos simples de sistemas estructurales isostáticos del primero y segundo tipo de marco espacial mencionados. Del mismo modo como es analizada una armadura plana, cargada en su mismo plano, a través del método de los nodos (es decir equilibrándolos uno por uno), se puede analizar una armadura tridimensional, en donde las cargas que actúan pueden estar en cualquier dirección pero aplicadas en los nodos y articuladas con rótulas. En este caso habrá tres ecuaciones de equilibrio estático en cada nodo.

La rigidez espacial en el primer tipo de marco espacial resulta de la rigidez inherente al módulo básico de ensamble, que es un tetraedro. En el segundo tipo, resulta de la curvatura de la superficie y de la rigidez plana de los módulos triangulares básicos.

Alejandro Graham Bell fue uno de los primeros en llevar a cabo este tipo de construcciones a partir de unidades tetraédricas. Entre sus experimentos se encuentran papalotes y una torre de 24 m de altura, construida en 1907, que tenía tres soportes de armadura en forma de tripié. (Fig. 2.26)

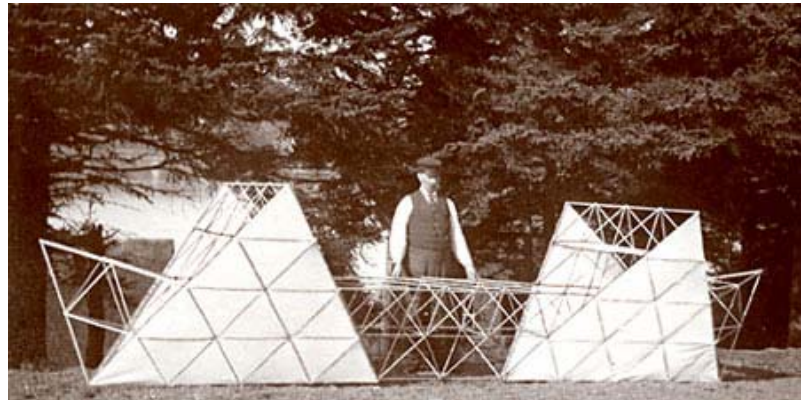
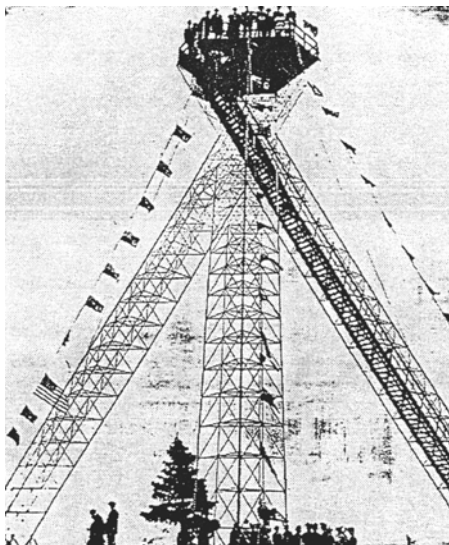


Fig. 2.26 Izquierda, torre formada por unidades tetraédricas en 1907 y derecha uno de los papalotes de Bell también formado por unidades piramidales. Fuente: [www.nga.gov](http://www.nga.gov)

Más recientemente, Buckminster Fuller, con un espíritu también experimental, dio un avance diseñando una estructura tipo tensegrity con forma de mástil (Fig. 2.27). Estas construcciones tenían la característica novedosa de que todas las barras a compresión y los cables a tensión, que componían un tetraedro, estaban dispuestos de modo que los que trabajaban a tensión eran continuos a lo largo de la estructura: es decir, que no había lugar para la transmisión continua de la compresión. El preesfuerzo de los tirantes contra las barras que se comprimían volvía rígida la estructura y auto sustentable. Como las barras a compresión eran cortas, se evitaba el riesgo de pandeo individual. Sin embargo, esto no significaba que se puedan construir a cualquier altura o escala, pues una estructura muy grande presentaría el fenómeno de pandeo global (Fig. 2.27).

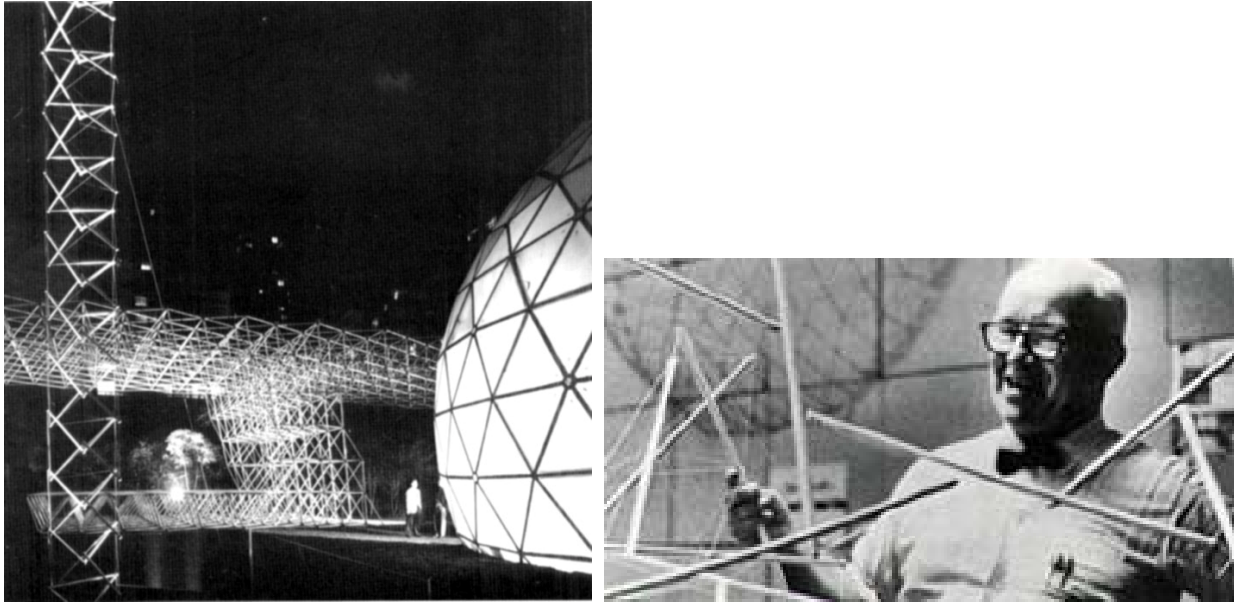


Fig. 2.27 Estructuras tensegrity exhibidas en el Museo de Arte Moderno de Nueva York en 1959. Fuller. Fuente: [www.synearth.net](http://www.synearth.net)

En ese sentido, estas estructuras no son más rígidas que las armaduras tradicionales. Aunque R. Motro<sup>3</sup> y otros han experimentado el sistema tensegrity en bóvedas y domos, su progreso se ha mantenido por fuera del camino principal de desarrollo. Este último se ha orientado más estrechamente por el camino desarrollado por Bell, como se muestra en el ejemplo del primer tipo de marco espacial que se observa en la Fig. 2.28.

Mucho antes de los experimentos de Bell, Schwedler ya había construido en Berlín, en 1863, el primer domo de marcos triangulados. Con la introducción de otros patrones de triangulación en la superficie, tales domos se hicieron muy comunes a principios del siglo XX y se empezaron a construir bóvedas de cañón análogas a los marcos triangulados. El principal objetivo en el diseño de nuevos patrones de triangulación era llegar a uno que maximizara la regularidad o uniformidad de las longitudes y secciones transversales de los elementos, congruentes con las cargas aplicadas, lo

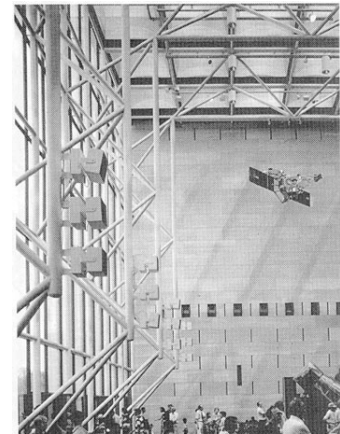


Fig. 2.28 Smithsonian Museo del Aire y el Espacio, 1973, Washington, HOK arquitectos. Fuente: Rowland Mainstone, *Developments in structural form*.

<sup>3</sup> Motro R., "Tensegrity systems and geodesic domes" *International Journal of Space Structures*, vol. 5, 1990.

que garantizaba una máxima economía de material y una máxima facilidad de fabricación y construcción. Este objetivo se logra más fácilmente en un domo de poca flecha o en una bóveda de cañón apoyada en toda su longitud que en un domo totalmente hemisférico, en donde las cargas circunferenciales son mucho menos uniformes en la parte inferior, pues cambian de compresión a tensión. Sin embargo, las ventajas de un espaciamiento uniforme de los miembros se puede conservar si se diseña una triangulación tal que, a lo largo de esta región de cargas no uniformes, el conjunto de miembros se mantenga lo mas horizontal posible para soportar las tracciones circunferenciales horizontales, mientras que otros conjuntos comparten la compresión radial y la mayor parte de la carga asimétrica generada por el viento o por la nieve.

En un domo hemisférico o parcialmente esférico, es casi imposible lograr una unidad en el diseño de la triangulación. Como era conocido por Platón, sólo hay cinco maneras de seccionar una esfera en cuerpos de caras regulares (poliedro). De estos cinco, los dos más relevantes en la arquitectura son los que pueden seccionarse en el mayor número de caras idénticas, pues entre mayor número de caras y más pequeñas, se obtienen las figuras que más se aproxima a la superficie de la esfera. Estas son el dodecaedro pentagonal (12 caras pentagonales) y el icosaedro triangular (20 caras triangulares), ambos con 60 segmentos rectos. Cualquier otra subdivisión aproximada a la superficie no puede ser completamente regular. Si partimos de una u otra de estas formas básicas regulares o de una forma híbrida casi regular, limitada por doce pentágonos iguales separados por veinte triángulos, es posible proceder a una subdivisión de varias maneras, pero cada una de las formas esqueléticas que se obtienen quedará constituida inevitablemente con miembros de más de una longitud.

Existe un pequeño ejemplo del Renacimiento, diseñado por Miguel Ángel, de tal subdivisión que en sí no tiene ningún significado estructural. En este ejemplo cada pentágono del dodecaedro regular queda dividido en cinco triángulos idénticos cuyos lados no son exactamente iguales. Si se les considera en grupos de seis triángulos centrados en cada uno de los vértices del dodecaedro, también pueden ser vistos como subdivisiones de un conjunto de hexágonos que se traslapan (Fig. 2.29)

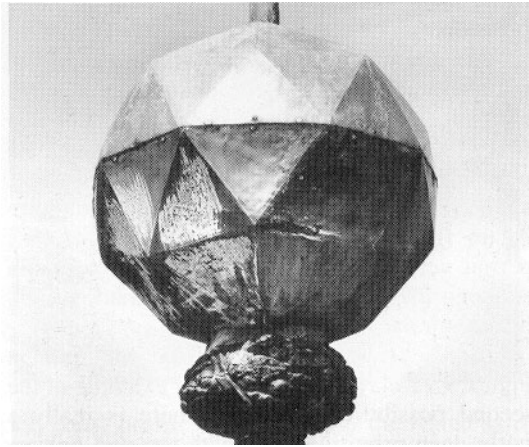


Fig. 2.29 Remate de la linternilla en la Capilla de los Medici, Miguel Angel, 1520- 1534 Fuente: Rowland Mainstone, ibidem.

En sus domos geodésicos Fuller eligió como punto de partida la división de la superficie esférica por un icosaedro regular. En seguida, subdividió los triángulos básicos pasando planos que bisectan el triángulo y que pasan por el centro de la esfera; el corte de estos planos contiene a la circunferencia máxima de la esfera. Los pequeños triángulos que se forman dentro de cada triángulo básico quedan ligeramente fuera del plano y pueden ser agrupados en hexágonos, pero este panel de hexágonos queda inevitablemente por debajo de la intrusión de un pentágono centrado en cada uno de los vértices de la división básica del icosaedro, debido a que 5 de los triángulos básicos ahí convergen. Aun en un domo con un gran radio de curvatura determina una subdivisión múltiple de triángulos básicos que proporciona miembros de longitud razonable, predomina una configuración hexagonal. Se ha visto que los hexágonos individuales constituyen módulos convenientes para ser prefabricados como elementos individuales. Con estos procedimientos la superficie se discretiza en un sistema estructural de una capa a base de barras regulares. Para evitar el pandeo de los elementos, en el caso de que el radio de curvatura sea tan grande



que exija un mayor peralte en la construcción del que se puede obtener de manera fácil y económica mediante una triangulación de una sola capa, los hexágonos, o bien tienen que curvarse en sus centros (es decir que el centro de la subdivisión del hexágono se eleva del plano), o bien se tiene que optar por un sistema de doble capa. Esta última alternativa se adoptó en el caso del Climatron de San Luis; aquí la superficie se conforma por módulos de anillos hexagonales a compresión en dos capas separados por barras de 0.75 m, cuyos vértices están unidos individualmente a un nodo que completa la triangulación y proporciona una rigidez tridimensional (Fig. 2.30).



Fig. 2.30 Climatron de San Luis. Fuller. Fuente: community.webshots.com

La experiencia ha demostrado que, aunque el comportamiento de los miembros individuales no fuera realmente isostático debido a las uniones rígidas, como se ahora es posible observar en un análisis más preciso mediante las computadoras, se podía obtener un cálculo adecuado de la probable distribución de las fuerzas mediante el análisis de un caso isostático hipotético. Por ejemplo, la distribución de fuerzas en un domo de marcos triangulados se calculaba de manera análoga a un cascarón continuo. A menudo, este cálculo análogo sobre el cascarón se consideraba lo suficientemente próximo, aun en el caso en que la estructura real se apartara de la simple triangulación de una sola capa.

No era posible conseguir un procedimiento igual de simple para marcos del tipo viga de celosía (Fig. 2.25 k) o de sus equivalentes en superficie. Todas estas formas son hiperestáticas en el mayor grado. De hecho, es precisamente debido a esta indeterminación (o al alto grado de soporte mutuo y a la interacción entre los miembros) que se debe el mérito estructural de estas formas.

En el caso de la viga de celosía (Fig. 2.25 i,g), surge de las interconexiones rígidas entre las barras. Ninguna barra se flexiona bajo una carga, sin provocar que las demás barras también se flexionen compartiendo parte de esta carga.

En el caso de las armaduras, esta indeterminación surge, aun si no existen uniones rígidas, por el hecho de que muchos de los puntales y tirantes individuales son, al mismo tiempo, miembros de submarcos triangulados en dos o más direcciones. En un sistema de armadura tridimensional, la carga se distribuye en todo el sistema. Debido a la complejidad tridimensional de estos sistemas, para optimizar el costo de los elementos debido al alto costo unitario de fabricación, hubo que esperar el desarrollo de las computadoras, a

partir de 1960, que hicieron posible realizar los cálculos necesarios para desarrollar nuevas formas y para optimizar el número de elementos y sus espesores y para minimizar los costos.

En 1962, se construye uno de los primeros ejemplos de este sistema en Londres, en un conjunto temporal para las oficinas de la IUA. Este ejemplo es poco usual. La fuerza de compresión mayor se encuentra en la capa inferior de la malla, pues el techo era muy ligero y la carga mayor la provocaba la succión del viento desde abajo (Fig.2.31).



Fig. 2.31 Oficinas de la IUA, Londres, 1962. Fuente: Rowland Mainstone, *Developments In structural form*.

Otro ejemplo construido 10 años después es el Centro de Exhibición de la Plaza McCormick de Chicago. Este sistema estaba sujeto a cargas más convencionales y estaba constituido por armaduras dispuestas en dos direcciones, formando una malla, con módulos de nueve metros cuadrados y cuatro y medio metros de peralte (Fig.2.32).

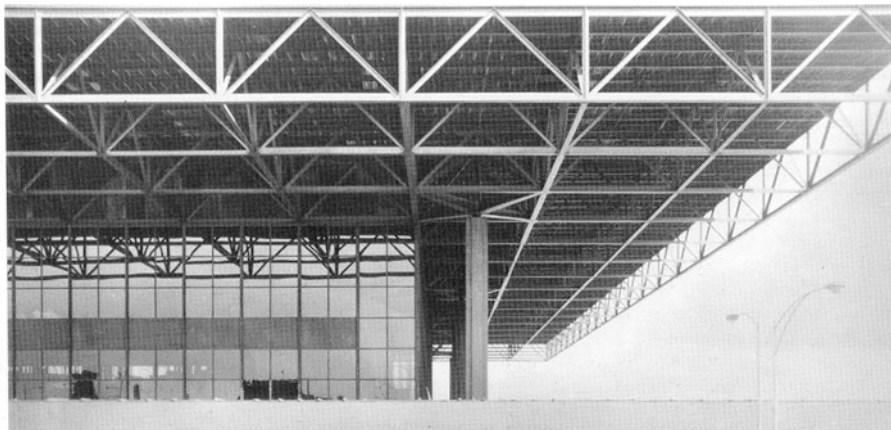


Fig. 2.32 Centro de Exhibiciones de la Plaza McCormick, Chicago. Fuente: Rowland Mainstone, *ibidem*.

Hasta finales de los 80s ya fue posible construir marcos espaciales de doble capa en acero de casi todas las formas que antes habían sido construidas como cascarones continuos, logrando además claros más grandes debido a la reducción del peso. El desarrollo de métodos de análisis computacionales, el avance

tecnológico en el ensamble de los nodos y la constante búsqueda por la reducción del peso de estas cubiertas, ha hecho posible la construcción de grandes techos retráctiles y desplegados.

### 3. GEOMETRÍA ESTRUCTURAL

Dentro de este universo de estructuras con base en nodos y barras podemos encontrar el trabajo que realizó el doctor Juan Gerardo Oliva Salinas para obtener el grado de Doktor–Ingenieur en la Universidad de Stuttgart, Alemania en el año de 1982, con la disertación “Sobre la construcción de cascarones reticulados”. En ella propone un sistema de nodos y barras con base en las investigaciones realizadas sobre este tipo de estructuras.

El sistema constructivo de un cascaron reticulado destaca el diseño de un nodo universal que responde a las necesidades constructivas que demanda la estructura y a la particularidad de poder ser utilizados en cubiertas con escala y curvatura variable. En el siguiente capítulo se trata mas a detalle el trabajo del doctor Oliva Salinas y como es que genera las bases para el desarrollo del proyecto de investigación (Fig. 3.0).



Fig. 3.0 Disertación de doctorado del arquitecto Juan Gerardo Oliva Salinas

### 3.1. Antecedentes

Todas las obras de la naturaleza, obedecen a principios de la energía mínima: “una recta es la distancia mas corta entre dos puntos”. Las leyes físicas se basan en “expresiones de principios mínimos: máximo rendimiento con un mínimo de utilización de energía” Un ejemplo de este sistema lo representa la catenaria, cuya forma se genera cuando una cadena flexible indeformable se suspende libremente de dos puntos, transmitiendo la fuerza a lo largo de su longitud formando un arco funicular\*.

Esta forma se representa matemáticamente a través de la función del coseno hiperbólico. (Fig. 3.1)

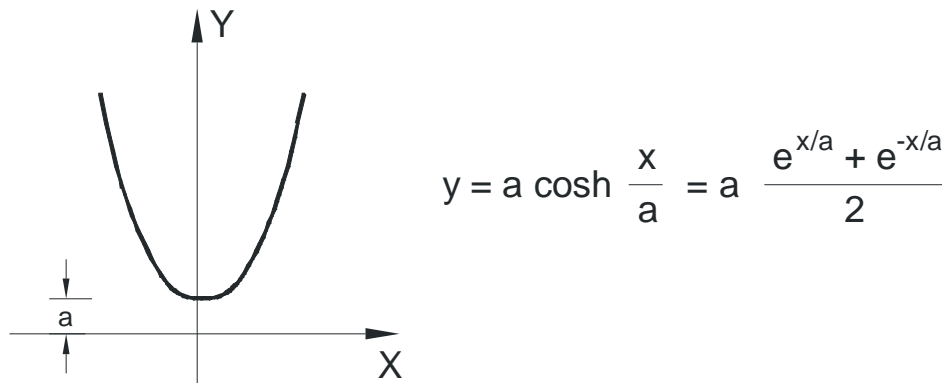


Fig. 3.1 Función del coseno hiperbólico.

“Para lograr un rendimiento óptimo en las estructuras espaciales curvas, estas deben construirse de acuerdo a su arco funicular, es decir, a la superficie correspondiente a sus esfuerzos. La curvatura debe estar en función de las fuerzas que actúan sobre este. Esa es la forma ideal en la que no intervienen esfuerzos flexionantes”. Esta cita de A.K. Kar\* nos conduce a concluir que a pesar de que es difícil tener una forma óptima para el desarrollo de cualquier estructura, el arco funicular de la catenaria es el criterio determinante para generar la forma de cubiertas curvas.

Como antecedentes sobre este sistema encontramos el trabajo del inglés Christopher Wren, del arquitecto español Antonio Gaudí, pionero en el desarrollo de este tipo de estructuras en la transición del siglo XIX al XX, quien desarrollo modelos colgantes para sus construcciones, siendo la Sagrada Familia la obra mas significativa de su trabajo. (Fig. 3.2) Frei Otto es otro personaje importante, quien desde los años cuarenta desarrolla modelos colgantes y de medición para determinar exactamente la geometría de la forma de redes flexibles colgantes. (Fig. 3.3) Cabe mencionar que estas son las figuras más destacadas dentro de este ámbito, pero existen grupos que trabajan en el cálculo analítico sobre estas estructuras y actualmente con el desarrollo de programas de cómputo se hace posible un proceso más rápido y exacto.

\* Oliva: “Sobre la construcción de cascarones reticulados”. p. 8

\* Oliva: Op cit. p. 10



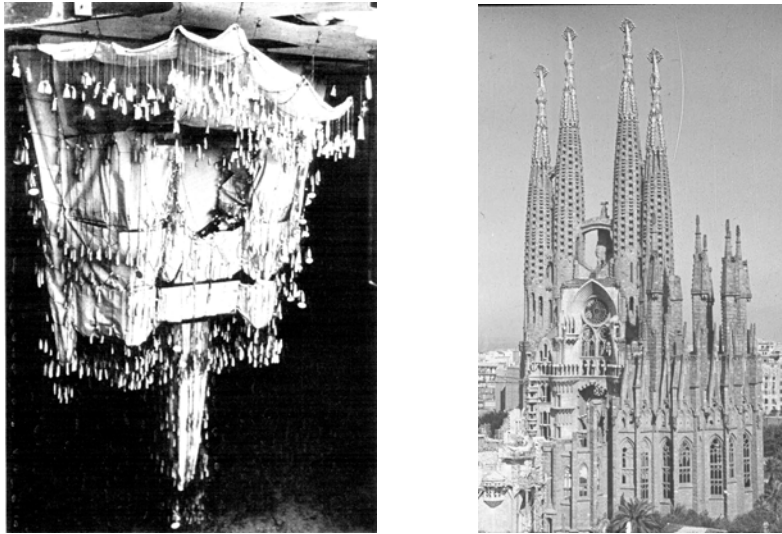


Fig. 3.2 A la izquierda: Modelo colgante de la colonia Güell y la derecha imagen de la Sagrada Familia, realizados por Antonio Gaudi.

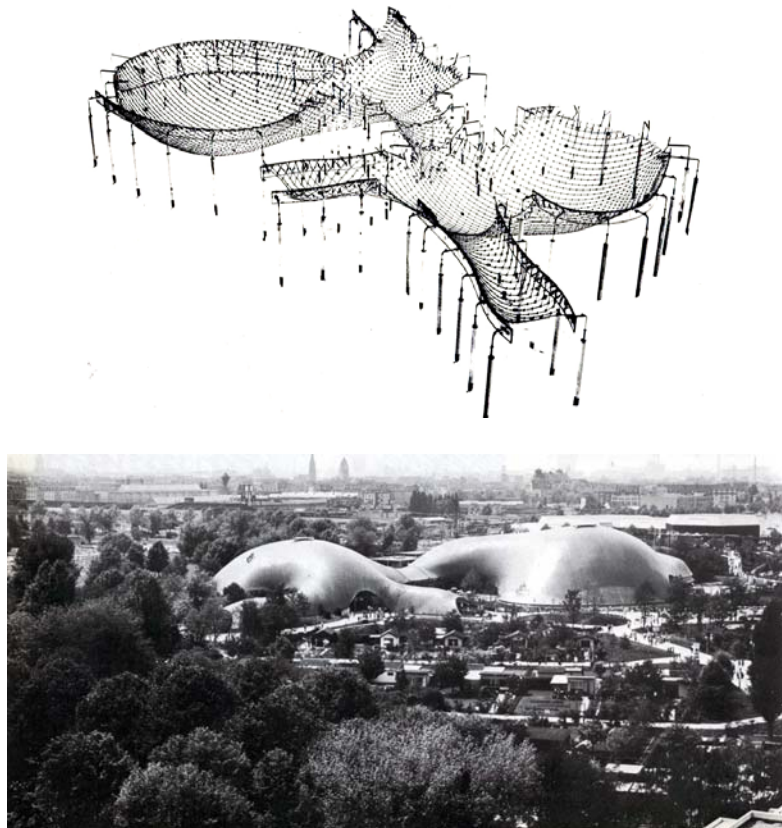


Fig. 3.3 Modelo colgante y vista de la Multisala Manheim en Alemania realizada por Frei Otto.

### 3.2. Clasificación de las superficies por su forma

Aunque podemos encontrar múltiples clasificaciones de las superficies, la más destacada que se utiliza internacionalmente es la que nos proporciona el matemático alemán Karl Friederich Gauss (1777-1855), quien define a las superficies de acuerdo a su curvatura con el resultado del recíproco del producto de sus radios. (Fig. 3.4) Otra forma de reconocer y diferenciar a las superficies por su forma es con el término “sinclástico” y “anticlástico (Fig. 3.5)

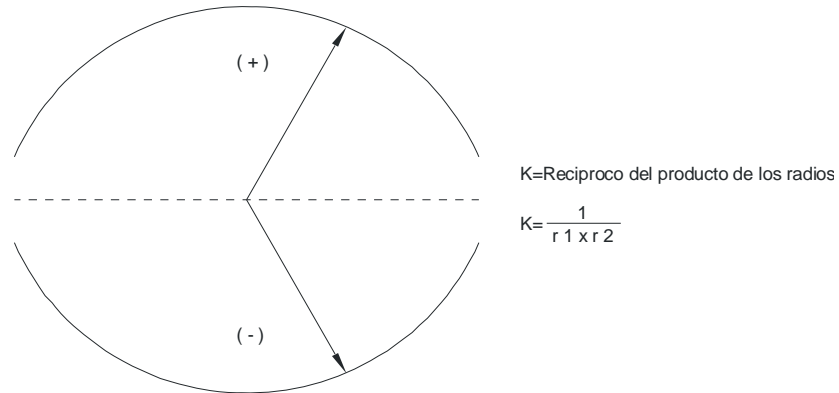
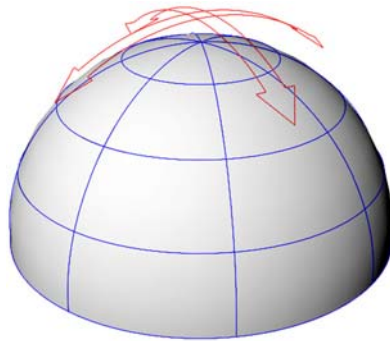
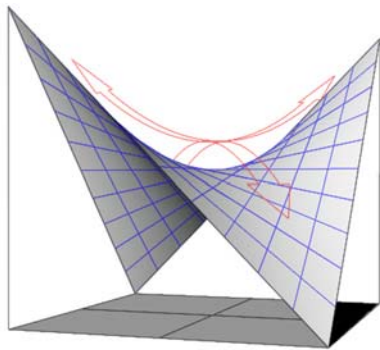


Fig. 3.4 Esquema de análisis para determinar la clasificación de las superficies según K. F. Gauss



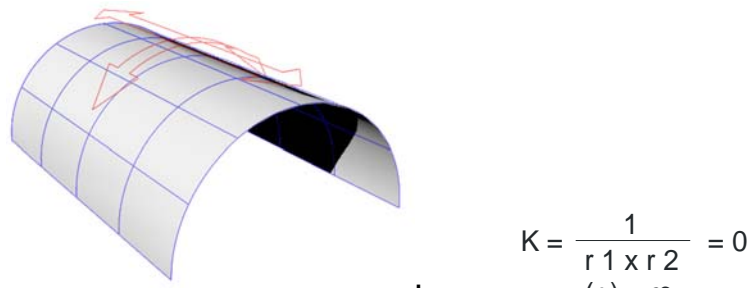
$$K = \frac{1}{r_1 \times r_2} = > 0 \text{ (positivo)}$$

**Curvatura de Gauss positiva (sinclástica)**



$$K = \frac{1}{r_1 \times r_2} = < 0 \text{ (negativo)}$$

**Curvatura de Gauss negativa (anticlástica)**



**Curvatura de Gauss nula**

Fig. 3.5 Representaciones de los tres tipos de curvatura gaussiana con sus respectivas ecuaciones.

### 3.3. Superficies de traslación\*

Una superficie de traslación es una superficie cuya forma se genera por el desplazamiento de una curva generatriz a lo largo de una curva directriz y viceversa formando una malla de superficie sinclástica ó anticlástica. Las curvas de traslación se encuentran en dos planos paralelos entre si y a su vez perpendiculares a la superficie de apoyo. (Fig. 3.6)

Ambas curvas de traslación pueden ser representadas por funciones cualesquiera (parábola, círculo, catenaria, etc.), siempre y cuando se garantice la curvatura de la estructura, aunque debido a las propiedades de la catenaria, (forma cuya energía potencial se produce en un mínimo) se recomienda esta función como curva de traslación.

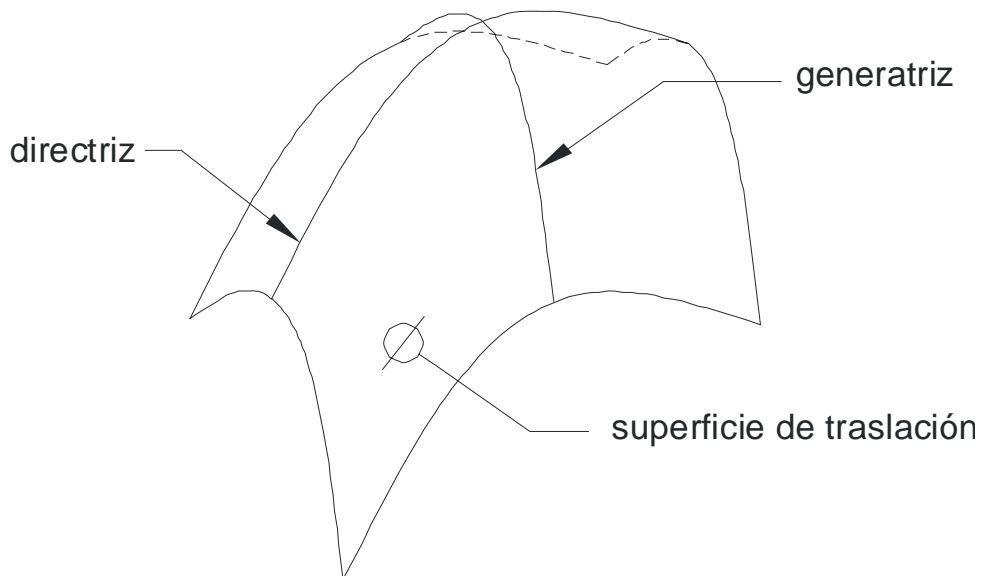


Fig. 3.6 Superficie de traslación

Existen dos formas que son las más frecuentes para delimitar el borde de una superficie de traslación

\* Oliva: Op cit .p. 19

*1er caso.* Superficie de traslación con planta cuadrangular.

