



Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Estudios Superiores Acatlán

# Sistemas Convertibles y Arquitectura Transformable

Tesis por actividad de investigación

que para obtener el título de

Arquitecto

presenta

Carlos Zetina Gargollo

Proyecto PAPIIT IN 404806-3  
Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas

México 2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

# Sistemas Convertibles y Arquitectura Transformable

Carlos Zetina Gargollo

Director de tesis

Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas

Sinodales

Arq. José Luis Sánchez Burgos

Arq. Rafael Alvarado Arredondo

Arq. César Fonseca Ponce

Arq. Elías Terán Rodríguez



Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Estudios Superiores Acatlán

México 2008

# Índice

---

## Capítulo 1: Introducción 1

---

Acerca de este trabajo  
Síntesis del problema  
Antecedentes  
Contribución  
Objetivos  
Alcances  
Hipótesis  
Metodología

---

## Capítulo 2: Orígenes 7

---

Nociones generales  
Terminología  
Ejemplos análogos en la naturaleza  
Las primeras estructuras convertibles  
Estructuras convertibles en el siglo XX

---

## Capítulo 3: Geometría estructural 24

---

Clasificación de superficies y convertibilidad  
Clasificación de sistemas convertibles  
Marcos plegables  
Ejemplos análogos

---

## Capítulo 4: Propuesta para la Academia de San Carlos 59

---

Antecedentes  
Consideraciones estructurales

---

## Capítulo 5: Concepto 66

---

Concepto de sistema convertible  
Concepto formal  
Concepto estructural  
Concepto mecánico

Capítulo 6: Proyecto arquitectónico 80

---

Plantas  
Fachadas  
Cortes  
Detalles  
Perspectivas

Capítulo 7: Criterio estructural 100

---

Peso de la cubierta  
Cálculo preliminar  
Propuesta de elementos estructurales  
Cálculo mecánico

Capítulo 8: Prototipos 105

---

Maqueta del Segundo Patio de la Academia de San Carlos  
Maqueta de la cubierta convertible

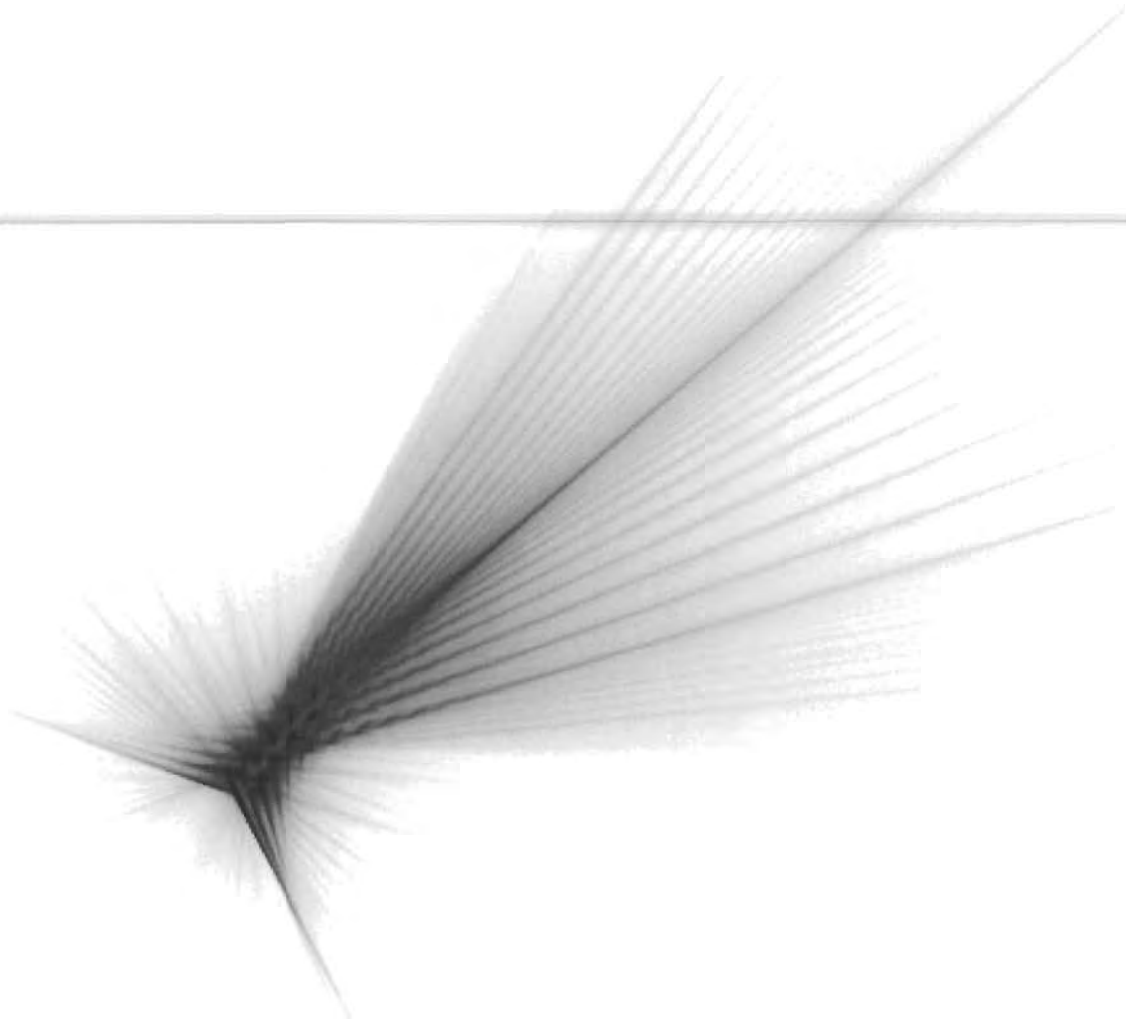
Capítulo 9: Conclusiones 109

---

Capítulo 10: Referencias 112

---





# Capítulo 1

Introducción

## Acerca de este trabajo

Las decisiones que tomamos todos los días nos van llevando por lo que es nuestra vida y es justamente ahí, en las decisiones más nimias donde forjamos nuestro camino y damos cabida a nuevas experiencias, a veces para bien a veces no tanto pero si seguimos aquí y estamos tranquilos es muy probable que hayamos tomado las decisiones correctas.

Mi vida por suerte ha estado llena de sorpresas y coincidencias, y quiero aprovechar esta introducción para contarte, a ti mi etéreo lector, como llegué al Laboratorio de Estructuras y lo que ha significado para mi colaborar en él ya desde hace varios años. Desde mi primer semestre, la geometría descriptiva me cautivó, las clases de los arquitectos Rafael Alvarado Arredondo y Mario Ocádiz García cambiaron mi perspectiva con respecto a la arquitectura y mi forma de concebir el mundo, en la clase de estereotomía con el arquitecto Pedro Irigoyen entendí la importancia del método de la geometría descriptiva y su aplicación, y esto, en su conjunto ha sido lo que me ha impulsado a buscar nuevas formas en la arquitectura y soluciones que aunque parecieran poco convencionales han estado ahí en la naturaleza siempre. El primer contacto aunque indirecto con el Lab fue cuando fueron los 450 años de la UNAM, hubo un ciclo muy grande de actividades y entre ellas estuvo una exposición en el museo del Palacio de Minería, a la cual acudí un día entre semana, cuando llegué me llamó la atención de sobremanera una estructura de lona blanca instalada en la plaza Tolsá, su fina geometría y una forma de obtener las plantillas en aquel entonces desconocida para mí, me pusieron a preguntarle a prácticamente cualquier peatón si sabía quién había realizado tal estructura, pues no, finalmente nadie me supo decir, pero el destino funciona de formas extrañas. Mi asombro creció un tanto más cuando entré al Palacio de Minería y viera la cubierta del patio central, una vez más la geometría de la membrana textil me dejó atónito.

Como dos semestres después, el tiempo de hacer mi servicio social había llegado y fui a las oficinas correspondientes en Acatlán para revisar las listas y escoger alguna actividad, para mi decepción no vi nada que me llamara la atención, dejando pendiente dicho trámite... Como dos semanas más tarde, platicando del servicio social con varios amigos de arquitectura, una amiga me dijo algo como "yo pensé que ya habías empezado en ese servicio de geometría que está en las listas"... ¿servicio de geometría?! ¡No lo vi! En ese instante regresé a la oficina y busque en las listas otra vez, ahora con mucho más detenimiento, y al fin lo encontré, Investigación sobre geometría estructural y cubiertas ligeras en Ciudad Universitaria... ¡hasta el sur! Pensé, bueno ni modo voy a hablar. Me contestó una persona que no tenía idea de que era o donde estaba la FES Acatlán y con toda razón, quedaba al otro lado de la ciudad,

-¿cómo supiste de nosotros?, -Están en las listas de servicio social de Acatlán. -¿en serio?, pero nosotros no hemos mandado nada de información, que raro, pero está bien, ven a que platiques con el doctor Oliva.

Llegué al Laboratorio y entrando me quedé impresionado, maquetas, estudios geométricos y gente trabajando en distintos proyectos, de pronto ahí estaba la estructura de la plaza Tolsá! Es el Modunam, una cubierta modular generada en términos generales por la intersección de dos paraboloides hiperbólicos, un poco después note que la cubierta del Palacio de Minería había salido de ahí también! No lo podía creer, al fin había encontrado a quien hizo estas dos estructuras que me habían dejado sin aliento hace apenas un año.

Platiqué con el doctor Oliva, me aceptó como prestador de servicio social y conocí a muchas personas que se han convertido en grandes amigos con los que he compartido el Lab muchos años.

Un poco después empecé a trabajar en el domo del Museo de Arte Popular, desarrollamos en el Laboratorio el control geométrico de la cubierta, la logística de construcción, y el diseño de la sujeción del vidrio, estuve supervisando esa obra de inicio a fin, fue para mí una experiencia inolvidable. Trabajé todavía en otros proyectos del Lab y aunque no me quería ir mi servicio social había terminado ya hacia varios meses.

Continué con mis estudios en Acatlán y en otro punto me volví a encontrar con el Laboratorio, el arquitecto, geómetra y gran amigo Octavio Barreda estaba en contacto con el arquitecto Carlos Flores Marini, comisario general para la exposición "Gaudí: arquitecto artista insólito" en el antiguo colegio de San Ildefonso y por parte de Acatlán presentamos un modelo de un paraboloides hiperbólico, para mi sorpresa el día que fuimos a montarlo me encontré a todos mis amigos del Lab ellos también estaban montando el último proyecto de investigación que se estaba desarrollando: un sistema de nodos y barras modulares que pueden generar superficies de doble curvatura positiva o negativa, me dio mucho gusto verlos y los ayudé a su montaje también, extrañaba trabajar con ellos, son un súper equipo.

Pasó un tiempo en el que estuve sin saber nada del Lab, entré a trabajar y paralelamente avanzaba en un tema de tesis que era Laboratorios de Investigación para el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM en Mazatlán, Sinaloa, de hecho todavía hay un remanente de ese tema en este trabajo, las portadas de cada capítulo son fractales que dibujé con un programa que se llama Chaoscope, y una de las condiciones al estarlos haciendo fue que se asemejaran o fueran una estilización de conchas o animales marinos.

Un día el doctor Oliva me llamó y me planteó la posibilidad de hacer la tesis por apoyo a la investigación en un proyecto de estructuras transformables, era una decisión aparentemente no muy fácil pues ya llevaba avanzado mi tema de los laboratorios en Mazatlán sin embargo después de cómo 10 segundos de pensarlo dije que sí, estaba claro que lo que me había planteado el doctor me emocionó como pocas cosas en los últimos meses, así que dejé de trabajar para dedicarme al 100% a terminar mi carrera. Así surge este trabajo, volviéndome a incorporar a ese lugar que me ha dado tanto, y pudiendo colaborar en él con mi trabajo y entusiasmo.

A la fecha sigo pensando que tal vez no fui yo quien encontró al Laboratorio sino que el Laboratorio de alguna forma me encontró a mí y no por lo que yo pudiera aportar a él sino por lo que tenía que aprender y vivir ahí. Gracias a todos mis amigos y en especial al Doc por haber creído en mí y haber realizado tantos proyectos juntos, espero que nuestros caminos sigan entrelazados para tener una vez más el gusto de materializar cosas tan bellas e impresionantes.

Carlos Zetina Gargollo  
Mayo de 2008



## Síntesis del problema

Actualmente es necesario cubrir patios de edificios históricos a efecto de realizar diversas actividades en los mismos. Estos espacios concebidos originalmente como espacios abiertos, requieren protegerse del sol, de la lluvia y el granizo. Considerando la posibilidad de generar sistemas de cubiertas convertibles, es decir, que ofrezcan la posibilidad de cubrir y proteger el espacio cuando su uso así lo requiera y que sean retirados a través de sistemas manuales o electrónicos y que permitan disfrutar del espacio abierto, no es una labor sencilla, ya que este proceso debe llevarse a cabo de manera segura y económica, sin causar vibraciones que afecten las estructuras de los edificios, muchas veces construidos en piedra.

## Antecedentes

En el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, se han desarrollado proyectos de investigación consistentes en cubrir espacios de manera provisional por medio de cubiertas desmontables, de rápido armado y desarmado, ligeras y fáciles de transportar y estibar. Tal es el caso del MODUNAM I, y del MODUTEATRO. También en el Laboratorio de Estructuras, se han generado grupos de trabajo y se han ganado concursos nacionales e internacionales, con propuestas de cubiertas velarias, o sea de sistemas estructurales donde el material básico es una membrana que trabaja a tracción gracias a su diseño y a sus características geométricas. Actualmente estamos en la fase terminal de los proyectos MODUNAM II y MODUNAM III, el primero consistente en un sistema de "tijeras" generando una forma análoga a un iglú cubierto por una velaria y el segundo consistente en un sistema modular de nodos y barras que permite variar claros y curvaturas de las cubiertas, utilizando los mismos elementos tipo en todos los casos.

## Contribución

Con base a los antecedentes descritos, considero que se pueden generar propuestas que nos permitan poner en servicio de la sociedad sistemas estructurales convertibles adecuados y que constituyan innovaciones tecnológicas en el área del diseño arquitectónico y estructural; susceptibles de ser patentadas y que reflejen la generación de nuevo conocimiento, sustentado científicamente y tecnológicamente.

## Objetivos

- Generar propuestas de sistemas estructurales convertibles a través de mecanismos mecánicos y/o electrónicos; para ser aplicados en el diseño y construcción de cubiertas ligeras de patios de edificios históricos.
- Dar respuesta a una problemática social real, de cubrir espacios concebidos originalmente como abiertos, para que ahora puedan utilizarse en diversos eventos que requieran de espacios cubiertos como conferencias o exposiciones, mediante la solución en el diseño de cubiertas convertibles.
- Generar nuevo conocimiento a través de las propuestas que surjan del grupo de investigación de este seminario, para resolver problemas prácticos y para escribir y difundir artículos científicos.
- Fortalecer el seminario de investigación permanente sobre Geometría y Mecánica Estructural, para generar una conciencia del uso de tecnología aplicada a la arquitectura fomentando la participación interdisciplinaria de profesores y alumnos de la FES Acatlán y las facultades de Arquitectura e Ingeniería de la UNAM.

## Alcances

- Analizar las distintas tipologías de cubiertas convertibles bajo parámetros formales, mecánicos y funcionales para determinar la solución más adecuada ante el problema planteado en la academia de San Carlos.
- Realizar el anteproyecto y presentación de dicha cubierta.

## Hipótesis

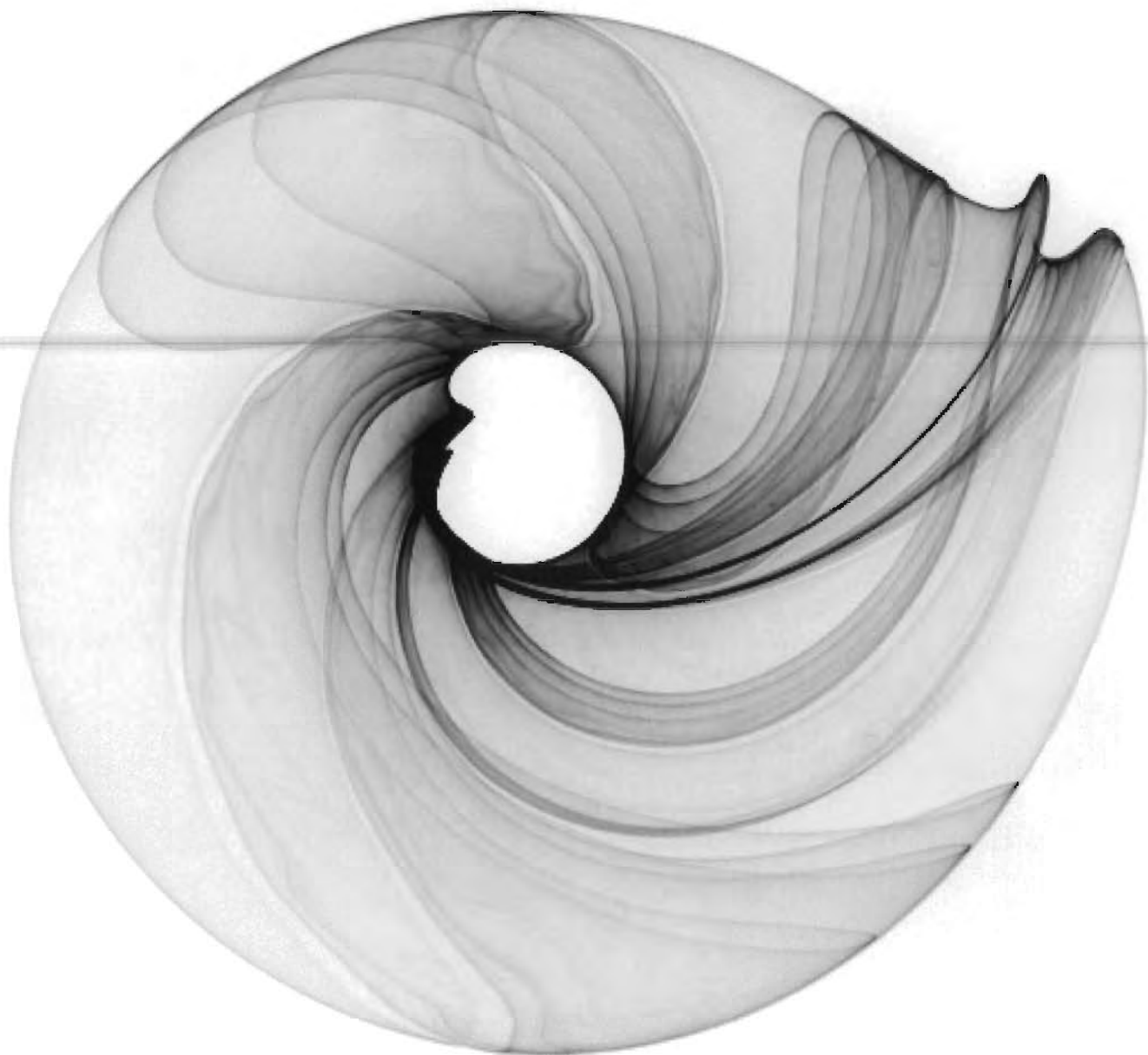
El uso dado a cierto espacio en el momento de su concepción no es perenne, y conforme las costumbres humanas cambian con el paso del tiempo, las actividades que se desarrollan en un local, en este caso un patio, varían a la par.

Por lo anterior, la versatilidad que un sitio pueda ofrecer repercute en un mayor aprovechamiento del espacio y a su vez abre la posibilidad de transformarlo en un número indefinido de espacios con características distintas como el nivel lumínico, grado de ventilación y la más notable, de un ámbito al aire libre a un lugar cubierto e impermeable.

## Metodología

En el Laboratorio de Estructuras, en el seminario permanente de investigación sobre geometría estructural, el trabajo cotidiano está coordinado por el doctor Juan Gerardo Oliva Salinas, con juntas semanales donde nos reunimos los becarios para exponer avances, dudas o propuestas para los proyectos y programar las actividades a seguir.

El Laboratorio tiene también el apoyo de alumnos, principalmente de las facultades de Arquitectura e Ingeniería, que llevan a cabo su práctica profesional supervisada o servicio social. De la misma forma recibe alumnos otros lugares, como los participantes del programa de CONACYT "Verano de Investigación Científica", alumnos de diversas facultades de la universidad, alumnos de universidades latinoamericanas y ocasionalmente alumnos de la Universidad de Aquisgrán, Alemania, gracias al Convenio de Intercambio Académico que sostiene la UNAM con dicha institución.



# Capítulo 2

Orígenes

## Nociones generales

La transformabilidad es una característica fundamental de los seres vivos, las articulaciones o movimientos musculares tienen por fin cambiar la posición o forma de un cuerpo, generando posibilidades en las que un ser se relaciona con su entorno. En un panorama más general los elementos inertes se transforman también por fenómenos naturales y no tienen más función que adecuarse a las propiedades físicas o químicas que poseen. La cualidad mecánica que presentan los organismos más desarrollados comprende principalmente articulaciones y elementos que se mueven a partir de ellas. Por otro lado sistemas axiales como el de una rueda (fig. 1) no existen en seres vivos sin embargo tienen un potencial cinético enorme.

En este trabajo expondré los distintos mecanismos de convertibilidad y sus posibilidades de aplicación en la arquitectura, específicamente a cubiertas ligeras.