Este caso se genera con cuatro puntos apoyados en un mismo nivel y las curvas de traslación corresponden con los lados rectos de la planta cuadrangular. (Fig. 3.7)

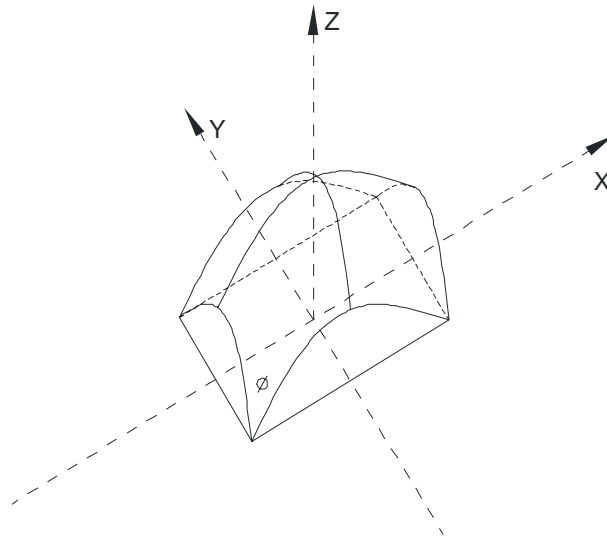


Fig. 3.7 1er caso de superficie de traslación

*2º caso.* Superficie de traslación de casos específicos.

En este caso el borde se determina por el corte de la superficie con un plano cualquiera, horizontal o bien otra figura geométrica. (Fig. 3.8)

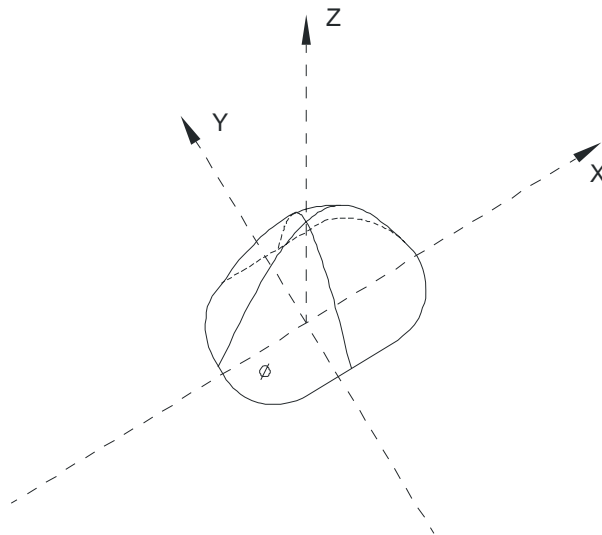


Fig. 3.8 2º caso de superficie de traslación

Para determinar la forma de una superficie de traslación con planta cuadrangular y curvatura gaussiana positiva Gerardo Oliva nos dice:

a) Se dan cuatro dimensiones cualesquiera: (Fig. 3.9)

|                 |      |
|-----------------|------|
| Ancho           | (A)  |
| Largo           | (L)  |
| Flecha          | (F)  |
| Distancia nodal | (DN) |

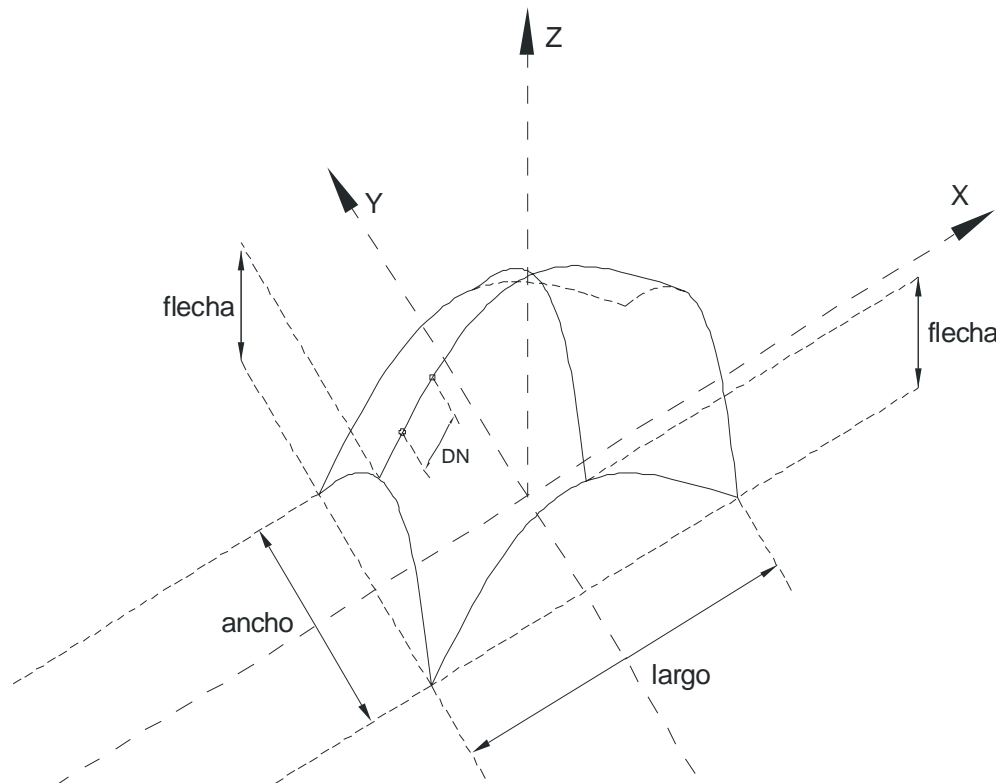


Fig. 3.9 Dimensiones necesarias para generar una superficie de traslación

- b) De acuerdo a las dimensiones dadas, se determinaran en un sistema de coordenadas tridimensionales, cinco puntos coordinados, los cuales determinan el lugar geométrico de las dos carenarías principales.
- c) Los puntos P1, P2, y P5 determinan la curva directriz. Estos puntos se encuentran a su vez, sobre el plano  $\emptyset 3$  generado por los ejes X y Z. La curva generatriz por su parte se determina por los puntos P3, P4 y P5, los cuales se encuentran sobre el plano  $\emptyset 2$ . (Fig. 3.10)

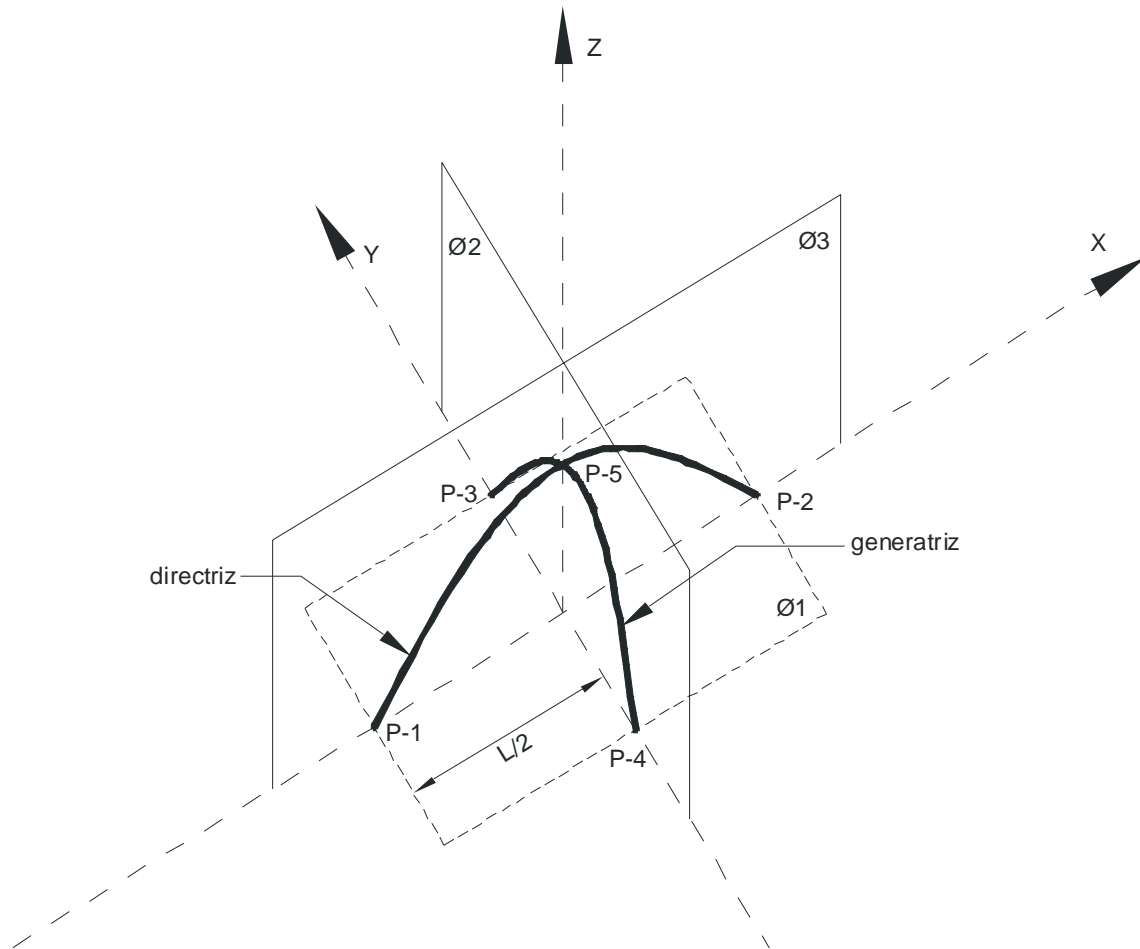


Fig. 3.10 Topología de una superficie de traslación

d) Las curvas principales se subdividen a partir del ápice, de acuerdo con la distancia nodal, por puntos que corresponderán a la unión espacial de las barras. Posteriormente se calculan las coordenadas de cada punto nodal. Existen dos alternativas para determinar la distancia nodal. (Fig. 3.11)

1ª alternativa. Longitud sobre el arco

2ª Alternativa. Longitud sobre la cuerda.

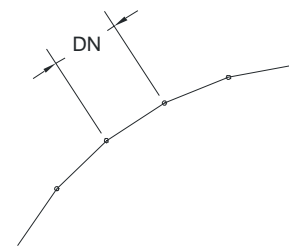
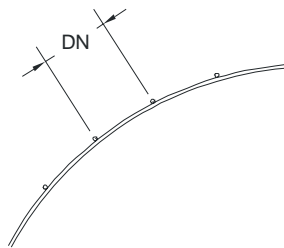


Fig. 3.11 Alternativas para determinar la distancia nodal de las generatrices

e) Desplazando la curva principal que se encuentra en el plano  $\emptyset 2$  (curva generatriz que subsecuentemente se denominara "catenaria principal en dirección "Y"), a lo largo de la catenaria principal que se encuentra sobre el plano  $\emptyset 3$  (curva directriz que subsecuentemente se denominara "catenaria principal en dirección "X"), se generan las "catenarias complementarias en dirección "Y". Estas se encuentran a su vez en planos paralelos al plano  $\emptyset 2$  y cortan a la curva directriz, en los puntos nodales calculados en el inciso "d". Las "catenarias complementarias en dirección " X " corresponden con una descripción análoga a la anterior. (Fig. 3.12)

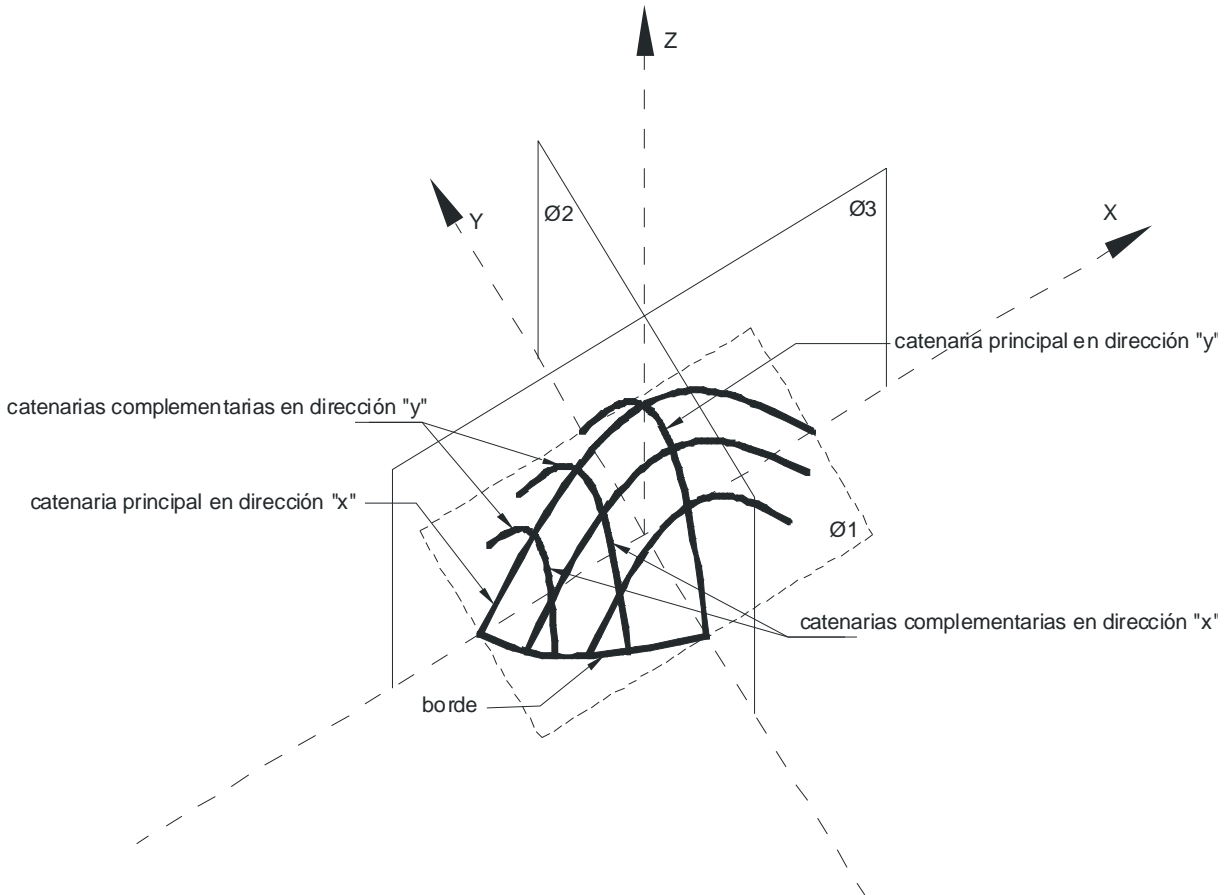


Fig. 3.12 Proceso para generar una superficie de traslación con curvatura sinclástica

F) La subdivisión de las catenarias complementarias en dirección "Y2 a través de puntos nodales, se lleva a cabo de manera análoga al inciso "d". Estos puntos nodales son a su vez el punto de cruce con las catenarias complementarias en dirección "X".

De esta manera podemos determinar la forma de una superficie de traslación con curvatura sinclástica y para determinar la forma de una superficie anticlástica basta con modificar el signo del radio y realizar el mismo proceso anteriormente descrito. (Fig. 3.13)

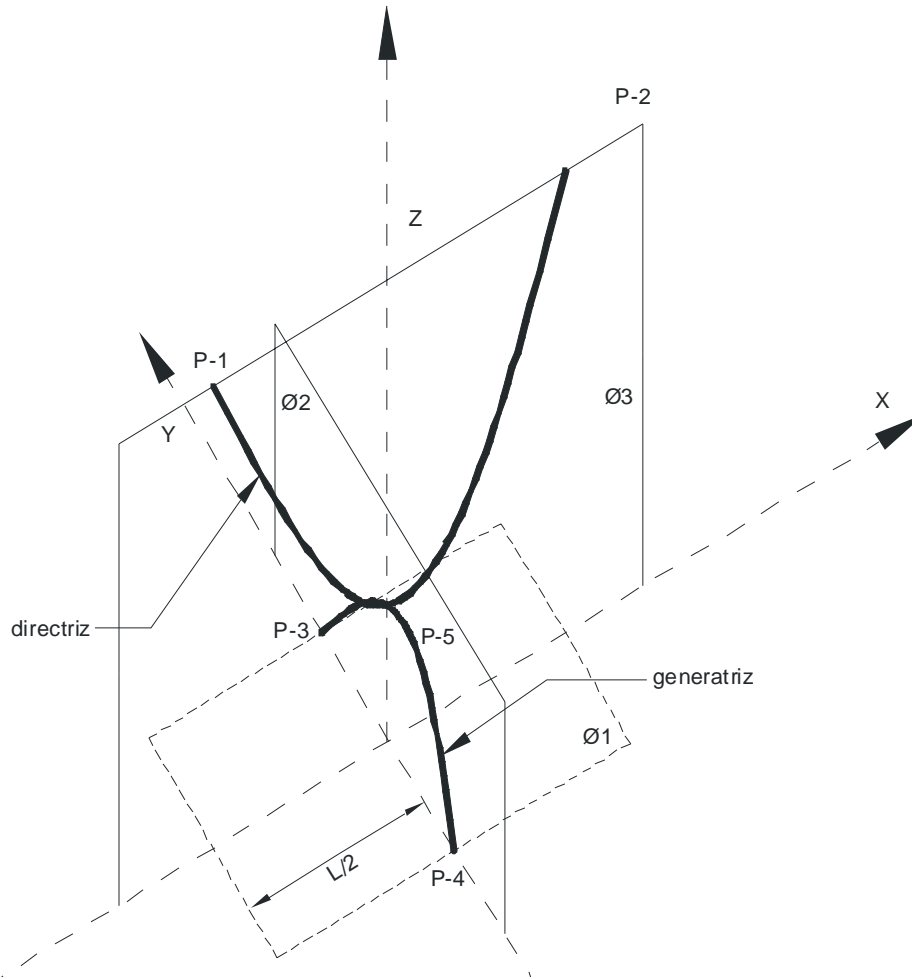


Fig. 3.13 Proceso para generar una superficie de traslación con curvatura anticlástica

Cabe mencionar que en este caso aunque la geometría dada sea similar a un paraboloides hiperbólico, este no lo es. Ya que sus directrices y generatrices son curvas catenarias y un corte paralelo a la superficie de apoyo no nos genera hipérbolas sino curvas cualesquiera como se menciona en el segundo caso de superficies de traslación. Si bien la parábola y la catenaria tienen similitudes no son idénticas. El mismo caso se presenta cuando generamos una superficie anticlástica con curva directriz elíptica o de circunferencia. Por lo tanto si a una superficie de traslación sinclástica con directriz catenaria le denominamos "catenariode" una superficie anticlástica con la misma directriz tendrá la misma denominación y podrá diferenciarse haciendo mención si es este sinclástico o anticlástico o bien con curvatura de Gauss positiva o negativa.



### 3.4. Programa GEOG\*

En 1982 el doctor Oliva Salinas desarrolla el programa matemático GEOG (Geometrie Gitterschale) en lenguaje Fortran y para 1991 dirigiendo la tesis de licenciatura en Ingeniería Civil de Reinhard Kürten en la Universidad de Essen Alemania se mejora en el programa Basic y de ahí se adapta a PC. Este programa nos proporciona la topología exacta de una superficie sinclástica de traslación con directrices y generatrices catenarias, calculando las coordenadas de los puntos, así como las distancias entre estos, en verdadera forma y magnitud, en relación a un sistema de ejes tridimensional.

Los cálculos que realiza el programa son los siguientes:

- Cálculo de las catenarias principales y complementarias, así como la determinación del valor del parámetro "a" (radio de curvatura mínimo) en ambas ecuaciones de las catenarias.
- Coordenadas de todos los nodos, tanto en la superficie interior de la estructura como en el borde de la misma.
- Cálculo de la longitud del arco (o en su caso de la cuerda) de acuerdo a la distancia nodal (DN) prefijada, así como la longitud variable de las barras del borde.
- Cálculo de todas las diagonales introducibles en la estructura.
- Cálculo de los ángulos originados por los cruces de barras en cada nodo.

A continuación se presentan los datos obtenidos con el programa GEOG, para el desarrollo geométrico que determina la forma de una cubierta cualquiera, así como el dibujo del modelo generado como archivo DXF en ACAD. (Fig. 3.14)

#### Datos de introducción:

Nombre del Proyecto: GEOG

Nombre de salida: GEOG

Superficie de traslación con planta rectangular

#### Datos de la superficie de traslación:

Longitud en X = 3.000 m

Longitud en Y = 3.000 m

Flecha = 1.000 m

Flecha total = 2.000 m

Distancia nodal = 0.740 m

#### Ubicación de la malla:

Nodo en el ápice.

---

\* Oliva: Op cit. p. 27

**Catenaria principal en dirección - X**

Parámetro A (X) = 0.928139

| ä-SL  | X     | Y     | Z     | Nodo No. |
|-------|-------|-------|-------|----------|
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 3.000 | 1 / 1    |
| 1.101 | 0.959 | 0.000 | 2.459 | 1 / 2    |
| 2.201 | 1.500 | 0.000 | 1.501 | 1 / 3    |
| 0.000 | 0.000 | 0.959 | 2.459 | 2 / 1    |
| 1.101 | 0.959 | 0.959 | 1.918 | 2 / 2    |
| 2.201 | 1.500 | 0.959 | 0.960 | 2 / 3    |
| 0.000 | 0.000 | 1.500 | 1.501 | 3 / 1    |
| 1.101 | 0.959 | 1.500 | 0.960 | 3 / 2    |
| 2.201 | 1.500 | 1.500 | 0.001 | 3 / 3    |

**Catenaria principal en dirección - Y**

Parámetro A (Y) = 0.928139

| ä-SL  | X     | Y     | Z     | Nodo No. |
|-------|-------|-------|-------|----------|
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 3.000 | 1 / 1    |
| 1.101 | 0.000 | 0.959 | 2.459 | 2 / 1    |
| 2.201 | 0.000 | 1.500 | 1.501 | 3 / 1    |
| 0.000 | 0.959 | 0.000 | 2.459 | 1 / 2    |
| 1.101 | 0.959 | 0.959 | 1.918 | 2 / 2    |
| 2.201 | 0.959 | 1.500 | 0.960 | 3 / 2    |
| 0.000 | 1.500 | 0.000 | 1.501 | 1 / 3    |
| 1.101 | 1.500 | 0.959 | 0.960 | 2 / 3    |
| 2.201 | 1.500 | 1.500 | 0.001 | 3 / 3    |

**Longitud de diagonales [m]**

| Nodo-A | Nodo-B | long. | Nodo-A | Nodo-B | long. |
|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| 1 / 1  | 2 / 2  | 1.734 | 1 / 2  | 2 / 1  | 1.356 |
| 1 / 2  | 2 / 3  | 1.860 | 1 / 3  | 2 / 2  | 1.177 |
| 2 / 1  | 3 / 2  | 1.860 | 2 / 2  | 3 / 1  | 1.177 |
| 2 / 2  | 3 / 3  | 2.064 | 2 / 3  | 3 / 2  | 0.765 |

**Ángulos de la malla**

| Nodo  | ángulo-1 | ángulo-2 | ángulo-3 | ángulo-4 |
|-------|----------|----------|----------|----------|
| 1 / 1 | 76.03    |          |          |          |
| 1 / 2 | 64.67    |          | 103.97   |          |
| 2 / 1 | 62.76    | 103.97   |          |          |
| 2 / 2 | 38.83    | 115.33   | 76.03    | 116.07   |

**Ángulos de las mallas y de las cuerdas**

**Angulo de la cuerda de la catenaria principal en dirección "X"**

| Nodo-A | Nodo-B | à [°] | á [°] |
|--------|--------|-------|-------|
| 1 / 2  | 1 / 1  | 29.43 | 60.57 |
| 1 / 3  | 1 / 2  | 60.56 | 29.44 |

**Angulo de la cuerda de la catenaria principal en dirección "Y"**

| Nodo-A | Nodo-B | à [°] | á [°] |
|--------|--------|-------|-------|
| 2 / 1  | 1 / 1  | 29.43 | 60.57 |
| 3 / 1  | 2 / 1  | 60.56 | 29.44 |

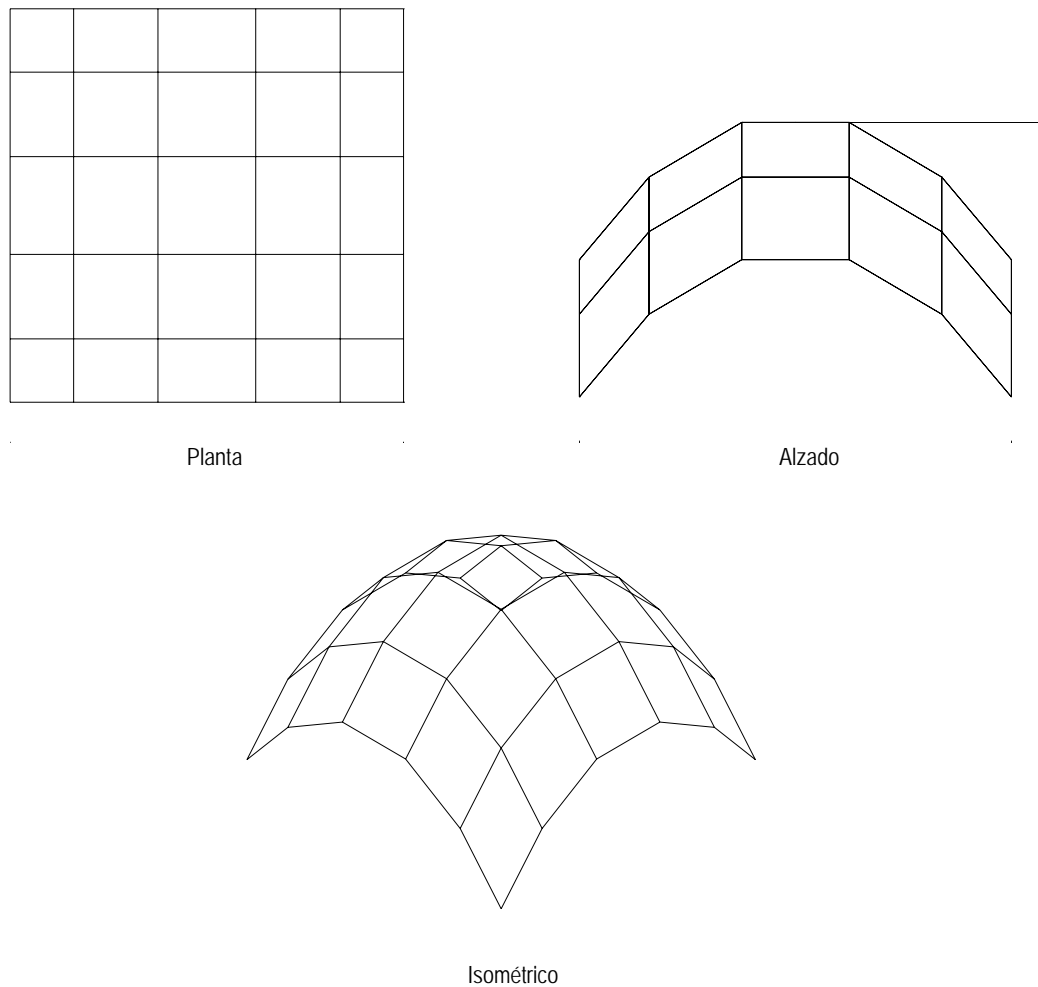


Fig. 3.14 Modelo geométrico de una cubierta con el programa GEOG

### 3.5. Sistema de nodos y barras para cascarones reticulados de traslación\*

Como mencionamos en el capítulo anterior el doctor Juan Gerardo Oliva Salinas realizó la disertación "Über die Konstruktion von Gitterschalen" (Sobre la construcción de cascarones reticulados). En la cual propone un sistema de nodos y barras que fundamenta las bases del proyecto de investigación "Fabricación e industrialización de sistemas estructurales con base en nodos y barras que sean elementos tipo y modulares para la construcción de cubiertas desmontables con claro y curvatura gaussiana variable"

A continuación se muestra una síntesis del trabajo que realizó el doctor Oliva sobre aspectos específicos del sistema constructivo. En esta destaca el diseño de un nodo universal que responde a las necesidades constructivas que demanda la estructura y a la particularidad de poder ser utilizados en cubiertas con escala y curvatura variable.

\* Oliva: Op cit. p. 55

### 3.5.1. Barras.

Dependiendo de la conformación constructiva del cascaron, existen dos posibilidades en la construcción de las barras:

#### *1ª alternativa*

Se origina por la deformación elástica de las barras continuas de la retícula. En este caso, es posible realizar el montaje completo de la estructura sobre la superficie del terreno y posteriormente elevarla a la posición deseada. Este procedimiento puede repetirse un sinnúmero de veces, con la ventaja de poder transportar la estructura abatida de manera relativamente fácil. Además, las barras de la retícula pueden utilizarse varias veces y en diferentes cascarones. En el caso de la deformación plástica del material, el uso del procedimiento anterior de elevar y abatir la estructura, presenta dificultades y es por ello poco aconsejable. En ambos casos deben tomarse en cuenta las posibles uniones en las barras, para lograr la longitud planeada (Fig. 3.15).

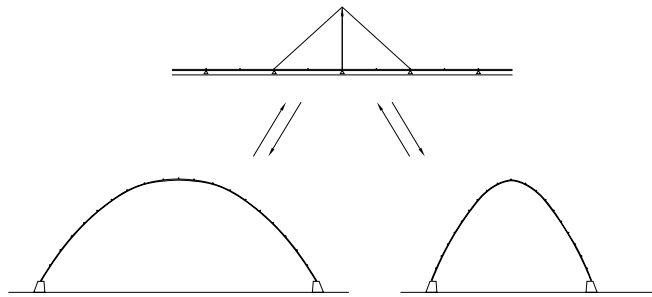


Fig. 3.15 Figura con la primera alternativa de barras

#### *2ª alternativa*

Se origina cuando se utilizan barras rectas aisladas, cuya longitud equivale a la distancia nodal. El proceso de montaje y desmontaje, el transporte y la utilización de las mismas barras para diferentes cascarones se puede llevar a cabo de manera relativamente fácil y rápida. Esto depende básicamente del diseño de barras y nodos, por medio del cual será posible construir cualquier función catenaria. La unión de las barras por exceso de longitud, se suprime completamente. La forma y tamaño de la sección, será acorde al material seleccionado, el cual a su vez estará condicionado al cálculo estático, uso y topología del cascarón reticulado en cuestión. El elemento de unión de la barra al nodo, se puede acondicionar a cualquier sección de barra utilizada. A continuación, se ejemplifican estos elementos de unión junto con la descripción de los nodos (Fig. 3.16).

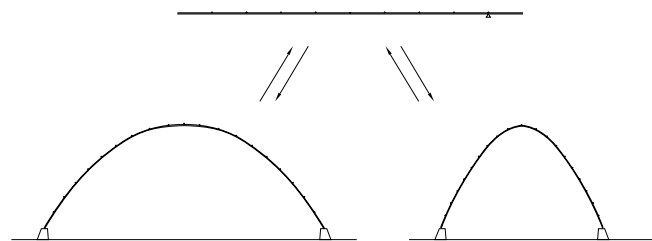


Fig. 3.16 Figura con la segunda alternativa de barras

### 3.5.2. Nodo

Este es una de las partes más importantes de los cascarones reticulados. Estos deben satisfacer los siguientes requerimientos:

- Unir cada cruce de barras sin afectar la topología del cascaron
- Garantizar determinada resistencia contra el giro y a su vez hacer posible la fácil fabricación y montaje.
- Garantizar su utilización en cualquier cascaron así como en cualquier lugar dentro de la retícula, es decir que deben poderse adaptar a la pendiente variable de la misma.
- Finalmente deben hacer posible la unión de otros elementos constructivos a los mismos como son diagonales, techumbres, instalaciones, etc.

El diseño de nodo que realizó el doctor Oliva, da solución a las funciones descritas anteriormente y su solución general se basa en la siguiente descripción topológica:

En cada cruce de barras, estas generan cuatro ángulos cualesquiera, cuya proyección paralela sobre el plano corresponde siempre a cuatro ángulos rectos. Si consideramos al punto "k" como el centro de una esfera podemos derivar de esta figura que las barras siempre cortan a la superficie de la esfera en dos meridianos M1 y M2, los cuales son perpendiculares entre si (Fig. 3.17).

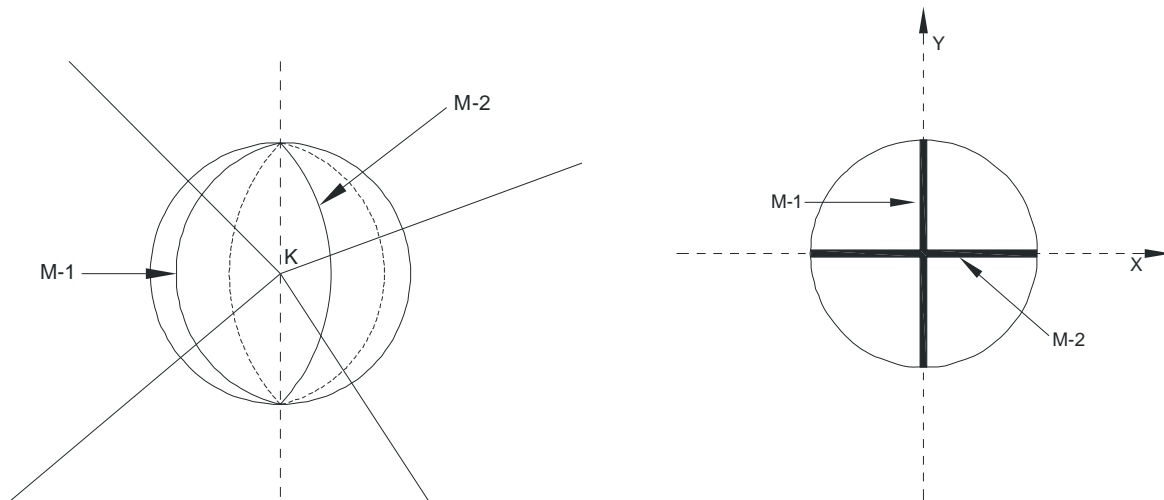


Fig. 3.17 Configuración de placas circulares para el nodo a partir de la esfera.

La solución resultante de esta construcción, es de dos placas de forma circular cuyos bordes corresponden con los meridianos M1 y M2, esto fue considerado como la forma base para el desarrollo de las siguientes alternativas.

#### *Alternativa "A"*

Este nodo puede utilizarse en claros relativamente cortos, o bien en zonas de la retícula cuya rigidez sea tomada exclusivamente por el nodo, es decir, donde no se introduzcan diagonales de refuerzo. No obstante, es posible dado el caso, conectar diagonales en tracción.

Además de las placas P1 y P2, cuyos bordes corresponden con los meridianos M1 y M2, es posible añadir una tercera placa P3, para incrementar la rigidez contra el giro del nodo en sí.

El centro "k" corresponde a las coordenadas calculadas durante el proceso de determinación de la forma. En el se cruzan todos los ejes de las barras que concurren en el nodo. Los ángulos pueden ajustarse de acuerdo a la pendiente de la barra que se requiera. Los tornillos superior e inferior S1 y S2 sirven como posibles conectores para diagonales, techumbre, instalaciones o similares. Dependiendo de la forma, tamaño y material de la barra, es posible construir el elemento de unión de esta con el nodo adaptándose a la sección propuesta. (Fig. 3.18)

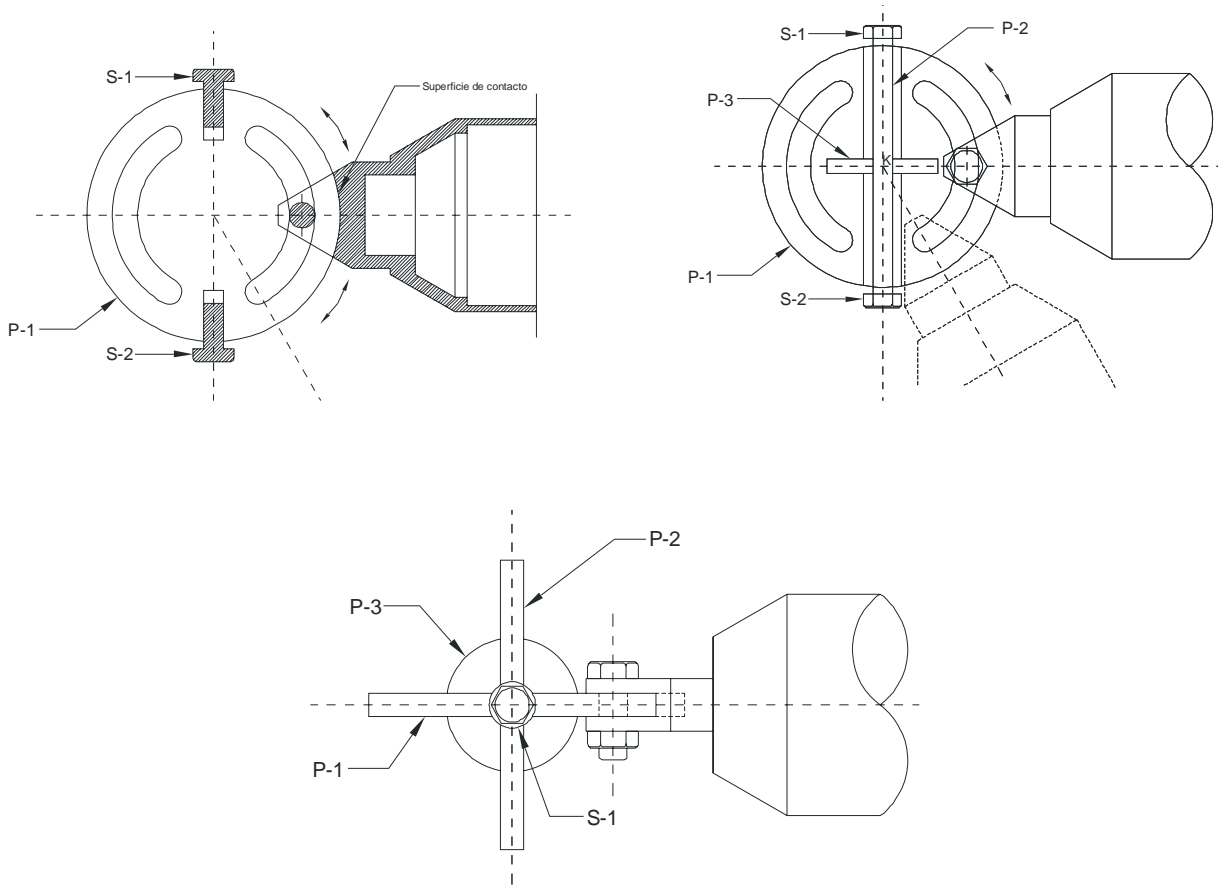
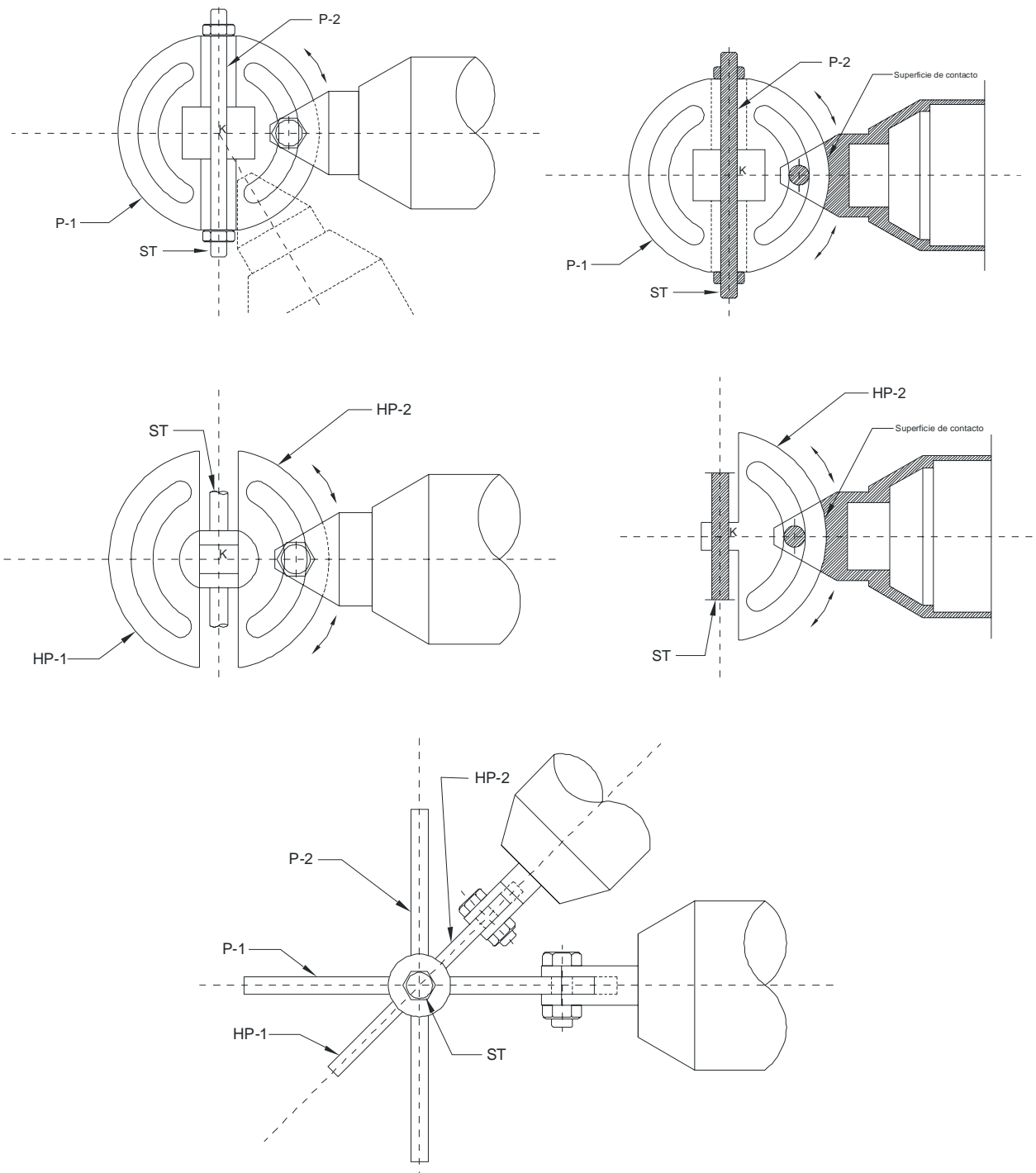


Fig. 3.18 Configuración geométrica de nodo: Alternativa "A"

*Alternativa "B"*

El nodo No. 2 satisface las propiedades mencionadas sobre el nodo "A" y además permite la conexión de diagonales. La forma básica del nodo "A" permanece. En lugar de la placa P3 y de los dos tornillos S1 y S2 posee una barra de acero de forma cilíndrica ST cuyo eje longitudinal corresponde con el eje "Z". Esta barra une las medias placas HP1 y HP2, cuya cantidad (4 máximas) depende del número de diagonales que se deseen introducir. Pernos con rosca en ambos extremos de la barra sirven para fijar la barra misma y así como posible conexión para elementos de la techumbre, instalaciones o similares. Todos los ejes, tanto los de las barras de la retícula como los de las barras diagonales, se cruzan en el punto central "k". (Fig. 3.19)





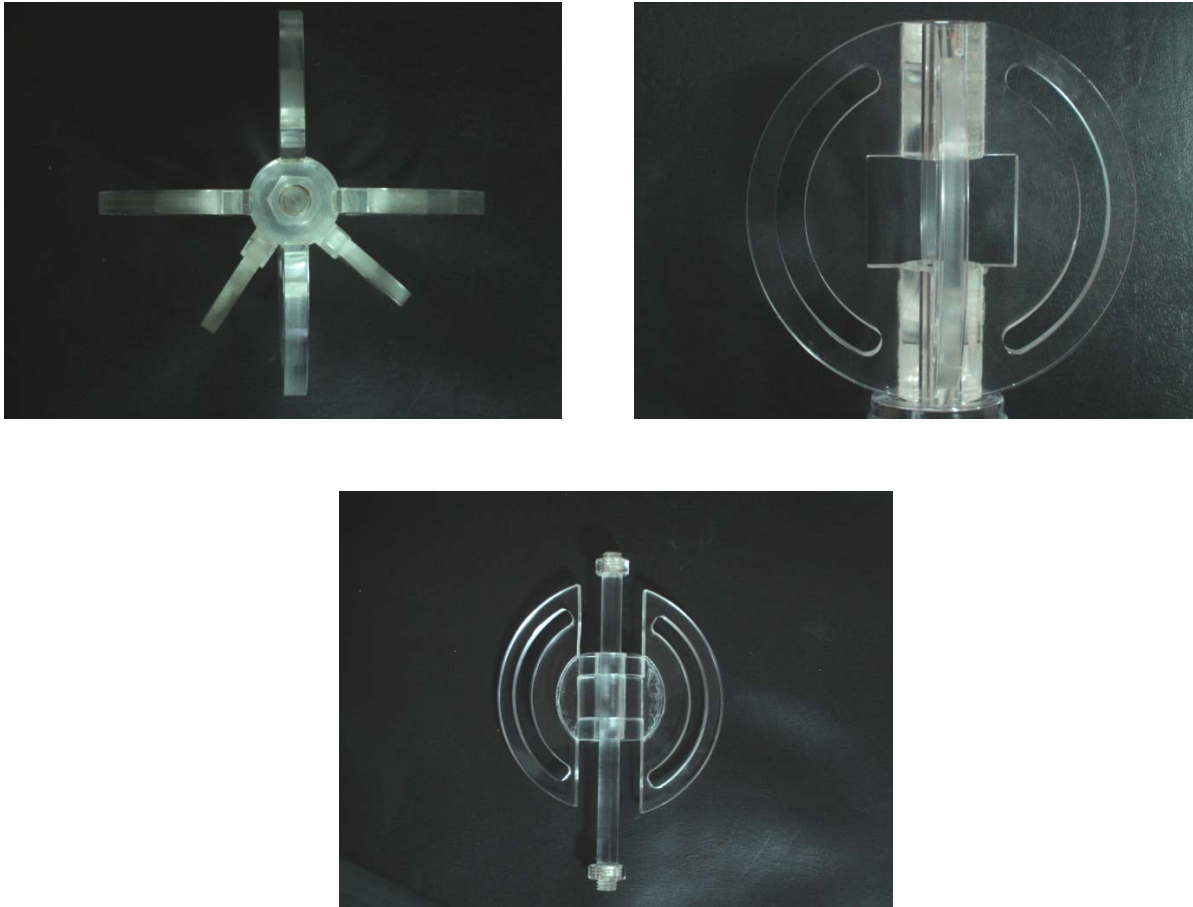


Fig. 3.19 Configuración geométrica de nodo: Alternativa "B"

### *Alternativa "C"*

Esta alternativa de nodo ofrece la posibilidad de construir un cascaron reticulado con barras continuas cuya deformación ocurre las mas de las veces elásticamente; sin embargo también es posible su aplicación con barras deformadas plásticamente. El montaje de la estructura completa se realiza sobre el plano base o sea sobre el piso para posteriormente elevar al CRT a su posición definitiva.

Para satisfacer estos objetivos, se desplazo el eje de las barras que corren en un sentido longitudinal con respecto al eje de las barras que corren en el otro sentido. Entre mas grande sea el desplazamiento ( $V$ ) mayor será el ángulo de máxima inclinación de las barras. (Fig. 3.20)

También es posible utilizar este nodo con barras rectas aisladas Las tres alternativas de nodos descritas representan el principio de construcción del nodo, a partir del cual pueden derivarse otras variantes de acuerdo a las necesidades.

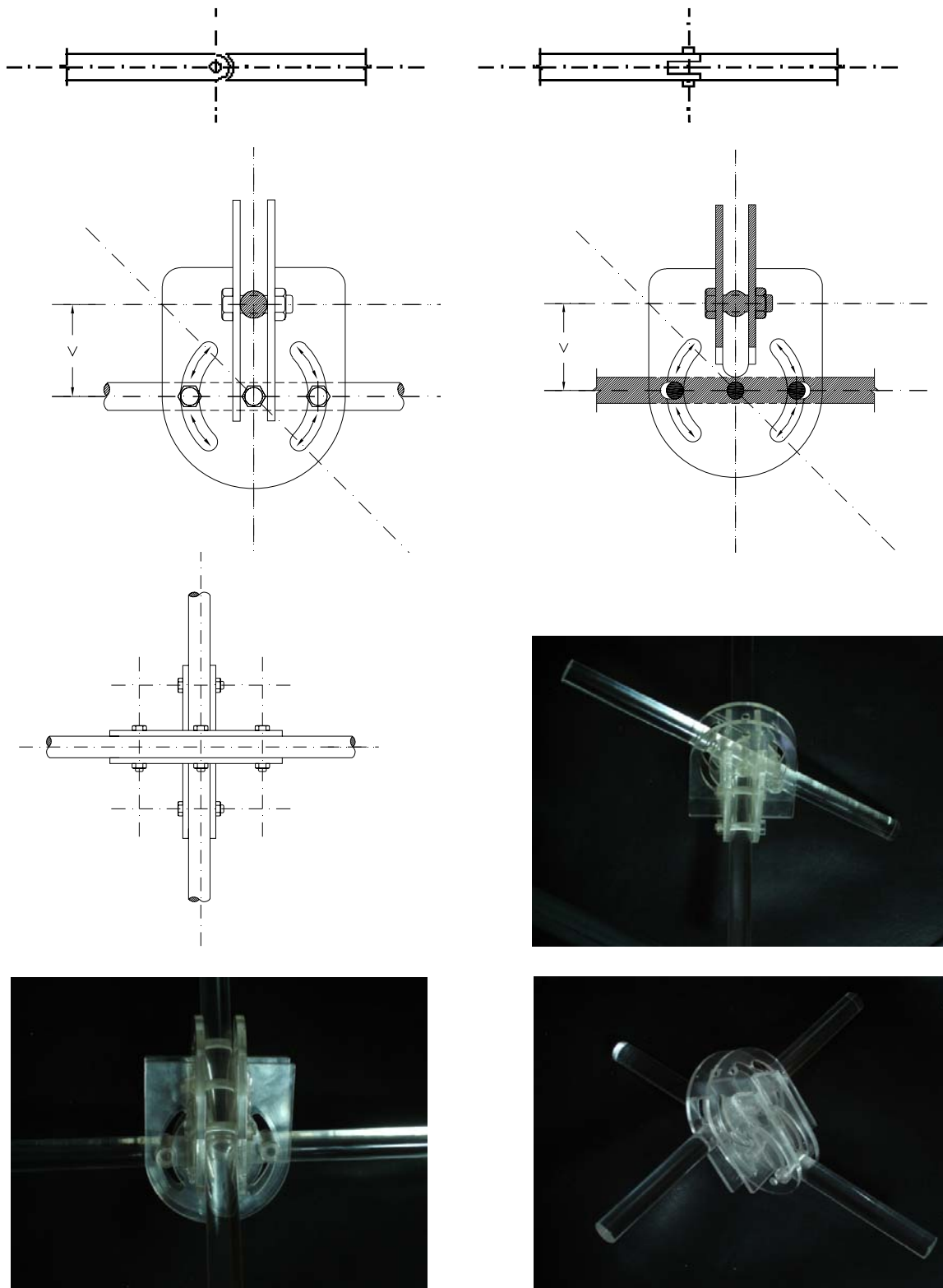


Fig. 3.20 Configuración geométrica de nodo: Alternativa "C"

### 3.5.3. Diagonales.

Es necesario rigidizar la estructura debido a su comportamiento estático. La inserción de diagonales genera una malla triangular. Dependiendo de su lugar en la retícula, estas diagonales pueden trabajar a tracción o a compresión en la condición de peso propio de la estructura.

La longitud de las diagonales depende de la distancia nodal y de la pendiente de la retícula. Por tal motivo, es conveniente poder ajustar las diagonales a las longitudes variables. Así mismo, la inserción o eliminación de las mismas debe efectuarse de manera rápida y sencilla. (Fig. 3.21)

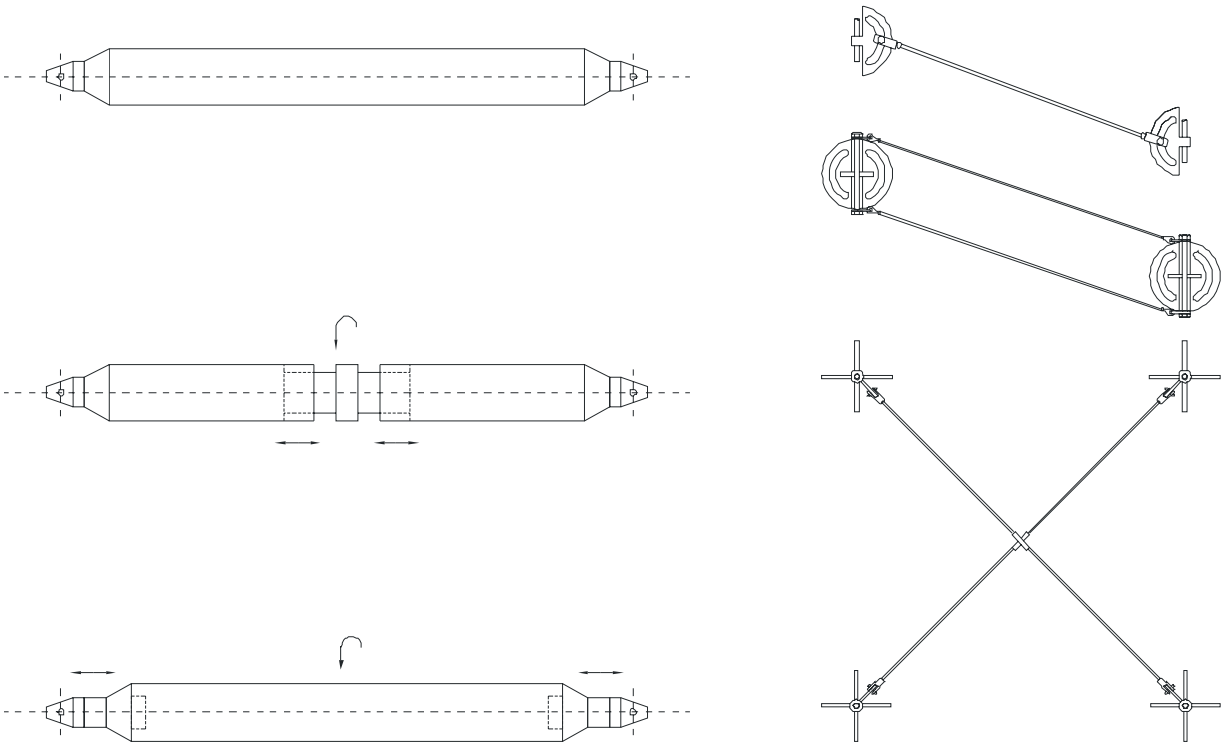


Fig. 3.21 Ejemplos de posibles diagonales

### 3.5.4. Borde.

Se pueden tener diferentes casos de apoyo para la superficie. Las siguientes figuras muestran una solución de apoyo que se puede utilizar en cualquier caso. (Fig. 3.22)

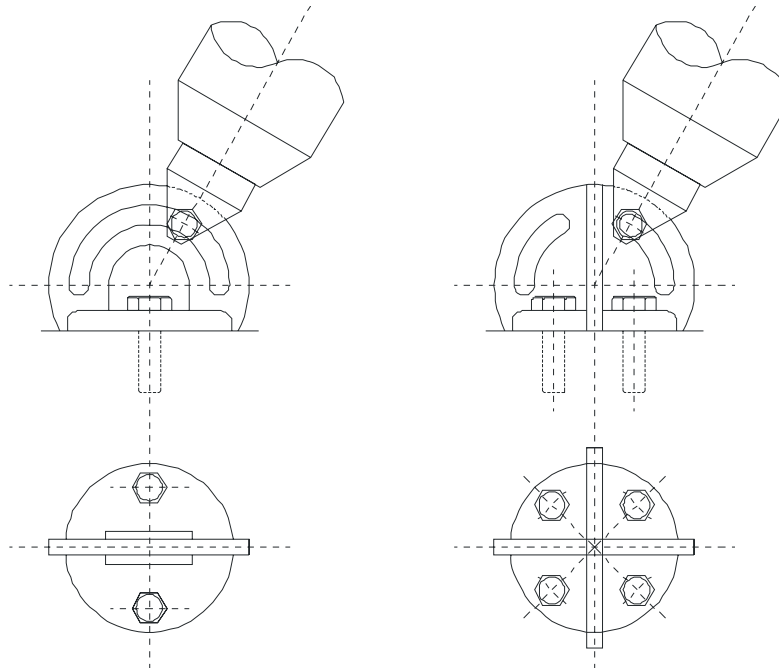


Fig. 3.22 Configuración geométrica de nodo de apoyo sobre borde.

1er caso: Borde sobre apoyo continuo.

Este caso se origina cuando existe un apoyo continuo a todo lo largo del borde debido a que en cada punto de borde que se puede fijar, se encuentra la estructura sometida solamente a esfuerzos de compresión, considerando solo su condición de peso propio. (Fig. 3.23)

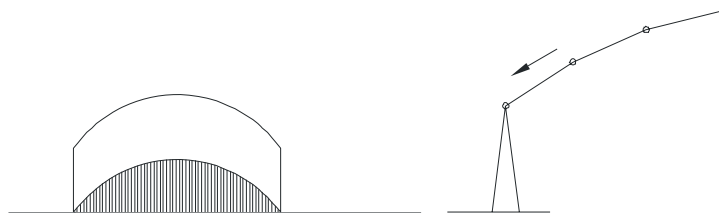


Fig. 3.23 Borde sobre apoyo continuo

2º caso: Borde libre.

El cascarón con borde libre se origina cuando no existe un apoyo continuo a lo largo del borde. Es posible generar un cascaron reticulado con mallas reticulares completas, variando relativamente poco las dimensiones dadas. La ventaja en este caso es que se puede construir la estructura completa con un solo tipo de barra, o sea de longitud constante. Otra posibilidad de lograr mallas completas en el borde consiste en seleccionar puntos de borde determinados. (Fig. 3.24)

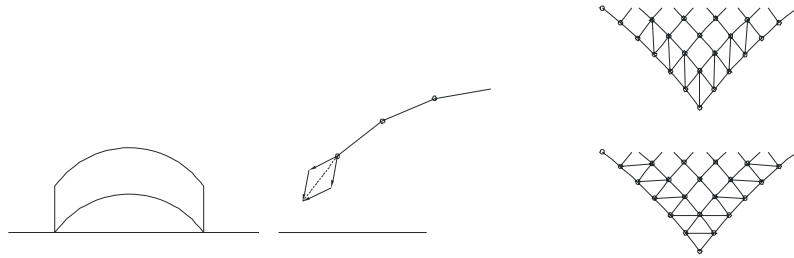


Fig. 3.24 Borde libre

3er caso: Borde apoyado sobre otras estructuras.