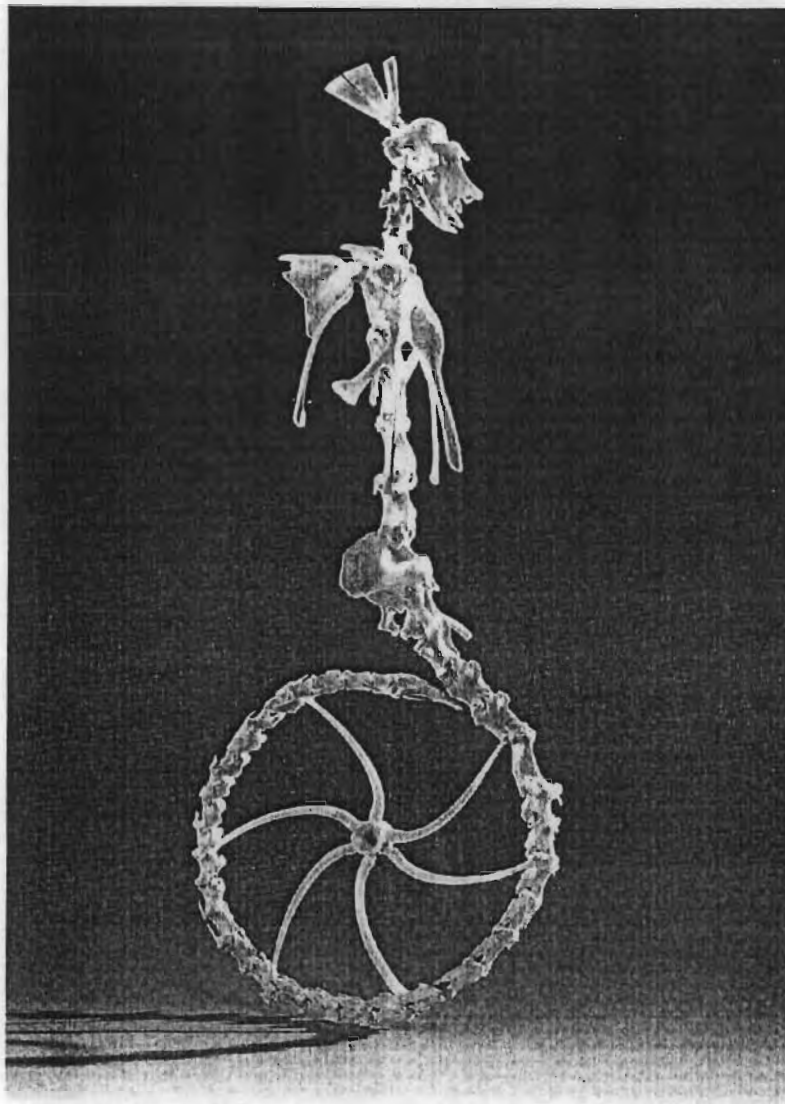


Figura 1. El Homo Rodans de Remedios Varo, 1959

## Terminología

En el campo de la arquitectura adaptable no hay lineamientos claros respecto a los conceptos y sus significados. A menudo se usan términos como arquitectura móvil, arquitectura plegable o arquitectura transformable que si bien se refieren a lo mismo, muchas veces son motivo de confusión. Para éste trabajo usaré la clasificación propuesta por el equipo del Institut für leichte Flächentragwerke (Instituto de Estructuras Ligeras) de la Universidad de Stuttgart, Alemania dirigido por muchos años por Frei Otto.

### Diferencia entre movilidad y convertibilidad

Convertibilidad se refiere a la capacidad de un edificio de cambiar su forma física, y debemos diferenciar entre convertibilidad externa e interna, la primera se refiere a cambios en la coraza del edificio, y en ésta categoría entran cubiertas que se puedan abrir y cerrar, o que cambien de tamaño. La convertibilidad interna implica cambios en locales de la construcción y puede ser como mover paredes o pisos, un ejemplo de esto podría ser el escenario y tramoya de un teatro donde existan plataformas que suban y bajen o elementos de escenografía que cambien las cualidades del espacio.

Movilidad es la capacidad de una edificación de cambiar su ubicación, en otras palabras, unidades de una construcción o la construcción en su totalidad se pueden mover sin cambiar esencialmente de forma.

Las cubiertas convertibles, que son el tema central de este trabajo, están en la categoría de sistemas convertibles exteriores y el objetivo de diseño de las mismas se centra en que puedan cambiar de forma en un periodo de tiempo relativamente corto.

A grandes rasgos ésta es la terminología que se utilizará a lo largo del escrito, las diferencias entre tipologías de convertibilidad serán tratadas más adelante en el capítulo 3 (pág. 19).

## Ejemplos análogos en la naturaleza

En el reino vegetal en el sentido de crecimiento, todas las plantas se transforman, adaptándose a las condiciones del medio en el que estén. Sin embargo el tiempo que tarda una planta en crecer, convierte al fenómeno de transformación en algo imperceptible más que a lo largo de los años. Algunos aseguran que se puede apreciar el crecimiento de ciertas plantas como el bambú o el pasto. Fuera de la cualidad de crecimiento, en plantas, hay pocos ejemplos cinéticos.

Uno de los más notables es la planta carnívora *Dionaea Muscipula*, cuyas trampas se cierran para capturar a su presa (fig. 2). El mecanismo por el cual ésta planta se mueve implica una compleja mezcla de crecimiento, elasticidad y presión de turgor que es presión del contenido de una célula contra sus paredes, generada por el contenido acuoso en la vacuola. De alguna forma éste fenómeno se podría considerar como un sistema automatizado pues la trampa se activa cuando alguno de los tres filamentos en su parte interior son estimulados. Como analogía a esto podríamos tomar los parasoles de un edificio, que regulen su ángulo de acuerdo al sol para mantener cierta temperatura o iluminación al interior.

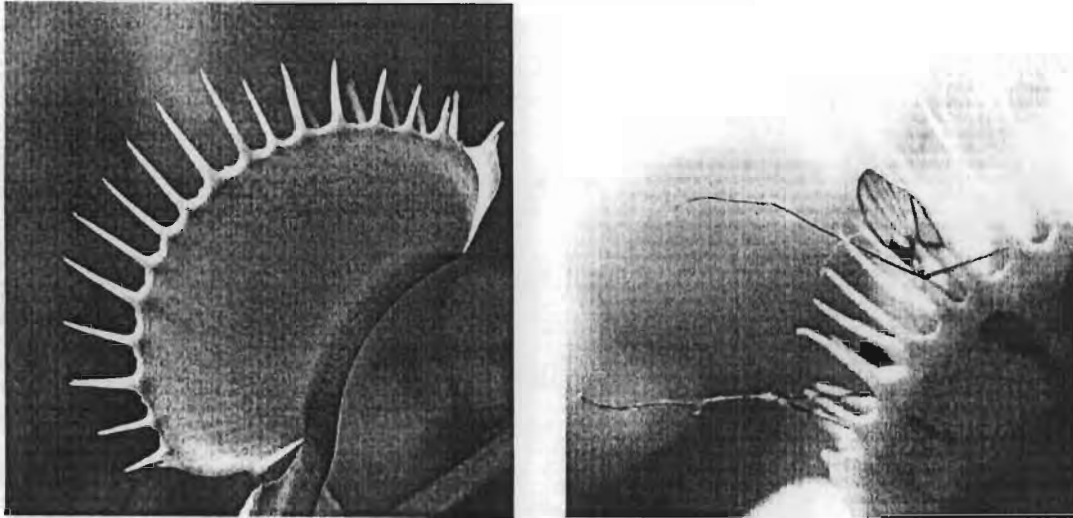


Figura 2. *Dionaea muscipula* abierta y con insecto

Otro ejemplo es la *Mimosa Púdica* de la familia de las fabáceas, que reacciona a estímulos como el tacto o un incremento en la temperatura y cierra sus hojas para su protección, es importante mencionar en éste caso, el cambio de área que una de estas ramas cubre en proyección horizontal es significativo, descubriendo en promedio más del 80% (fig. 3).

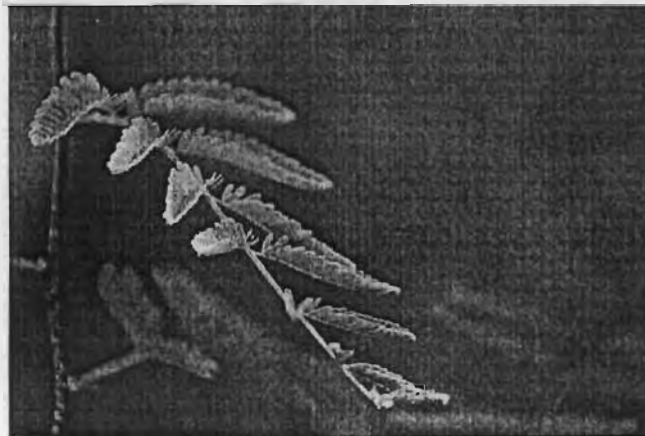


Figura 3. *Mimosa* o dormilona

La *Forficula Auricularia* o tijerilla es un insecto conocido popularmente por los apéndices en forma de pinza que presenta al final de su abdomen. Los machos de esta especie poseen alas, y la forma de plegarlas para guardarlas es poco común. En 2004 Caroline Hachem, Eyal Karni y Ariel Hanaor publicaron un estudio sobre varios ejemplos de transformabilidad en la naturaleza para el Simposio Anual de la International Association for Shell and Spatial Structures IASS (Asociación Internacional de Cascarones y Estructuras Espaciales) en Montpellier, Francia, y uno de los ejemplos fue precisamente éste donde bajo la clasificación de transformabilidad propuesta por R. Levy y A. Hananor destacan las características del patrón de doblado del ala y acercamientos a posibles aplicaciones arquitectónicas.



Figura 4. *Forficula Auricularia*

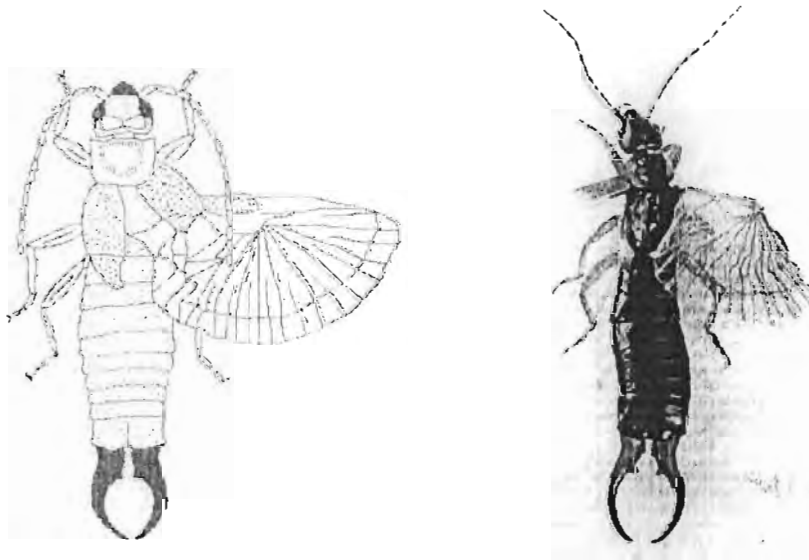


Figura 5. Ala extendida

El tamaño del ala extendida es diez veces mayor que cuando esta plegada, y el mecanismo como tal consta principalmente de pliegues radiales. Sin embargo, un pliegue curvo (fig. 5) que sigue la forma de la parte exterior del ala, genera una combinación poco común: pliegues radiales y pliegues dados por cuarto planos adyacentes. Dado que esto sería técnicamente complicado con planos totalmente rígidos, en la intersección de estos cuatro planos existe una zona de membrana elástica que permite el movimiento de desplegamiento del ala.



Los ejemplos principales de transformabilidad en la naturaleza, se encuentran en el reino animal, y constan principalmente de articulaciones tipo nodo y barra. Las combinaciones que de este sistema se obtienen son muchas, variando desde insectos muy pequeños hasta mamíferos de gran tamaño. Las posibilidades de movimientos abarcan tareas como desplazamiento, protección, y hasta vuelo.

El murciélago es un ejemplo análogo particularmente referente a posibles cubiertas, pues el sistema de nodos y barras, esta complementado por una membrana elástica que forma el ala, un método similar fue usado en la antigüedad en el diseño de las velas de los barcos chinos (fig. 6).



Figura 6. Murciélago y la vela china

La mano humana (fig. 7) es el órgano principal con el que podemos controlar nuestro entorno, esta conformada por lo menos de 27 huesos que dan lugar a un numero aproximado de 16 articulaciones. Las combinaciones de movimientos dan lugar a una amplia gama de acciones y en comparación con la mayoría de los animales es más compleja y delicada por lo que nos permite manejar una gran variedad de herramientas y dispositivos.



Figura 7. Radiografía de la mano de un niño

La complejidad y posibilidades de movimiento que pueda tener un organismo esta dada por el número de articulaciones que posee, y cuando un animal esta completamente conformado por piezas articuladas el resultado es interesante (fig. 8). Las serpientes son un ejemplo extraordinario de transformabilidad por su cualidad de poderse mover en prácticamente cualquier dirección.

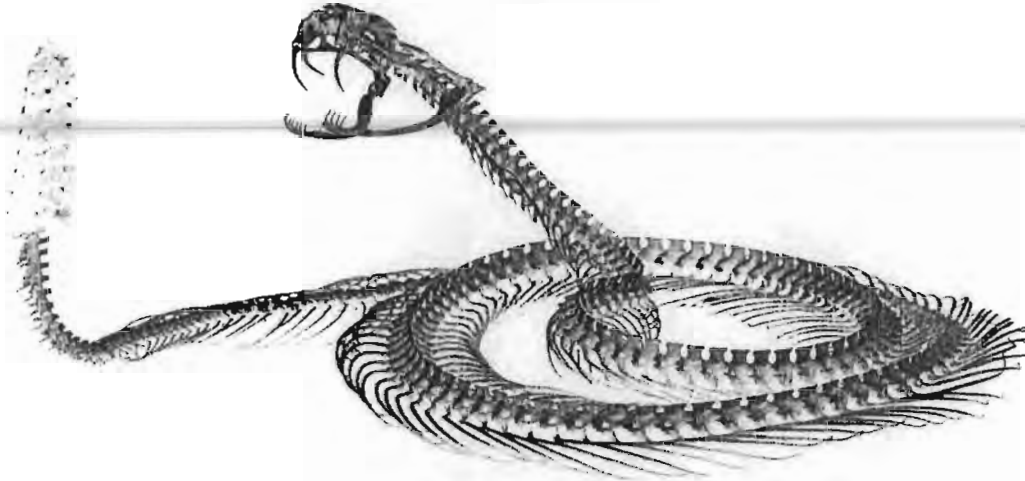


Figura 8. Esqueleto de serpiente

Como transición entre los sistemas cinéticos naturales y las construcciones transformables hechas por el hombre, expondré brevemente la obra de Theo Jansen, ingeniero y escultor trabajando en las playas de Holanda que con los años ha llegado a diseñar "animales" hechos de estructuras ligeras de plástico y cuyo movimiento está impulsado únicamente por el viento.

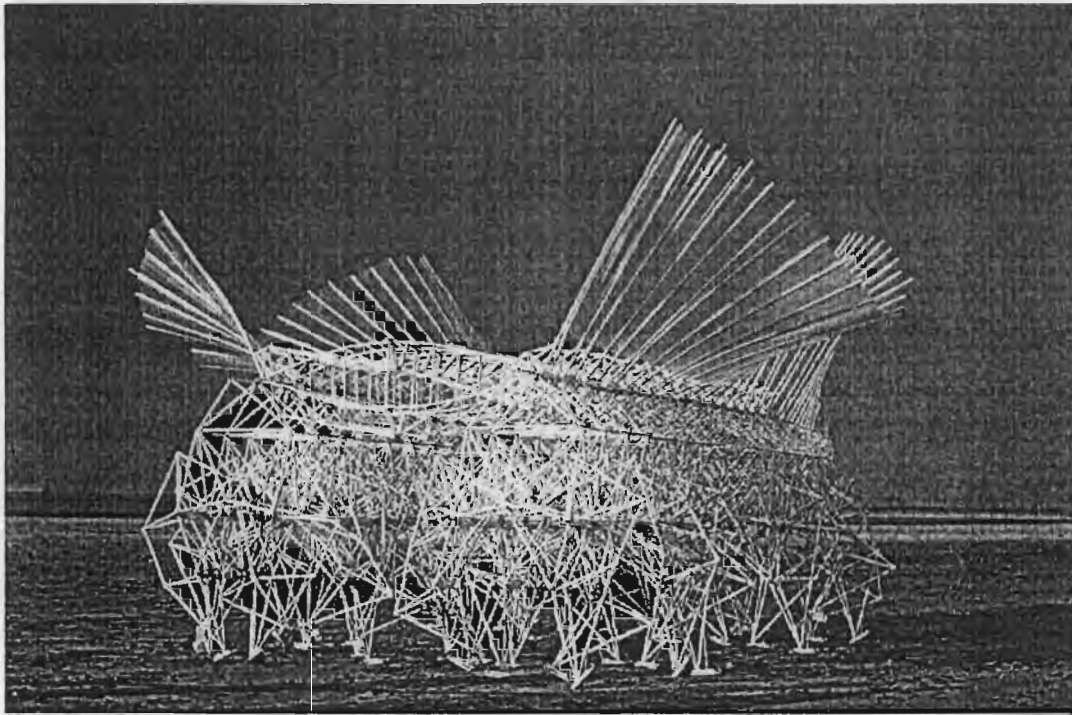


Figura 9. Escultura cinética de Theo Jansen

Jansen se ha dedicado a generar vida artificial por medio de un algoritmo genético con el que hace evolucionar a sus creaciones. Las más adelantadas están provistas de un "sistema nervioso muy primitivo" que consiste en una línea de pistones hechos con botellas de agua que dependiendo como estén dispuestos (abiertos o cerrados) equivalen a un número en código binario que hace reaccionar a la criatura para por ejemplo alejarse del agua.

La idea de este escultor es que eventualmente sus creaciones sean totalmente autosuficientes y las pueda dejar en la arena para que vivan ahí.

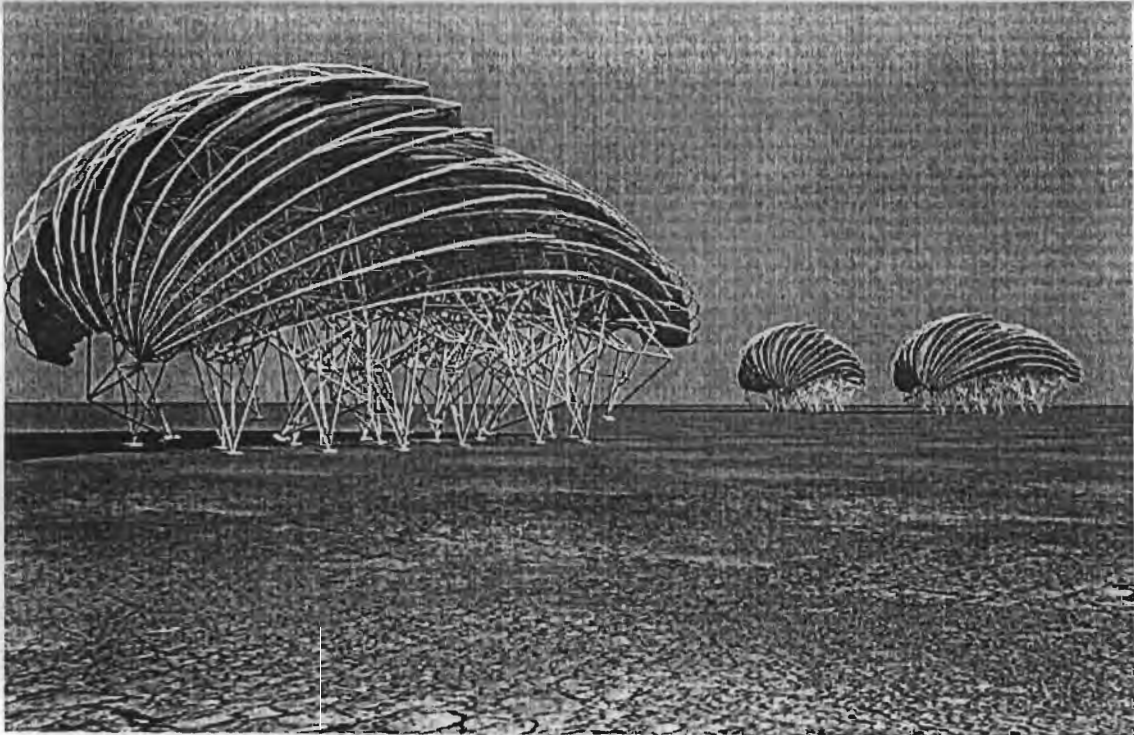


Figura 10. Render de próximos diseños

"The walls between art and engineering exist only in our minds"

*"Las barreras entre el arte y la ingeniería existen solo en nuestras mentes"*

Theo Jansen

## Las primeras estructuras convertibles

El concepto de una estructura que pueda cambiar de forma para adaptarse al clima o a distintos usos no es nuevo y aunque la información con respecto al inicio de este tipo de construcciones no es muy precisa, el ejemplo más elemental de arquitectura adaptable son las construcciones enfocadas a la vivienda. Las tiendas de campaña en un inicio fueron usadas por soldados o cazadores y su objeto es transportarse e izarse de manera sencilla y veloz. La evolución de estructuras de membrana ha dado una gran variedad de formas, como ejemplos están la tienda romana y las tiendas medievales (fig. 11).

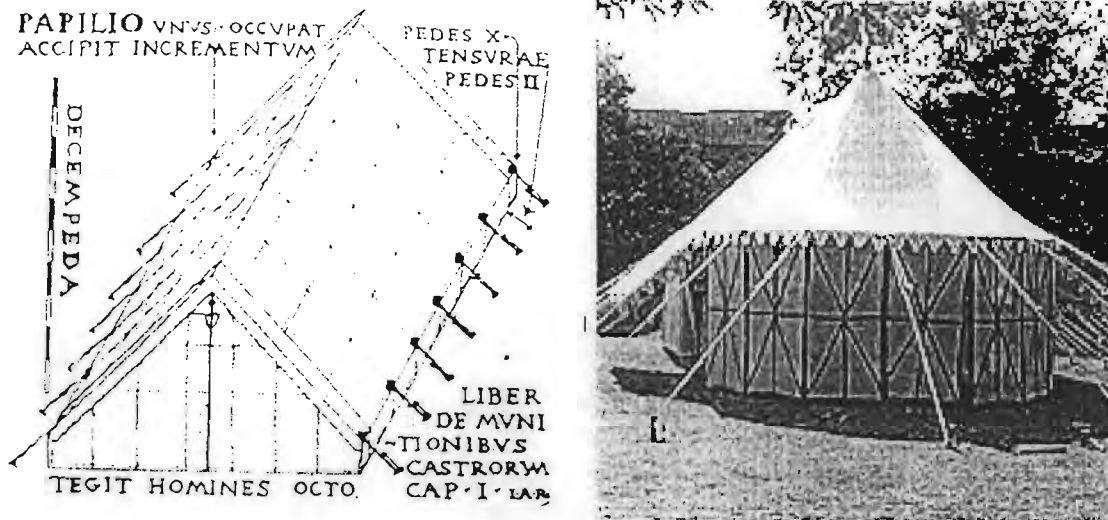


Figura 11. Papilio romano y tienda medieval

Casi cualquier construcción de membrana puede cambiar considerablemente de forma a un costo relativamente bajo. Un ejemplo interesante de esta aplicación son las tiendas de los Berber al norte de África donde variando el ángulo de inclinación del textil, la tienda se puede adaptar a la dirección y fuerza del viento.

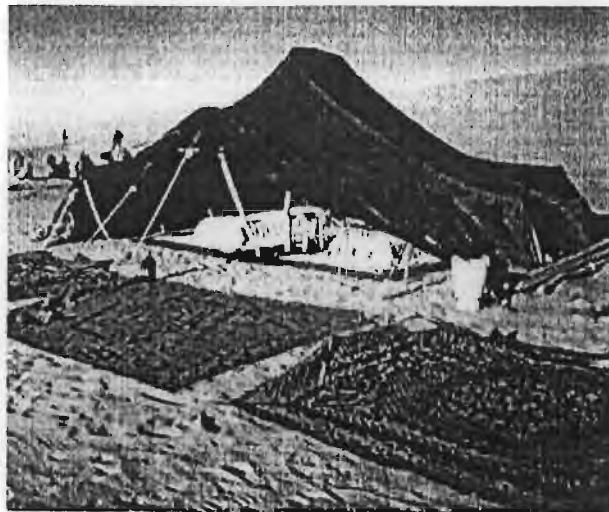


Figura 12. Tienda Berber

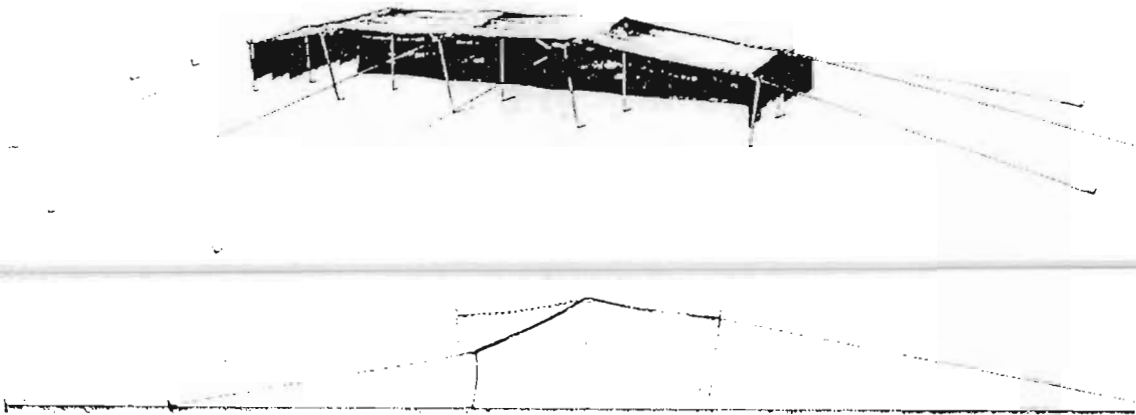


Figura 13. Diagrama de una tienda Berber y sus posiciones



Figura 14. Tipi norteamericano

Los tipis norteamericanos tienen características de convertibilidad que escapan a simple vista, el hecho de poder ajustar la piel que cubre la parte superior de la estructura dependiendo la dirección del viento, con el fin de que la salida de humo funcione correctamente y haga tiro, o cerrar completamente el espacio. (fig. 14).

Un caso especial son las yurtas asiáticas que con un ingenioso sistema de tijeras forman los muros de la tienda, este sistema usado también en corrales para bebés tiene su base en sistemas articulados de nodos y barras que parten del rombo, cabe mencionar que estos rombos no están contenidos en planos y que la forma de la estructura corresponde a un hiperboloide de revolución. (fig. 15).



Figura 15. Estructura y yurta terminada

Otros ejemplos de arquitectura adaptable, ya no en función de crear todo un refugio o hábitat son las marquesinas textiles que tienen como objetivo dar sombra a una ventana o puerta y las cubiertas de membrana sobre calles como los toldos españoles o japoneses.

La palabra marquesina supuestamente se originó a partir del Marqués de Pompadour a mediados del siglo XVIII en Francia sin embargo las primeras marquesinas textiles son un poco anteriores. Aunque el concepto como tal ha sido el mismo, lo que ha evolucionado es el sistema mecánico, si bien en un principio el sistema era totalmente manual y la marquesina se retiraba o quedaba colgando libremente, hoy en día un sistema electromecánico enrolla el textil en torno a un eje.

El Archivo General del Ayuntamiento de Sevilla tiene facturas fechadas entre los años de 1570 a 1572 de la construcción de velas y toldos para procesiones funerarias, evidencia clara de la existencia de toldos sobre las calles en España en el siglo XVI, sin embargo es muy probable que este tipo de construcciones sean mucho más viejas. Estos sistemas constan de cables que van de un edificio a otro y membranas sujetas por anillos que se deslizan paralelamente a los cables para cubrir el espacio.

La sombrilla es un sistema convertible con inicios probablemente en el siglo XIII AC una muestra de esto es un grabado en piedra del gobernante Asirio Assurbanipal donde un sirviente está sosteniendo una sombrilla (fig. 17) que aunque no es muy claro si la tela se puede plegar para guardarse, parece tener partes móviles que lo harían posible.

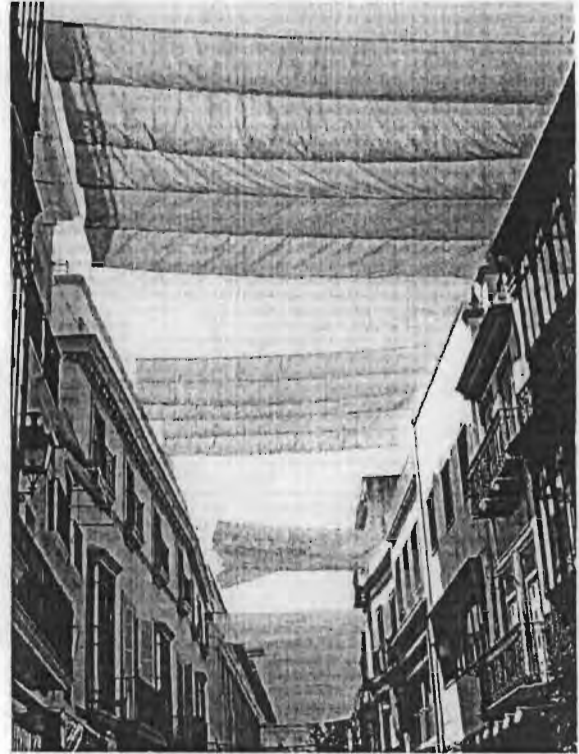


Figura 16. Toldos en Sevilla

El primer testimonio encontrado sobre el uso de esta estructura para protección de la lluvia viene de los romanos, llevando hasta nuestros días la palabra paraguas. Esta tipología también se desarrolló en los inicios de India, China y Japón.

De forma que ante nosotros tenemos una estructura convertible que se inventó hace más de dos mil años y que seguimos usando. La escala ha cambiado poco desde sus inicios, permaneciendo chica con uso por lo general personal llegando a aplicaciones de mesas en restaurantes, sin embargo las posibilidades de ejercer este sistema para cubrir claros mayores son vastas.



Figura 17. Grabado Asirio en piedra mostrando una sombrilla

Podemos encontrar otras fascinantes aplicaciones de cubiertas convertibles en los teatros romanos donde usando mástiles como rieles, corrían velas para cubrir a las gradas de la intemperie. Este ejemplo merece nuestra especial atención por el enorme área que cubrían y por los obstáculos técnicos que tuvieron que resolver para lograrlo. El único documento fehaciente de la existencia de estas estructuras es un fresco en Pompeya, al respecto se han hecho investigaciones profundas de cómo pudo haber funcionado dicha estructura.

Hay que tomar en cuenta que estas estructuras fueron convertibles por necesidad y no tanto por el gusto de poder retirarlas en días con buen clima. Esto es que en aquel entonces no existía la tecnología necesaria para haber construido un techo de materiales sólidos con ese claro. De tal forma que el velum probablemente servía para proteger a los espectadores del sol, pero se retiraba para su conservación en caso de lluvia o viento fuerte que pudiera destruirla (fig. 18).

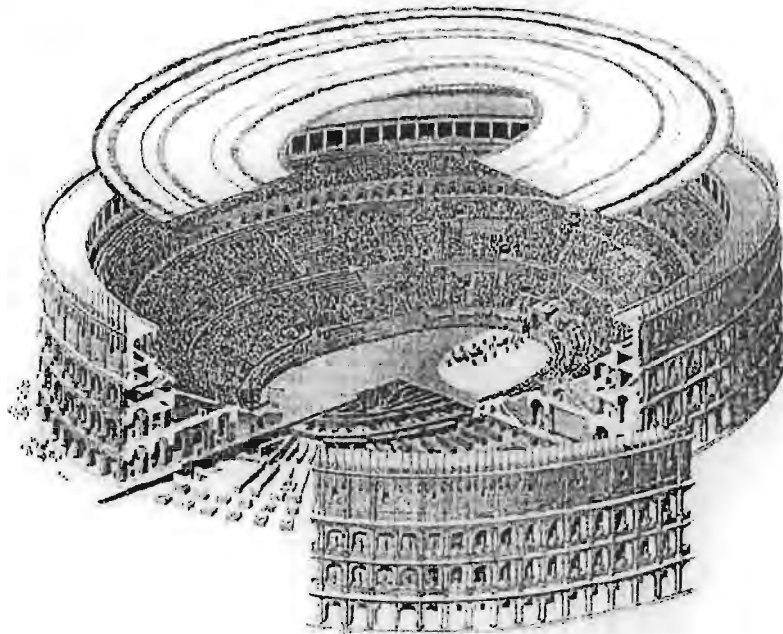


Figura 18. Coliseo romano y su membrana estibable periférica

Anteriormente me he referido a construcciones que tienen en común el uso de materiales textiles, sin embargo a lo largo de la historia se han desarrollado también cubiertas convertibles hechas de una o varias piezas rígidas que se mueven. En estos casos, la línea entre movilidad y convertibilidad no es muy clara **pues los elementos** rígidos de algunas de estas estructuras no cambian de forma, solo se desplazan, y por otro lado la estructura portante cambia de forma en un panorama general. Un ejemplo del inicio de esta tipología podrían ser las escotillas en barcos para dar ventilación a los locales interiores. Los pajares en Istria, Yugoslavia son resguardados por un techo que puede cambiar de posición de manera vertical y se puede fijar en la altura necesaria.

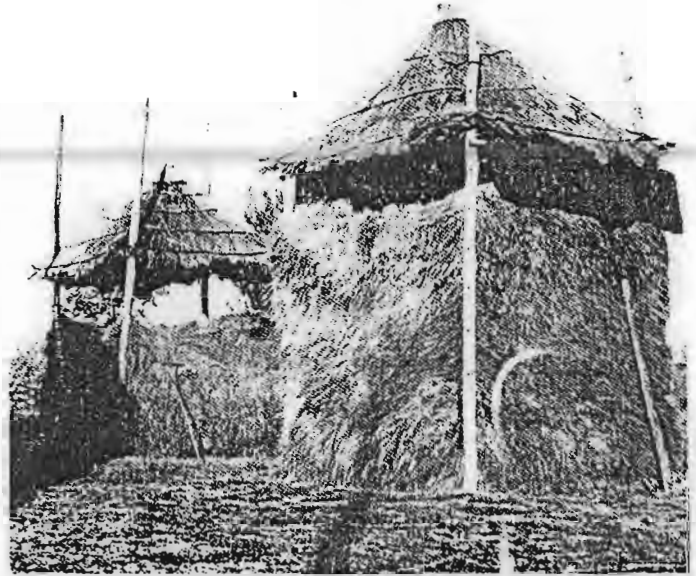


Figura 19. Pajar en Istria

En cubiertas con elementos rígidos de cristal, comúnmente se usan celosías de ventilación (louvers) o persianas igualmente de vidrio que se pueden abrir para regular la temperatura interior.



## Estructuras convertibles en el siglo XX

La convertibilidad en el siglo XX empezó a tener brotes a finales de la década de 1920, el primer registro de proyecto es de 1929 en Leningrado en la Unión Soviética, proyectado por A. Nikolski y aunque no se construyó fue una propuesta que empezó a marcar la pauta para la creación de sistemas convertibles. La estructura consistía en un domo de vidrio sobre un sistema deslizable circular, y el fin era cubrir o descubrir una alberca.

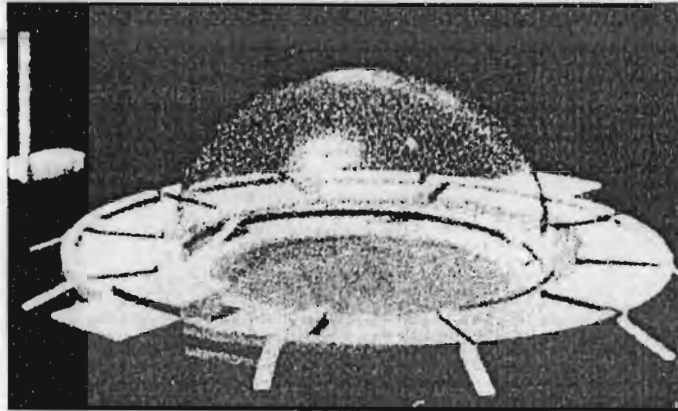


Figura 20. Cubierta para alberca de A. Nikolski

En 1935 la Sportfondsen Association en Rotterdam construyó una de las primeras cubiertas convertibles con un área de 700 m<sup>2</sup>, para cubrir una alberca, y aunque también se construyeron una o dos versiones de este proyecto, quedó sin sucesores inmediatos.



Figura 21. Cubierta para alberca, Rotterdam 1935

Conocimiento nuevo con respecto a convertibilidad se dio hasta 1955 cuando Frei Otto hizo el proyecto para el teatro al aire libre en Killesberg, donde se tuvieron que resolver los nuevos problemas que aparecían principalmente por dos factores, la naciente tecnología en cubiertas de membrana y por otro lado la gran dimensión del proyecto al ser un área a cubrir de 3,700 m<sup>2</sup>.

En 1965 Roger Taillibert hace aparición en Cannes con el primer sistema de membrana estibable central para el proyecto de un teatro al aire libre. Desde este punto la actividad en torno a la búsqueda de nuevos sistemas de convertibilidad fue intensa en Europa, principalmente en Francia y Alemania.

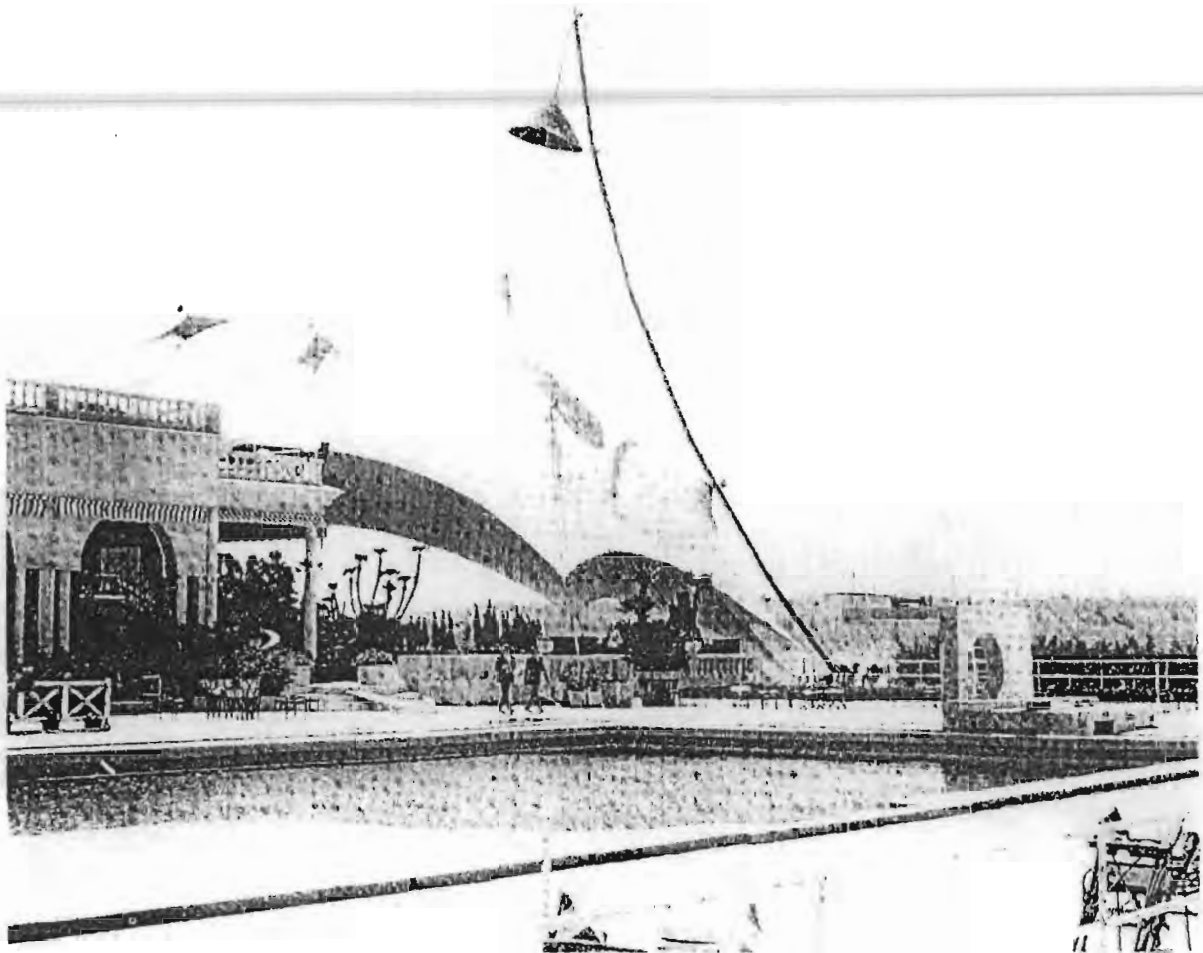


Figura 22. Primera cubierta de sistema estibable central, 1965 Roger Taillibert

El primer acercamiento extensivo con miras de generar un compendio de conocimiento ordenado con respecto a la transformabilidad de las estructuras fue elaborado en 1972 por el grupo de Frei Otto en la Universidad de Stuttgart, a partir de éste se han generado numerosos estudios y se han publicado varios libros y artículos. De la misma forma, se han propuesto varios métodos de clasificación de los sistemas convertibles, como se mencionó anteriormente, para efectos del presente escrito utilizaré la propuesta por Otto dada su sencillez y accesibilidad. En el próximo capítulo se ahondará en ésta clasificación y se tratarán más ejemplos análogos del siglo XX y XXI.

En este punto me gustaría hacer referencia a la corta pero fructífera trayectoria de un arquitecto español. De vez en cuando hay personas en la historia que generan saltos importantes en el conocimiento, uno de estos casos, en el ámbito específico de cubiertas convertibles fue el de Emilio Pérez Piñeiro, nació en 1935 y murió en 1972 con tan solo 37 años de edad. El primer destello de su genialidad fue en 1961 en el congreso de la Unión Internacional de Arquitectos, en Londres, donde fue ganador del primer premio del concurso para un teatro ambulante. Su propuesta fue tan adecuada y brillante que la decisión del jurado fue unánime. (fig. 23)

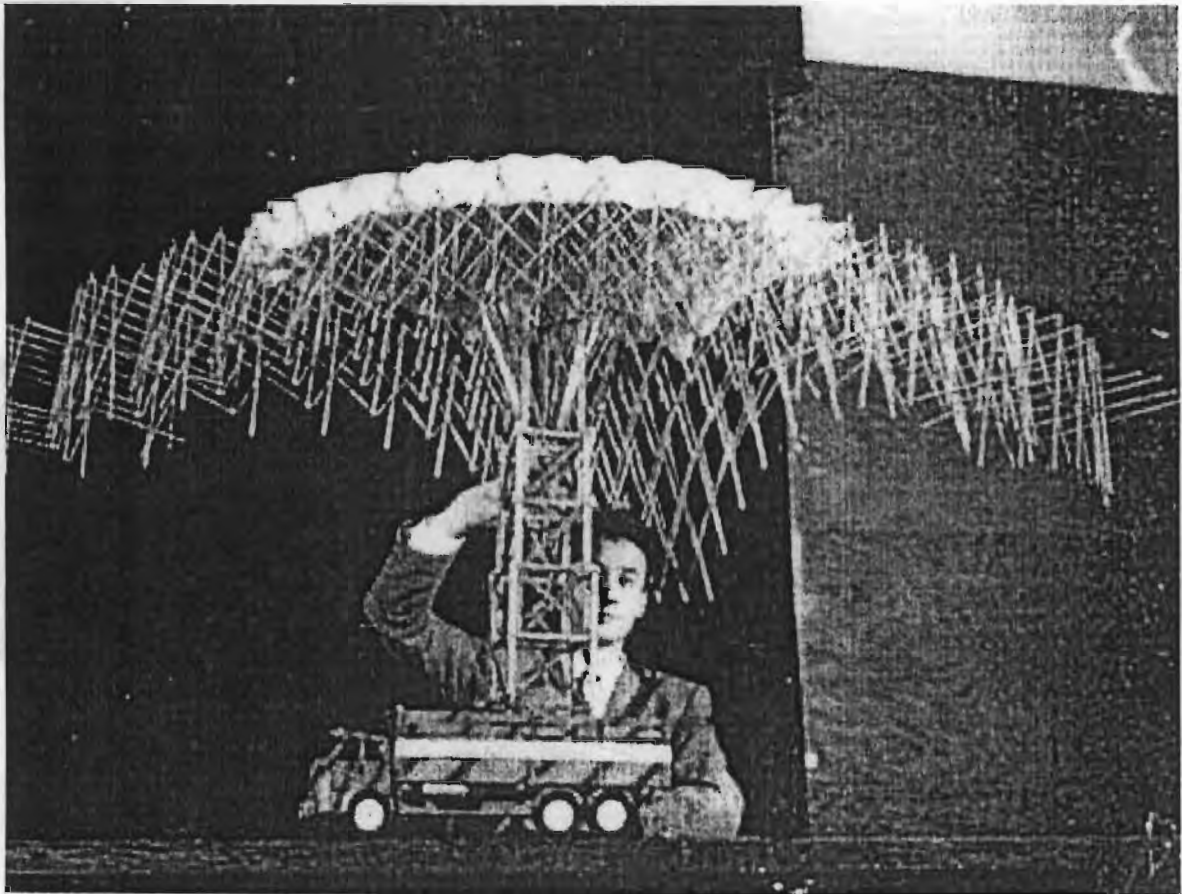


Figura 23. Modelo transformable de Emilio Pérez Piñeiro

En este congreso, conoce a Félix Candela con quien desde ese punto entablaría una relación tanto de trabajo como de amistad que duraría hasta el día de su deceso. El lapso en el que decidieron unir sus esfuerzos a nivel profesional duro poco y la unión se debió al concurso para la cubierta del velódromo de Anoeta en San Sebastián, no existen detalles precisos con respecto al funcionamiento del proyecto pero quedaron fotografías de maquetas y dibujos como registro (fig. 24).