Este caso se da cuando el borde se apoya sobre una estructura independiente al cascaron reticulado. Se pueden considerar las siguientes tres variantes:

- a) Borde sostenido por cuerdas. En este caso las fuerzas laterales son absorbidas por las cuerdas. Para disminuir el número de cuerdas, sería recomendable una combinación con diagonales en las mallas de borde. (Fig. 3.25)

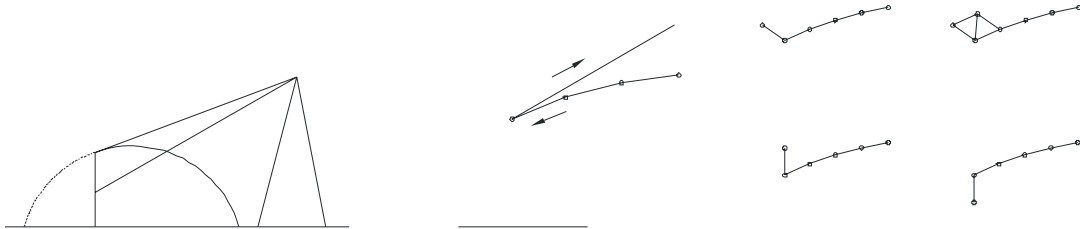


Fig. 3.25 Borde sostenido por cuerdas

- b) Borde sobre apoyos aislados. Este caso se da principalmente cuando se planean grandes claros. De igual manera que en el caso anterior, sería recomendable una combinación con diagonales en el borde. (Fig. 3.26)

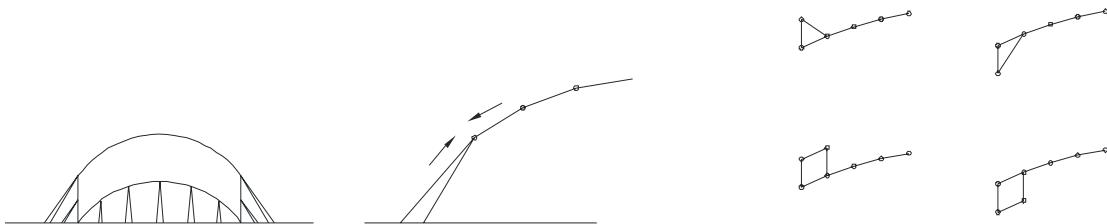


Fig. 3.26 Borde sobre apoyos aislados

- b) Borde sobre borde. Este borde se origina por la combinación de dos o mas cascarones reticulados. Las fuerzas tangenciales se reducen casi exclusivamente a fuerzas verticales, provocando solamente fuerzas a compresión sobre el arco de borde. No obstante, podría incrementarse la fuerza resultante considerablemente, por lo que se requerirá algún elemento estructural extra como ayuda de rigidización. (Fig. 3.27)



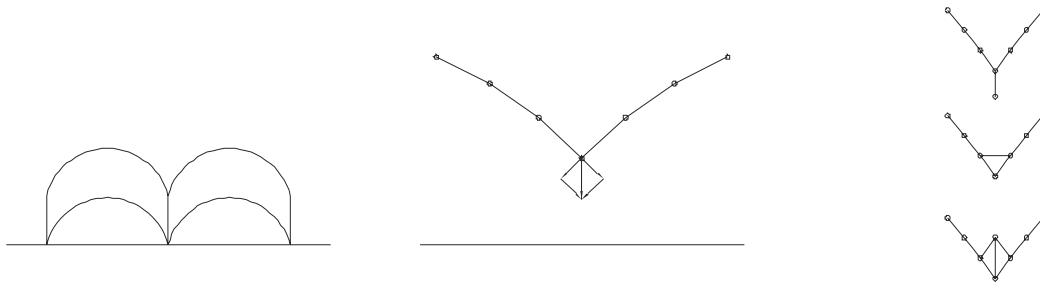


Fig. 3.27 Borde sobre borde

### 3.5.5. Propuestas constructivas de rigidización para problemas específicos.

Se consideran los siguientes tres casos:

- a) Perforaciones. Estas se pueden considerar como bordes interiores. Pueden constituir bordes libres o bien apoyarse sobre otras construcciones. La rigidización de las perforaciones serían de manera análoga a las propuestas descritas para el borde. (Fig. 3.28)

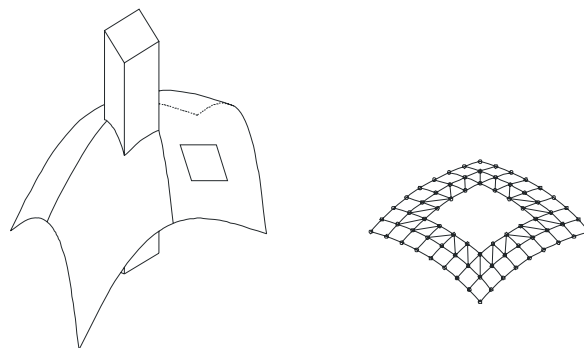


Fig. 3.28 Rigidización con perforaciones

- b) Cargas concentradas. Debido a su utilización, podrían actuar cargas concentradas sobre lugares determinados de la construcción reticulada. Para garantizar el estado de equilibrio del cascaron reticulado en tales casos de carga, se proponen las siguientes alternativas de rigidización. (Fig. 3.29)

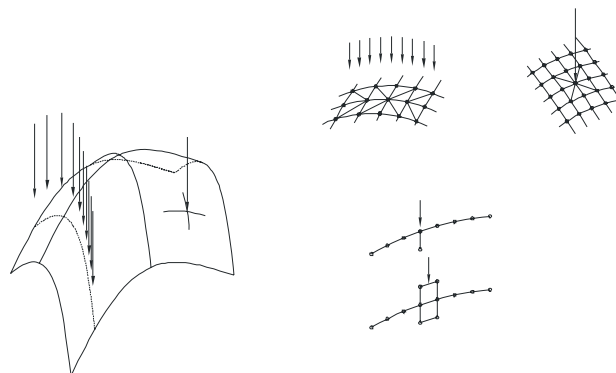


Fig. 3.29 Rigidización con cargas concentradas

c) Claro grande y/o gran carga. La rigidización del cascaron reticulado puede incrementarse si la estructura se duplica, es decir, si se construye en varias capas. Esto se aplica cuando se plantean grandes claros o bien, cuando se esperan cargas importantes. Las conexiones descritas en los mismos, hace posible la inserción sencilla y rápida de barras verticales. (Fig. 3.30)

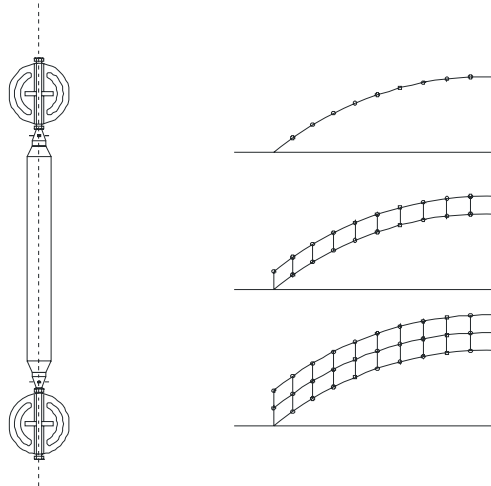


Fig. 3.30 Rigidización con claro grande y/o gran carga

**3.5.6. Cubierta.**

La cubierta puede ser ayuda en la rigidización del cascaron reticulado o bien puede trabajar independientemente del comportamiento estático de la construcción reticulada. De toda construcción reticulada que se desea cubrir se puede derivar lo siguiente:

Las barras, cuyos ejes corresponden a un mismo sentido, corren siempre paralelas entre si. Así mismo, cada modulo de la retícula se determina por cuatro puntos nodales los cuales se encuentran sobre el mismo plano.

De esto se deduce que los bordes de cada modulo, es decir, de cada retícula, se pueden cubrir siempre con una placa plana cuya forma obedece a un paralelogramo. Esto permite afirmar que cada placa que se utiliza para cubrir un elemento reticular, se puede definir solamente con dos datos: distancia nodal (DN) y el valor de uno de los ángulos (WR) por sus siglas en aleman "Winkel Raun" (ángulo en el espacio).

El elemento de cubierta o cerramiento montado sobre el reticulado, puede funcionar como "piel activa", rigidizando y creando secciones en grandes claros. (Fig. 3.31)

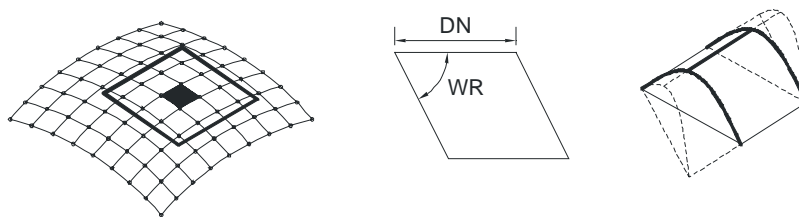


Fig. 3.31 Geometría con placas planas de cubierta

### 3.5.7. Fabricación y montaje.

En los casos mas sencillos de un cascarón reticular es posible erigir la estructura completa con un solo tipo de nodo y de barra, cuya sección y longitud son constantes. Cuando por motivos de diseño, se originan en el borde barras de longitud diferente, entonces se recomienda la identificación de las barras durante su fabricación.

Las diagonales necesaria para rigidizar el cascaron reticulado varían en su longitud dentro de limites determinados. No obstante, es deseable tener un número mínimo de elementos diagonales, cuya longitud pudiera variar.

La construcción de nodos descritos anteriormente, pueden ubicarse y utilizarse indistintamente en la estructura. En el caso de que se plantee una estructura permanente, se fabrica el nodo de tal manera, que la ranura circular se sustituye por una perforación menor. Igualmente se recomienda en este caso, una identificación del nodo durante su fabricación. (Fig. 3.32)

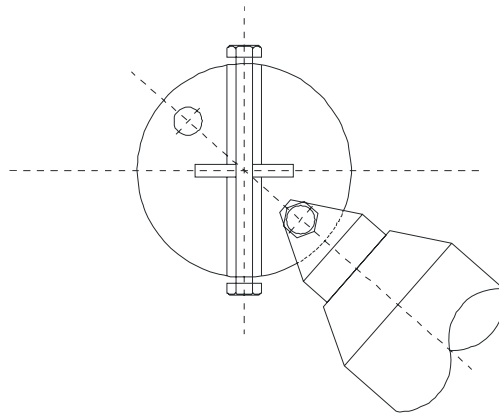


Fig. 3.32 Nodo con barra fija para estructuras permanentes

Los procedimientos utilizados para elevar cascarones reticulados son por medio de grúas, construcciones neumáticas o apoyos telescópicos entre otros, iniciando la erección en los puntos de apoyo, es decir en los bordes y por medio de torres de altura variable, ir armando la estructura hacia el interior de la misma. La sección montada anteriormente se soportaría a si misma.

Para controlar la geometría durante el montaje, sería suficiente una retícula marcada con hilos o pintura sobre la superficie de desplante, es decir, su proyección ortogonal en planta, una plomada y las coordenadas en el eje "Z", y así ubicar con precisión su posición en el espacio. (Fig. 3.33)

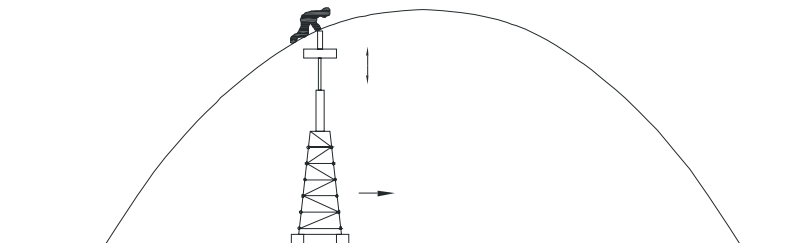


Fig. 3.33 Propuesta de montaje

#### 4. APLICACIONES DEL SISTEMA EN CUBIERTAS PARA PATIOS DE EDIFICIOS HISTÓRICOS

Una de las posibles aplicaciones del sistema es la construcción de cubiertas para patios de edificios históricos. En el Laboratorio de Estructuras se realizaron dos anteproyectos el primero para cubrir el patio central del Colegio de la paz "Vizcaínas", ubicado en la calle de Vizcaínas No.21 y el segundo para cubrir el patio de la Antigua Escuela de Jurisprudencia, edificio de la UNAM ubicado en la calle de Argentina, ambos en el Centro Histórico de la Ciudad de México. Los dos anteproyectos se basan en el sistema estructural anteriormente descrito.

##### 4.1. Anteproyecto: Cubierta para la Antigua Escuela de Jurisprudencia, UNAM.

En el año 2003 el director de la Facultad de Derecho le solicitó al Laboratorio de Estructuras un proyecto para cubrir el patio del edificio de la Antigua Escuela de Jurisprudencia, con el objetivo de dar más utilidad al espacio. (Fig. 4.1) El patio de forma rectangular tiene 28 x 26 m y una superficie de 728 m<sup>2</sup> (Fig. 4.2).



Fig. 4.1 Vista del patio por la azotea

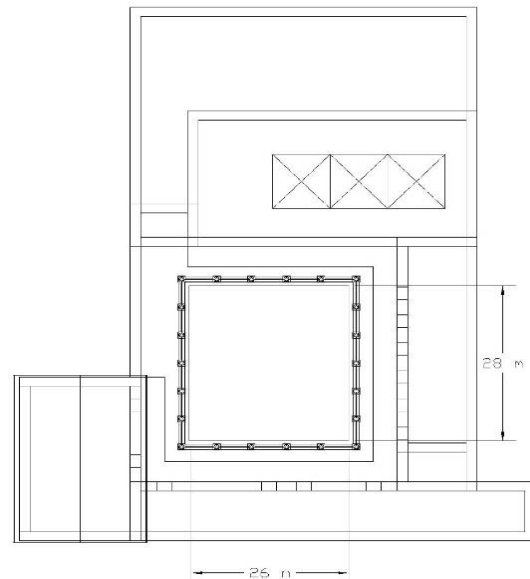


Fig. 4.2 Planta del Edificio

Para esta cubierta se propuso un cascarón reticulado de traslación con superficie sinclástica cuya directriz es una curva catenaria perpendicular a los ejes del patio. La determinación de la forma se realizó con el programa GEOG. A continuación se presentan los datos de introducción, los resultados obtenidos y la geometría de la cubierta en ACAD. (Fig. 4.3 y 4.4)

##### Datos de introducción:

Nombre del Proyecto: JURIS 01

Nombre de salida: JURIS 01

Superficie de traslación con planta rectangular

**Datos de la superficie de traslación:**

|                 |   |          |
|-----------------|---|----------|
| Longitud en X   | = | 28.000 m |
| Longitud en Y   | = | 26.000 m |
| Flecha X        | = | 3.000 m  |
| Flecha Y        | = | 3.000 m  |
| Flecha total    | = | 8.000 m  |
| Distancia nodal | = | 1.280 m  |

**Ubicación de la malla:**

Malla en el ápice.

**Catenaria principal en dirección - X**

Parámetro A (X) = 33.154949

**Catenaria principal en dirección - Y**

Parámetro A (Y) = 28.653147

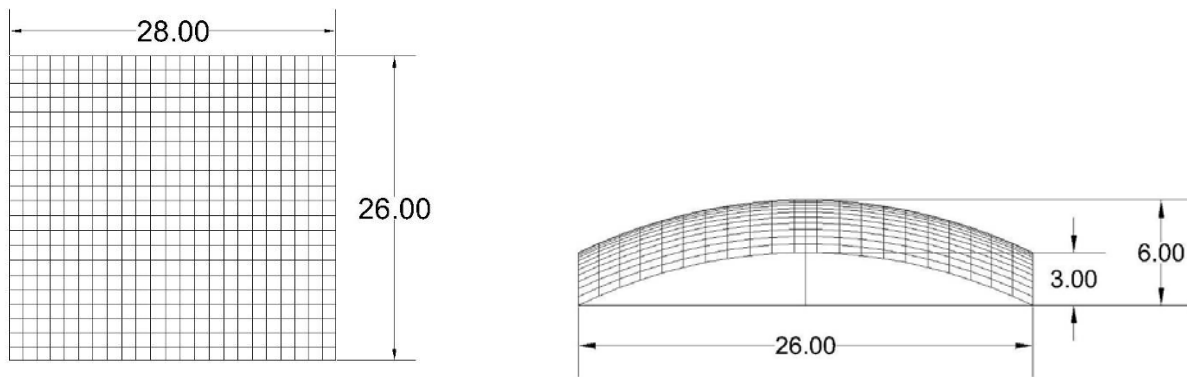


Fig. 4.3 Resultados del programa GEOG y geometría del catenaroide sinclástico

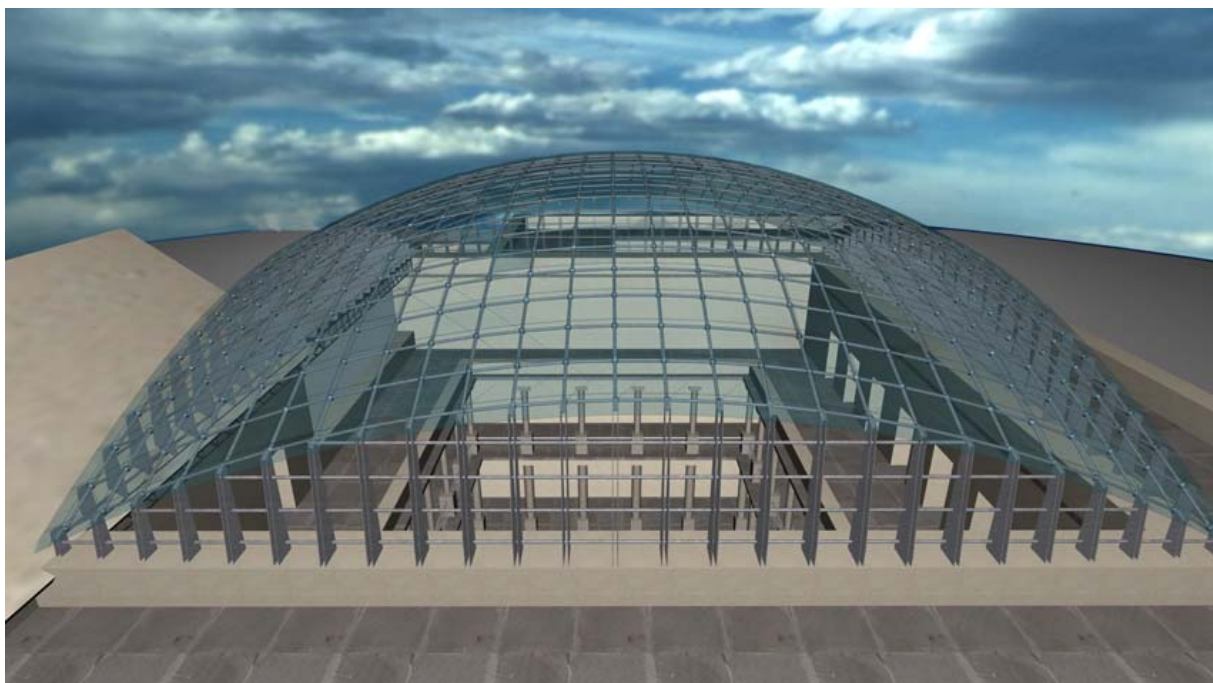


Fig. 4.4 Imagen virtual del cascarón



Dadas las dimensiones de la cubierta se considero una sola capa de malla rigidizada con diagonales en todo el borde y las esquinas. Se propuso un borde con apoyos aislados conformados de placa y ligados entre si con perfiles tubulares de acero perpendiculares a estas. Esto permite una ventilación cruzada en el edificio y evita el efecto invernadero (Fig. 4.5).

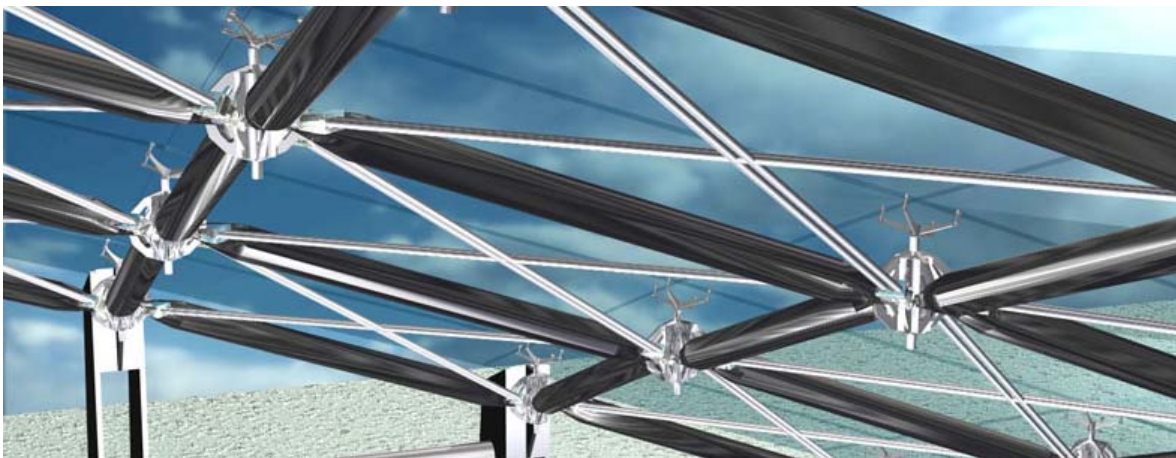
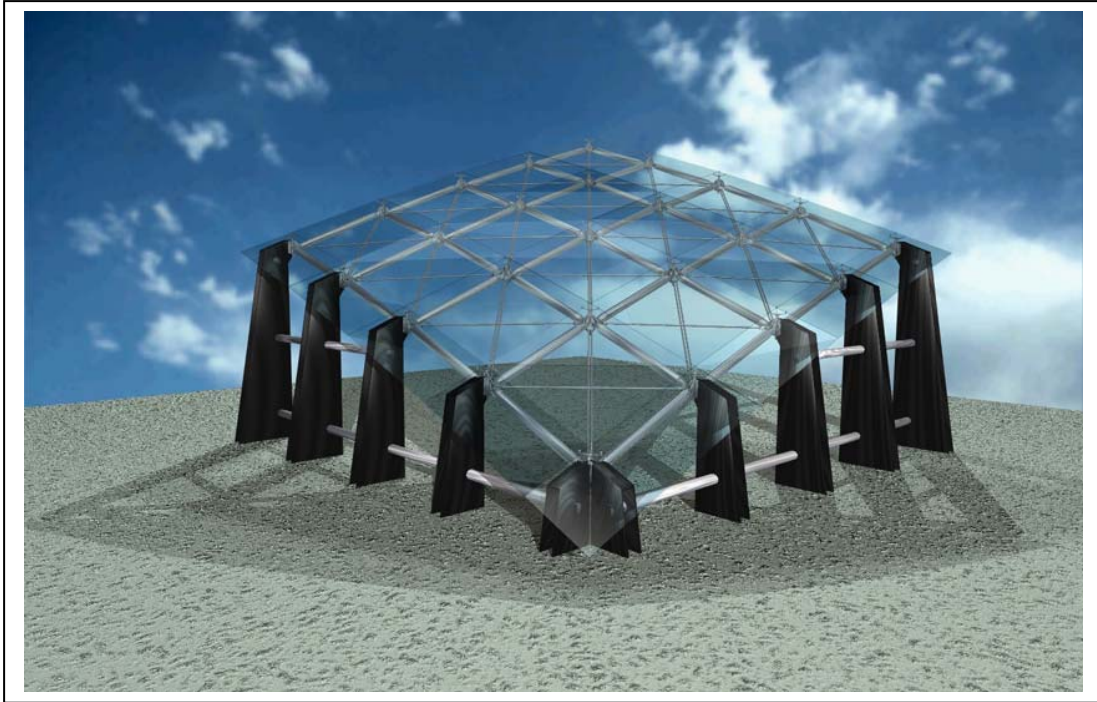


Fig. 4.5 Detalle de borde y rigidización de la malla



## 4.2. Anteproyecto: Cubierta para el Colegio de la Paz Vizcainas

En el mismo año fue solicitado el diseño de una cubierta para el patio central del edificio del Colegio de la Paz (Vizcainas). Los requerimientos de funcionalidad eran similares a los del patio de la Escuela de Jurisprudencia con la única particularidad que el sistema permitiera observar desde el interior la cúpula y la espadaña que se ubican en la azotea. Bajo estas premisas se determino realizar un cascaron reticulado de traslación con una cubierta de cristal para un patio rectangular de 33 x 41 m y un área a cubrir de 1350 m<sup>2</sup> (Fig. 4.6).

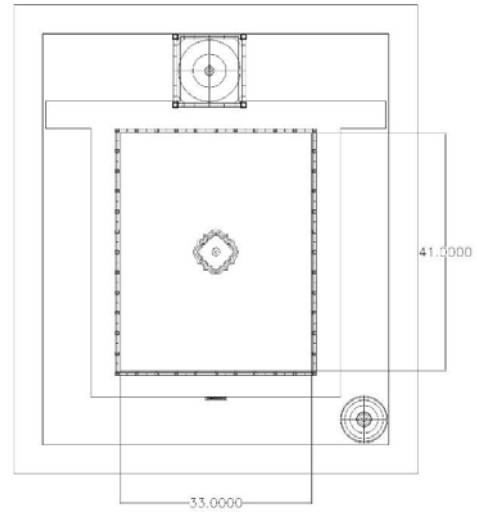


Fig. 4.6 Vista aérea del patio con cúpula y espadaña

En este caso la geometría se genera con una directriz catenaria colocada a 45° referida a los ejes principales del patio. La determinación de la forma se realizo con el programa GEOG. A continuación se presentan los datos de introducción, los resultados obtenidos y la geometría de la cubierta en ACAD. (Fig. 4.7 y 4.8)

### Datos de introducción:

Nombre del Proyecto: VIZC 01

Nombre de salida: VIZC 01

Superficie de traslación con planta rectangular

### Datos de la superficie de traslación:

|                 |   |                     |
|-----------------|---|---------------------|
| Longitud en X   | = | 63.730 m (Diagonal) |
| Longitud en Y   | = | 63.730 m (Diagonal) |
| Flecha X        | = | 4.000 m             |
| Flecha Y        | = | 4.000 m             |
| Flecha total    | = | 8.000 m             |
| Distancia nodal | = | 1.022 m             |

### Ubicación de la malla:

Malla en el ápice.

### Catenaria principal en dirección - X

Parámetro A (X) = 127.583252

### Catenaria principal en dirección - Y

Parámetro A (Y) = 127.583252

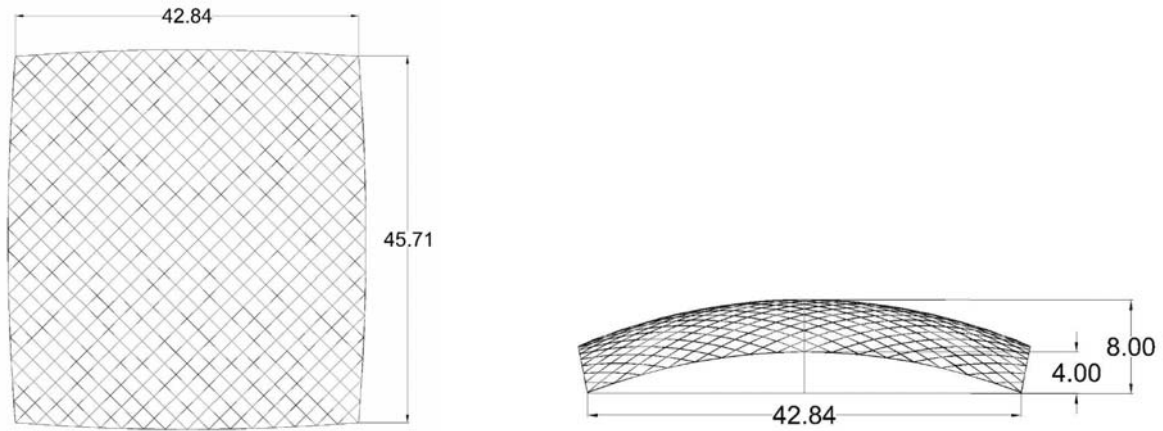


Fig. 4.7 Resultados del programa GEOG y geometría del catenaroide sinclástico en planta y alzado

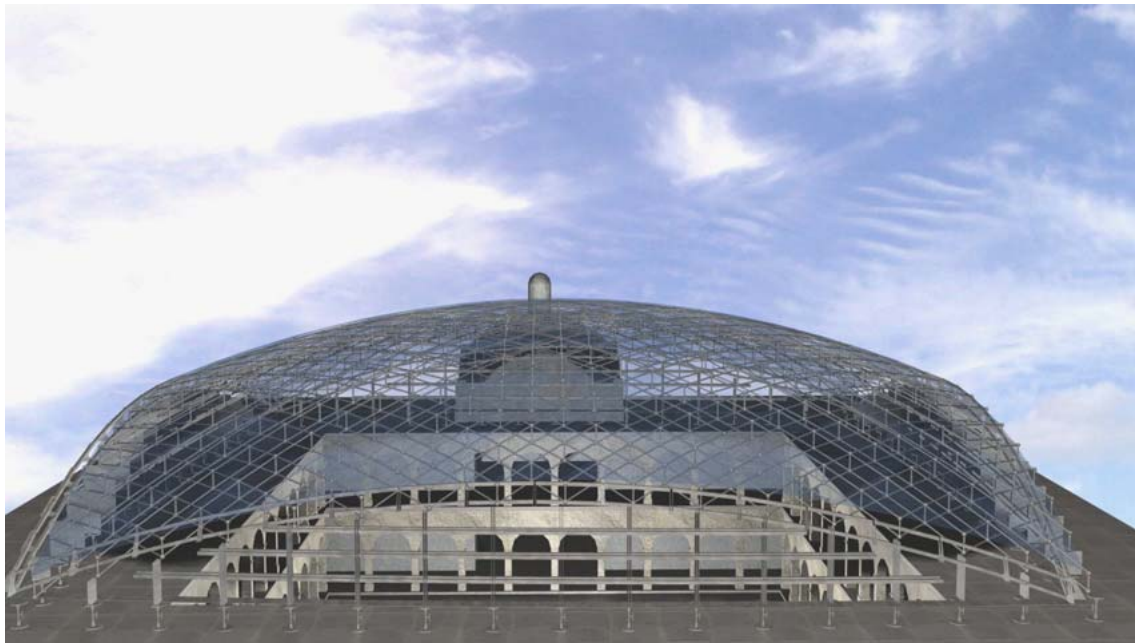


Fig. 4.8 Imagen virtual del cascarón

En esta cubierta dadas sus dimensiones 33 x 41 m y la ubicación de los arcos que conforman la malla a  $45^\circ$  se considero una malla de doble capa rigidizada con diagonales en todo el borde y las esquinas. El borde al igual que el anterior se propuso con apoyos aislados conformados de placa y ligados entre si con perfiles tubulares de acero perpendiculares a estas. (Fig. 4.9).

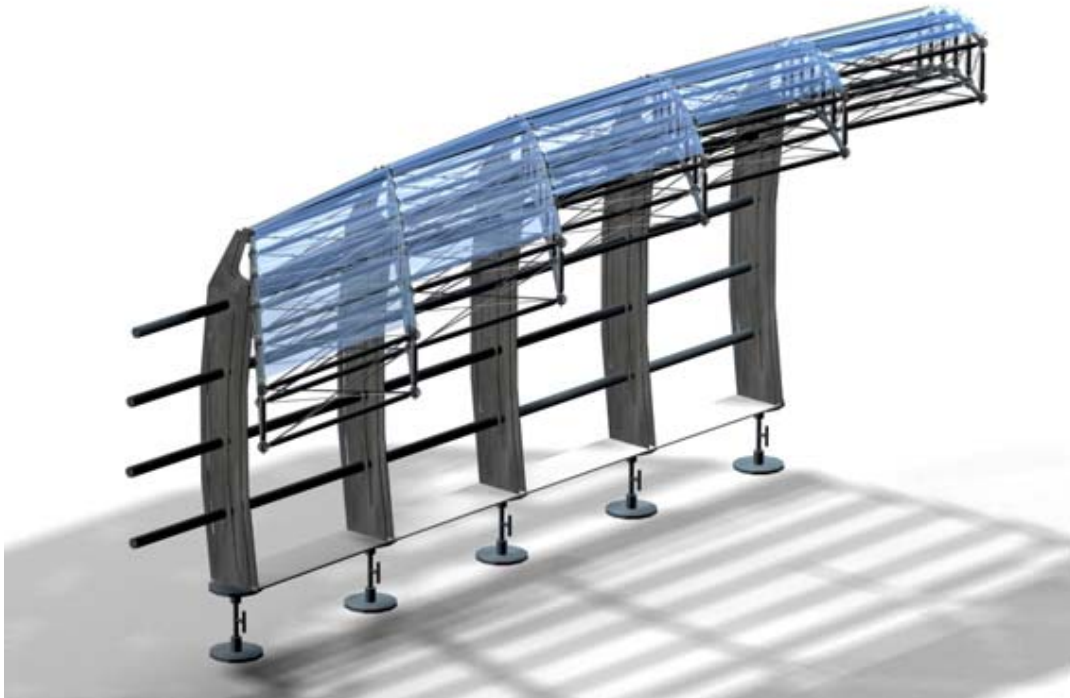


Fig. 4.9 Detalle del borde del cascarón en donde se observa la doble capa del sistema estructural

### 4.3. Propuesta constructiva de ambos anteproyectos

Para la construcción de la cubierta se consideraron todos los aspectos comentados en el capítulo 3 sobre los cascarones reticulados de traslación. Debido a las dimensiones de las cubiertas propuestas y a los objetivos del proyecto respecto a la fabricación e industrialización del sistema, se adoptó la fundición como proceso de producción para nodos y conectores (Fig. 4.10). Las barras de perfil tubular OC y las placas de borde son de acero tipo A-36 con secciones de acuerdo al Manual para Construcción en Acero del IMCA y los cables de rigidización de acero galvanizado.