Desgraciadamente unos meses más tarde, antes de entregar el proyecto, Emilio Pérez Piñero regresaba de visitar a Dalí, para quien realizaba varios proyectos, cuando un accidente automovilístico puso fin a su carrera. En palabras de Josemaría de Churtichaga:

"Emilio Pérez Piñero, uno de los mejores y más precoces genios en la concepción estructural del S.XX, y Félix Candela, otro gigantesco y veterano creador, dejaban suspendidas las fabulosas estructuras que hubiera realizado la juventud plegable y reticulada de Emilio Pérez Piñero con la experiencia y sabiduría reglada de Félix Candela."

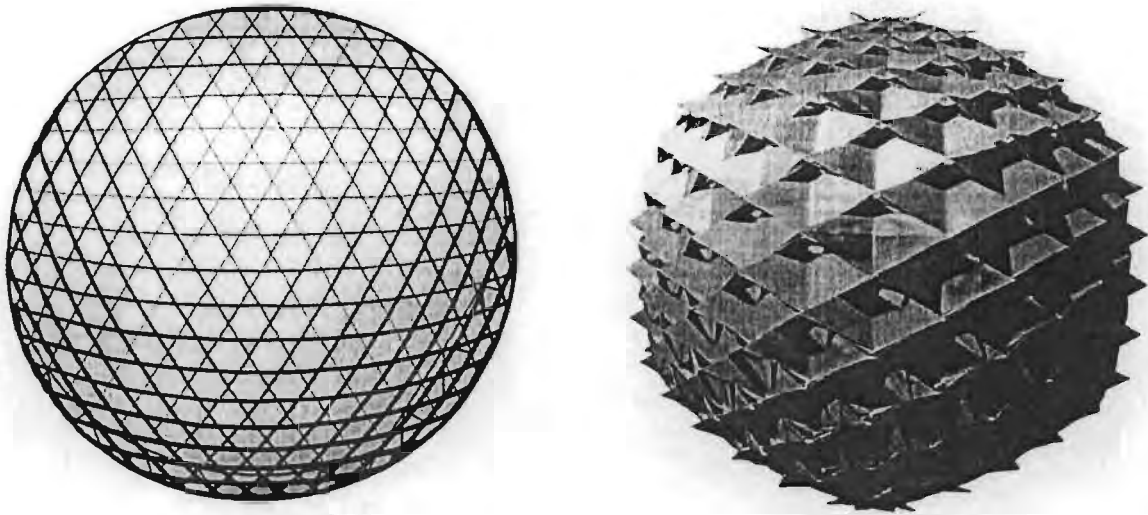
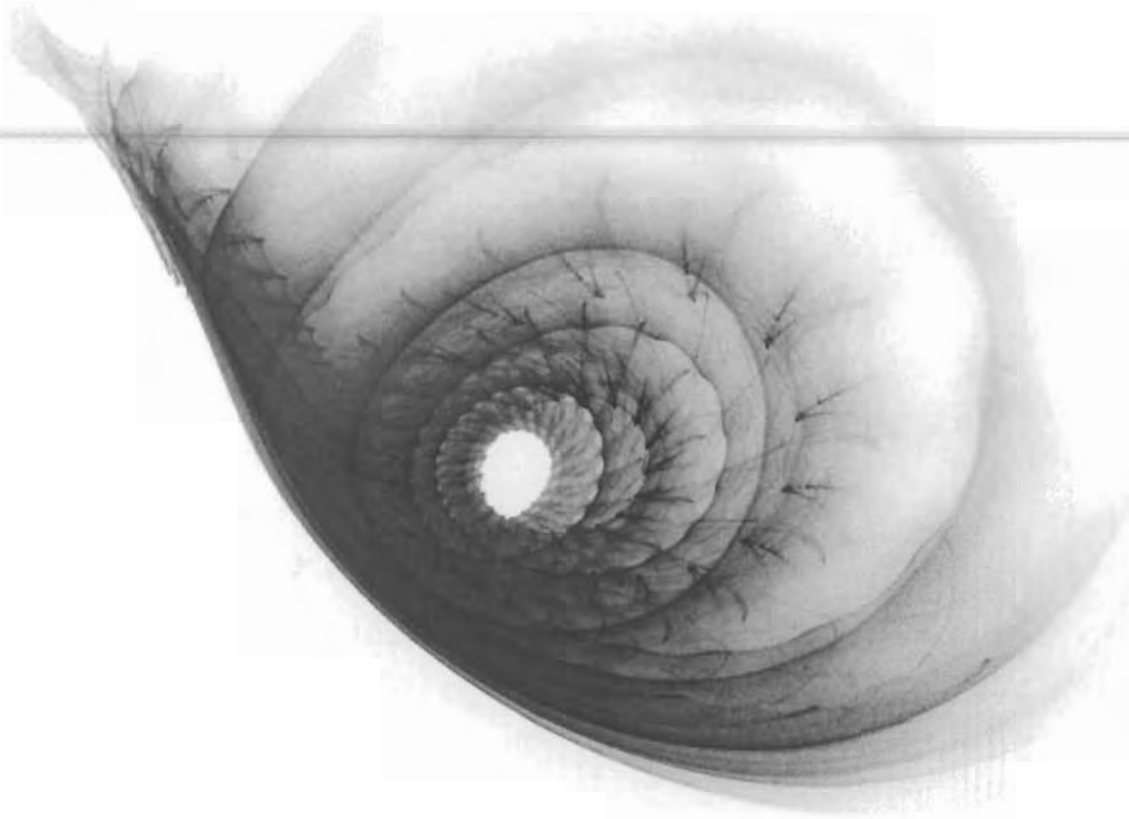


Figura 24. Proyecto de cubierta para el velódromo de Anoeta



# Capítulo 3

Geometría Estructural

## Clasificación de superficies y convertibilidad

Existen varios criterios y metodologías para clasificar las superficies en el espacio. En esta parte explicaré brevemente el acercamiento que el matemático y astrónomo Johann Carl Friedrich Gauss (1777-1855) propuso.

Las superficies de doble curvatura según las características que las definan pueden ser clasificadas bajo un estudio realizado por Gauss. La clasificación está dada por el producto de los radios de las curvas principales en algún punto de la superficie; donde los radios de las curvas con concavidad hacia arriba son negativas y los radios de las cóncavas hacia abajo son positivas (fig. 1), dado por la fórmula:

$$k = \frac{1}{r_1 \times r_2}$$

Donde  $k$  es el recíproco del producto de los radios, en otras palabras el tipo de curvatura gaussiana y  $r_1$  y  $r_2$  son los radios de las curvas que pasan por ese punto.



Figura 1. Acuerdo de signos para las curvas

Una superficie plana o las superficies cilíndricas, presentan curvatura gaussiana igual a cero o nula.

La curvatura gaussiana positiva está dada por dos curvas principales de signos iguales, por ejemplo una esfera, un catenaroide o el hiperboloide de revolución de eje focal (fig. 4a). A este tipo de superficies se les conoce también como superficies sinclásticas (fig. 2).



Figura 2. Curvatura gaussiana positiva

Las superficies con curvatura gaussiana negativa son el resultado de curvas principales con signos opuestos, como el paraboloides hiperbólico, la conoide, o el hiperboloide de revolución de eje transversal (fig. 4b). Estos casos son conocidos como superficies anticlásticas (fig. 3).

Las superficies de doble curvatura no son desarrollables como las cilíndricas o las cónicas, sin embargo pueden cambiar de forma haciendo uso de alguna tipología de convertibilidad.

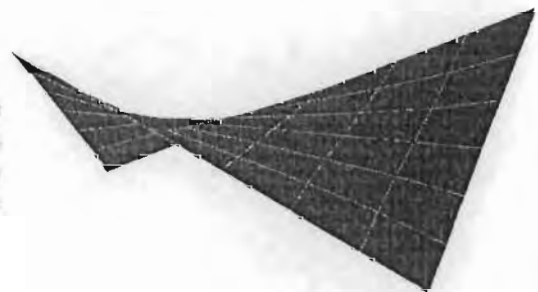


Figura 3. Curvatura gaussiana negativa

Las propiedades de las superficies alabeadas son necesarias para las construcciones de membrana, de tal manera que el material trabaje exclusivamente a tracción. Así mismo la forma de las cubiertas convertibles basadas en membrana es preferible que responda a una forma anticlástica en su estado desplegado. En el caso de estructuras neumáticas, al tener la presión interior inducida por aire, la forma sinclástica es la más adecuada.

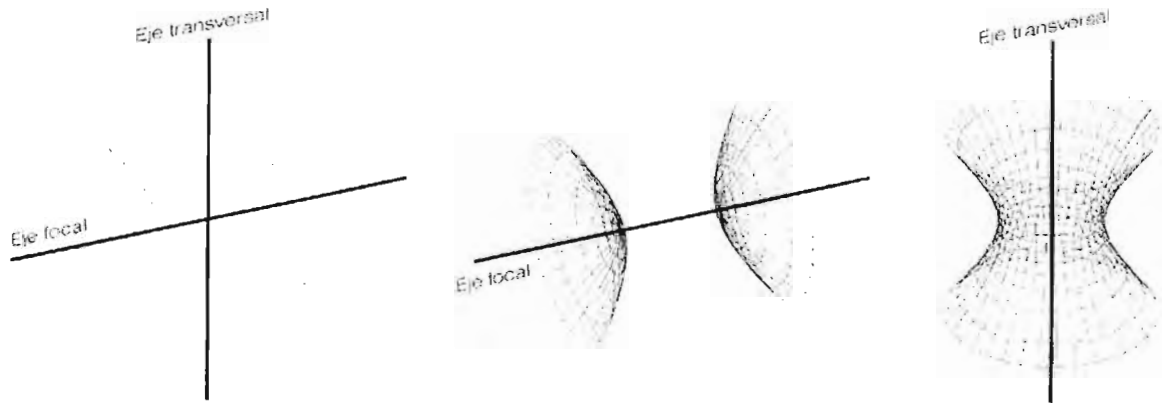


Figura 4. Hiperboloides de revolución de eje focal (4a) y focal (4b)

## Clasificación de sistemas convertibles

A continuación presento una clasificación de tipologías mecánicas cuya aplicación es viable en el campo de la arquitectura. Esta clasificación fue propuesta por el grupo IL en 1972 (ver Referencias, Capítulo 10). De manera conjunta expondré ejemplos análogos de obras que se han realizado en los últimos años o que el proyecto por su innovación, lo amerita.

La tipología está dada por tres factores: Sistema constructivo, Tipo de movimiento y Dirección del movimiento.

### Sistema constructivo

Membranas con estructura portante fija donde solo se mueve la membrana para convertir el espacio.

Un ejemplo de este sistema consiste en desplegar una membrana que por las características del material, puede ser guardada en un espacio pequeño comparado con lo que cubre. Debe de seguir formas con curvatura gaussiana negativa para garantizar un trabajo estructural distribuido (fig. 4).

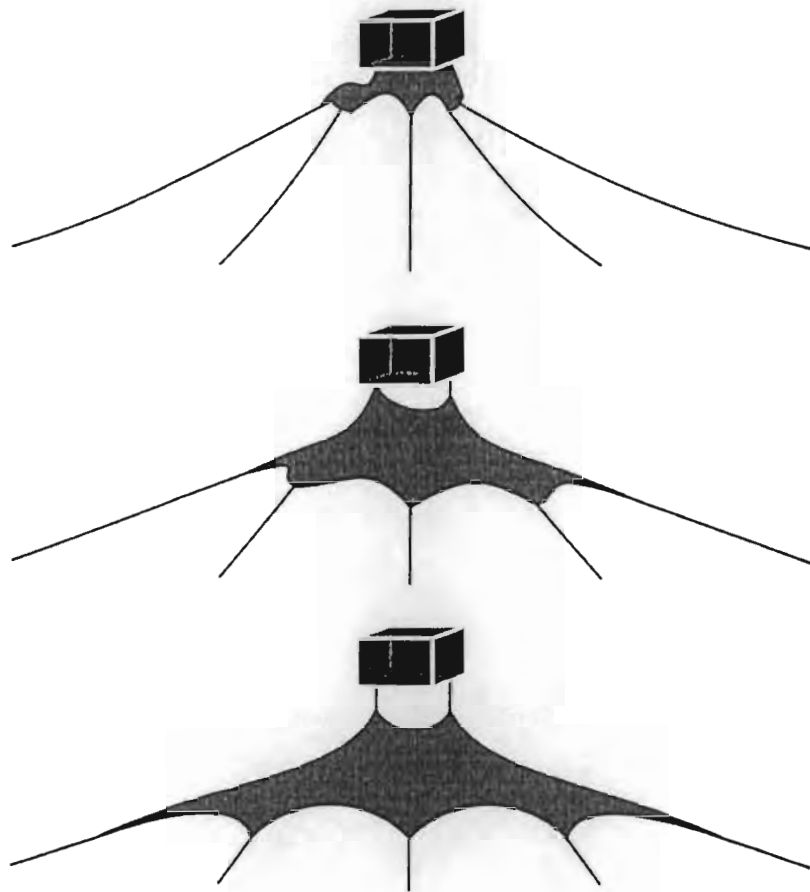


Figura 5. Membrana con estructura portante fija



Membranas con estructura portante móvil (fig. 6), donde la estructura que sostiene a la membrana se mueve con la misma.

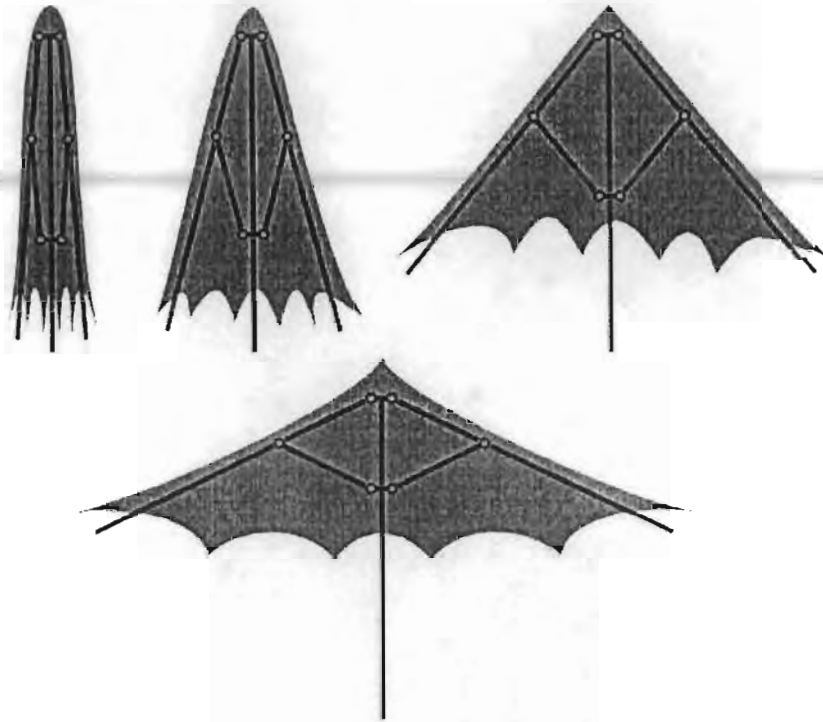


Figura 6. Membrana con estructura portante móvil

Estructuras Rígidas (fig. 7), donde el sistema convertible está dado por elementos que no cambian de forma.



Figura 7. Estructura rígida

Esta tipología arriba plasmada es a veces denominada telescópica y consta de elementos independientes no articulados que cambian de posición y comúnmente funcionan con ruedas o montados sobre rieles. Por su versatilidad y sencillez de análisis, esta tipología ha sido empleada en varios casos con usos y tipos de proyecto distintos. El tener piezas no articuladas y que no se transforman, simplifica el funcionamiento del mecanismo, un ejemplo de aplicación es el Skydome en la ciudad de Toronto en Canadá (p. 44, fig. 31).

## Tipo de movimiento

- Estibable: Membrana que se mueve hacia un punto o línea y ahí cuelga libremente.  
Enrollable: Membrana que se enrolla en torno a un eje.  
Deslizable: Elementos que se mueven a lo largo de una senda o riel.  
Plegable: Elementos que rotan en torno a un eje horizontal.  
Rotable: Elementos que rotan en torno a un eje vertical.

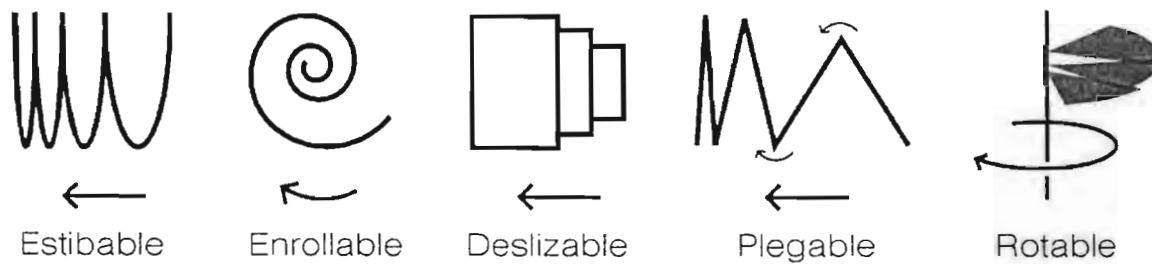


Figura 8. Tipo de movimiento

## Dirección del movimiento

- Paralelo: A lo largo de ejes paralelos o paralelo a un eje de referencia.  
Central: Hacia un punto que puede estar o no dentro del área a cubrir.  
Circular: En dirección del perímetro del área a cubrir.  
Periférico: Hacia el perímetro del área a cubrir o alejándose del punto de referencia.

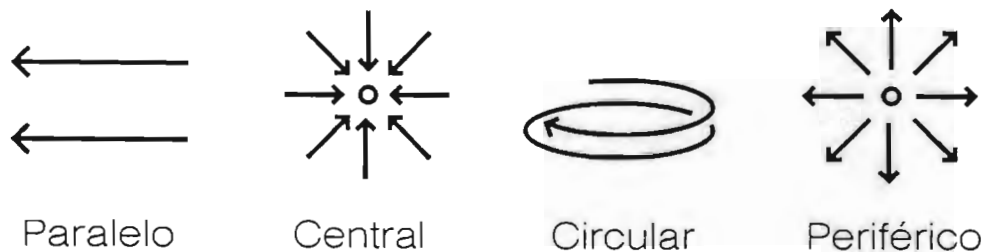


Figura 9. Dirección del movimiento

La siguiente tabla fue generada por el Institut für leichte Flächentragwerke in Stuttgart, Alemania (ver referencias) y funciona como una matriz, en las intersecciones aparece una pequeña ilustración a manera de ejemplo de la tipología. Los espacios vacíos se refieren a casos donde no hay ejemplos sencillos de expresar.

Cabe mencionar que la tabla se refiere meramente a conceptos de convertibilidad y que la factibilidad de construcción no se está tomando en cuenta.

Sistema constructivo	Tipo de movimiento	Dirección del movimiento			
		Paralelo	Central	Circular	Periférico
Membrana de estructura fija	Estible				
	Enrollable				
Membrana de estructura móvil	Deslizable				
	Plegable				
	Rotable				
Estructura rígida	Deslizable				
	Plegable				
	Rotable				

Figura 10. Tabla de clasificación de tipologías

## Marcos transformables

El sistema transformable de nodos y barras es un mecanismo básico del que parten un número importante de ejemplos, y funciona en su expresión más elemental, contenido en un plano. Consiste por lo menos de dos elementos rígidos como barras que comparten un nodo con un eje de rotación perpendicular al plano de las barras (fig.11).

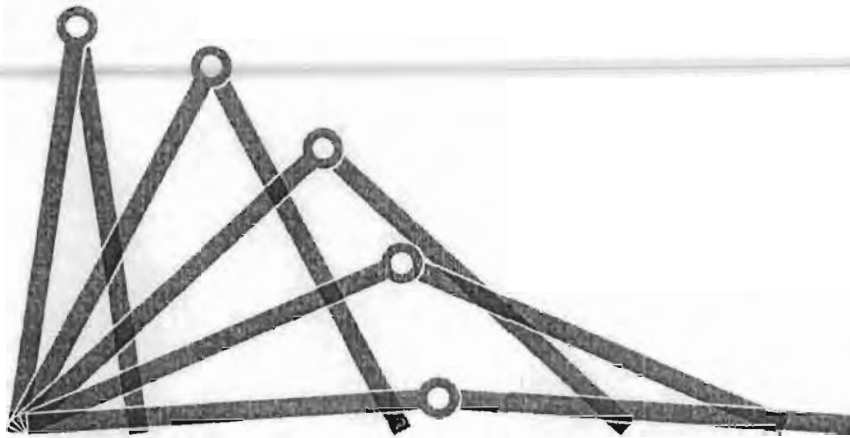


Figura 11. Sistema transformable de nodos y barras

El sistema comúnmente denominado tijeras o teselación de rombos es una aplicación frecuente de una estructura de nodos y barras donde existen también articulaciones intermedias (fig. 12).

Es un tema bastante amplio al que se le han dedicado estudios muy extensos, en esta parte se abarcará un panorama general de cómo funcionan algunos de los ejemplos más comunes.

Un marco, sea o no transformable, está definido por barras y nodos conectándolas, si todas las barras del marco son paralelas a un solo plano, se denomina como marco plano. Si por el contrario las barras no son paralelas a un solo plano se trata de un marco o estructura espacial.