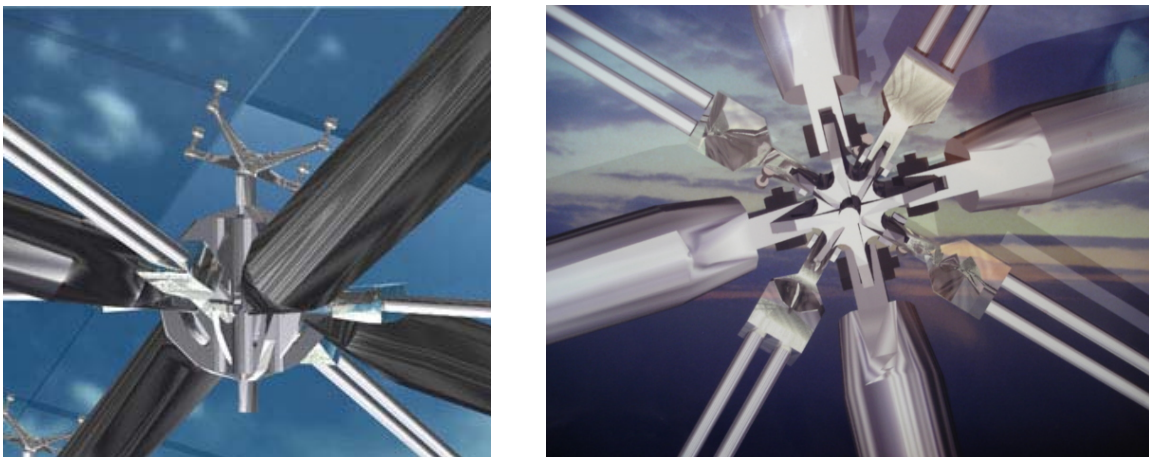


Fig. 4.10 Detalle del nodo, barras y contraventeos

Debido a las condiciones del Centro Histórico al ser zona lacustre se presentan hundimientos diferenciales en los edificios. Por este motivo diseñamos un sistema de apoyo al edificio con pernos de cuerda que permiten hacer ajustes para adaptarse a los hundimientos posibles del edificio y a la superficie accidental de la azotea (Fig. 4.11).

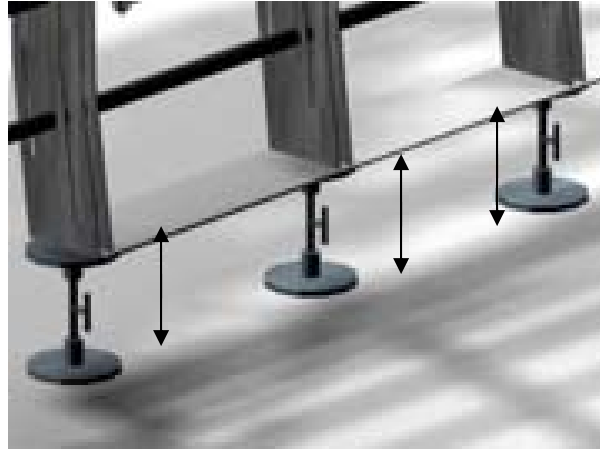


Fig. 4.11 Detalle del nodo, barras y contraventeos

#### 4.4. Metodología de análisis y diseño estructural

La metodología de análisis y diseño estructural para los dos anteproyectos fueron realizados por el corresponsable del proyecto de investigación el ingeniero Lorenzo Miranda y el becario de la Facultad de Ingeniería Sergio Uriel Balbuena. Para poder comprender como se elaboró dicho análisis, a continuación se hará mención de la metodología adoptada.

##### 4.4.1. Descripción del sistema estructural.

El sistema estructural adoptado para los proyectos anteriormente descritos está conformado por nodos y barras tipo que permiten formar con los mismos elementos, cubiertas con escalas y geometrías distintas generadas a partir de superficies de traslación. Estos dos proyectos son superficies de traslación de doble curvatura en el mismo sentido, es decir, curvatura sinclástica.

Los nodos y barras están dispuestos espacialmente según la geometría que se desea. El nodo está diseñado de tal manera que permite que las barras y contravientos puedan tomar distintos ángulos, para así adaptarse a las diferentes geometrías. La cubierta como tal será de cristal apoyada directamente en los nodos.

##### 4.4.2. Proceso de análisis y diseño estructural.

Por ser un modelo formado por barras dispuestas en el espacio, se realiza un análisis estructural espacial, para lo cual se requiere la utilización de un programa de cómputo, en este caso se propone el programa SAP2000 v8.2.

A continuación se describe de manera general el procedimiento de análisis y diseño estructural:

1. Dibujo de la estructura en tres dimensiones.
2. Propuesta de secciones transversales de los elementos para un análisis preliminar.
3. Carga muerta de la estructura.
4. Determinación de la carga viva según lo que marca el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF) para cubiertas.

La carga viva que marca el RCDF es:

| Destino / Carga                       | Instantánea | Máxima |
|---------------------------------------|-------------|--------|
| Cubierta con pendiente no mayor de 5% | 70          | 100    |
| Cubierta con pendiente mayor de 5%    | 20          | 40     |
| Cargas Vivas en [kg/m <sup>2</sup> ]  |             |        |

5. Para obtener las fuerzas verticales puntuales aplicadas en los nodos La carga viva se multiplica por el área tributaria de cada nodo. Cabe comentar que la pendiente de cada plano (panel o cristal) va cambiando, por lo que se tienen cargas vivas distintas y las fuerzas puntuales aplicadas en cada nodo son diferentes. Con estas premisas se tiene lo necesario para el análisis estructural de la combinación de cargas de las dos estructuras.
6. Para obtener la presión producida por el viento se determina un coeficiente que toma en cuenta la forma de la cubierta, con lo cual se amplifica o disminuye la presión y esto a su vez nos define el tipo de empuje que actúa, succión ó presión.
7. Se definen las combinaciones de carga según el RCDF:

Combinación I: Carga Muerta + Carga Viva Máxima.

Combinación II: Carga Muerta + Carga Viva Instantánea + Carga Accidental.

En este caso la carga accidental puede ser de sismo o viento, una a la vez, por lo que se tendrían que realizar dos análisis para la combinación II. Sin embargo por la forma de ambas estructuras, de baja altura y muy estables bajo cargas laterales, el sismo no es una condición crítica que rigiera el diseño. Por tanto, la combinación con el efecto del viento fue la más desfavorable pues son cubiertas abiertas que pueden estar expuestas al empuje del viento por debajo de la cubierta, sumándose así a los empujes de la parte superior. Por esta razón, en la combinación II, solo se considera al viento como carga accidental.

La determinación de las cargas debido al efecto del viento, no resulta fácil debido a que la geometría de las estructuras no es convencional y las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Viento (NTC) del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal no consideran ningún caso similar. Es necesario realizar algunas interpretaciones de las NTC y con cálculos laboriosos para la determinación de las presiones que ejerce el viento. Estos cálculos están basados en el caso más aproximado que contemplan las NTC, que es una cubierta de arco de circunferencia.

La carga en el catenaróide es por una parte de succión al paso del viento por la parte superior, esto se debe a la relación de las dimensiones de ancho y altura de la estructura, y por otra parte de presión en el interior de la cubierta ya que se tienen aberturas que abarcan más del 30% de su superficie.

6. Se carga el modelo tridimensional en el programa, con la aplicación de todas las fuerzas. Para lo cual se definen diferentes casos de cargas, cada carga es una librería separada en el archivo y en el análisis se utilizan según la combinación de cargas que se quiera revisar. Por tanto se definen las combinaciones de carga que nos marca el RCDF, aplicando los factores de carga correspondientes (para la combinación I es 1.4 y en la combinación II es 1.1). Estos factores amplifican las cargas por situaciones inesperadas o imprevistas. Una vez cargado el modelo y definidas las combinaciones, se realiza el análisis.
7. Con el análisis se obtienen las fuerzas internas en los elementos (fuerzas de compresión, tracción, cortantes, momentos flexionantes y torsionantes), desplazamientos nodales y reacciones en los apoyos. Con los desplazamientos se revisaron los estados límites de servicio, los cuales son los desplazamientos mínimos que marca el RCDF, que no deben ser mayores a lo marcado para garantizar un comportamiento adecuado de la estructura.
8. Con las fuerzas internas se calculan los esfuerzos internos que actúan en el material y a partir de los cuales se diseñan los elementos de la estructura, es decir, se revisan las secciones propuestas al inicio, las cuales no deben estar sobre esforzadas ni muy sobradas en resistencia, por lo que el proceso de análisis y diseño es iterativo hasta encontrar la sección óptima.



## 5. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS

### 5.1. Diseño y fabricación de piezas

Bajo las premisas sentadas por la disertación del doctor Oliva procedimos a construir un prototipo escala 1:1 en donde pudiéramos comprobar las hipótesis planteadas sobre la versatilidad del nodo para poder modificar la geometría y la escala de una cubierta así como el proceso de fabricación de las mismas.

El sistema propuesto constructivamente se conforma por un nodo constituido por dos placas principales de forma circular, unidas al centro y perpendiculares entre si, además de dos placas circulares secundarias que se ubican en la bisectriz del ángulo que forman las placas principales, ambas placas presentan una ranura paralela al borde de la circunferencia que funciona como guía para la ubicación de barras y diagonales de refuerzo. El segundo elemento que conforma el sistema, es una barra con conector que se inserta en las ranuras secundarias del nodo. (Fig. 5.1)

Todos los elementos de este sistema se enuncian y describen a continuación.

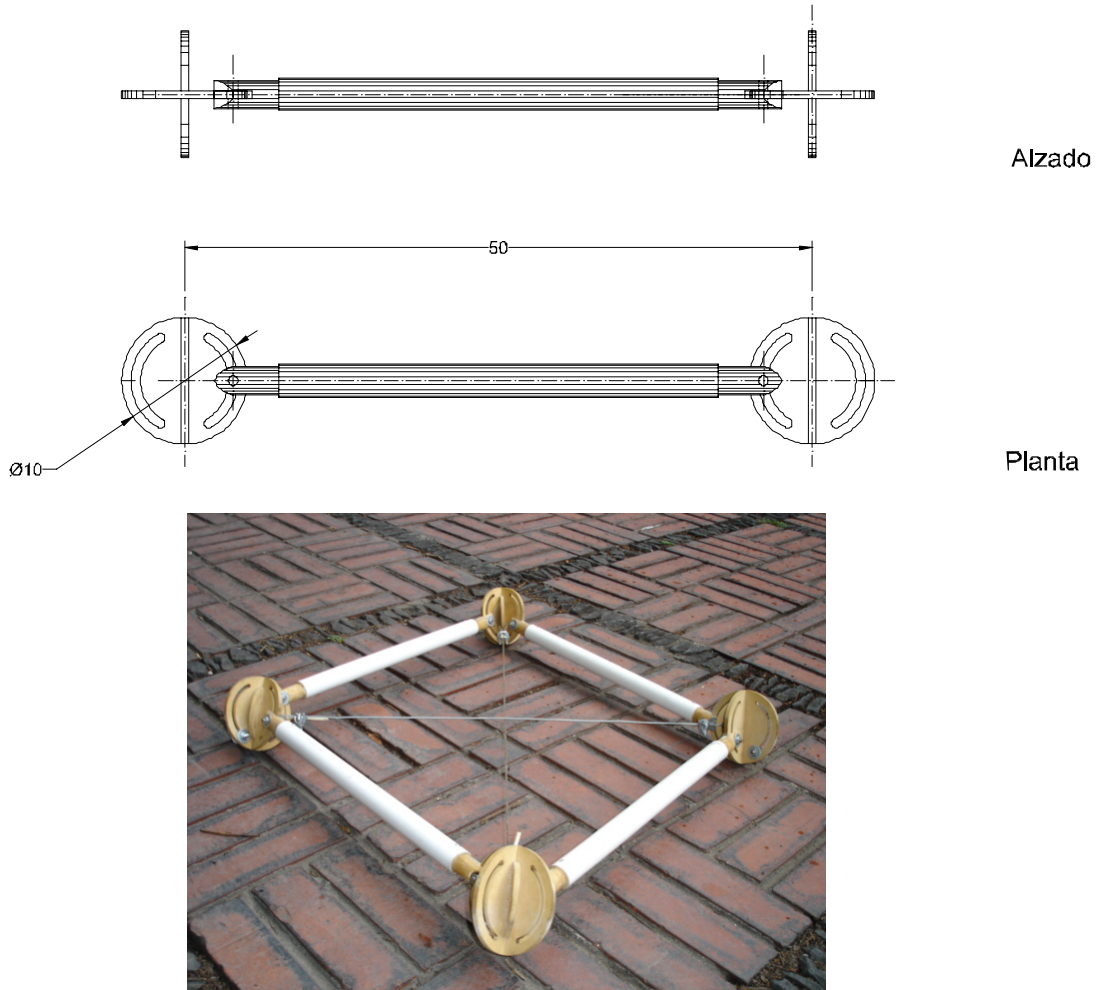


Fig. 5.1 Sistema para construir el primer modelo de la estructura escala 1:1 compuesto por un nodo, un conector de madera, una barra de PVC y contraventeos con cables de acero.

### 5.1.1 Nodos

Diseñamos un nodo a partir de dos placas circulares de 10 cm de diámetro que se unen perpendicularmente y cuatro placas de un diámetro menor colocadas a 45 grados respecto a las anteriores. Todas las piezas fueron construidas en MDF (Middle Density Fiber) de 6 mm de espesor. (Fig. 5.2)

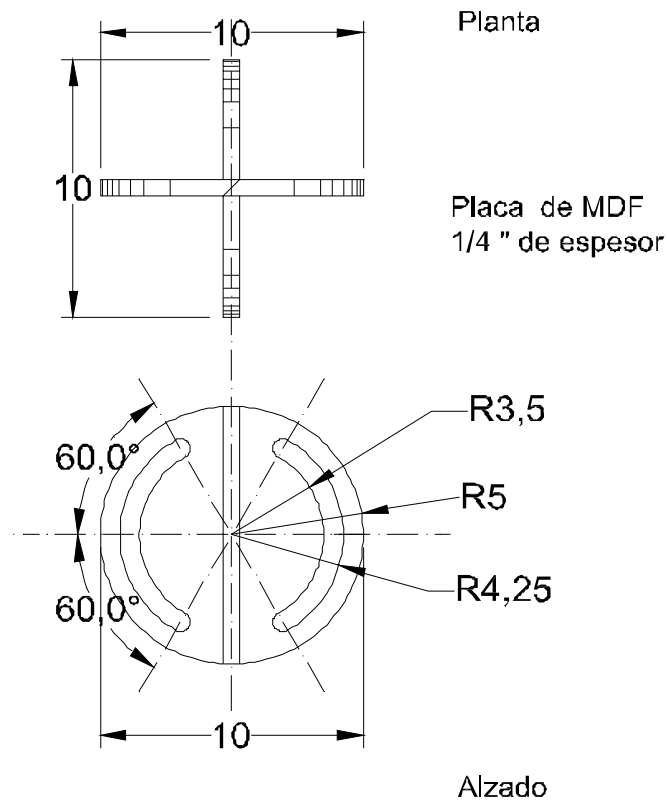
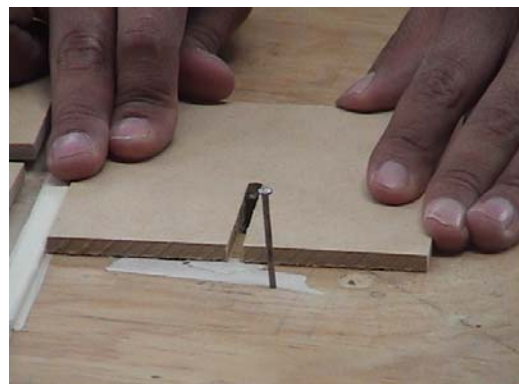
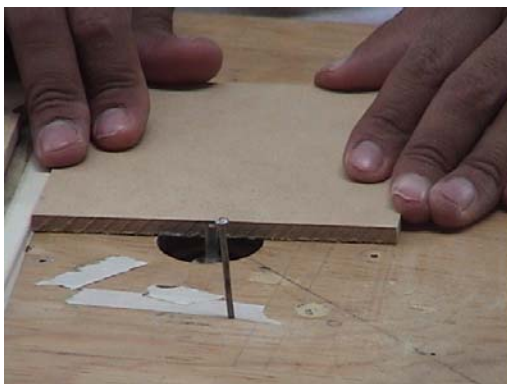


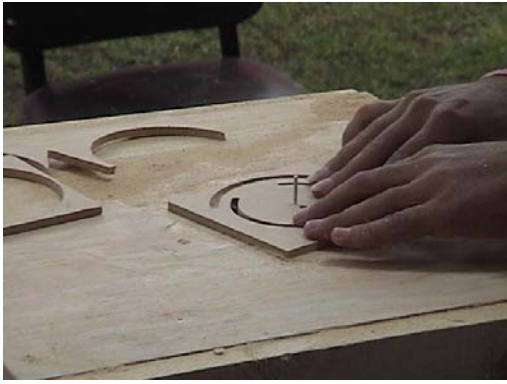
Fig. 5.2 Dibujo del nodo para su fabricación escala 1:1

El proceso de fabricación consistió en los siguientes pasos: (Fig. 5.3)

1. Recorte de cuadros de 10 x 10 cm.
2. Ranuras curvas y rectas con rauter.
3. Corte perimetral circular con rauter.
4. Ensamble de placas perpendiculares.



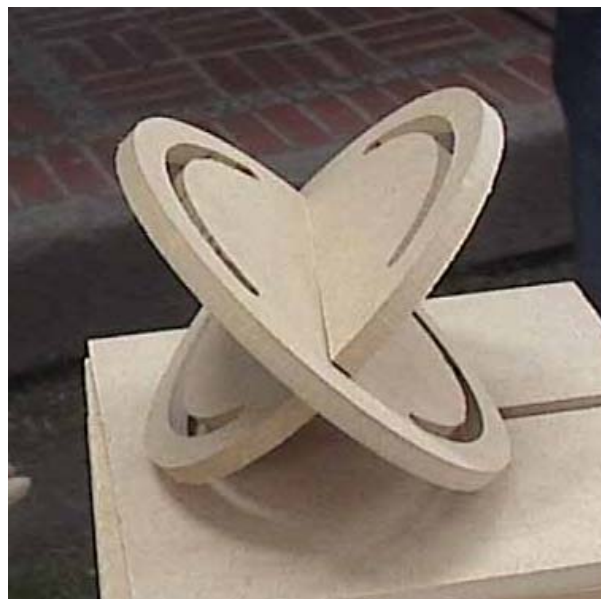
Paso No. 1 y 2



Paso No. 3



Paso No. 4



Nodo final

Fig. 5.3 Proceso de fabricación de nodo

### 5.1.2 Conectores y barras

La pieza conector tiene la función de hacer el enlace entre la barra y el nodo con la particularidad de tener una superficie de contacto que resulta la cuerda de un segmento del diámetro total de las placas circulares de 10 cm. El diseño se realizó con un sólido redondo de madera de pino de 1" de diámetro con una ranura del espesor de la placa de MDF (6 mm) la cual se inserta en el nodo y se sujeta con un tornillo de 7.5 mm de diámetro. La ranura aloja la pieza que hace contacto con la cuerda del nodo y se realizó con pasta epóxica de nitrocelulosa. La barra se construyó con un tubular de PVC de 1" de diámetro interior que recibe al conector y se sujeta con un pasador remache. (Fig. 5.4)

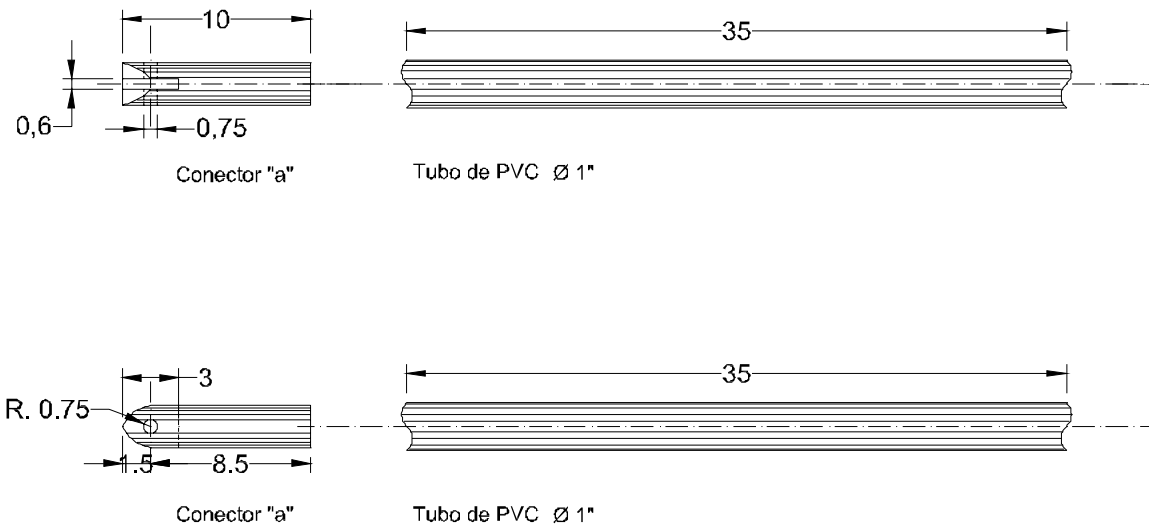


Fig. 5.4 Dibujo de barra y conector para su fabricación escala 1:1

El proceso de fabricación consiste en los siguientes pasos: (Fig. 5.5)

1. Corte de sólido redondo de madera
2. Colocación en molde para corte en serie
3. Barreno en caras laterales del sólido redondo
4. Corte de ranura perpendicular al eje mayor del sólido redondo
5. Corte chaflán a 45 grados



Paso No. 1 y 2





Paso No. 3



Paso No. 4 y 5



Conectores terminados

Fig. 5.5 Proceso de fabricación de conectores de madera

### 5.1.3 Bases

Las bases para el prototipo de la cubierta escala 1:1 fueron diseñadas con un análisis junto a los ingenieros que participan dentro del equipo bidisciplinario del laboratorio de estructuras. En este diseño se tomaron en cuenta solamente las condiciones de apoyo de la estructura, sin considerar ninguna carga a efecto de simplificar la representación en el modelo. Para construir la cubierta con curvatura anticlástica identificamos la problemática de una interferencia de las barras que se ubican en las bases debido a la pendiente que implica tener una geometría de doble curvatura. Teniendo como solución la construcción de un nodo diferente a los utilizados en la geometría sinclástica, las condiciones básicas para el diseño de este nodo fueron dos: la primera era tener una superficie que nos permitiera tener mayor pendiente de la barra que se instalaría en ese nodo y la segunda era tener una geometría que respondiera al sentido de los esfuerzos que transmite el nodo a la base. (Fig.5.6)

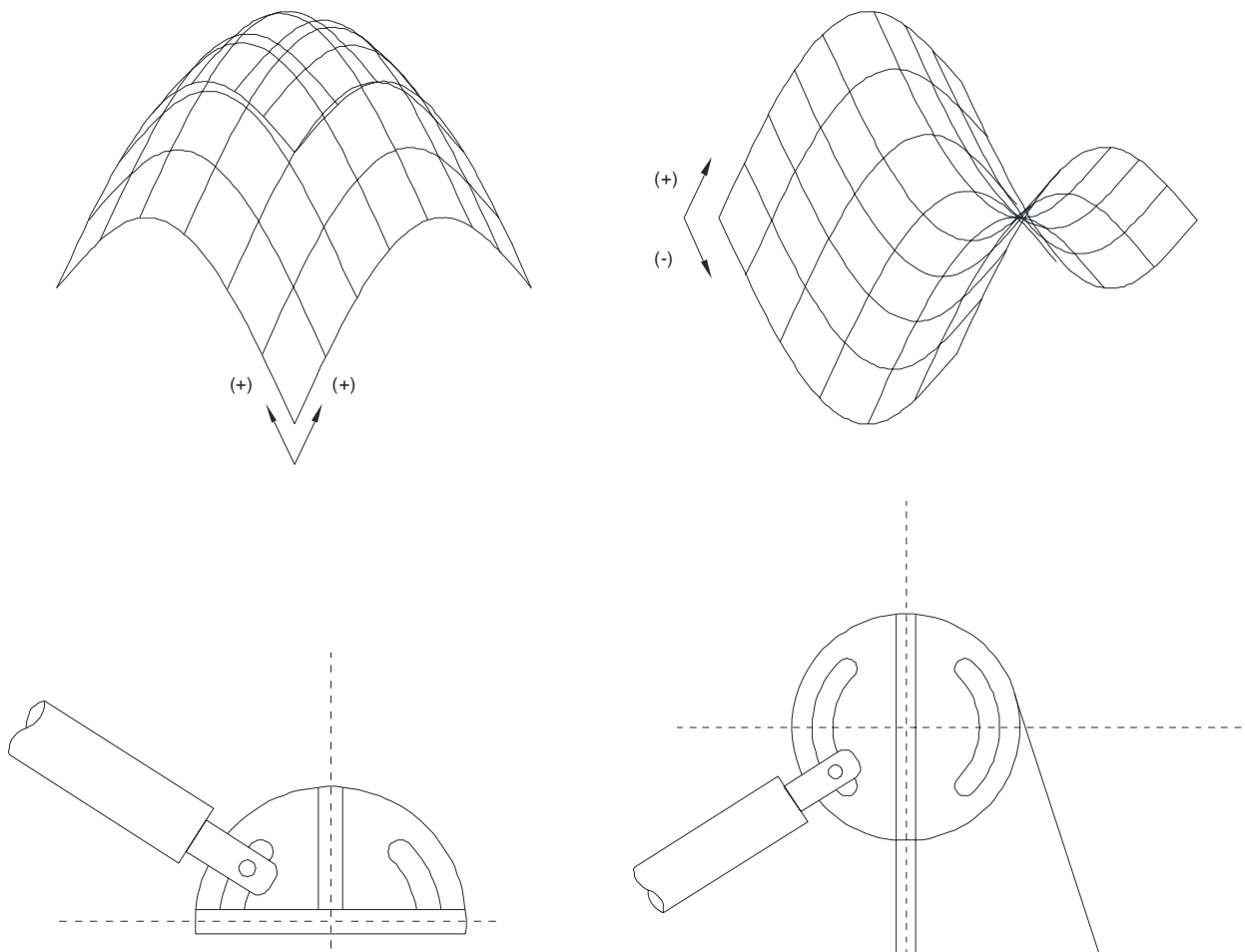


Fig. 5.6 Diseño de nodos-base y esquemas de pendientes en curvatura sinclástica y anticlástica

Las cuatro bases fueron realizadas en MDF (Middle Density Fiber) de 6mm de espesor, trazadas con plantilla escala 1:1 y cortadas con sierra caladora (Fig. 5.7).

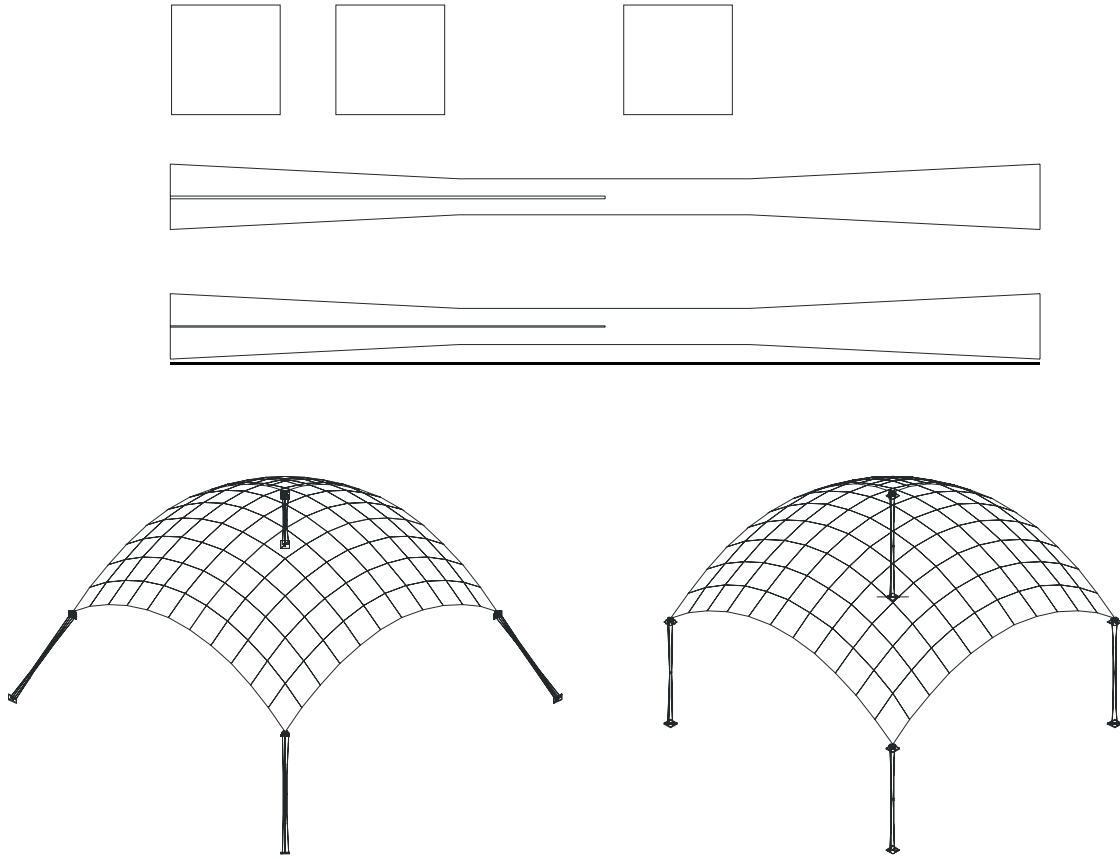


Fig. 5.7 Dibujos para la fabricación de bases y estructura con dos posibles soluciones de colocación y proceso de manufactura de las bases para el prototipo.