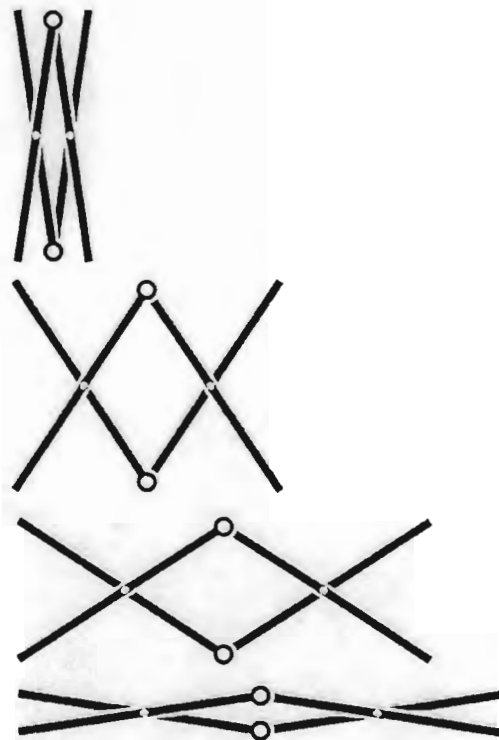


Figura 12. Sistema de tijeras

El arquitecto español Santiago Calatrava en su disertación de doctorado habla de estabilidad dimensional, que es la propiedad formal de una estructura de conservar la disposición de sus elementos bajo la aplicación de cargas. Usando el número de nodos y barras, podemos calcular la estabilidad dimensional usando la fórmula propuesta en su disertación de doctorado (ver referencias, página 100).

Para marcos planos tenemos:

$$2g = n + 3$$

donde

g= número de nodos articulados  
n= número de barras

La condición de  $2g = n+3$  es requerida pero no necesariamente suficiente para garantizar la estabilidad dimensional de un marco, en otras palabras, se podría cumplir con la condición y también disponer los elementos del marco de cierta forma para hacerlo inestable.

En el caso de la figura 13 son 17 barras y 10 nodos, usando la fórmula y disponiendo los elementos como se muestra podemos afirmar que el marco es estable.

$$g = 10$$
$$n = 17$$
$$2(10) = 17 + 3$$

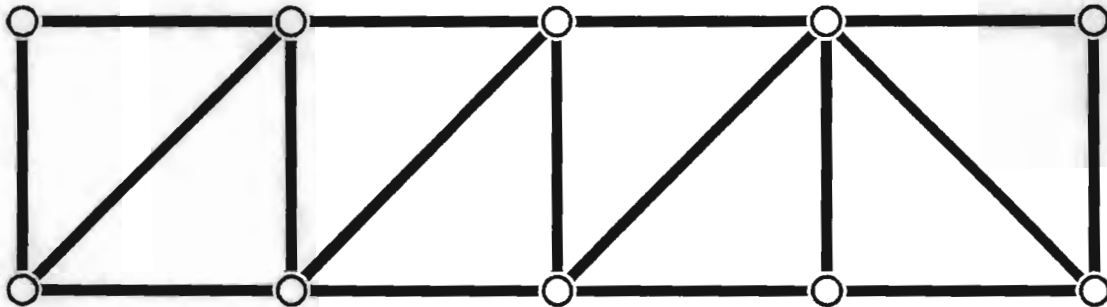


Figura 13. Marco estable

En los casos de que  $2g < n+3$  o  $2g > n+3$  se trata de un exceso o faltante de barras de barras, y el número de barras extra está dado por igualar la expresión a cero.

$$n+3-2g = 0$$

Cuando la expresión es igual a cero, el marco es estable con el número de elementos necesarios, cuando el resultado es positivo, el número indica el número de barras que están sobrando, de la misma forma cuando el resultado es negativo, el número indica el número mínimo de barras que faltan de colocar en una posición correcta para hacer el marco estable.

En el caso de estructuras espaciales la fórmula cambia a:

$$3g = n + 6$$

Y aplican los mismos procesos que en los ejemplos anteriores.

$$g = 6$$

$$n = 12$$

$$3(6) = 12 + 6$$

El octaedro es una estructura espacial estable.

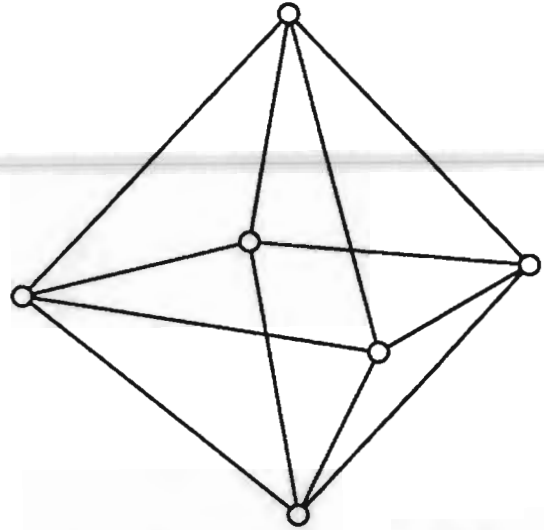
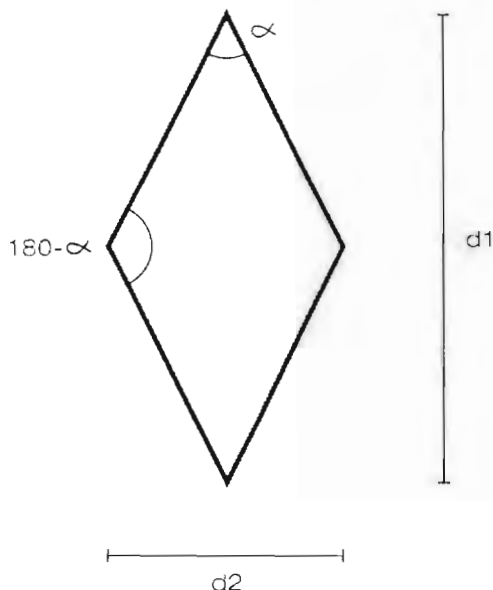


Figura 14. Octaedro de nodos y barras

Es importante considerar que una estructura transformable, tanto retraída, en el proceso móvil y en su estado desplegado debe de ser capaz de soportar carga por lo que si se plantea un sistema de marcos transformables, siempre debe existir un mecanismo de asegurar la estabilidad de la forma en determinada posición y que no dependa de la fuerza externa responsable de generar el movimiento.

De esta forma podemos entender que un sistema de marcos transformables debe ser inestable en el proceso de transformación, sin embargo en las posiciones que se designen como estáticas, (comúnmente abierto y cerrado), deberá de ser estable.



Una teselación consiste en el acomodo geométrico de elementos en un plano o en el espacio. El sistema comúnmente conocido como tijeras, es una teselación de rombos. Las propiedades de un rombo articulado las podemos estudiar por medio de las relaciones entre sus ángulos y las distancias entre sus nodos. En este ejemplo si  $a$  es el lado rombo, la expresión es:

$$d1 = 2a \cos \alpha/2$$

$$d2 = 2a \sen \alpha/2$$

Figura 15. Ángulos en el rombo

El espacio necesario para que un rombo articulado se mueva, está dado por cuatro parábolas.

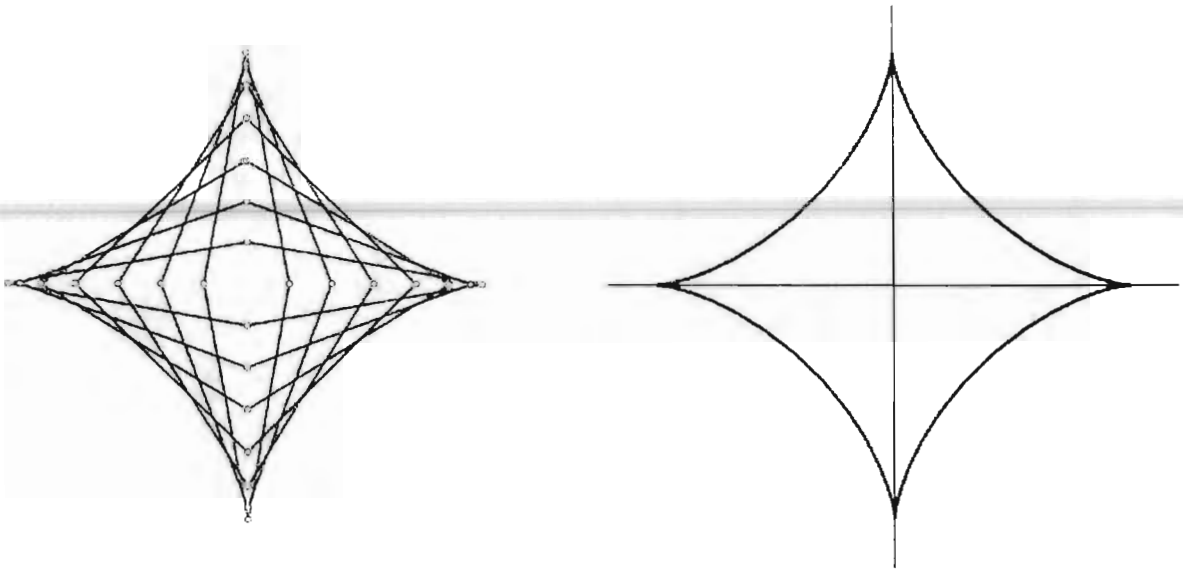


Figura 16. Espacio para el movimiento de un rombo

Cuando las barras usadas en una teselación de este sistema no son rectas, o sea tienen algún tipo de ángulo, el resultado son movimientos que pueden trazar trayectorias curvas. Se puede partir de plantas en forma de polígonos regulares para generar mecanismos llamados de diafragma, como los que poseen las cámaras fotográficas.

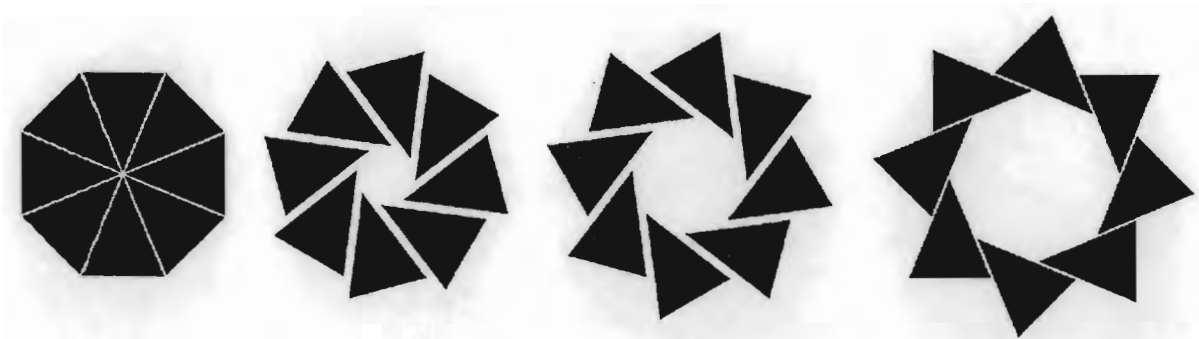


Figura 17. Diafragma de planta octagonal

En este ejemplo se utilizó el mismo polígono base pero ahora con barras anguladas, usando los ángulos internos del octágono que son de  $135^\circ$ .

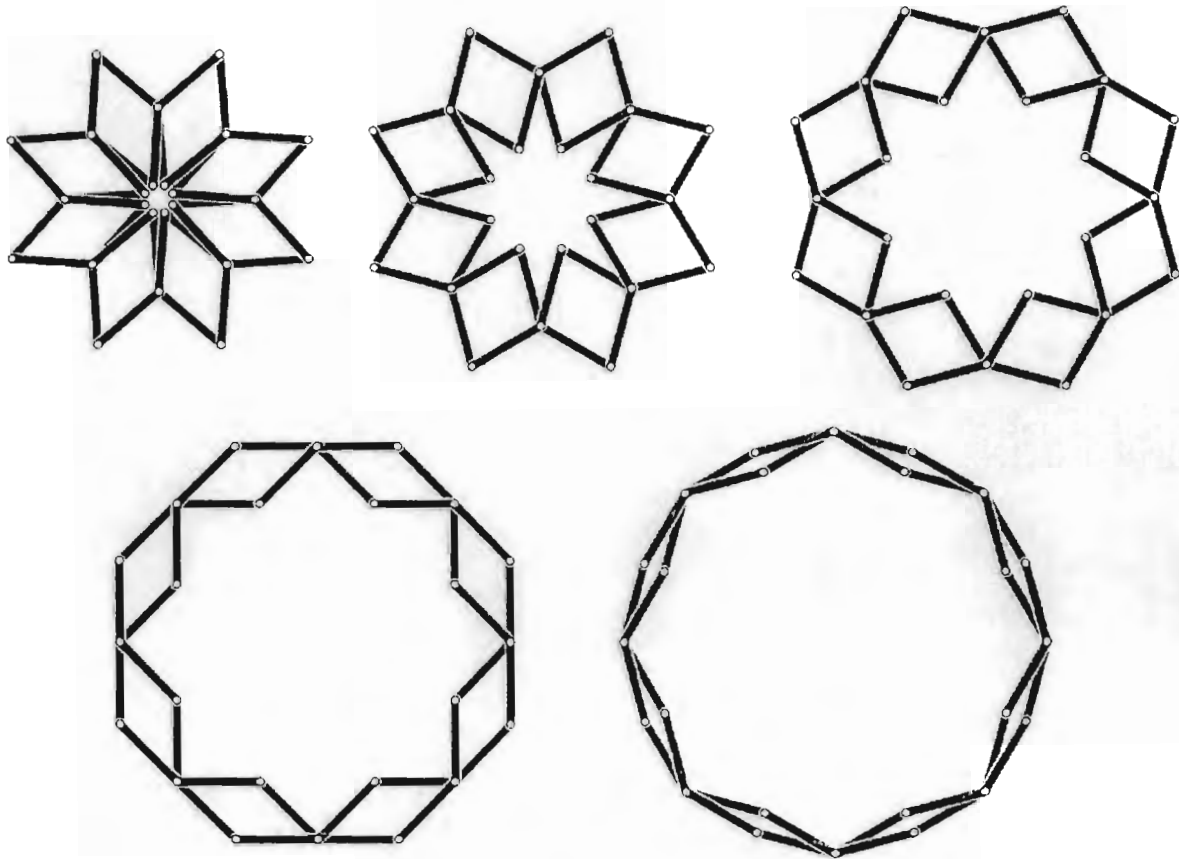


Figura 18. Aplicación de tijeras anguladas en base octagonal

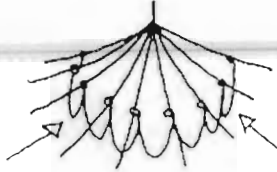
Cuando esta aplicación deja de estar contenida en un plano, se crean domos de barras anguladas llamadas domos iris por Chuck Hoberman.



## Ejemplos análogos

A continuación se presentan algunos ejemplos análogos de sistemas convertibles.

Membrana de estructura fija estibable central:  
Commerzbank-Arena



El proyecto está ubicado en la ciudad de Frankfurt, fue inaugurado en 1925 y remodelado y modernizado en 2005 para la Copa del Mundo FIFA 2006, ahora es uno de los estadios más grandes de Alemania con capacidad para 52,300 espectadores.

Como parte del compromiso para la preservación del medio ambiente, la cubierta tiene un sofisticado sistema de recolección de agua. El estadio como tal consta de una serie de soportes que permiten las condiciones adecuadas para la entrada de luz natural a través de una cubierta traslúcida que también es convertible. Al centro del vano, está suspendida una estructura en forma de prisma con base cuadrada, que tiene por objeto dos funciones; el soporte de 4 pantallas de televisión gigantes y la estiba de la cubierta convertible. Este núcleo está sujeto al estadio por medio de cables dispuestos de forma radial y pesa 30 toneladas.

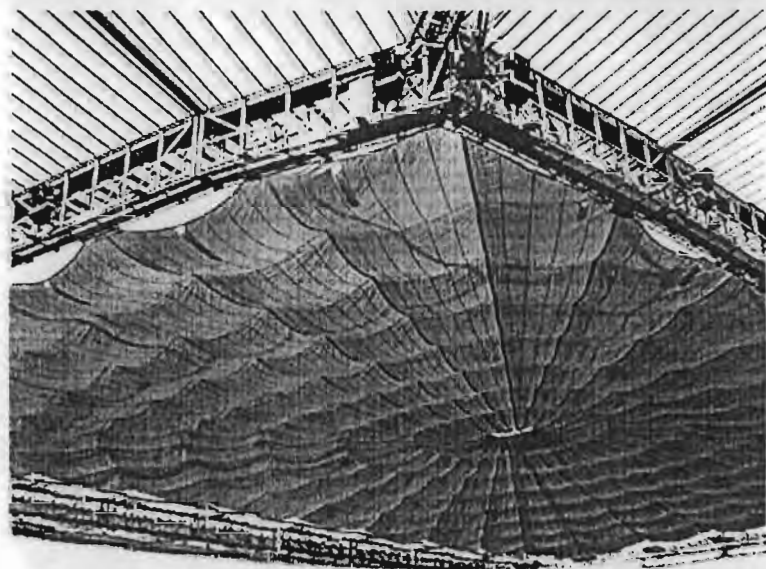


Figura 19. Commerzbank-Arena, Frankfurt, Alemania

La parte de la obra que consumió más tiempo fue la cubierta, tardando en total alrededor de un año y medio. Una vez que estuvo lista la membrana y el elemento central, se izaron en julio de 2004 sin contratiempos y cumpliendo normas de construcción alemanas e internacionales como las especificaciones de la FIFA. La cubierta de 37,500 m<sup>2</sup> pesa aproximadamente 2,500 toneladas, siendo un peso promedio por metro cuadrado de 67 kg.

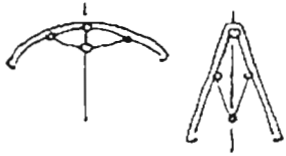
El área convertible de este proyecto oscila en los  $9000\text{m}^2$ , y la forma de sujeción del núcleo central se puede comparar con cómo están dispuestos los rayos de una rueda de bicicleta. Para cubrir el espacio, se jalen los treinta y dos segmentos que componen la membrana convertible a lo largo de los cables y el tiempo necesario para este proceso es aproximadamente de quince minutos.

En estas imágenes (fig. 20, 21 y 22) podemos ver el proceso convertible del sistema, cuando está totalmente estibada la membrana, toma su lugar dentro del núcleo central y empieza a trabajar a tracción conforme se va desplegando.



Figuras 20, 21 y 22. Cubierta de la Commerzbank-Arena

## Membrana neumática de estructura móvil estibable central: Cubiertas neumáticas



Construidas entre 1969 y 1970 para la plaza de los planetas de la Expo de Osaka, consisten en gajos o compartimentos neumáticos de doble capa dispuestos de forma radial, con soportes interiores y cables que van del perímetro de la cubierta a la punta de los postes portantes. El diseño estuvo a cargo de T. Oki y asociados.

Para cerrar la cubierta, los cables superiores son jalados, llevando a los gajos que a su vez se desinflan, a estar paralelos al poste. En esta posición la cubierta puede protegerse contra tormenta girando el anillo en la cabeza del poste para compactar aun más el material estibado.

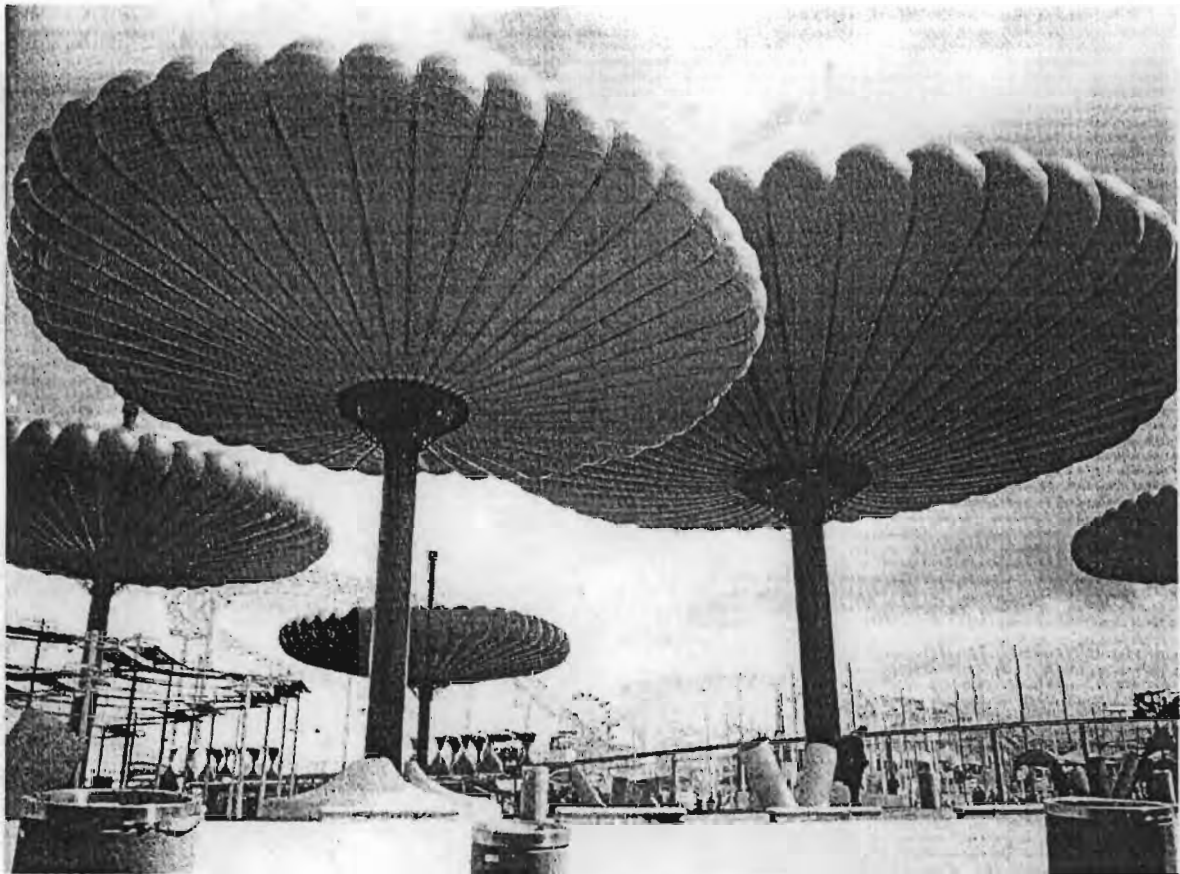


Figura 23. Cubiertas en Osaka

Se construyeron 5 cubiertas de planta circular con 3 tamaños distintos, con diámetros de 30, 20 y 15 m, el tiempo máximo de despliegado de estos sistemas era de 15 minutos.