## 5.2 Prototipo 01

### 5.2.1 Determinación de la forma de modelo sinclástico y anticlástico

Se realizaron diversas hipótesis sobre la funcionalidad del modelo experimental que se construyó como parte de los objetivos del proyecto, llegando a la conclusión de que un prototipo de 5x5 m nos proporcionaría una escala idónea para comprobar la viabilidad de modificar la geometría, además de resolver las necesidades de un espacio temporal que puede ser destinado a exposiciones, espectáculos o centro de acopio. Todo esto fundamentado en el antecedente del prototipo MODUNAM, concluido en el Laboratorio de Estructuras en el año de 1997.

Determinamos en primera instancia la forma del prototipo con curvatura sinclástica en el programa GEOG obteniendo los siguientes resultados: (Fig. 5.8)

#### Datos de introducción:

Nombre del Proyecto: PROTO 01

Nombre de salida: PROTO 01

Superficie de traslación con planta rectangular

#### Datos de la superficie de traslación:

Longitud en X = 5.000 m

Longitud en Y = 5.000 m

Flecha = 1.000 m

Flecha total = 2.000 m

Distancia nodal = 0.610 m

#### Ubicación de la malla:

Malla en el ápice.

#### Catenaria principal en dirección - X

Parámetro A (X) = 3.279313

#### Catenaria principal en dirección - Y

Parámetro A (Y) = 3.279313

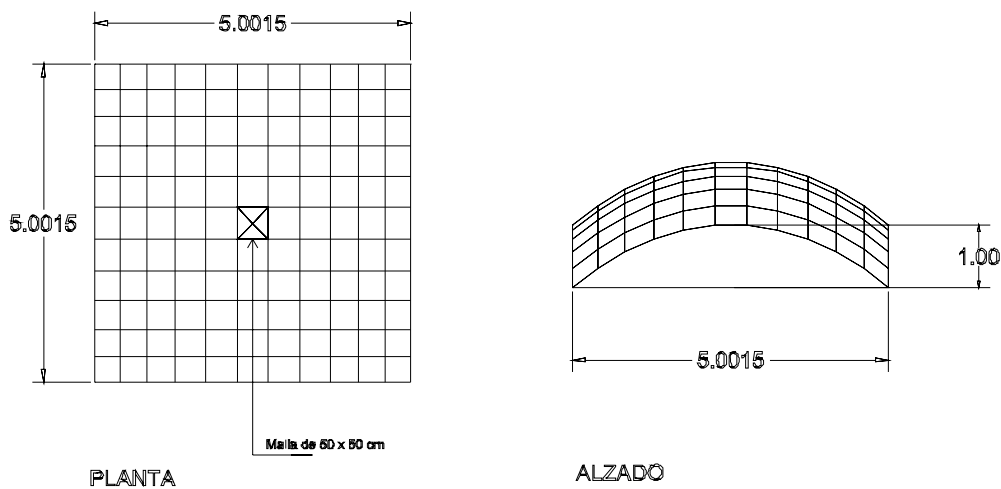


Fig. 5.8 Modelo "sinclástico" de la cubierta con directriz catenaria.

Posteriormente determinamos la geometría del segundo modelo con curvatura anticlástica a partir de una superficie de traslación con directriz parabólica con el objeto de ver las diferencias que pudieran existir entre ambas curvas. (Fig. 5.9)

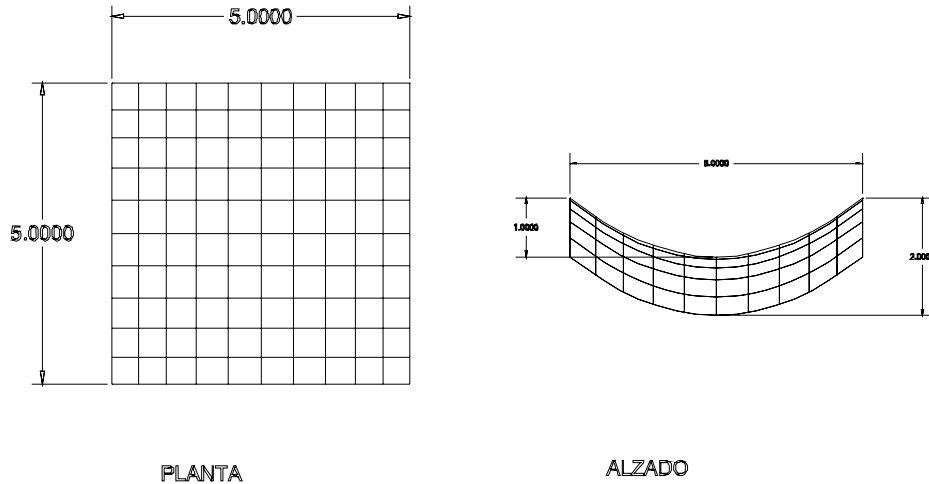


Fig. 5.9 Modelo "anticlástico" de la cubierta con directriz parabólica.

En ambos casos obtuvimos los ángulos de las pendientes que tendrá cada barra para formar ambas curvaturas. Siendo tan solo necesario obtenerlos en una mitad de arco, ya que estos son simétricos e iguales en toda la superficie. Pudimos observar que en ambos arcos coinciden los ángulos respecto a la horizontal excepto en la barra que llega a los apoyos, habiendo una diferencia de apenas 1 grado entre ambas. (Fig. 5.10 y 5.11)

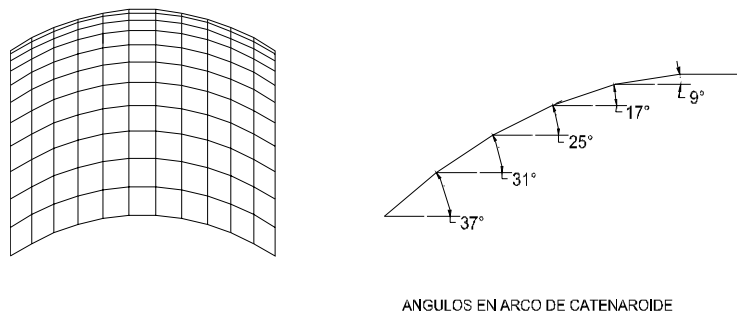


Fig. 5.10 Ángulos en superficie sinclástica

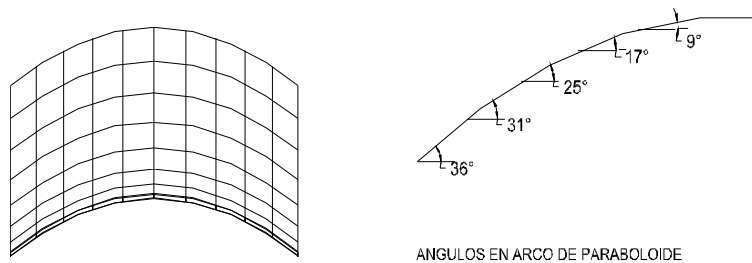


Fig. 5.11 Ángulos en superficie anticlástica

### 5.2.2. Montaje

Para realizar el montaje del modelo se trazo una retícula de mediciones con hilos para referir un cuarto del primer modelo de cubierta con curvatura gaussiana positiva. Esta retícula previamente obtenida en ACAD sirve para verificar la posición de los nodos de la estructura en el espacio. (Fig. 5.12)

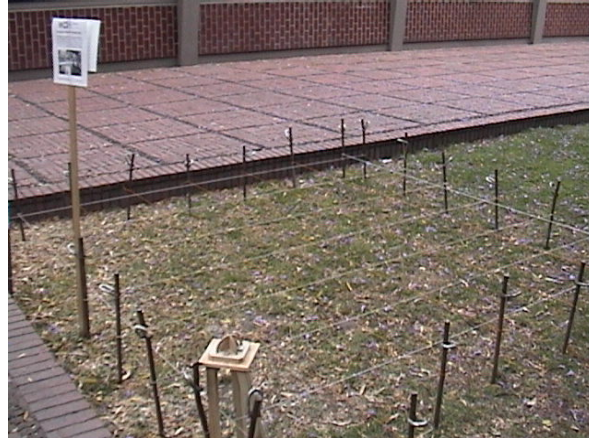


Fig. 5.12 Trazo de retícula de mediciones para armado de un cuarto de cubierta del prototipo escala 1:1 con curvatura de Gauss positiva.

Posteriormente al trazo de la retícula para referir la cubierta, junto con el equipo del laboratorio de estructuras, armamos un cuarto de la cubierta colocando en una sección barra por barra y verificando con plomada que su ubicación en planta fuera la correcta conforme a la retícula obteniendo el siguiente resultado (Fig. 5.13).



Fig. 5.13 Armado de un cuarto de cubierta del prototipo escala 1:1.

### 5.3 Prototipo 02

#### 5.3.1. Determinación de la forma de modelo sinclástico y anticlástico

Debido a las condiciones de escala y la poca rigidez del material el prototipo 01 no se construyó al 100%, ya que tuvimos deformaciones de la curvatura y dificultades en el montaje, por lo cual se decidió construir un prototipo de menor escala. Determinamos la forma del prototipo 02 con curvatura sinclástica en el programa GEOG obteniendo los siguientes resultados: (Fig. 5.14).

**Datos de introducción:**

Nombre del Proyecto: PROTO 02 sinclastico

Nombre de salida: PROTO 02

Superficie de traslación con planta rectangular

**Datos de la superficie de traslación:**

Longitud en X = 2.240 m

Longitud en Y = 2.240 m

Flecha = 0.500 m

Flecha total = 1.000 m

Distancia nodal = 0.500 m

**Ubicación de la malla:**

Malla en el ápice.

**Catenaria principal en dirección - X**

Parámetro A (X) = 1.329798

**Catenaria principal en dirección - Y**

Parámetro A (Y) = 1.329798

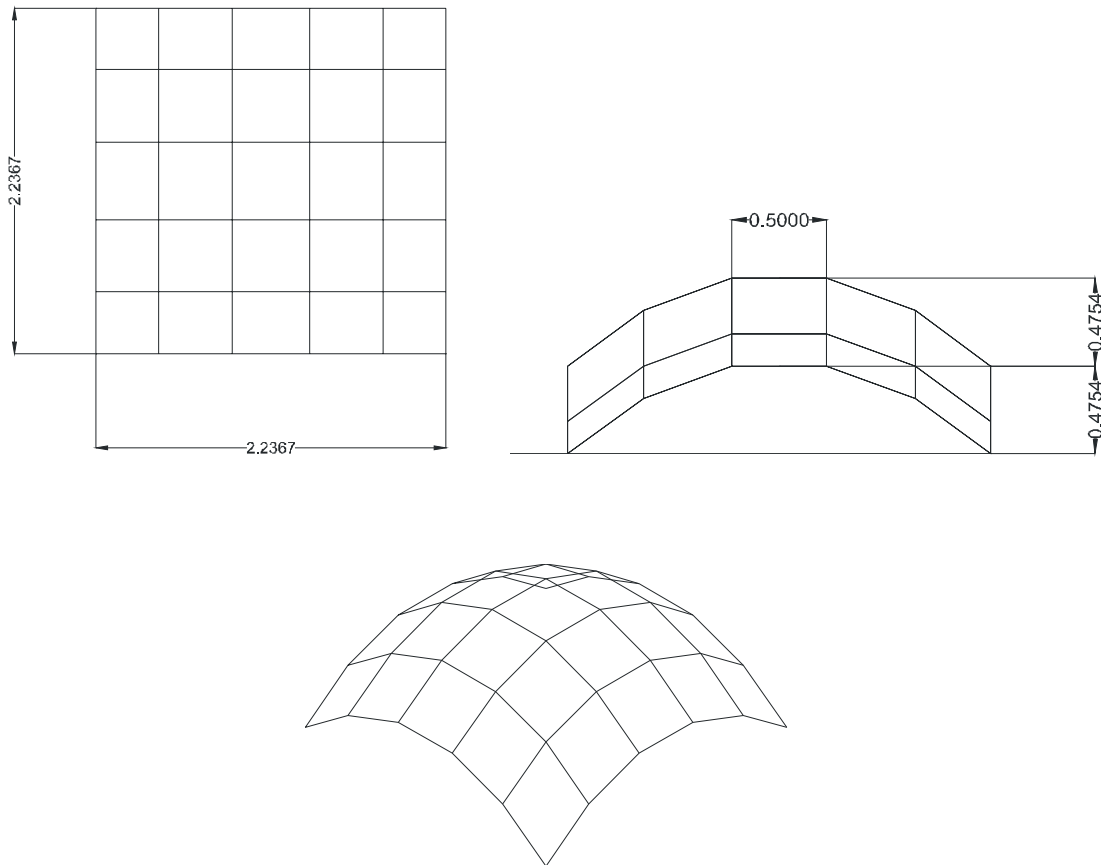
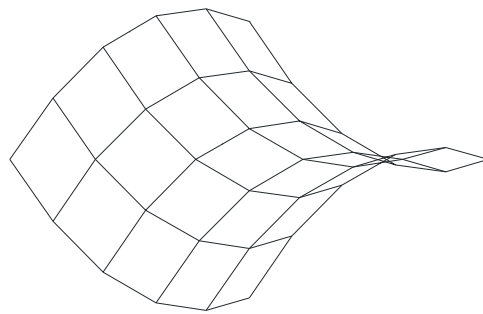
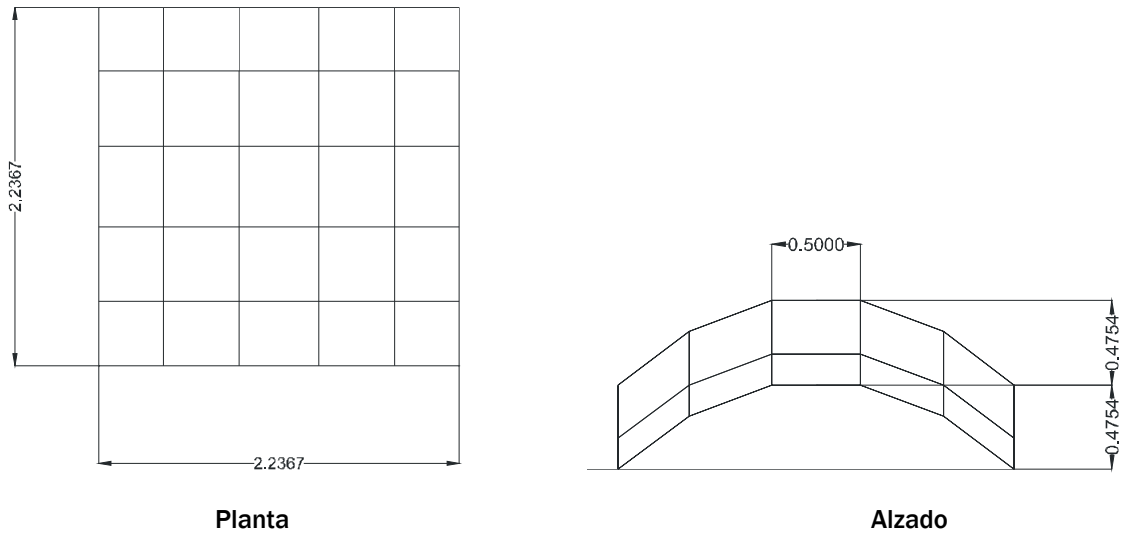
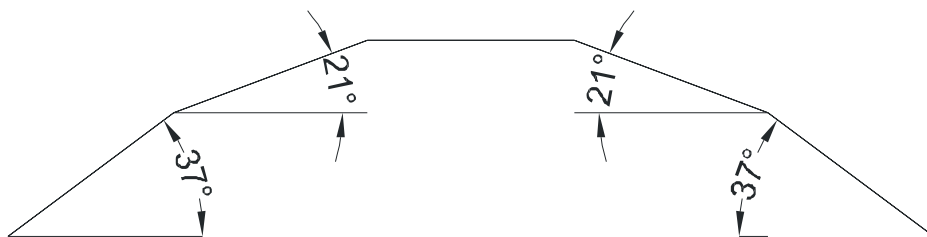


Fig. 5.14 Isométricos y alzado con ángulos del segundo modelo con curvatura de Gauss positiva y negativa

El modelo anticlástico se determinó con la misma directriz catenaria que nos proporciona el programa GEOG y solo fue necesario dibujar la superficie de traslación con el proceso comentado en el capítulo 3 (Fig. 5.15).



Isométrico



Ángulos de pendientes para ambos casos

Fig. 5.15 Prototipo de cubierta con curvatura de Gauss negativa (anticlástica)

### 5.3.2. Montaje de modelo sinclástico

Debido a que este prototipo es de menor escala resulto más fácil realizar el montaje. Exploramos un segundo proceso al armar arcos continuos en el piso con la geometría dada y posteriormente colocamos las barras perpendiculares a este con la pendiente requerida, así sucesivamente hasta completar el modelo. Esto resulto un proceso mucho más rápido y exacto (Fig. 5.16).



Fig. 5.16 Prototipo con curvatura sinclástica escala 1:1 fabricado con nodos de MDF (Middle Density Fiber), conectores de madera, barras de PVC, cables de refuerzo diagonales de acero galvanizado y una cubierta de tela.



Posterior al ensamble del prototipo sinclástico, realizamos en ACAD los patrones de corte para fabricar una membrana con tela de manta que sirviera como cubierta a la estructura (Fig.5.17).

El proceso para realizar la cubierta de tela fue el siguiente: en primer lugar fue necesario, realizar el despiece en ACAD para obtener los patrones de corte de la cubierta (Fig. 5.18) posteriormente se realizó la impresión de estos patrones escala 1:1 en papel bond para ser copiados a la tela, una vez que se tiene la geometría de las plantillas en la tela se procede a cortarlas dejando una pestaña de 2 cm aproximadamente para su costura. De esta manera se unen cada uno de los gajos que preferentemente deberán ser identificados con una nomenclatura para evitar posibles confusiones.

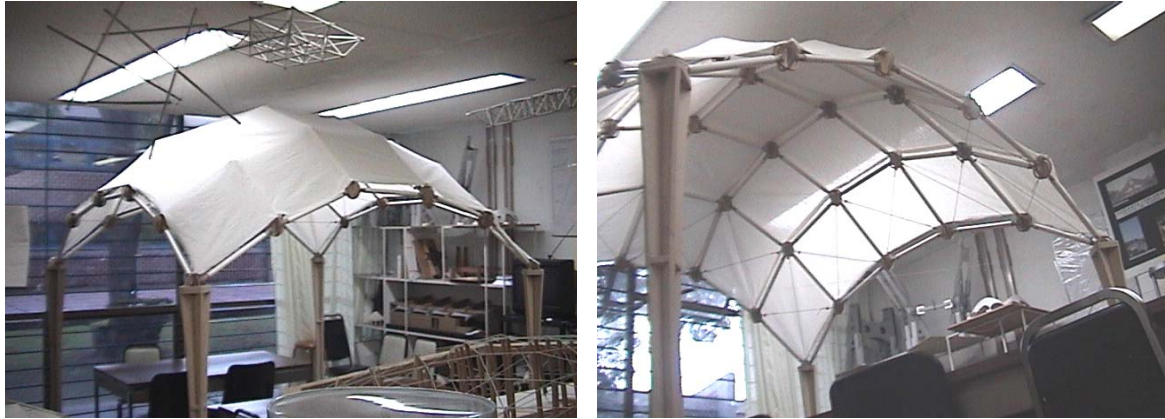


Fig. 5.17 Vista de la cubierta con membrana de tela.

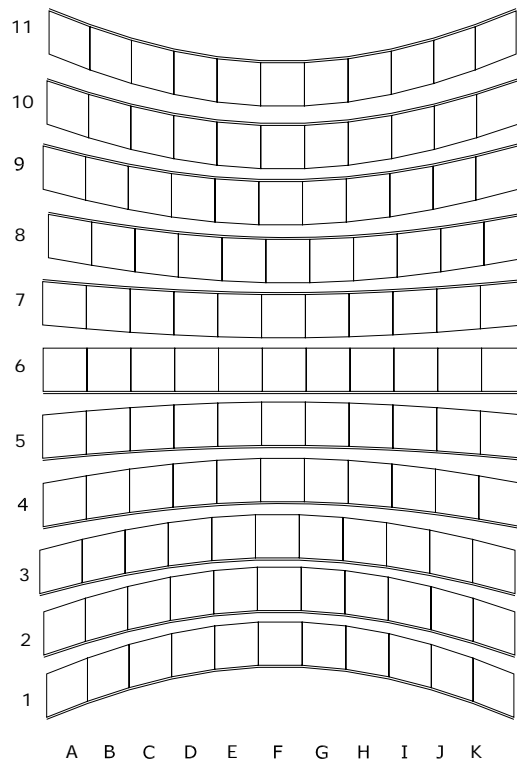


Fig. 5.18 Patrones de corte para la membrana de tela realizados en ACAD.



### 5.3.3. Montaje de modelo anticlastico

La primera etapa consistió en desarmar la cubierta para tener los nodos tipo y las barras de longitud constante libres, una vez desmantelada la cubierta procedimos a colocar los nodos-base.

La segunda etapa correspondió a identificar cada una de las pendientes de las barras en cada arco en ACAD, situación que resulto fácil al tener tan solo tres ángulos de inclinación resultado de la geometría generada por una superficie de traslación. (Fig. 5.19) Una vez teniendo estos datos solo fue necesario colocar las barras sobre los nodos apretándolos "a tope" con su inclinación correcta ayudándonos con nivel y transportador. Al tener la geometría de la cubierta al 100% procedimos a verificar los datos de las pendientes y apretar lo suficiente para que las barras quedaran bien empotradas al nodo y evitar un giro.

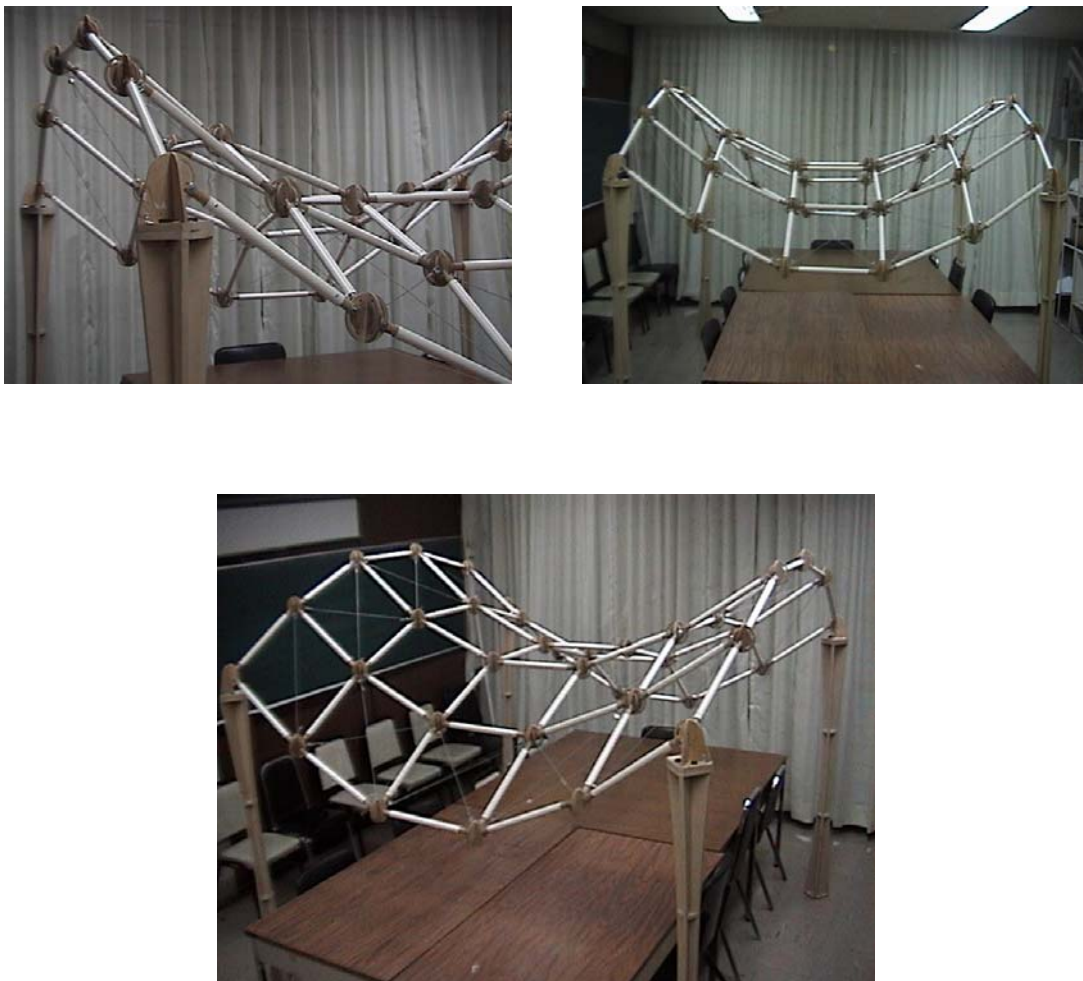


Fig. 5.19 Prototipo con curvatura anticlástica escala 1:1 fabricado con nodos de MDF (Middle Density Fiber), conectores de madera, barras de PVC y cables de refuerzo diagonales de acero galvanizado.

Cabe mencionar que este prototipo fue exhibido en la exposición *“Gaudí: Arquitecto Artista Insólito”* en el Antiguo Colegio de San Idelfonso como muestra de la influencia del arquitecto español en México (Fig. 5.20).



Fig. 5.20 Prototipo con curvatura anti-clástica exhibido en el Antiguo Colegio de San Idelfonso

## 6. FABRICACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DEL SISTEMA.

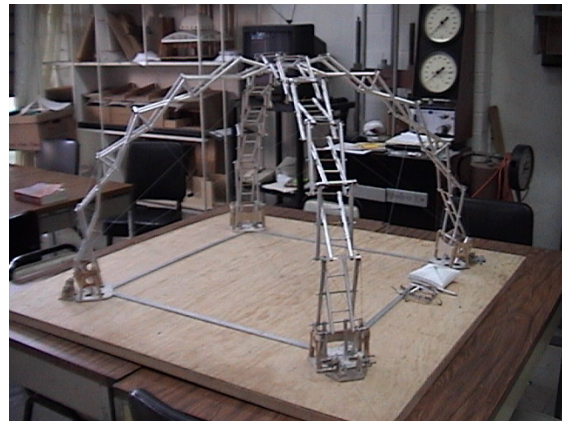
### 6.1. Modunam III

Con las experiencias obtenidas durante el desarrollo de los prototipos a escala procedimos a realizar la cubierta definitiva que se planteo al inicio en los objetivos del proyecto. Para ello consideramos que teniendo como antecedente la Cubierta velaria para usos múltiples Modunam, la Cubierta provisional plegable Modunam II y la necesidad actual de una arquitectura que no sea permanente, sino que brinde la flexibilidad de tener espacios susceptibles de ser cubiertos a consideración de las actividades que se realicen, sean estas de carácter público o privado, propusimos realizar el prototipo Modunam III.

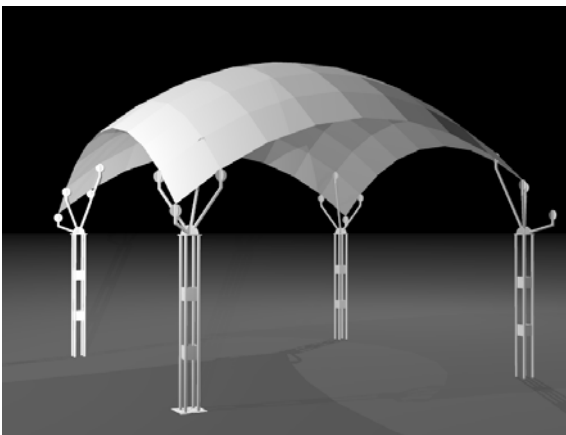
Modunam III sería una cubierta con base en nodos y barras que con el mismo número elementos pueda ser modificada en forma y escala. Esta se conformaría de un "stock" de nodos y barras, bases telescópicas teniendo la capacidad de adaptarse a las diferentes formas y escalas de la cubierta, un sistema de anclaje al piso por medio de lastres y una cubierta de membrana. El funcionamiento que puede tener es diverso pudiendo ser: exposiciones temporales, eventos sociales, artísticos y culturales, módulos informativos, locales comerciales, protección de monumentos arqueológicos, aulas temporales, hospital, refugio o centro de acopio en casos de desastre. (Fig. 6.1).