Para el mecanismo de cerrado, se utilizan cuarenta y cinco cables que van del anillo exterior de la cubierta y se unen en la cabeza del mástil a un solo cable que es jalado hacia abajo por dentro del poste. En este momento la presión interior de la cubierta disminuye para poder estibar la membrana. El diseño de estas cubiertas está calculado para soportar una velocidad de viento de 15 m/s, en caso de que se registrara un viento con velocidad superior a 15 m/s las cubiertas se deben cerrar.

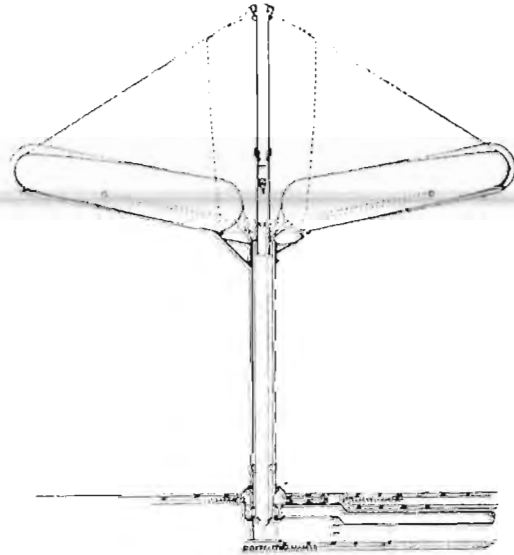


Figura 24. Corte

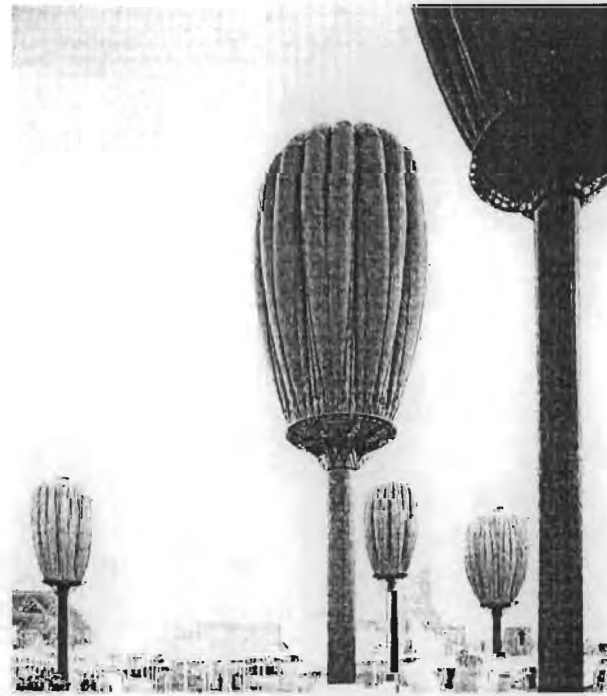
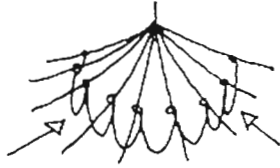


Figura 25. Posición cerrada

### Membrana de estructura fija estibable central: Estadio Olímpico para 1976



El estadio fue construido para las olimpiadas de verano de 1976 en Montreal, Canadá diseño del arquitecto francés Roger Taillibert y es parte de un conjunto deportivo (fig. 26). Su cubierta se diseñó para cubrir y descubrir el estadio completamente.

El sistema de membrana extendido genera una superficie anticlástica que se ancla en el perímetro del vano, y el proceso para descubrir el espacio consiste en apilar la membrana en la parte más alta de una torre inclinada que se desplanta desde el uno de los costados del estadio. Cabe mencionar que ésta torre es la torre inclinada más alta del mundo. Debido al costo y a la complejidad técnica del sistema convertible, no se terminó a tiempo para la inauguración de los juegos olímpicos y fue hasta 1988 cuando se usó esta cubierta por primera vez.

- A. Estadio
- B. Centro deportivo
- C. Albercas
- D. Mástil

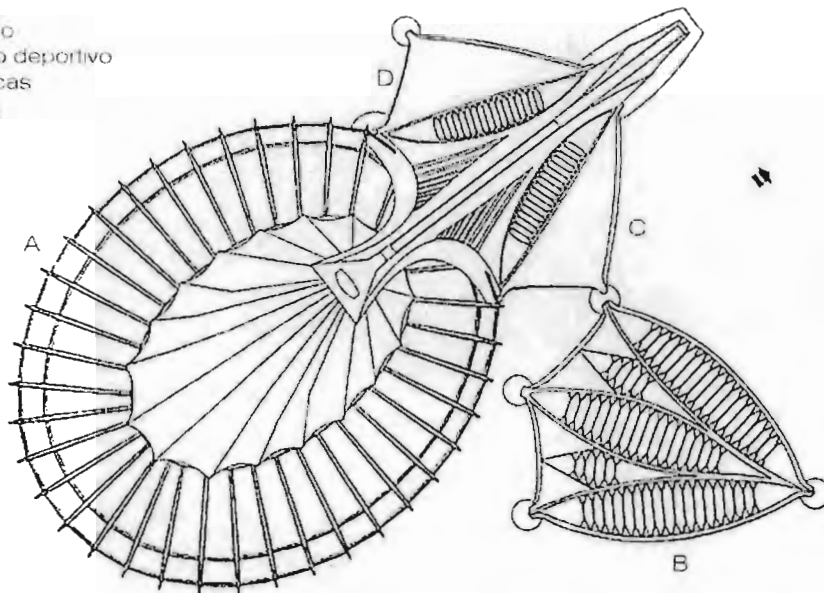


Figura 26. Conjunto deportivo para las Olimpiadas de 1976 en Montreal, Canadá

Prácticamente desde el momento en que se terminó la cubierta, ha tenido muchos problemas estructurales y económicos. A principios de la década de 1980, se retomó el proyecto para terminarla y un poco después la torre se incendió causando algunos daños.

En 1986 un trozo de la torre cayó al campo en medio de un partido de baseball. En 1987 se colocó una membrana anaranjada de kevlar que finalmente terminó la cubierta casi diez años después, sin embargo debido a errores en el diseño, la membrana empezó a rasgarse hasta el punto de que entraba agua al estadio cuando llovía.

En 1991 se le hizo una nueva remodelación y en septiembre de ese año, durante el mecanismo de desplegando, algunos cables fallaron, dejando caer una laja de concreto de cincuenta y cinco toneladas, no hubo heridos pero los organizadores de expos decidieron cambiar de lugar. Para 1992 se decidió dejar cerrada la cubierta todo el tiempo.

La siguiente remodelación ocurrió en 1998 cuando se desmontó la cubierta de kevlar y se dejó el estadio al aire libre para esa temporada. A finales de 1998 se instaló una nueva cubierta opaca sin la capacidad de retraerse. En 1999 una porción de aproximadamente 40m<sup>2</sup> de la cubierta falló dejando caer nieve y hielo sobre unos trabajadores que estaban preparando el Montreal Auto Show, a raíz de esto, el show cambió de lugar y la cubierta se reparó reforzando su efectividad contra la nieve por medio de la instalación de una red de tuberías por las cuales circula agua caliente para derretir la nieve del exterior.

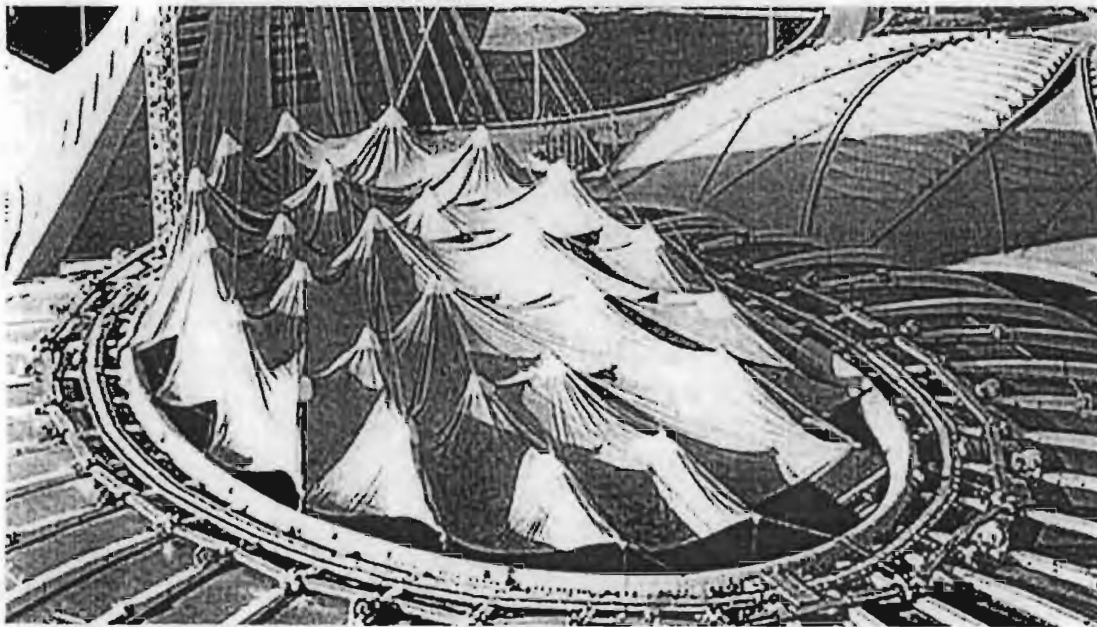
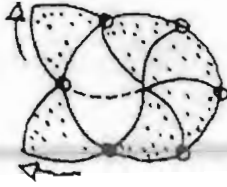


Figura 27. Proceso de extendido de la membrana

En la actualidad la cubierta no es transformable, esta fija en su posición cerrada debido a la problemática que ha implicado mantenerla, y aún con todas las medidas de precaución tomadas, el espacio permanece cerrado en la temporada de nevadas. Finalmente dado a su alto costo de mantenimiento y a su condición ya deteriorada por los años, ha estado en discusión la posibilidad de demolerlo en algún punto en el futuro.

### Estructura rígida rotatable periférica: Domo Iris



El Domo Iris es un sistema rígido rotatable periférico, diseñado por Chuck Hoberman. El y su equipo de diseño han desarrollado muebles, accesorios y juguetes, uno notable por su geometría es la esfera Hoberman, cabe mencionar que no es precisamente una esfera sino un poliedro arquimediano, un icosidodecaedro cuya transformabilidad está dada por las aristas, que están constituidas por un sistema de marcos transformables o tijeras (fig. 28).

Cabe mencionar que este tipo de estructuras no son exclusivas del icosidodecaedro, pueden ser generadas a partir de una gran variedad de poliedros.

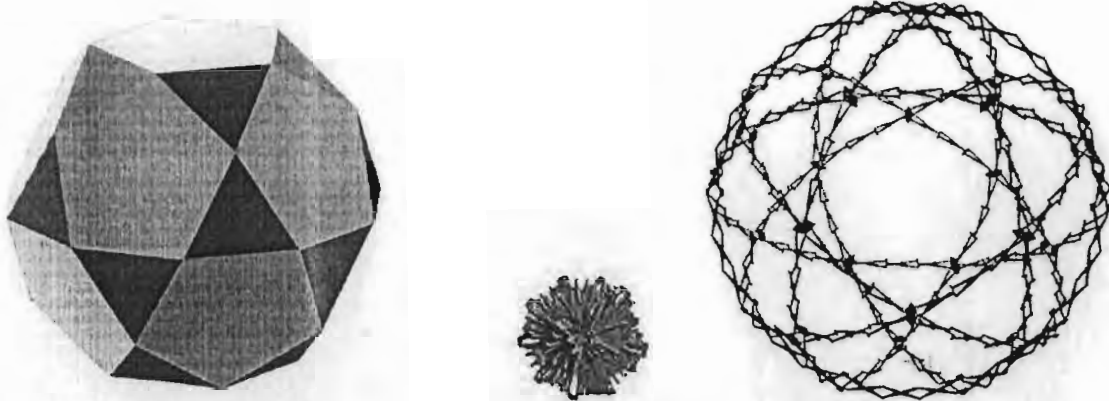


Figura 28. Icosidodecaedro y Hoberman Sphere

El domo Iris obtiene su nombre por la similitud del movimiento al del iris de un ojo. El perímetro se mantiene fijo mientras la estructura cambia de forma y en su estado extendido genera un domo cuyos elementos forman una serie de espirales entrelazadas. La propuesta de cubierta para uso arquitectónico y no solo escultural, tiene como adición paneles rígidos que se mueven para acomodarse uno sobre otro y generar una red impermeable encima del domo. Los estudios realizados por Hoberman han resultado a la fecha en tres formas de planta: circular, elíptica y cuadrada (fig. 29).

Su primera aparición fue en 1994 en el museo de Arte Moderno de Nueva York siendo una maqueta a escala del sistema completo y una sección 1:1 de un domo de 20 metros.

Su primera construcción al aire libre fue 6 años más tarde y se construyó para la Expo 2000 en Hannover, en frente del pabellón alemán (fig. 30). Fue parte de una exhibición referente a la reconstrucción de la Catedral Frauenkirche en Dresden que fue destruida durante la Segunda Guerra Mundial.

El sistema de planta circular tenía un diámetro y altura de 6 y 4.2 metros respectivamente. Estaba montada sobre una estructura que permitía a los visitantes pasar por debajo de ella y poder ver su movimiento. Al centro del domo se instaló una maqueta de la Catedral Frauenkirche.

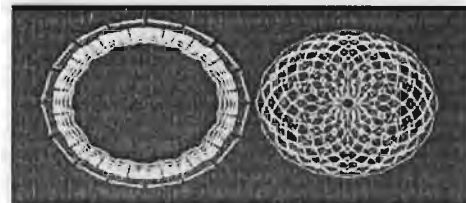
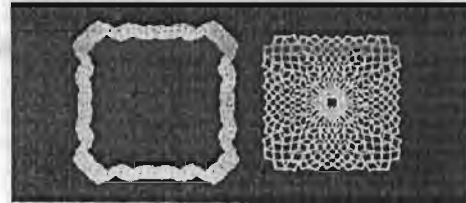
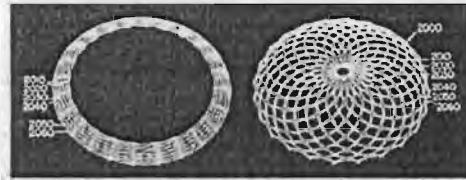


Figura 29. Plantas de domos Iris

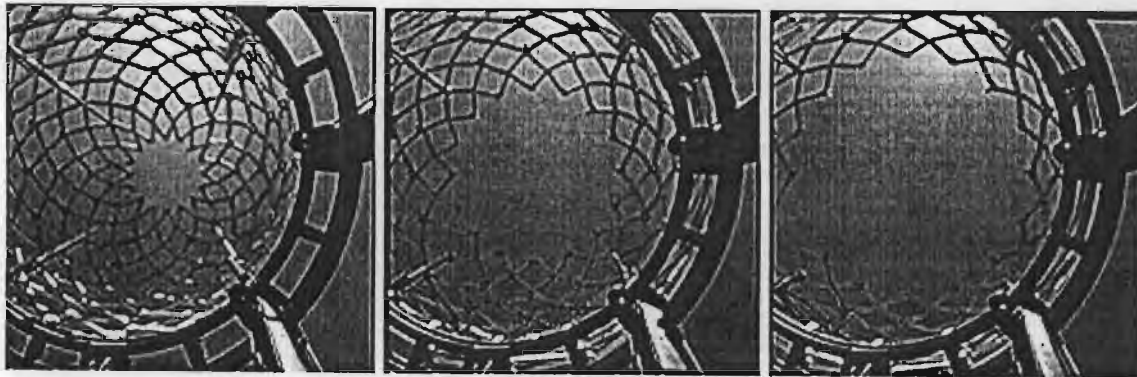
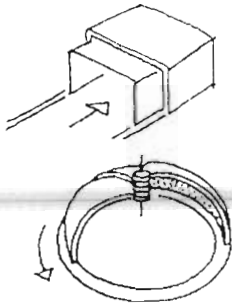


Figura 30. Domo Iris en la Expo 2000



## Estructura rígida deslizable paralela/circular: Skydome



De 1986 a 1989, se construyó en la ciudad de Toronto, Canadá, el Skydome siendo el primer estadio con una cubierta rígida que se podía convertir en su totalidad. El proyecto estuvo a cargo de Roderick Robbie y Michael Allen. Consta de un sistema de estructura rígida con 3 partes móviles que descubren el espacio, dos de estas piezas tienen una forma de superficie cilíndrica con directriz de arco de circunferencia y se deslizan de manera paralela. Por otro lado la forma de la tercera pieza es un huso esférico y su movimiento en vez de ser paralelo es circular.

Esto implica que en planta los rieles portantes de la pieza esférica sigan una trayectoria de arco de circunferencia. Dentro de las propuestas para el estadio, una de ellas era un sistema neumático para sostener una cubierta de membrana como en el estadio de BC Place en Vancouver, al final se decidió poder darle al estadio la versatilidad que una cubierta convertible implica.



Figura 31. SkyDome, Toronto, Canadá

EL sistema convertible fue patentado por los arquitectos en 1992 bajo la clave U.S. Patent # 05167097, para evitar que fuera copiado fácilmente, cuando está abierta, descubre el 90% de los asientos y el 100% de la cancha, la cubierta tiene un peso de 11,000 toneladas y cubre un área de 3.2 hectáreas.



Figura 32. La sección esférica en movimiento

El despacho de arquitectos Robbie/Young + Wright Architects Inc, participó en el concurso del estadio Olímpico para Beijing 2008 con una interesante propuesta de sistema convertible, también conformada por elementos rígidos solo que en este caso se trata de dos deslizamientos circulares que no son concéntricos.

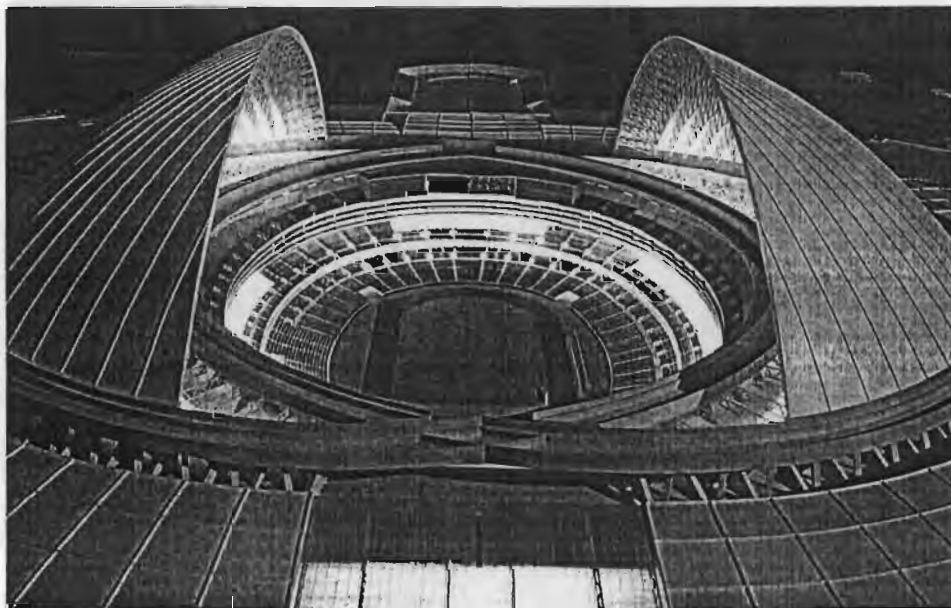
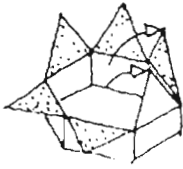


Figura 33. Propuesta para el estadio Olímpico de Beijing 2008

Estructura rígida plegable periférica:  
Pabellón de Kuwait



Se construyó para la Exposición Universal de Sevilla, España en 1992, el diseño estuvo a cargo de Santiago Calatrava y el proyecto consta de diecisiete costillas de concreto que por medio de un sistema hidráulico se pueden mover para cubrir o descubrir el espacio. El movimiento de las costillas es independiente dando como resultado una variedad de posiciones que cambian las características lumínicas del espacio.

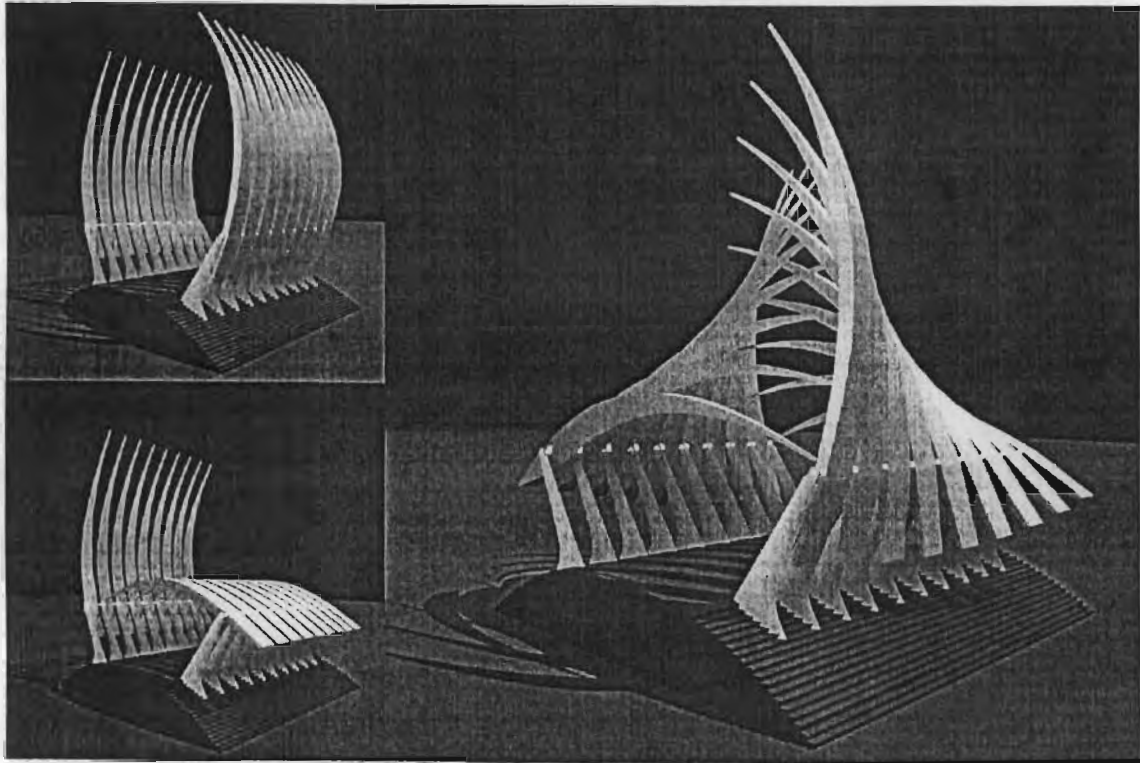


Figura 34. Distintas posiciones de la cubierta

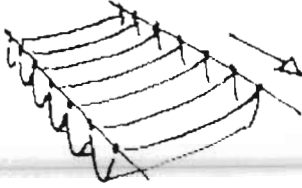
## Propuesta experimental en movimiento: Rotation Pneus

La fuerza centrífuga puede ser usada para desplegar una cubierta sin el uso de ningún elemento rígido. Dominik Baumüller y su equipo han desarrollado un modelo de cubierta compuesto de una doble capa de membrana parecida a la de un parapente. La membrana tiene entradas de aire cercanas al eje que al girarla la inflan dándole volumen y estabilidad. Dependiendo de la velocidad de rotación y el viento, la cubierta está constantemente cambiando de forma. Para una cubierta de 6m de diámetro un motor de 300W es suficiente. Dada la naturaleza del sistema, éste no puede ser usado en condiciones de viento fuerte, por lo que su uso no implica refugio de condiciones climáticas extremas. El uso para el que está diseñado es para hacer sombras en eventos de corta duración.



Figura 35. Rotation Pneus

## Membrana de estructura fija estibable en paralelo: Restaurante los Danzantes



Como último ejemplo quiero mostrar un proyecto que realizó el Laboratorio de Estructuras en colaboración con el arquitecto Marcos J Ontiveros Hernández. El proyecto está ubicado en la ciudad de Oaxaca, y el espacio principal de éste es un patio donde un detalle constructivo importante son sus muros de adobe, los cuales por su textura y gran altura, producen una sensación espacial muy característica, a lo que se le atribuye gran parte del atractivo del lugar.

El patio está confinado por cuatro edificios distintos, y el área de mesas esta al aire libre, por lo que en época de lluvias se improvisa una cubierta de lonas.

Ante esta problemática, se solicitó al Laboratorio de Estructuras, una cubierta permanente que tuviera la posibilidad de cubrir y descubrir el patio de manera mecánica.

Con base en un levantamiento preliminar del lugar, se construyó una maqueta de madera esc. 1:20 donde pudiéramos experimentar las distintas propuestas de cubierta.

Los parámetros a considerar para el diseño fueron los siguientes:

- La cubierta será de estructura de acero y membrana textil.
- La cubierta retraída deberá quedar encima del área de barra, siendo éste un espacio techado por un pergolado y policarbonato.
- La cubierta extendida deberá desaguar a un espejo de agua ubicado en uno de los extremos del patio.

Una vez definido el concepto de la cubierta, se trazó la forma para analizar los posibles efectos de viento, sismo, lluvia, granizo, dando como resultado una morfología funcional y estéticamente adecuada.

Los detalles de la estructura, se trabajaron de forma paralela con los ingenieros y especialistas en cálculo estructural, que en miras de fomentar la estabilidad de la cubierta en su totalidad, aplican corridas y cálculos a la estructura que se utilizará. El diseño de detalles de la estructura varía dependiendo la actividad que cada pieza tiene en el sistema, como ejemplo, por un lado está el sistema de movimiento, que permitirá el desplazamiento del modulo de cubierta, y por otro lado el sistema mecánico, que genera el movimiento de la cubierta.

A continuación presento un recorrido gráfico del proceso por el que pasó este proyecto, desde bocetos, planos constructivos, modelos de estudio, hasta fotografías de la estructura terminada y funcionando.

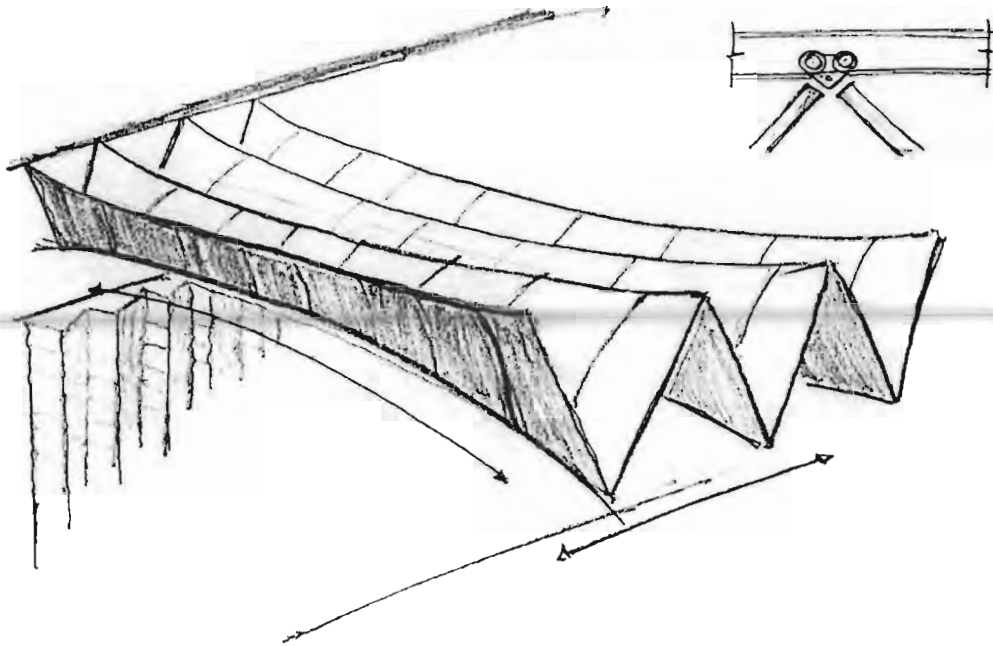
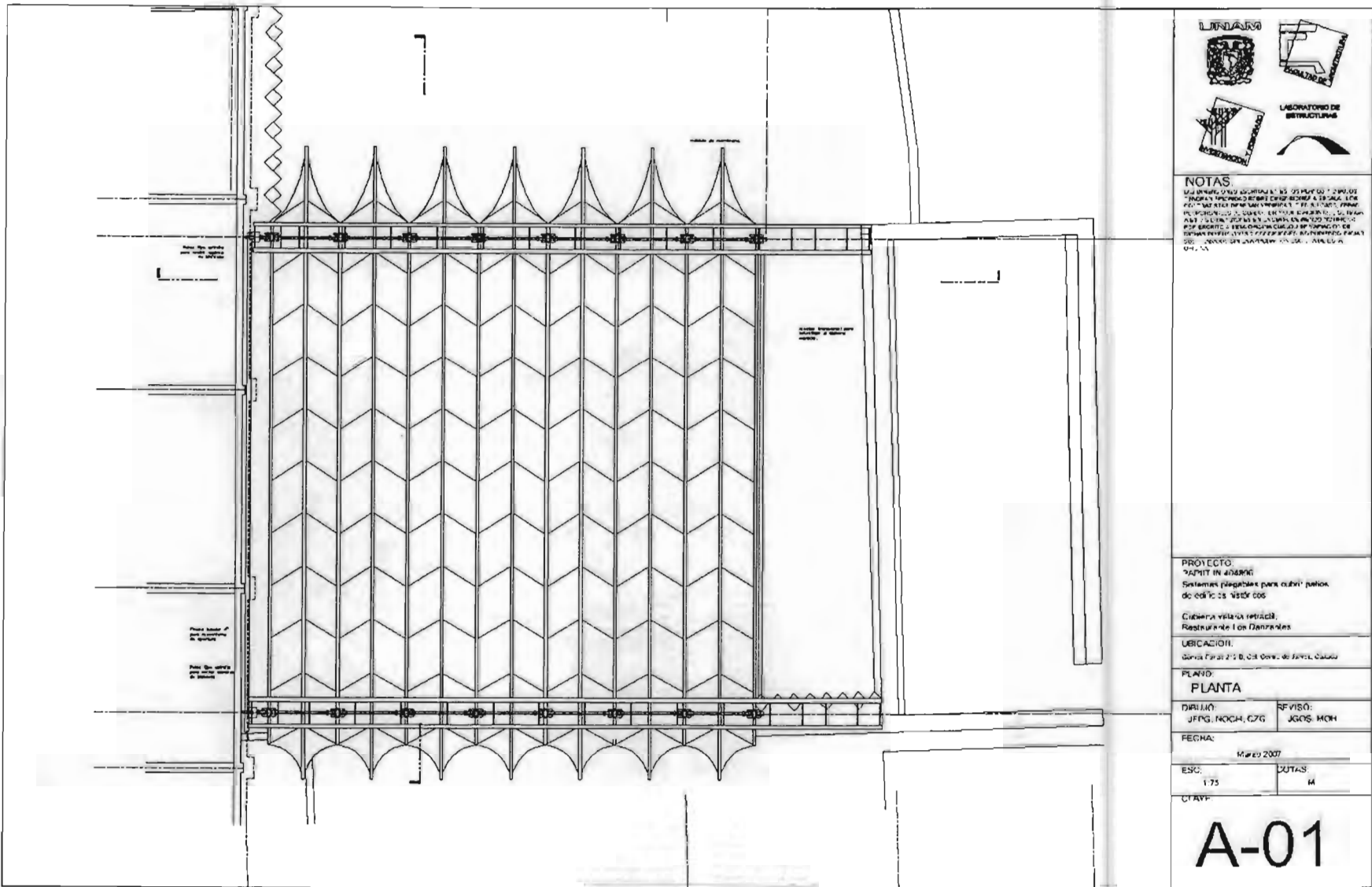


Figura 36. Croquis iniciales



Figura 37. Render conceptual



**NOTAS**  
 Este sistema de cubierta es un sistema de cubierta convertible que permite la apertura y el cierre del espacio cubierto. El sistema de cubierta se compone de una estructura de aluminio que soporta una membrana de PVC. El sistema de cubierta se puede abrir y cerrar mediante un mecanismo de accionamiento manual o eléctrico. El sistema de cubierta se puede utilizar para cubrir patios, terrazas, etc.

**PROYECTO:**  
 "PANTIN 40000"  
 Sistema plegable para cubrir patios de edificios de altura.

**UBICACION:**  
 Avenida Pinar 212 B, Col. Centro de Salud, Ciudad de México.

**PLANO:**  
**PLANTA**

**DISEÑO:** J.F.G. NOGA, C.Z.G.      **REVISÓ:** J.G.O.S. MOH

**FECHA:**  
 Marzo 2007

**ESCALA:** 1:75      **CUTAS:** M

**CI RVP:**

**A-01**

Figura 38: Planta

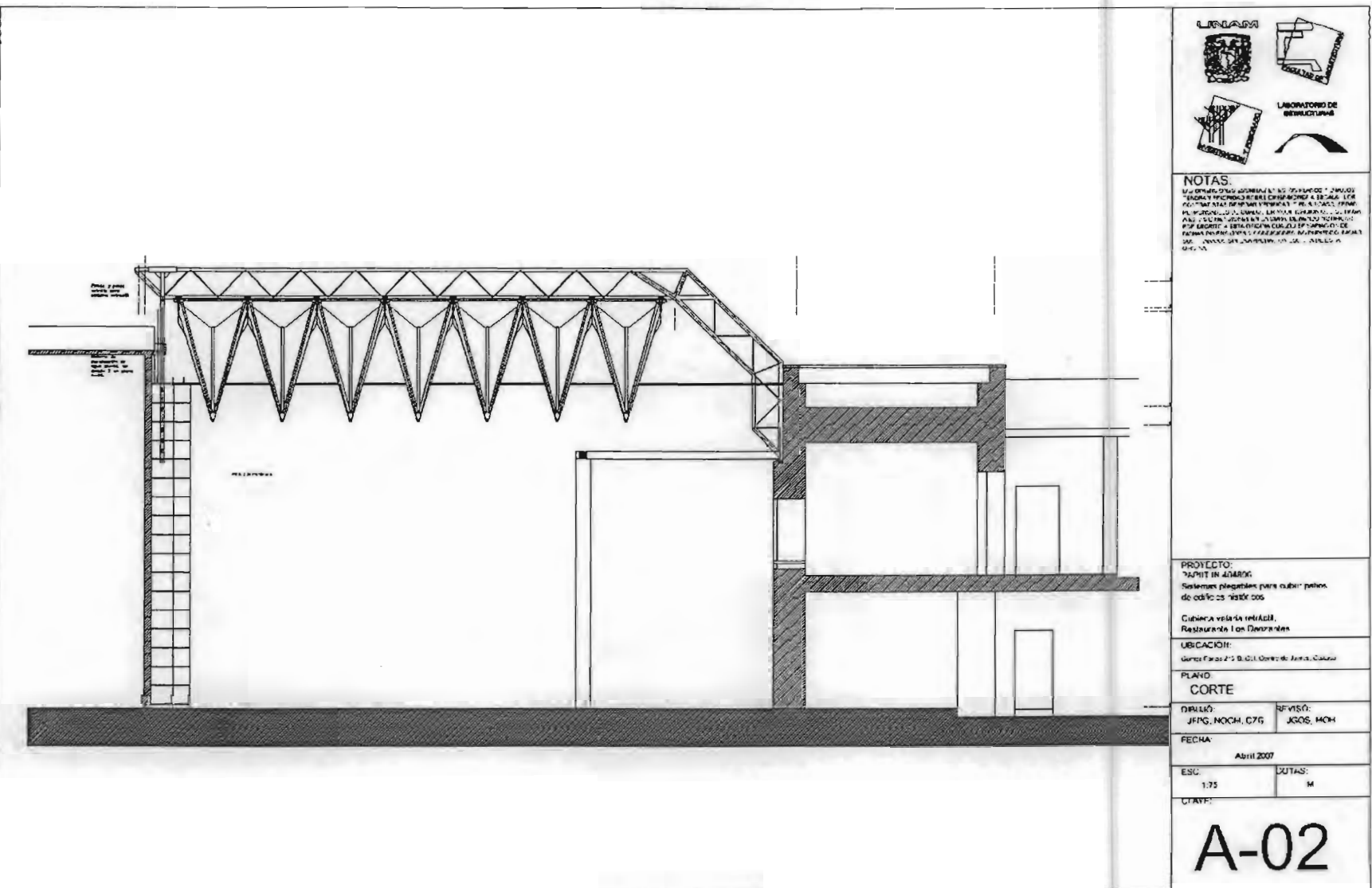


Figura 39. Corte en posición cerrada



**NOTAS:**  
 Las dimensiones dadas en los dibujos y planos  
 tienen prioridad sobre las especificaciones y  
 los datos de los fabricantes de materiales.  
 Las dimensiones dadas en los dibujos y planos  
 son las dimensiones nominales de los  
 materiales y no las dimensiones reales.  
 Las dimensiones dadas en los dibujos y planos  
 son las dimensiones nominales de los  
 materiales y no las dimensiones reales.

**PROYECTO:**  
 TAPIT IN AMAROC  
 Sistemas plegables para cubrir patios  
 de edificios existentes

Cubierta variable retráctil,  
 Restaurante Los Dinosaurios

**UBICACIÓN:**  
 General Fariñas 215 B. Col. Centro de Amec, Colima

**PLANO**  
**CORTE**

**DIBUJÓ:** J.F.G., M.O.C.H., C.T.G.      **REVISÓ:** J.G.S., M.O.C.H.

**FECHA:**  
 Abril 2007

**ESC:** 1:75      **UNIDADES:** M

**OTROS:**

**A-02**



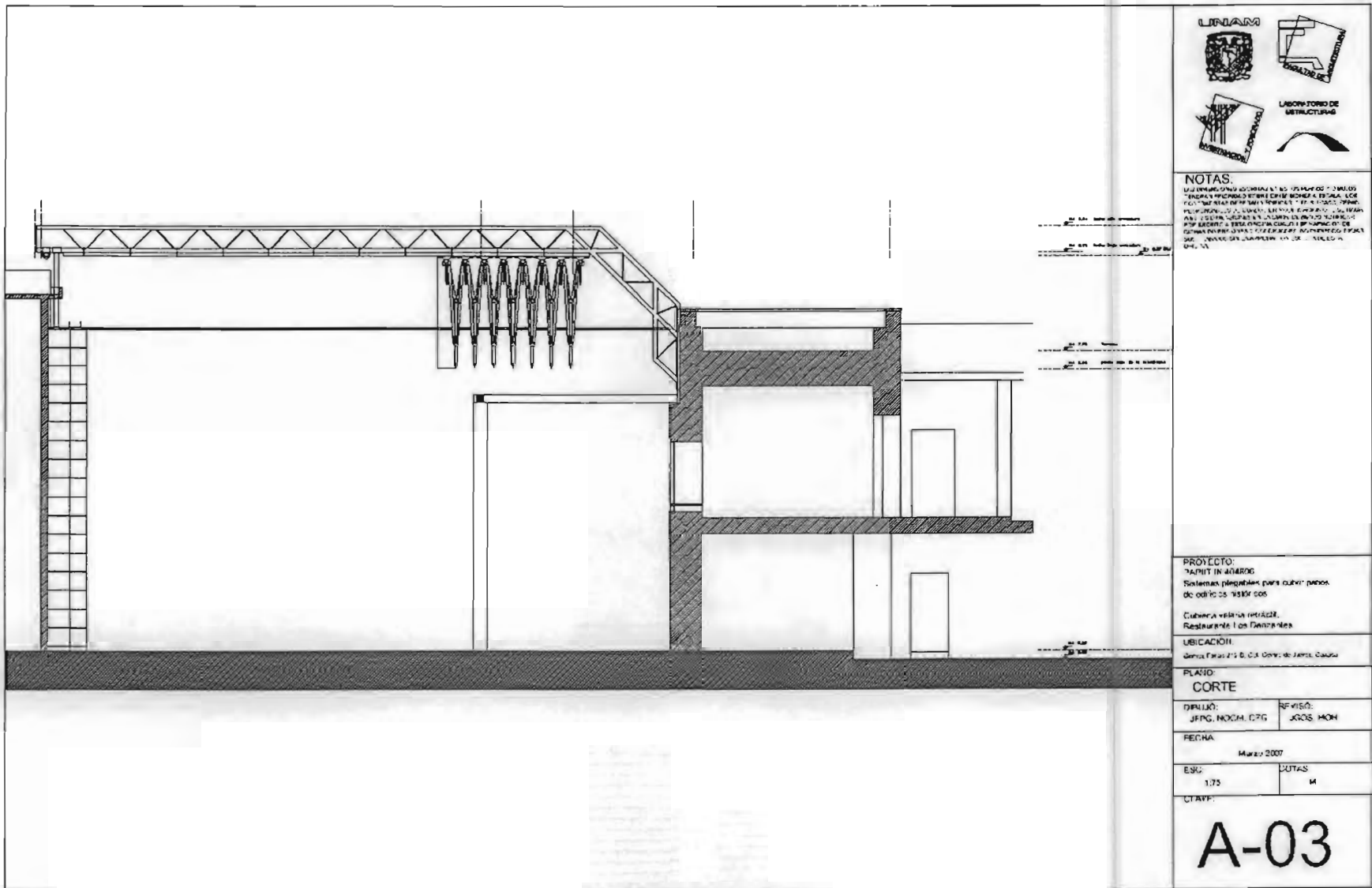


Figura 40. Corte en posición abierta



**NOTAS:**  
 1. LAS DIMENSIONES SE ENCUENTRAN EN LOS PLANOS DE DETALLE.  
 2. EN LAS PARTES NO DETALLADAS SE APLICARÁN LAS NORMAS DE LA CIMENTACIÓN Y ESTRUCTURAS DE ACERO.  
 3. SE DEBE VERIFICAR EL ESTADO DE LOS ELEMENTOS DE ACERO EN LOS PUNTO DE CONEXIÓN CON EL CONCRETO.  
 4. SE DEBE VERIFICAR EL ESTADO DE LOS ELEMENTOS DE ACERO EN LOS PUNTO DE CONEXIÓN CON EL CONCRETO.  
 5. SE DEBE VERIFICAR EL ESTADO DE LOS ELEMENTOS DE ACERO EN LOS PUNTO DE CONEXIÓN CON EL CONCRETO.

**PROYECTO:**  
 TAJUNT IN ARABIC  
 Sistema plegable para cubrir pisos de edificios altos  
**CUBIERTA:** sistema retráctil.  
**Restaurante Los Financieras**  
**UBICACIÓN:**  
 Zona Financiera 215 B, C.A. Centro de Juntas, Ciudad

**PLANO:**  
**CORTE**

<b>DISEÑO:</b> J.F.G. MOCH. C.F.G.	<b>REVISÓ:</b> J.G.O.S. MOH
---------------------------------------	--------------------------------

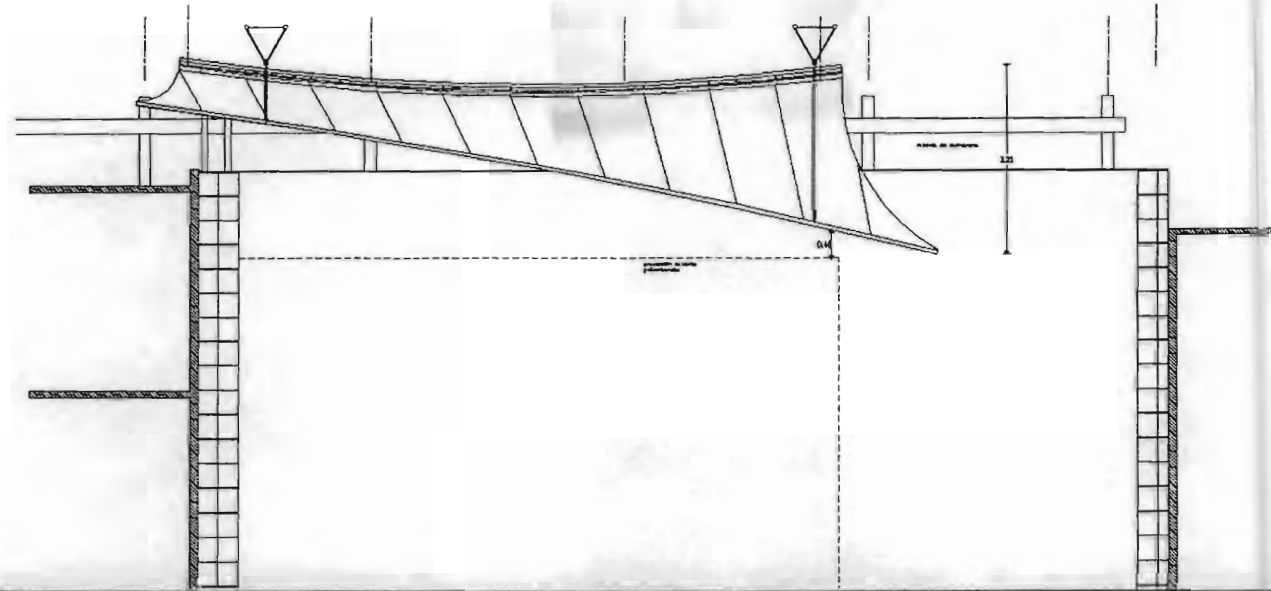
**FECHA:**  
 Marzo 2007

<b>ESCALA:</b> 1:75	<b>LISTAS:</b> M
------------------------	---------------------

**CLAVE:**  
**A-03**



**NOTAS:**  
 1. Este documento es propiedad de la Universidad de Chile y no debe ser reproducido ni distribuido sin el consentimiento escrito de la Universidad de Chile.  
 2. Este documento es propiedad de la Universidad de Chile y no debe ser reproducido ni distribuido sin el consentimiento escrito de la Universidad de Chile.  
 3. Este documento es propiedad de la Universidad de Chile y no debe ser reproducido ni distribuido sin el consentimiento escrito de la Universidad de Chile.  
 4. Este documento es propiedad de la Universidad de Chile y no debe ser reproducido ni distribuido sin el consentimiento escrito de la Universidad de Chile.  
 5. Este documento es propiedad de la Universidad de Chile y no debe ser reproducido ni distribuido sin el consentimiento escrito de la Universidad de Chile.