Modunam I,



Modunam II



Modunam III

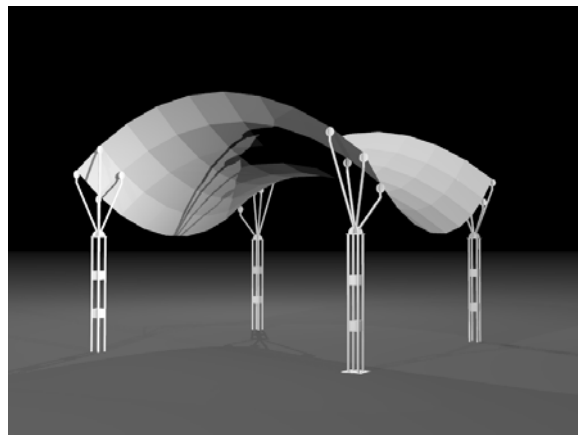


Fig. 6.1 Cubiertas desarrolladas en el Laboratorio de estructuras

Para la construcción del prototipo con curvatura de Gauss positiva, realizamos una corrida en el programa GEOG determinando una dimensión en planta de 5 x 5 m, una flecha de 1 m y una distancia nodal de 61 cm, obteniendo el modelo geométrico que a continuación se presenta (Fig. 6.2):

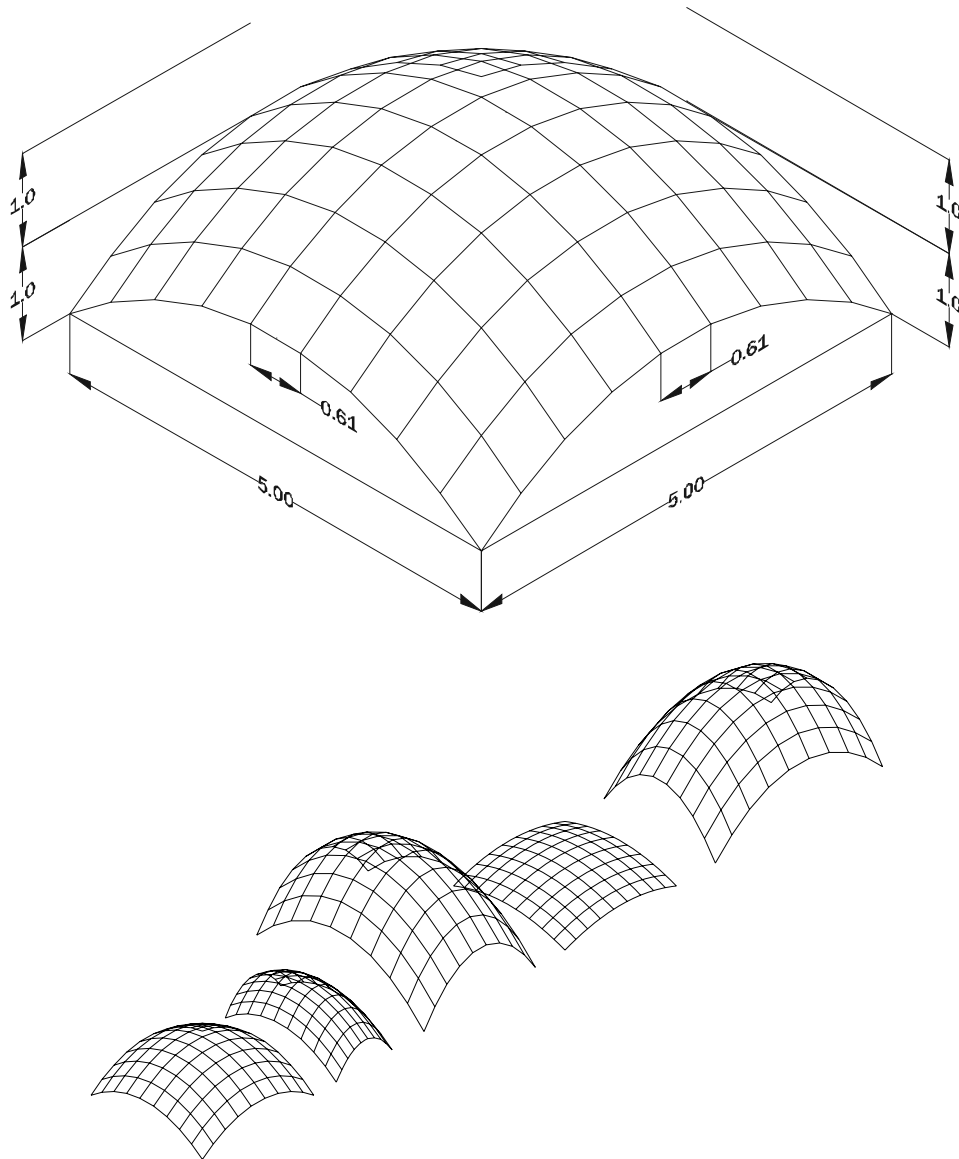


Fig. 6.2 Modelo geométrico y posibles configuraciones de la cubierta con curvatura de Gauss positiva (sinclástica).

Para realizar el modelo geométrico de la cubierta con curvatura de Gauss negativa, se utilizó la misma curva de directriz catenaria que en el modelo anterior y se trasladó de manera inversa, obteniendo el modelo que a continuación se presenta (Fig. 6.3):

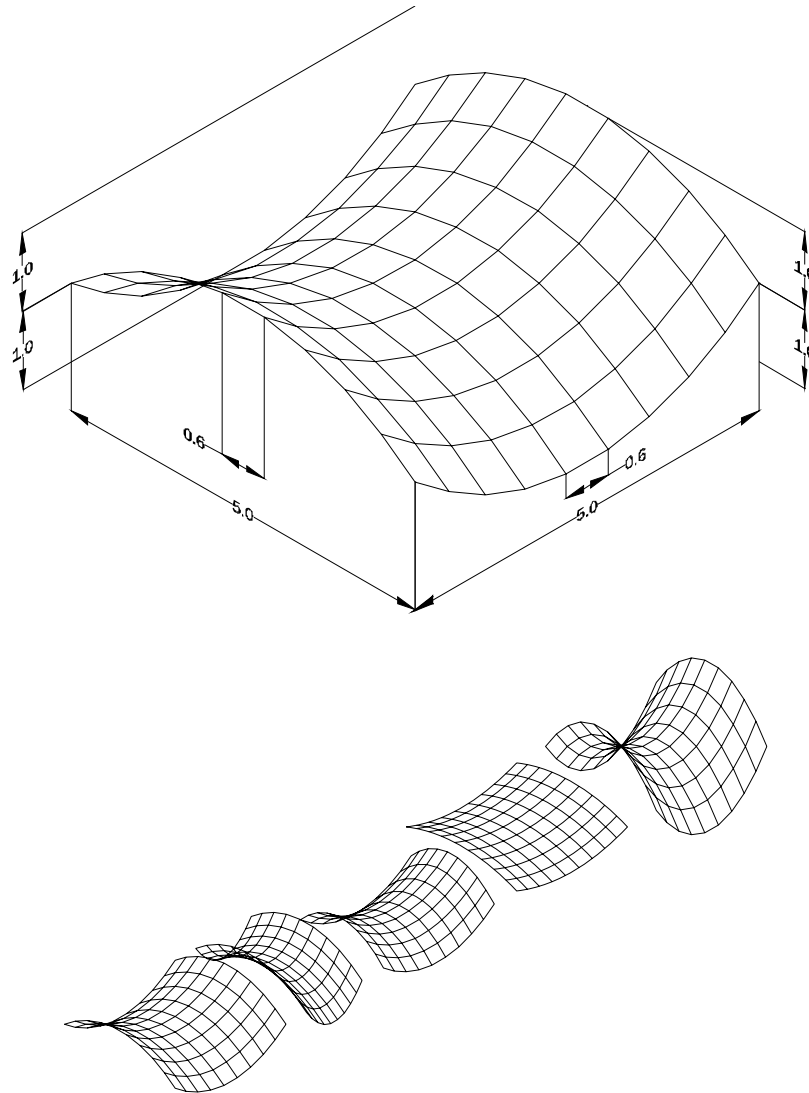


Fig. 6.3 Modelo geométrico y posibles configuraciones de la cubierta con curvatura de Gauss negativa (anticlástica).

En ambos casos para su construcción son necesarios:

- 100 nodos
- 180 barras
- 360 conectores
- 4 bases con lastre
- 2 cubiertas de membrana (una para cada caso)

Dependiendo de los datos que arroje el cálculo de este modelo en particular serán necesarios:

- Conectores para refuerzos diagonales
- Refuerzos diagonales de cable de acero galvanizado

Debido a sus propiedades de ligereza y al poco desarrollo que existe en México de una cultura sobre el aluminio como material estructural se propone este como material innovador para fabricar la cubierta. Para realizar esta, se analizaron diversas propuestas encontrando que la mayor complicación para su

manufactura residía en el nodo y los conectores, ya que las barras se pueden fabricar con perfiles comerciales al igual que las bases y los lastres de la misma.

La complejidad de la fabricación e industrialización de nodos y conectores se debe a que es necesaria una precisión absoluta y su geometría no permite que se realice con procesos de manufactura convencionales. Entre los aspectos que se deben considerar para el proceso de fabricación destacan los siguientes:

- Garantizar la perfecta conexión entre la superficie de contacto del conector con el nodo, para evitar un posible giro de la barra respecto de este y deformaciones en la cubierta.
- Garantizar el empuje entre elementos barra – conector – nodo para que la cubierta sea estable.
- Que el proceso seleccionado no sea complicado y permita tener una fabricación en serie de bajo costo para hacer eficiente su industrialización.

A continuación describimos de manera general los procesos estudiados para la fabricación así como costos estimados:

## 6.2. Proceso de fabricación por fundición en acero.

La fundición como proceso de producción, consiste en realizar moldes del objeto, fundir y manejar el metal en estado líquido para su vaciado en estos moldes. Aunado a esto es necesario realizar la limpieza y acabado de las piezas terminadas. Se puede realizar la fundición de las piezas en acero o aluminio indistintamente.

Si bien este proceso resulta el idóneo para la industrialización del sistema encontramos algunas complicaciones. La principal se deriva de la geometría del nodo, ya que resulta muy complicado realizar el molde con la ranura en donde gira la barra, además de que este tendría que ser de varias secciones debido a las placas de contraventeo (Fig. 6.4).

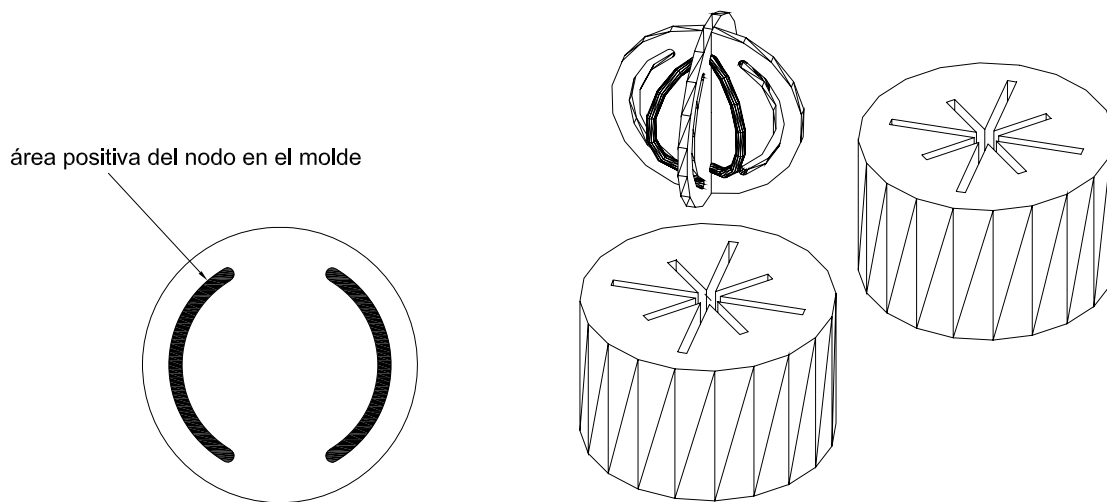


Fig. 6.4 Moldes para vaciado



### 6.3. Proceso con perfiles extruidos y troqueles

Debido a la complejidad de la propuesta anterior procedimos a realizar una segunda propuesta que consistió en fabricar un perfil extruido en aluminio con base en un herramental específico para la figura que se requiere y posteriormente hacer un corte con troquel de la figura del nodo. De esta manera podemos tener el nodo en una sola pieza con la geometría requerida y las placas de contraventeo que pueden insertarse en el núcleo del nodo y sujetarse con un tornillo que a su vez puede sujetar la membrana. Con base en estas hipótesis diseñamos los perfiles para su fabricación, el primero corresponde al nodo y el segundo a la solera para las placas de contraventeo. (Figs. 6.5 y 6.6)

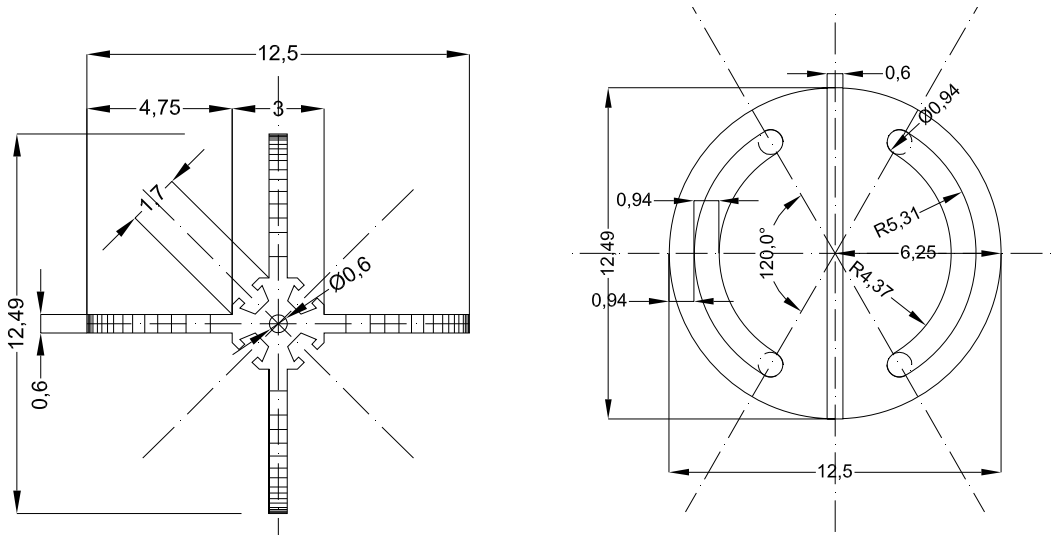


Fig. 6.5 Diseño de perfil para extrusión (planta) y de figura para troquel (alzado) en nodo

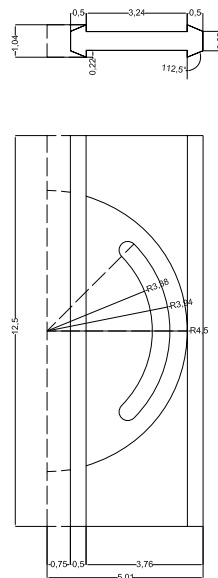


Fig. 6.6 Diseño de perfil para extrusión (planta) y de figura para troquel ( alzado) en placa de contraventeo:



Los perfiles se fabrican en aluminio con una aleación comercial (6063 T-6) y una longitud de 6m de largo. Con este se obtiene la matriz del nodo y de las placas de contraventeo (Fig. 6.7). Posteriormente se recorta el perfil extruido según las dimensiones del nodo y se troquea con la figura deseada. (Fig. 6.8).

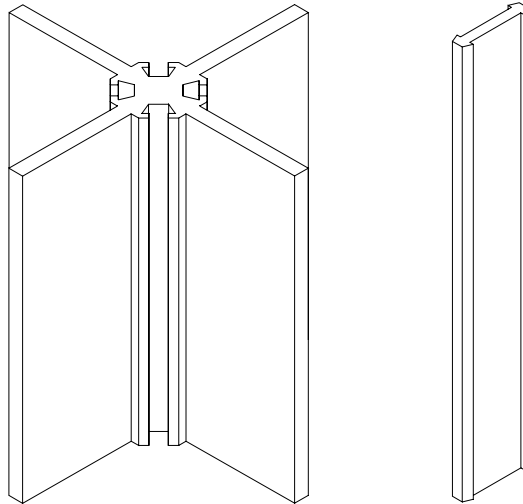
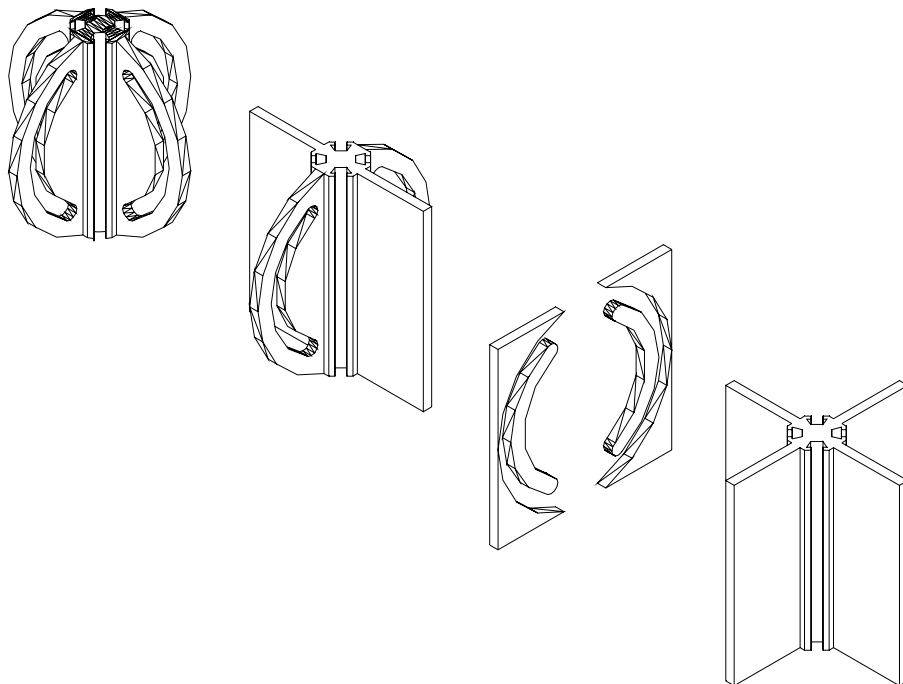


Fig. 6.7 Perfiles para la fabricación de piezas



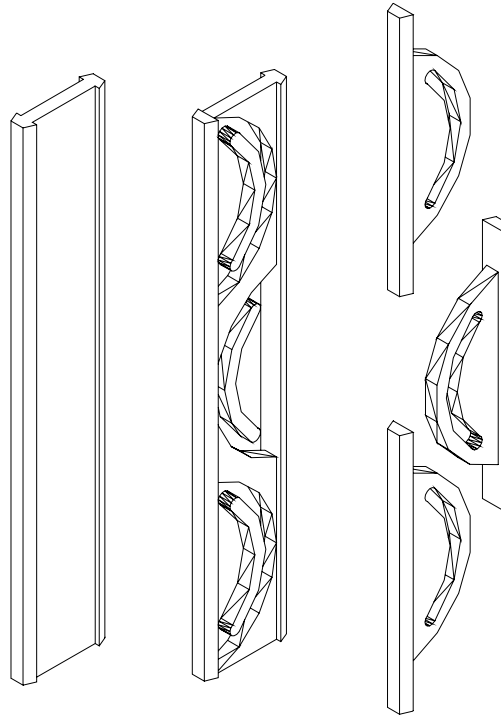


Fig. 6.8 Perfiles troquelados

Después de este proceso se realiza una limpieza de las piezas para retirar la posible viruta que desprenda el corte y se realiza el ensamble. (Fig. 6.9).

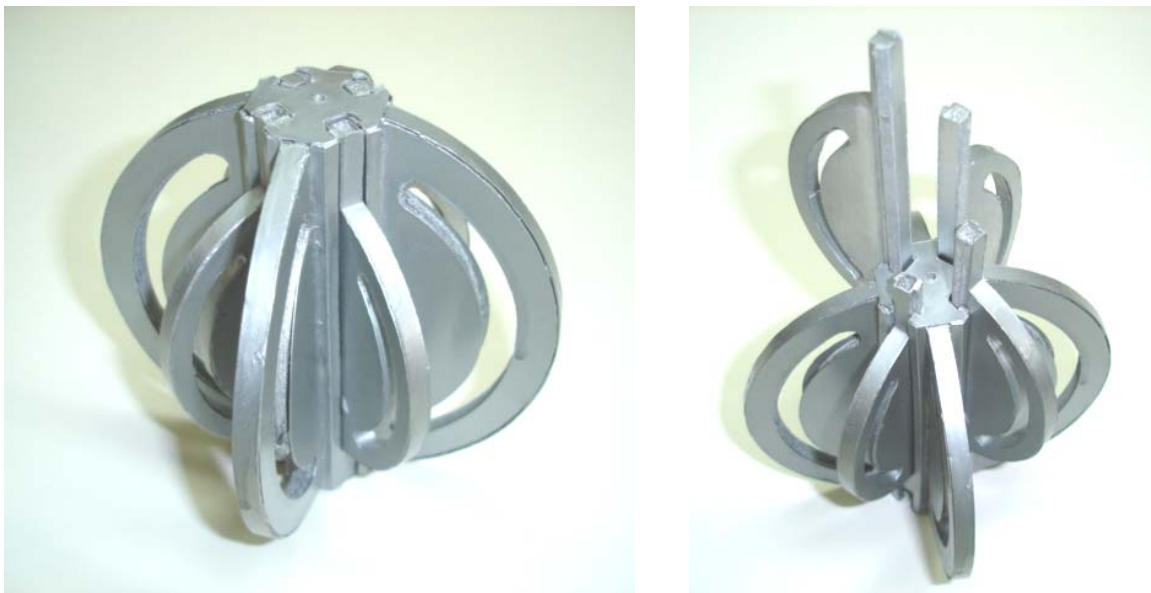


Fig. 6.9 Modelo a escala del nodo

### 6.4. Proceso por corte de placa con uniones soldadas

Una tercer propuesta consiste en realizar la producción de nodos y barras únicamente con placa (Fig. 6.10). Este proceso es muy similar al anterior y al realizado con MDF para los prototipos 01 y 02 (ver capítulo 5: Fabricación de Prototipos) solamente que en vez de tener un perfil extruido este se realiza directamente en una placa con el espesor requerido y el corte puede ser por medio de un troquel, plasma, agua o láser. (Ver anexo 01: Planos de taller del prototipo Modunam III)

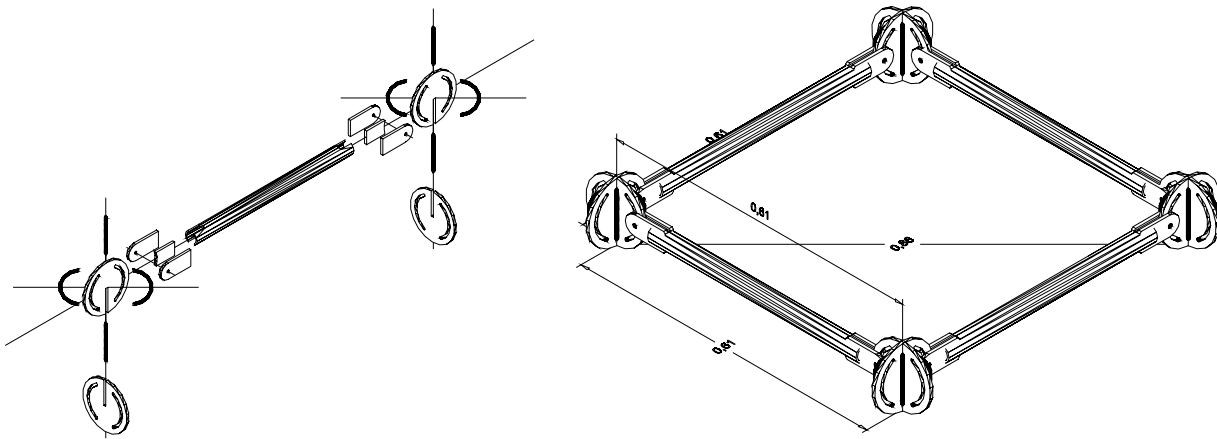


Fig. 6.10 Sistema de nodos y barras fabricados con placa

A continuación se presenta la cotización del material y corte para la fabricación de los nodos y barras de la cubierta\*:

Costos directos de material y corte:

|                                                                   |                  |              |
|-------------------------------------------------------------------|------------------|--------------|
| Placa de aluminio 1200 f en 4"x10" de 1/4" de espesor.            | 4.20 dls.x kg    | \$ 43.76     |
| Perfil tubular de aluminio IPS ced. 40 con diámetro nominal de 1" | 4.39 dls x kg    | \$ 45.74     |
| Corte por agua.                                                   | 0.15 dls x pulg. | \$ 1.56      |
| Corte por láser.                                                  |                  | \$120.00 x m |

#### MATERIAL

| Pieza                                                 | Cantidad en piezas | Peso en kg | Peso total | Costo por kg en dolares | Costo por kg en pesos (\$10.42 x dólar) | Total       |
|-------------------------------------------------------|--------------------|------------|------------|-------------------------|-----------------------------------------|-------------|
| Placa de aluminio 1200 f en 4"x10" de 1/4" de espesor | 1.3                | 65.710     | 85.423     | 4.20                    | \$43.76                                 | \$ 3,738.11 |

\* Fuente: Aceros y Metales Internacionales s.a. de c.v. (09 de diciembre del 2005)

|                                                                            |    |       |      |      |         |            |
|----------------------------------------------------------------------------|----|-------|------|------|---------|------------|
| Perfil tubular de aluminio IPS ced. 40 con diámetro nominal de 1" X 6.10 m | 14 | 5.400 | 75.6 | 4.39 | \$45.74 | \$3,457.94 |
|                                                                            |    |       |      |      | TOTAL   | \$7,196.05 |

**CORTE DE MATERIAL**

| Pieza                      | Cantidad en piezas | Longitud x pieza en m | Total en m | Total en pulgadas | Costo en corte por agua \$1.56 x pulgada | Costo en corte por láser \$120 x m |
|----------------------------|--------------------|-----------------------|------------|-------------------|------------------------------------------|------------------------------------|
| Placa nodo                 | 200                | 0.9532                | 190.64     | 11918.81          | \$11,708.59                              | \$ 22,876.80                       |
| Placa lateral contraventeo | 360                | 0.2316                | 83.37      | 3282.51           | \$5,120.71                               | \$10,005.00                        |
| Placa central contraventeo | 180                | 0.1518                | 27.32      | 1075.74           | \$1,678.15                               | \$3,278.88                         |
| Barra                      | 180                | 0.098                 | 17.94      | 694.48            | \$1,083.38                               | \$2,116.80                         |
|                            |                    |                       |            | TOTAL             | \$19,590.83                              | \$38,277.48                        |

Realizando el corte de la placa y perfiles tubulares con agua el costo es de: \$ 26,786.88  
 15% IVA \$ 4,018.03  
 TOTAL \$ 30,804.91

Realizando el corte de la placa y perfiles tubulares con láser el costo es de: \$45,473.53  
 15% IVA \$ 6,821.02  
 TOTAL \$52,294.55

## 7. CONCLUSIONES

Los objetivos y metas personales planteados al inicio de nuestra participación en el proyecto y durante estos últimos seis meses se cumplieron cabalmente, realizando todos los trabajos, lo que nos permitió tener una imagen completa de cómo desarrollar integralmente una investigación.

Las actividades que realizamos durante estos tres años fueron diversas, comenzando por la recopilación y análisis de información sobre los antecedentes del sistema estructural y el estudio de sistemas análogos. Posteriormente, hicimos múltiples propuestas de tipo conceptual, técnico y constructivo para el diseño de prototipos y participamos en la construcción de un modelo del sistema, en el que llevamos a cabo algunas pruebas para confirmar las hipótesis de diseño. Con los resultados obtenidos reconsideramos algunas de estas hipótesis y rediseñamos los elementos tomando en cuenta el proceso de fabricación. Durante los últimos seis meses, trabajamos en la elaboración del informe final del proyecto y en los planos constructivos del prototipo. Finalmente, nuestra labor como becarios del proyecto fue coordinar y supervisar las actividades de alumnos de servicio social y práctica profesional supervisada que también se integraron al grupo de trabajo.

Durante el desarrollo de estas actividades, participamos en el seminario de investigación permanente sobre geometría estructural que se desarrolla diariamente y de manera continua en el Laboratorio de Estructuras. En este seminario analizamos y comentamos en forma grupal, con el responsable y corresponsable del proyecto, los avances que logramos y planeamos nuevas actividades. Esto también significó para nosotros la experiencia de trabajar con un grupo de investigación trasdisciplinario y de asumir obligaciones y responsabilidades, complementando nuestra formación como profesionistas, al aportar ideas y soluciones en la concepción y diseño de los prototipos.

Tuvimos la oportunidad de profundizar y aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera sobre la geometría y el diseño de estructuras, acercándonos más al desarrollo de las nuevas tecnologías. A partir de esta experiencia, descubrimos que la enseñanza sobre estructuras y geometría impartida en nuestra Facultad es insuficiente, en relación con el diseño arquitectónico. A nuestro parecer, podría ser reforzada con un enfoque tal, que en lugar de significar un esfuerzo tortuoso para el alumno, sea una herramienta para fomentar la creatividad en el diseño.

Consideramos que nuestras aportaciones personales fueron creciendo conforme fuimos adquiriendo conocimientos y experiencias, ya que durante todo el proyecto participamos en la generación de propuestas conceptuales y de diseño. Una aportación importante que realizamos, pero que creemos que es constante en las nuevas generaciones, es el manejo de nuevos programas de cómputo y/o de nuevas versiones, lo que permite simplificar, agilizar y mejorar el proceso de diseño.

Con relación a los objetivos y metas del proyecto, se logró consolidar el grupo bidisciplinario entre las facultades de Arquitectura e Ingeniería en el Seminario Permanente de Investigación sobre Geometría Estructural, con la formación de nuevos arquitectos e ingenieros; prueba de ello es el presente trabajo.

Se logró proponer la fabricación e industrialización del sistema estructural de nodos y barras, así como la viabilidad de modificar su escala y su geometría en prototipos de maquetas a escala 1:1. De los estudios anteriores se derivan los siguientes puntos:

- Como estructura temporal concluimos que es exitosa ya que ésta puede ser utilizada infinidad de veces, adaptándose a diversos funcionamientos en distintas condiciones de espacio. Sin embargo, tiene el inconveniente de que cada vez que se modifica su curvatura es necesaria una membrana con diferente geometría, lo cual impacta los costos o limita la versatilidad.
- En el caso de que se plantee como estructura permanente, existe la posibilidad de que la ranura circular de los nodos se sustituya por una perforación menor y/o una soldadura.
- Los procesos de montaje aún no han sido experimentados en el prototipo de metal, sin embargo, en los prototipos de madera concluimos que el sistema puede ser montado con relativa facilidad. Esto depende de la claridad que se tenga de la geometría en el espacio, para lo cual es importante desarrollar una logística.
- Comprobamos que rigidizar la cubierta con cables diagonales garantiza la rigidez del sistema completo.
- Las condiciones para el análisis estructural son diferentes en cada caso que se presenta por lo cual es importante generar limitantes y tener un promedio de las posibles escalas de la cubierta a construir, para determinar una sección promedio de los elementos.

Por otra parte, se cuenta con una patente del nodo que, después del desarrollo del proyecto, se concluye que es susceptible de ser mejorada para generar una nueva sobre el proceso de fabricación e industrialización, lo cual se tramitará al concluir este trabajo. Hasta el momento presente, el proyecto se encuentra realizado en un 90% y está programado para concluirse en un futuro cercano.

Finalmente, consideramos que la oportunidad que brinda la Facultad de Arquitectura para optar por el título de arquitecto, a través del apoyo a proyectos de investigación, constituye una alternativa muy favorable para quienes nos incorporamos, que nos permite aplicar todo nuestro esfuerzo y capacidad en beneficio de la investigación arquitectónica.

---

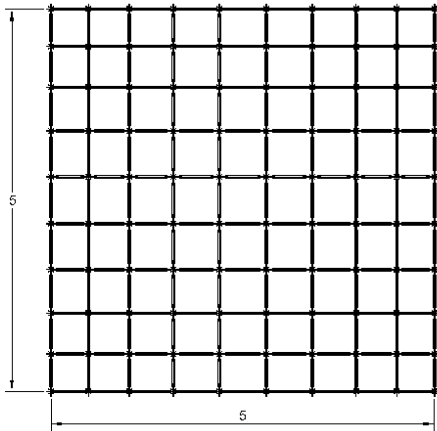
## REFERENCIAS

### Bibliograficas

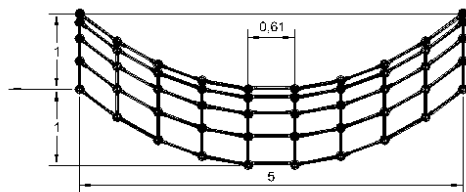
- **Oliva Salinas, Juan Gerardo.** "Über die Konstruktion von Gitterschalen; Selbstverlag SFB 64, Stuttgart Alemania, 1982
- **Tonda, Juan Antonio.** "Cascarones de concreto". UAM Azcapotzalco, SEP, México 1987.
- **Oliva Salinas, Juan Gerardo.** "Sobre la Construcción de Cascarones Reticulados" Facultad de arquitectura, División de Estudios de Posgrado, UNAM, 1989.
- **Mainstone Rowland J.** "Developments in structural form". Architectural Press, Great Britain. 1998
- **De la Torre Carbó, Miguel.** "Geometría Descriptiva", ENEP Acatlan UNAM, México, 2001
- **Gómez Loyo F., Valdez Olmedo E.** "Apuntes de Geometría Estructural" Facultad de Arquitectura, UNAM, México, 2002
- **"Manual de construcción en acero"**, Diseño por esfuerzos permisible,s 4ª edición, IMCA Instituto Mexicano de la Construcción en Acero A.C., Ed. Limusa Noriega, México 2004.
- **Arnal Simón L., Betancourt Suárez M.** "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal", Ed. Trillas, México 2005.





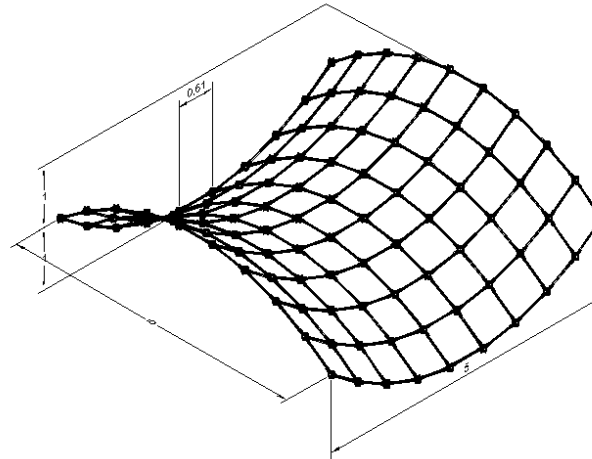


PLANTA  
esc. 1:50

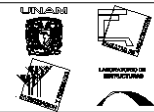


VISTA FRONTAL  
esc. 1:50

## MODELO ANTICLÁSTICO



ISOMÉTRICO  
esc. 1:50



PROYECTO:  
ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN DE UNO DE LOS  
ESTRUC. PLANEOS DE BARRAS Y NODOS. ANÁLISIS CON  
EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS. ANÁLISIS DE  
COMPORTAMIENTO DE UN MODELO ANTICLÁSTICO.  
CATEDRA DE MECÁNICA DE ESTRUCTURAS.  
PAPIIT IN 401502

ING. JUAN GERARDO OLIVA GALINDAS  
ING. LORENZO MIRANDA CORDOBA

UNA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DISEÑO MECÁNICO Y DE ESTRUCTURAS  
ARMANDO TELLO CARRILLO  
LUCY VALDEZ OLMEDO

NOTAS:

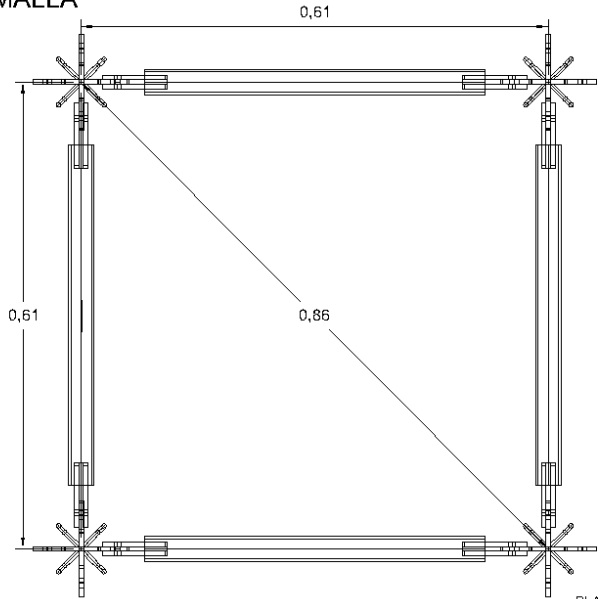
plano: Modelo anticlasticion  
dibujo: T.H.S. / E.V.D.  
revisó: J.G.O.S.  
archivó: nodos y barras.dwg

escala: indicadas  
acotaciones: en metros  
fecha: diciembre del 2005

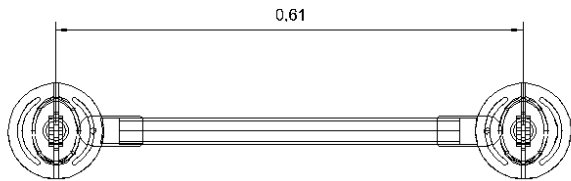
CLAVE:

**A-02**

**MALLA**

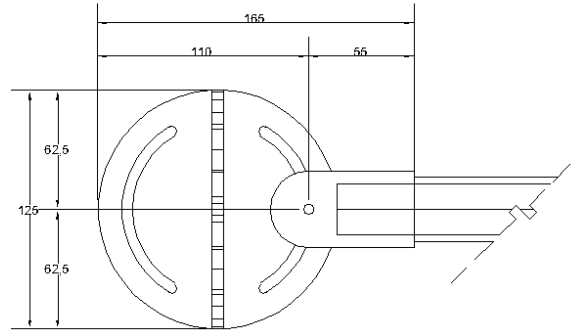


PLANTA  
esc. 1:5

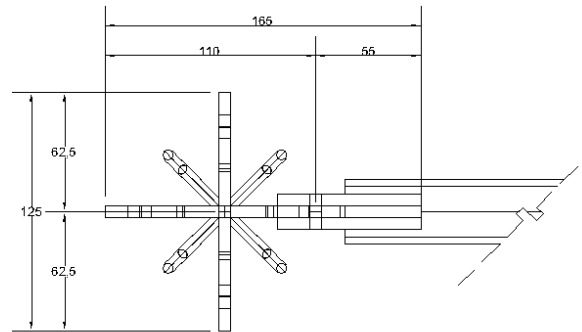


VISTA FRONTAL  
esc. 1:5

**DETALLE DE CONEXIÓN**



esc. 1:2



esc. 1:2

**PROYECTO**  
 UNIFICACIÓN DE SISTEMAS DE ALUMINACIÓN EN EL SISTEMA DE TRAMITACIÓN DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS DEL GOBIERNO REGIONAL DE TACNA  
 CONSTRUCCIÓN DE LA PLATAFORMA TECNOLÓGICA PARA EL SERVIDOR PÚBLICO  
 PAPIIT IN 401502

Ing. Juan Gerardo Oliva Salinas  
 Ing. Lorenzo Miranda Cordo

Una biblioteca digital  
 Escrito con: AutoCAD  
 Odra: Roberto José González  
 Armado: Víctor Carrillo  
 E: Víctor Oliva

NOTAS:

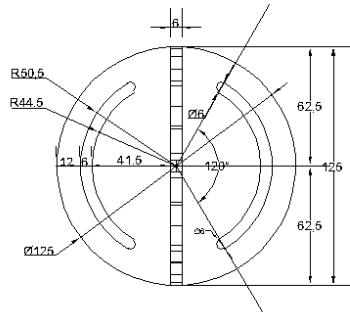
plano: Ma ls y detalles de mención  
 dibujo: T.H.S. / E.V.D.  
 revisa: J.G.O.S.  
 archivo: nodos y barras.dwg

escala: indicadas  
 cotaciones: en milímetros  
 fecha: diciembre del 2005

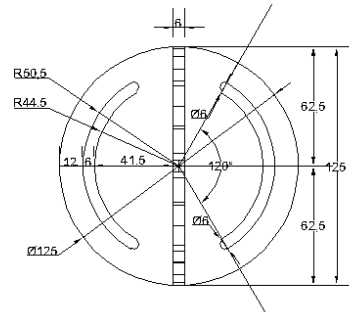
CLAVE:  
**A-03**



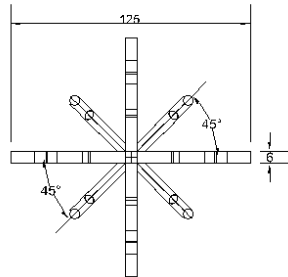
# NODO



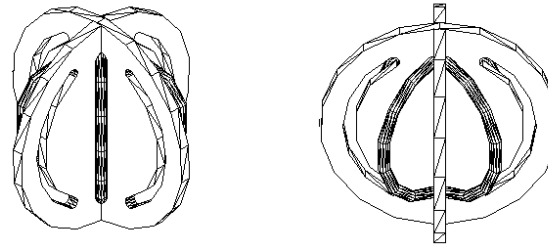
Vista frontal  
esc: 1:2



Vista lateral  
esc: 1:2



Planta  
esc: 1:2



Isométrico  
esc: 1:2



PROYECTO  
 UNO DE LOS OBJETOS DE ESTE CURSO  
 ESTÁN HECHOS POR EL DISEÑO DE UNO DE LOS OBJETOS DE ESTE CURSO  
 CONSIDERANDO LA IMPORTANCIA DE LA  
 EDUCACIÓN EN EL SIGLO XXI  
 PAPIIT IN 401502  
 Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas  
 Ing. Lorenzo Miranda Cordoba  
 Una buena idea  
 Fernando Gomez  
 Oscar Roberto San Gabriel  
 Armando Yeste Carrillo  
 Elio Valdez Olmedo

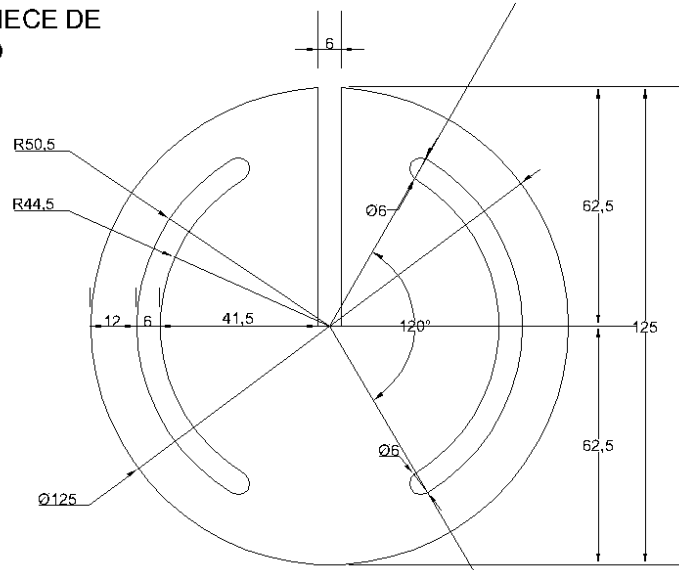
plano: Nudo  
 dibujo: T.H.S. / E.V.O.  
 revisión: J.G.O.S.  
 archivo: nodos y barras.dwg

escala: indicadas  
 acotaciones: en metros  
 fecha: diciembre del 2005

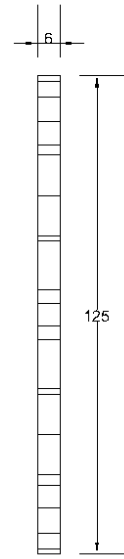
CLAVE:

**A-05**

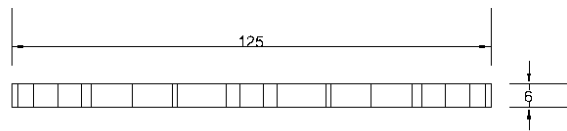
# DESPIECE DE NODO



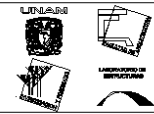
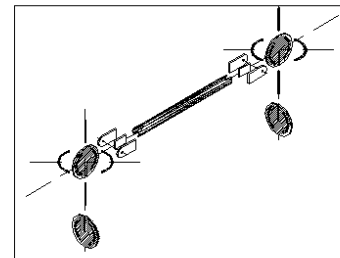
Vista frontal



Vista lateral



Planta



PROYECTO  
 UNO CASCOS INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
 ESTRUCTURAS Y SISTEMAS DE CONSTRUCCION  
 DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
 COMO TUTOR DE ESTUDIOS DE CASO  
 CARRERA DE INGENIERIA CIVIL  
 PAPIIT IN 401502

Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas  
 Ing. Lorenzo Miranda Cordoba

Una biblioteca digital  
 Fernando Gomez Ruiz  
 Oscar Roberto San Gonzalez  
 Armando "Toto" Carrillo  
 Eric Valdez Olmedo

NOTAS:

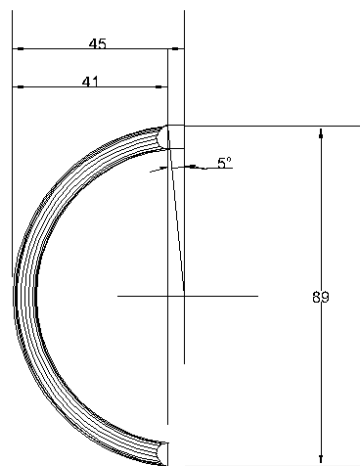
plano: Despiece de nodo  
 dibujo: T.H.S. / E.V.O.  
 revisa: J.G.O.S.  
 archivo: nodos y barras.dwg

escala: 1:1  
 acotaciones: en milímetros  
 fecha: diciembre del 2005

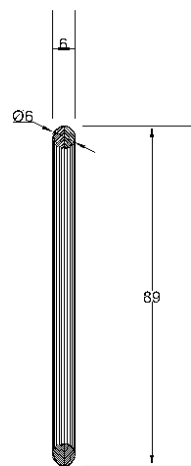
CLAVE:

**A-06**

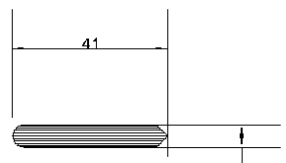
# CONTRAVENTEO



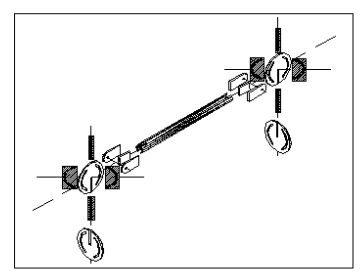
Vista frontal



Vista lateral



Planta




  
**PROYECTO**  
 UNIDAD DE INGENIERIA CIVIL DE 2500 HORAS  
 ESTRUCTURAS DE ACERO INGENIERIA DE ACERO  
 DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA OBRA DE ACERO  
 CONSTRUCTIVA DE ACERO EN EL CENTRO DE LA CIUDAD  
 DE QUITO, QUITO, PASTAZA, GUAYAS, SUCUMBIOSI  
**PAPIIT IN 401502**  
 Ing. Juan Gerardo Oliva Salinas  
 Ing. Lorenzo Miranda Cordoba  
 Una biblioteca digital  
 Facultad de Ingenieria  
 Obras de Acero y Estructuras  
 Armario "Eduardo Carrion"  
 E-10 Vialto, Quito

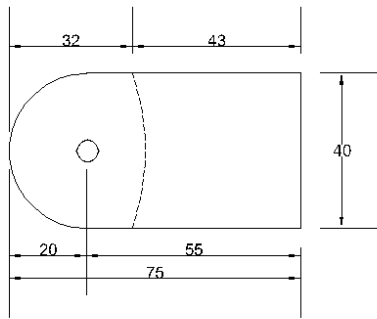
NOTAS:

plano: Contraventeo  
 dibujado: T.H.S. / E.V.O.  
 revisado: J.G.O.S.  
 archivo: nodos y barras.dwg  
 escala: 1:1  
 acotaciones: en milímetros  
 fecha: diciembre del 2005

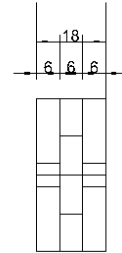
CLAVE:  
**A-07**



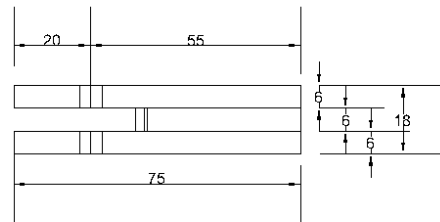
# CONECTOR



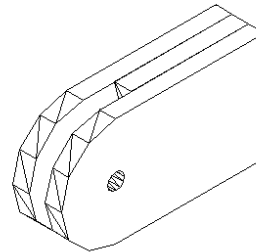
Vista frontal  
esc: 1:1



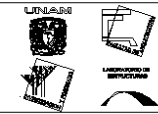
Vista lateral  
esc: 1:1



Planta  
esc: 1:1



Isométrico  
esc: 1:1



**PROYECTO**  
 UNIFICACIÓN DE LA RED DE AGUAS  
 POTABLES DEL MUNICIPIO DE SAN CARLOS  
 DE RÍO CHICÓ, MUNICIPIO DE SAN CARLOS,  
 DEPARTAMENTO DE QUINDÍO, COLOMBIA  
**PAPIIT IN 401502**  
 Ing. Juan Gerardo Oliva Salinas  
 Ing. Lorenzo Miranda Cordoba  
 Una biblioteca digital  
 Escrito con: AutoCAD  
 Odra: AutoCAD, AutoCAD LT  
 Armado: AutoCAD LT  
 E: to: Víctor Olayo

NOTAS:

plano: Conector  
 dibujo: T.H.S. / E.V.O.  
 revisión: J.G.O.S.  
 archivo: nodos y barras.dwg

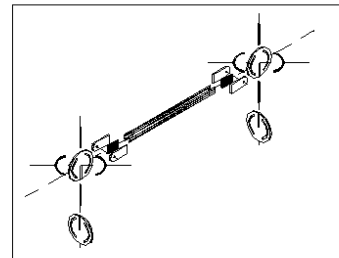
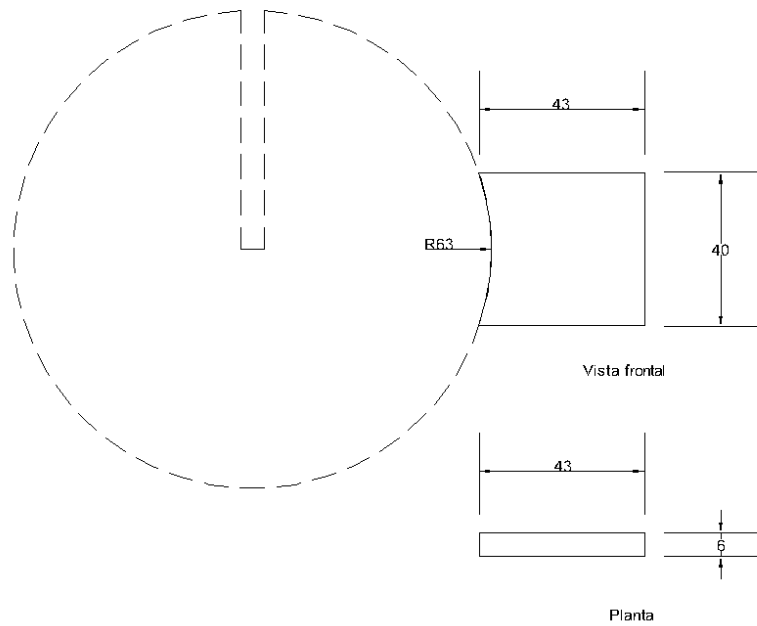
escala: indicadas  
 cotaciones: en milímetros  
 fecha: diciembre del 2005

CLAVE:

**A-08**



# PLACA CENTRAL DE CONECTOR



**PROYECTO**  
 UNIFICACIÓN DE SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA EN LAS UNIDADES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE GUAYMAS, ESTADO DE SONORA, MÉXICO  
 CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD DE GUAYMAS, ESTADO DE SONORA, MÉXICO  
**PAPIIT IN 401502**  
 Ing. Juan Gerardo Oliva Salinas  
 Ing. Lorenzo Miranda Cordoba  
 Una Sistema Privada  
 Ferrando Gomez, S de RL  
 Ocaso Roberto, Juan Gonzalez  
 Armando "Tito" Carrillo  
 Erico Valdez Olmedo

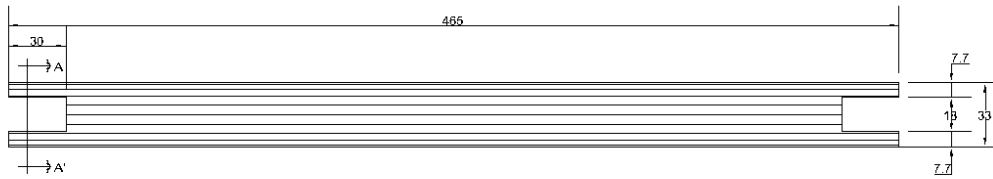
**NOTAS:**

plano: Placa central de conector  
 dibujo: T.H.S. / E.V.D.  
 reviso: J.G.O.S.  
 archivo: nodos y barras.dwg

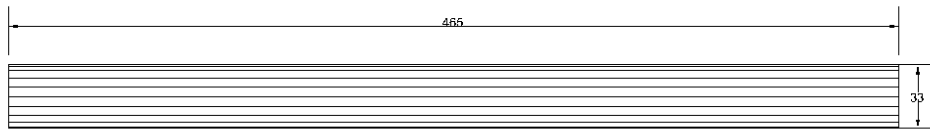
acotaciones: en milímetros  
 fecha: diciembre del 2005

**CLAVE:**  
**A-10**

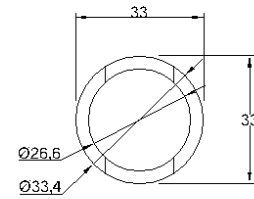
# BARRA



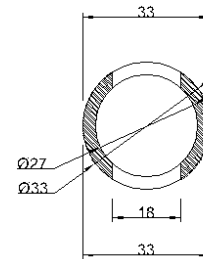
Planta  
esc. 1:2



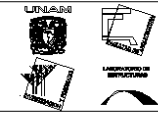
Vista frontal  
esc. 1:2



Vista lateral  
esc. 1:1



Corte  
esc. 1:1



PROYECTO  
 PARA CALDERA EN EL TUNELADO EN EL SISTEMA  
 DE TUNELADO EN EL TUNELADO EN EL TUNELADO EN EL  
 CONSTRUCCION DE LA LINEA DEL TUNELADO EN EL  
 PAPIIT IN 401502  
 Ing. Juan Gerardo Oliva Salinas  
 Ing. Lorenzo Miranda Cordoba  
 Una biblioteca digital  
 Formado en el  
 Ocaso de la Universidad  
 Armando "Tito" Carrillo  
 E-10: Víctor Olmedo

NOTAS:

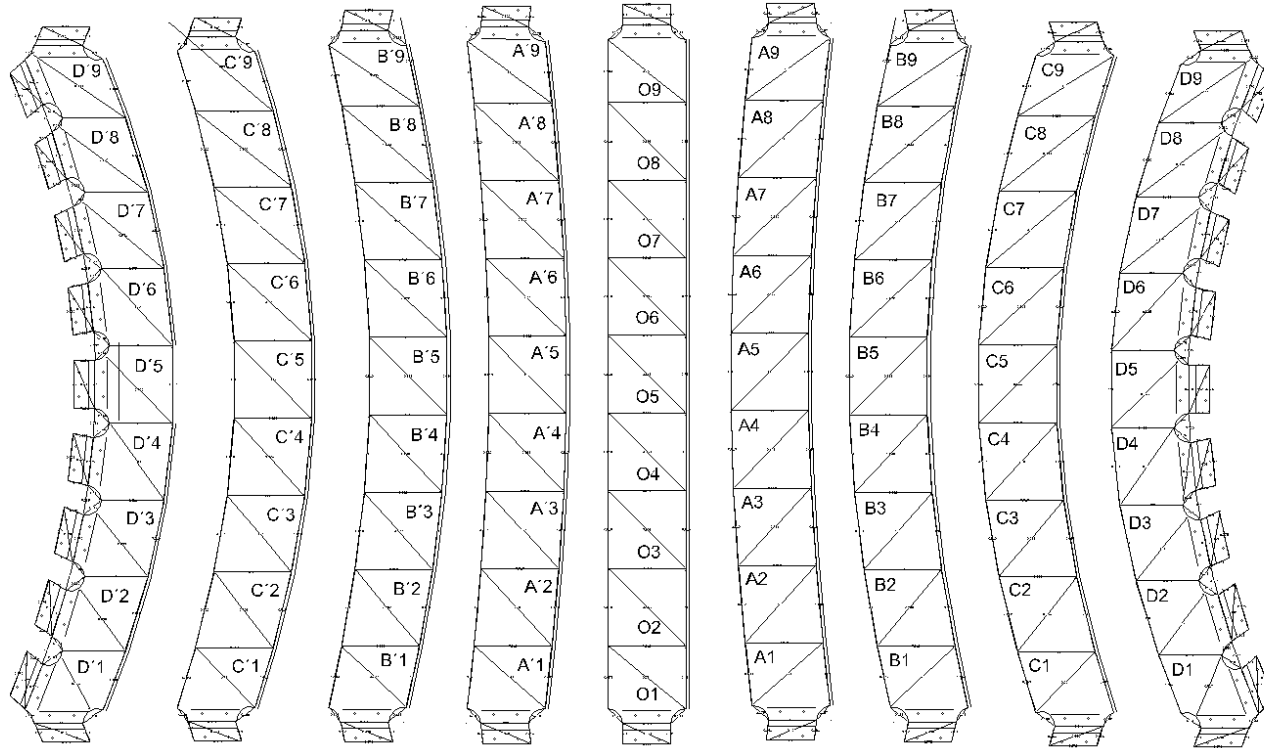
plano: Placa central de conector  
 dibujo: T.H.S. / E.V.D.  
 revisa: J.G.O.S.  
 archivo: nodos y barras.dwg

acotaciones: en milímetros  
 fecha: diciembre del 2005

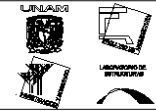
CLAVE:

**A-11**

**PLANTILLAS MEMBRANA  
SINCLASTICA**



Planta  
esc. 1:30



MEMBRANAS  
INSTRUMENTOS DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
PARTICULAR DEL DISEÑO DE SISTEMAS DE MEMBRANAS  
CON ELEMENTOS TÍPICOS Y EXCLUSIVOS PARA LA  
CONSTRUCCIÓN DE CARPENTAS (SOLAR) Y TENDAS  
CUBIERTAS Y OTRAS ESTRUCTURAS DE MEMBRANA  
**PAPIIT IN 401502**

Elaborado por:  
Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas  
Coordinador:  
Ing. Lorenzo Miranda Cordoba  
Cuerpo Técnico:  
Uziel Estrella de Parodi  
Fernando Gomez Lora  
Oscar Alejandro Lara Gonzalez  
Armando Pizarro Gaitan  
Eric Valdez Ojeda

NOTAS:

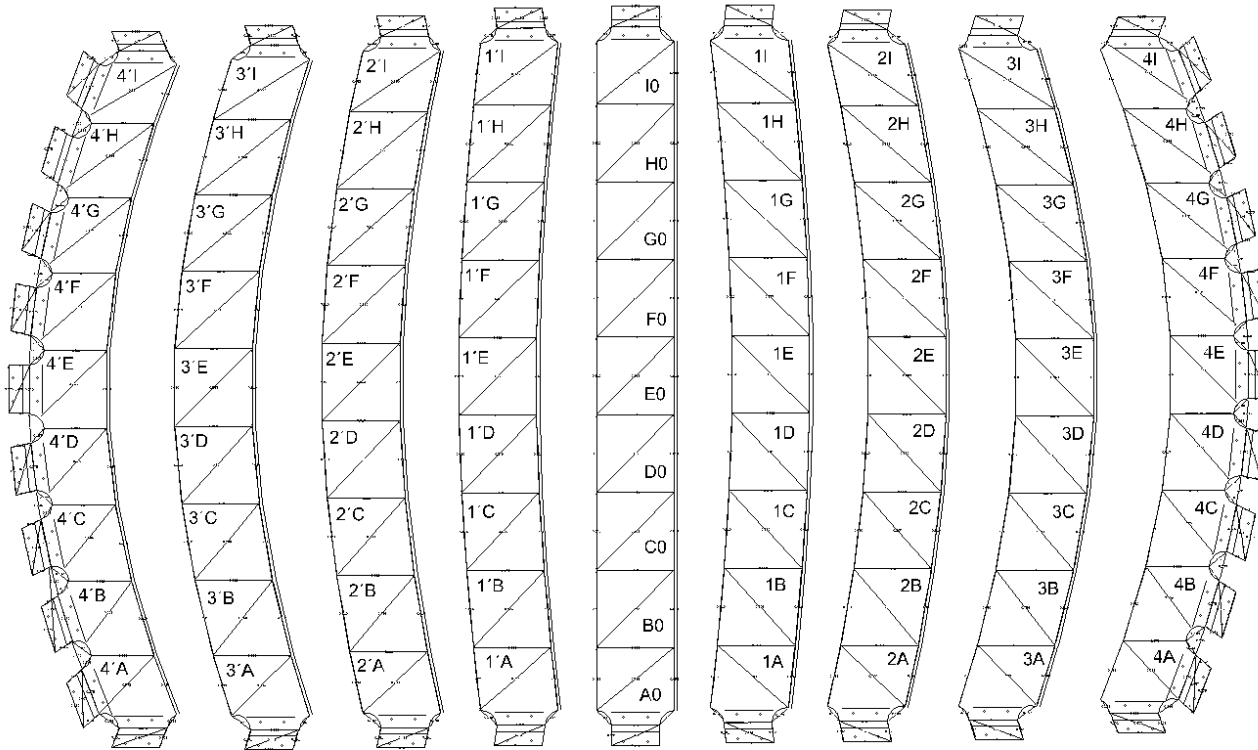
plano: Plantillas membrana sinclastica  
dibujo: T.H.S. / F.V.D.  
revisio: J.C.G.S.  
archivo: notas y barras.cwg

especificaciones en mil metros  
fecha: diciembre del 2006

CLAVE:

**A-12**

**PLANTILLAS MEMBRANA  
ANTICLASTICA**



Planta  
esc. 1:30



PROYECTO  
INSTITUCIÓN EDUCATIVA LAZARILLO DE S. STEFANO  
DIRECCIÓN DEL COMITÉ DE DISEÑO Y SUPERVISIÓN  
DISEÑO ESTRUCTURAL Y PROYECTO PARA LA  
CONSTRUCCIÓN DE UNA MEMBRANA ANTICLASTICA  
CUBIERTA CULTURAL EN GUATEMALA  
**PAPIIT IN 401502**  
AUTORIA:  
Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas  
COORDINADOR:  
Ing. Lorenzo Miranda Cordoza  
COORDINADOR:  
Miguel Brito de la Parra  
Hernando Correa Lopez  
Oscar Alejandro Lopez Gombato  
Asesor: Piedad Gaitan  
Eric Valdez Urbani

NOTAS:

plano: Plantillas membrana anticlastica  
diseño: T.H.S. / F.V.O.  
revisó: J.C.G.S.  
archivo: notas y barras.cwg

adaptaciones: en mil metros  
fecha: diciembre del 2005

CLAVE:

**A-13**