**PROYECTO:**  
 PAPIR IN 40400  
 Sistemas plegables para cubrir jardín de edificio de oficinas

Cubierta retráctil  
 Restaurante Los Pajaritos

**UBICACIÓN:**  
 Avenida Franklin 275 & 280, Centro de Justicia, Chile

**PLANO:**  
 CORTE

<b>DIBUJO:</b> JFG, MOCH, C7G	<b>REVISÓ:</b> JGOS, MOH
----------------------------------	-----------------------------

**FECHA:**  
 Abril 2007

<b>ESCALA:</b> 1:75	<b>CUTAS:</b> M
------------------------	--------------------

**CLAVE:**

**A-04**

Figura 41. Corte longitudinal



**NOTAS:**  
 LAS DIMENSIONES SE DEDUCEN DE LOS PLANOS DE ARQUITECTURA Y SE TIENEN EN CUENTA LAS DISTANCIAS ENTRE LOS EJE DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES. LAS DISTANCIAS ENTRE LOS EJE DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES SE TIENEN EN CUENTA EN LOS PLANOS DE ARQUITECTURA Y SE TIENEN EN CUENTA EN LOS PLANOS DE ARQUITECTURA Y SE TIENEN EN CUENTA EN LOS PLANOS DE ARQUITECTURA.

**PROYECTO:**  
 PABILLÓN EDIFICIO  
 Sistema plegable para cubrir salas de edificios históricos

**CUBIERTA:** material reflectante  
 Rendimiento: Lint. Decoración

**UBICACION:**  
 Gómez Fábila 212 D, Col. Centro de Juárez, México

**PLANO:**  
**PERSPECTIVA**

**DIBUJO:** J.F.C. NOCH. C.Z.C.      **REVISÓ:** J.C.O.S. MOH.

**FECHA:**  
 Marzo 2007

**E.S.C.:** 1:30      **CO. #S:** M

**C.AVE:**

**A-05**

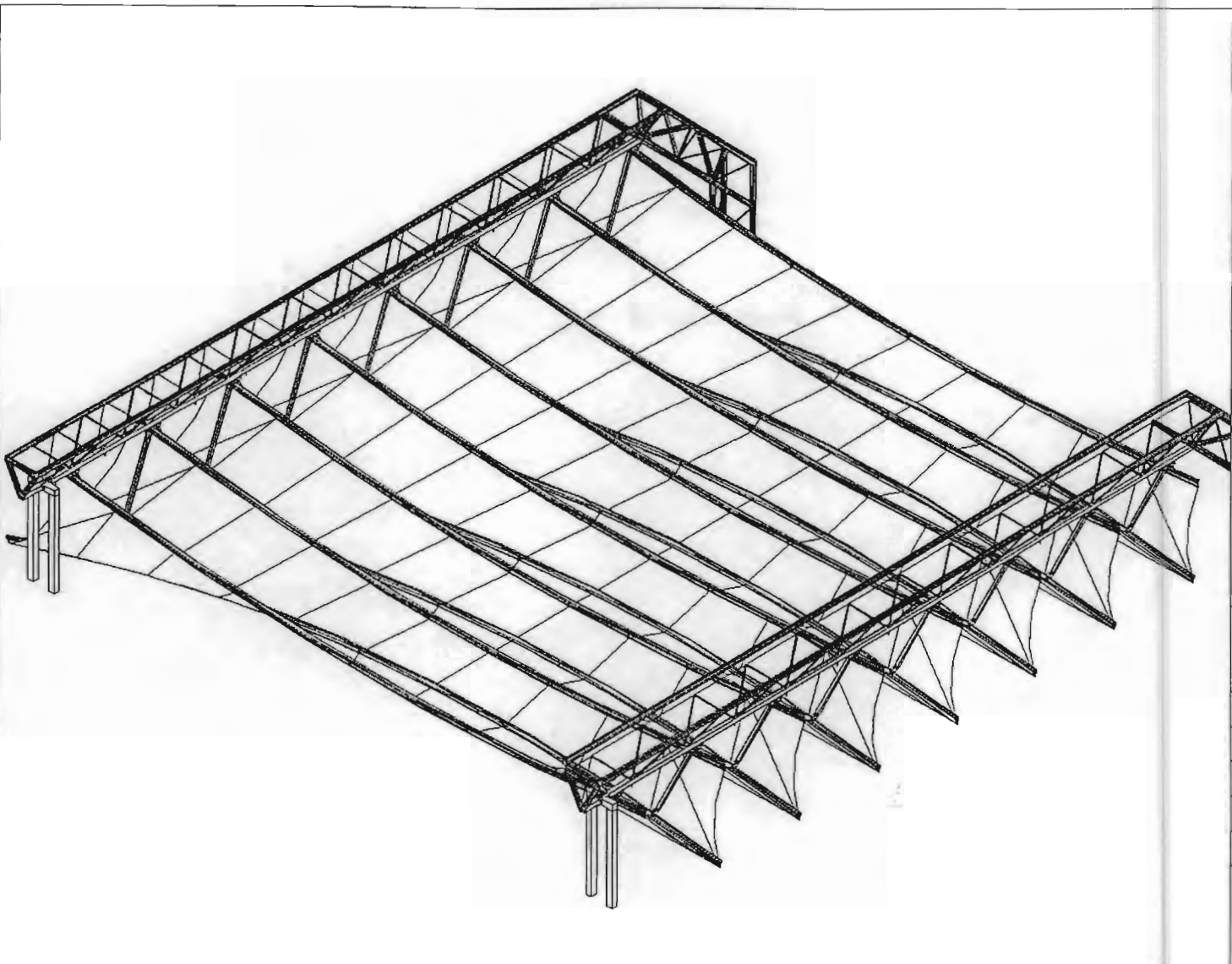


Figura 42. Isométrico

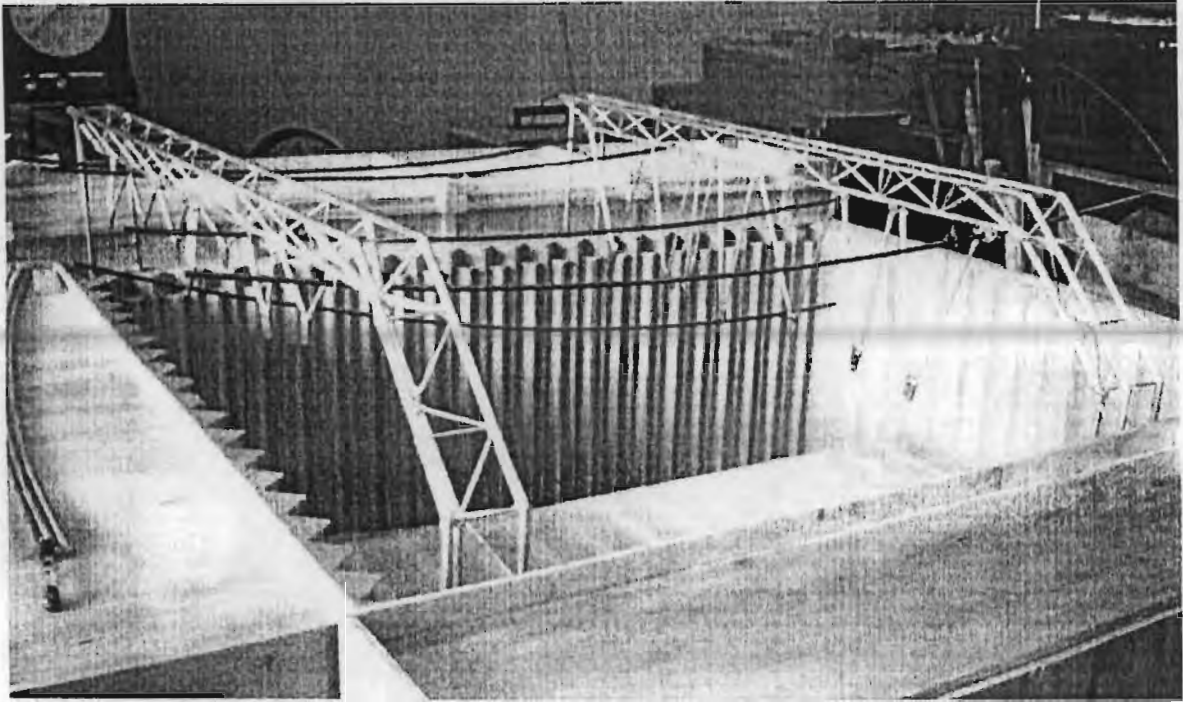


Figura 43. Maqueta en construcción

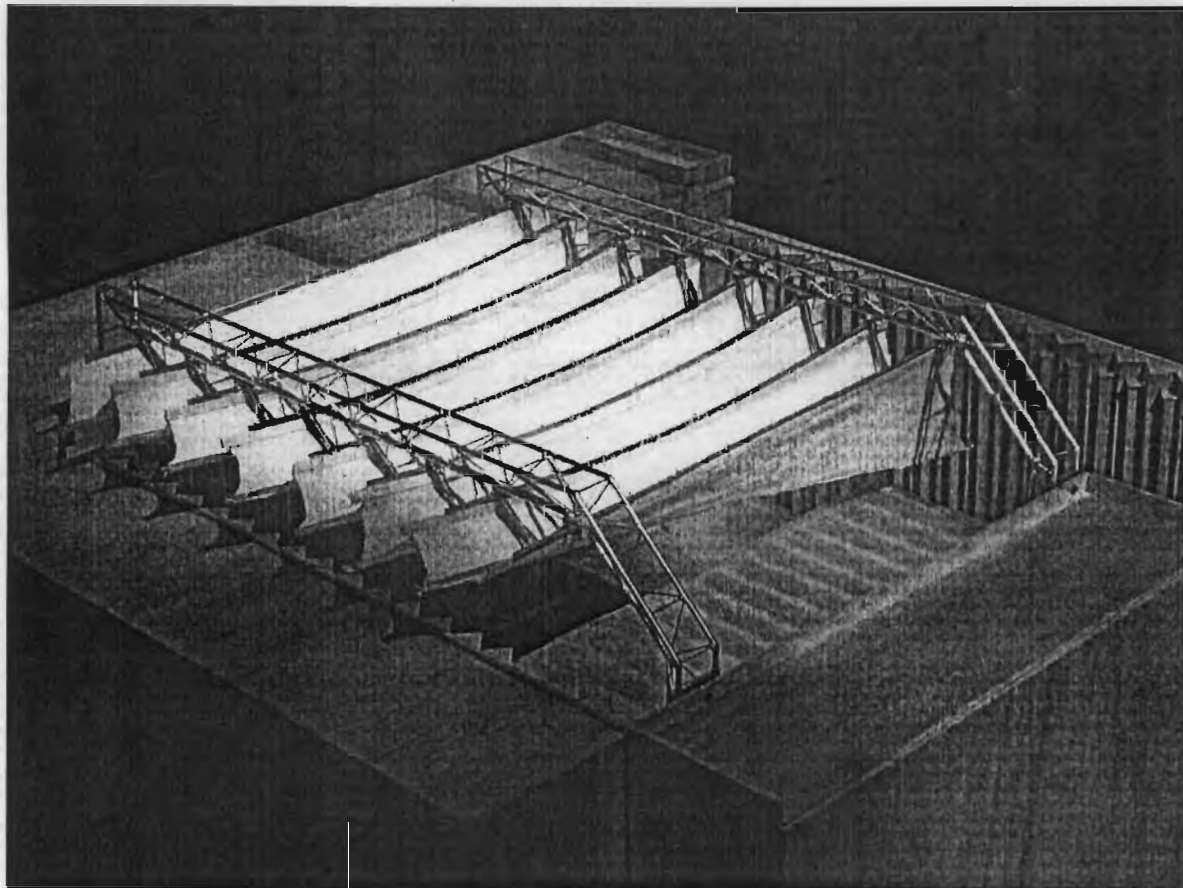


Figura 44. Maqueta terminada

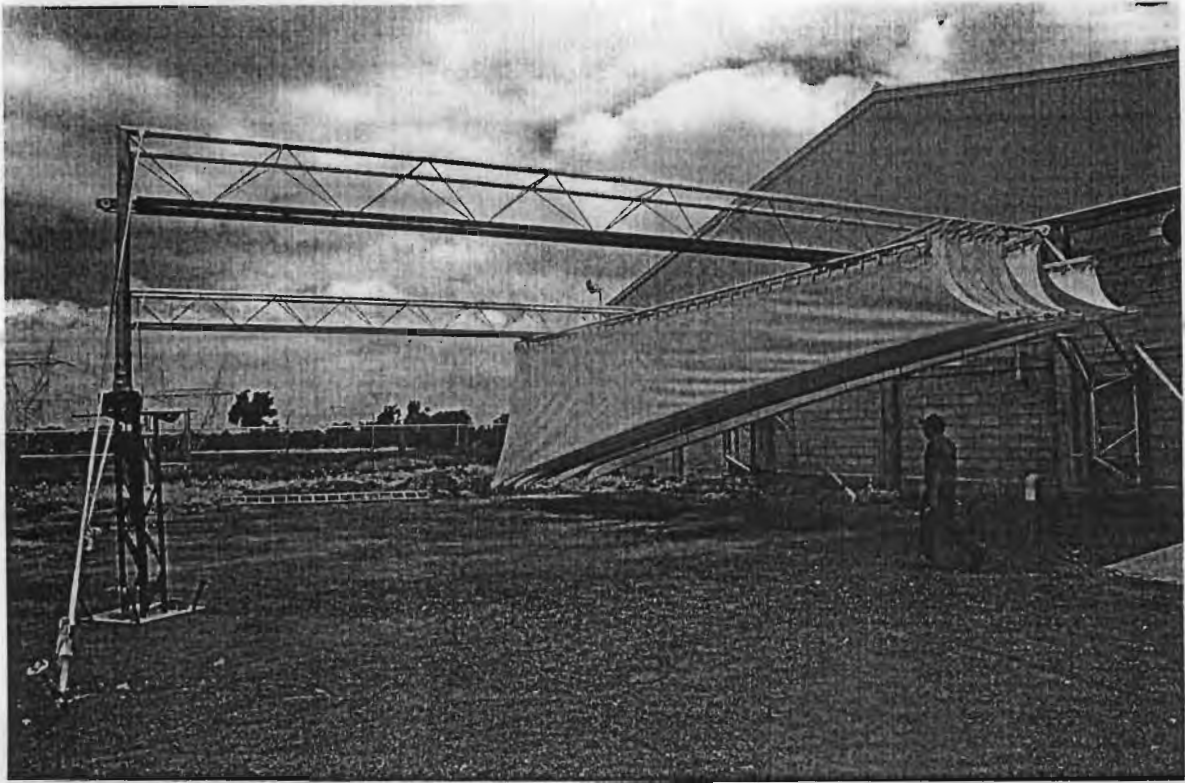


Figura 45. Prueba de la estructura en los talleres de la empresa Carroussel, Tizayuca Hidalgo

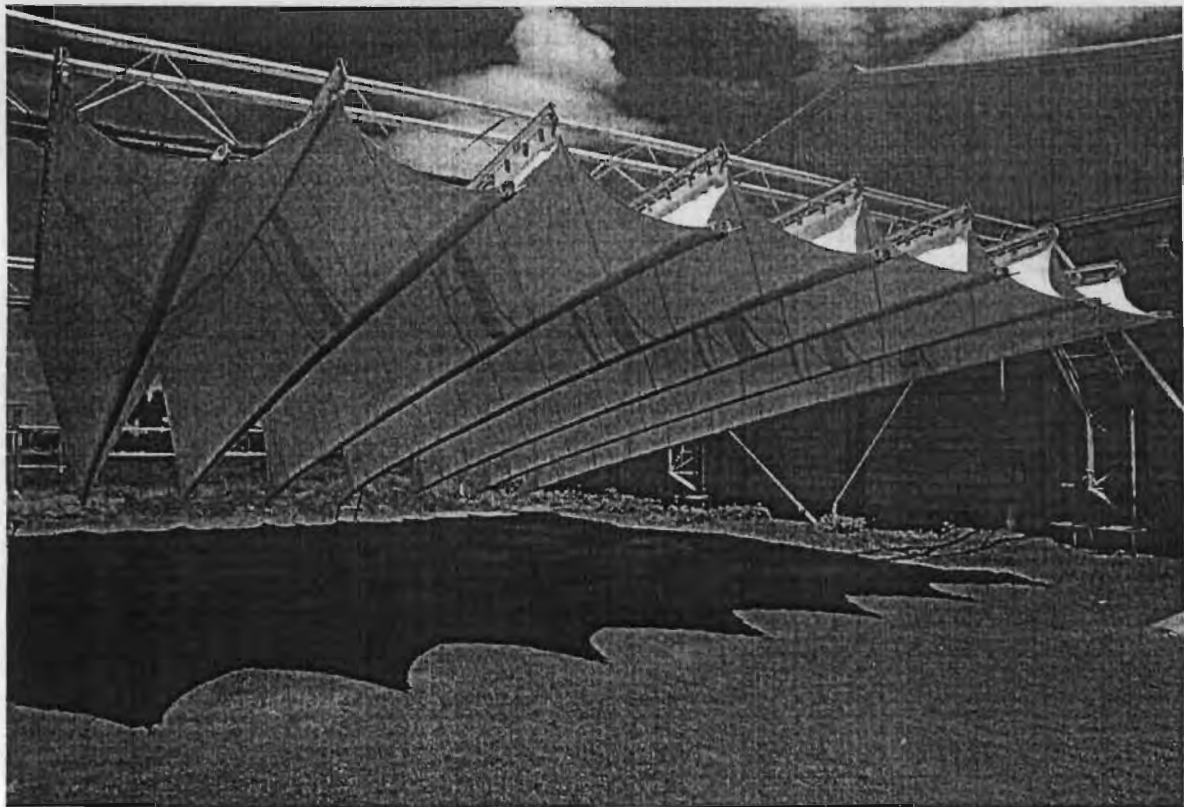


Figura 46. Prueba de la estructura en los talleres de la empresa Carroussel, Tizayuca Hidalgo

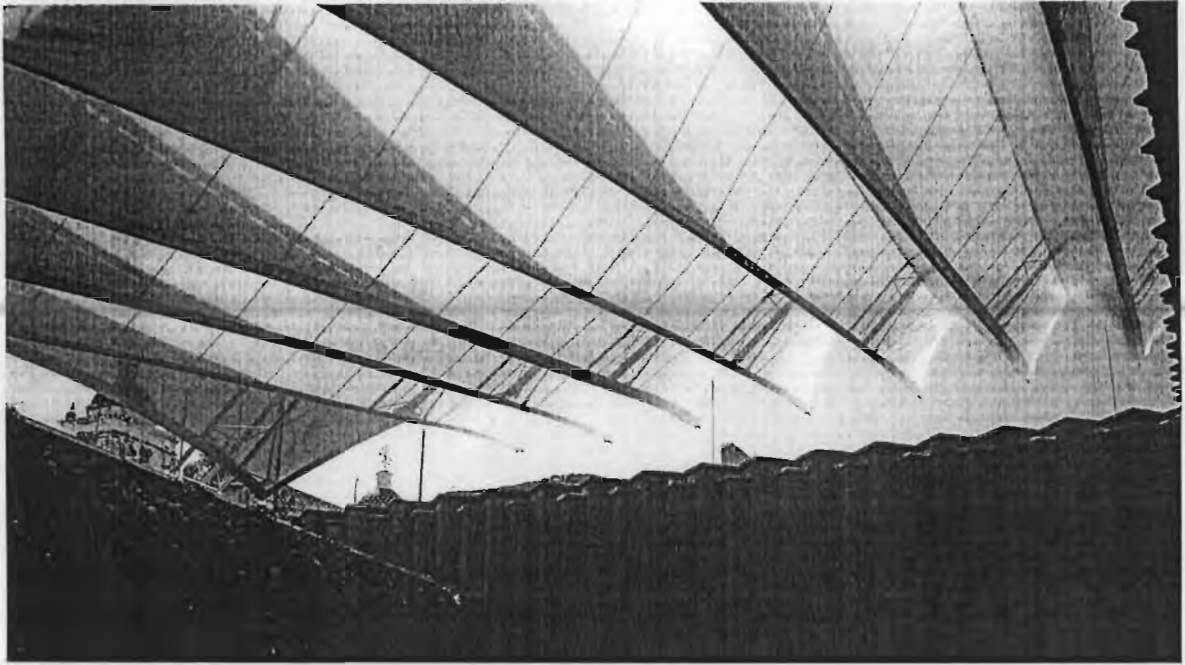


Figura 47. Cubierta terminada, restaurante Los Danzantes, Oaxaca

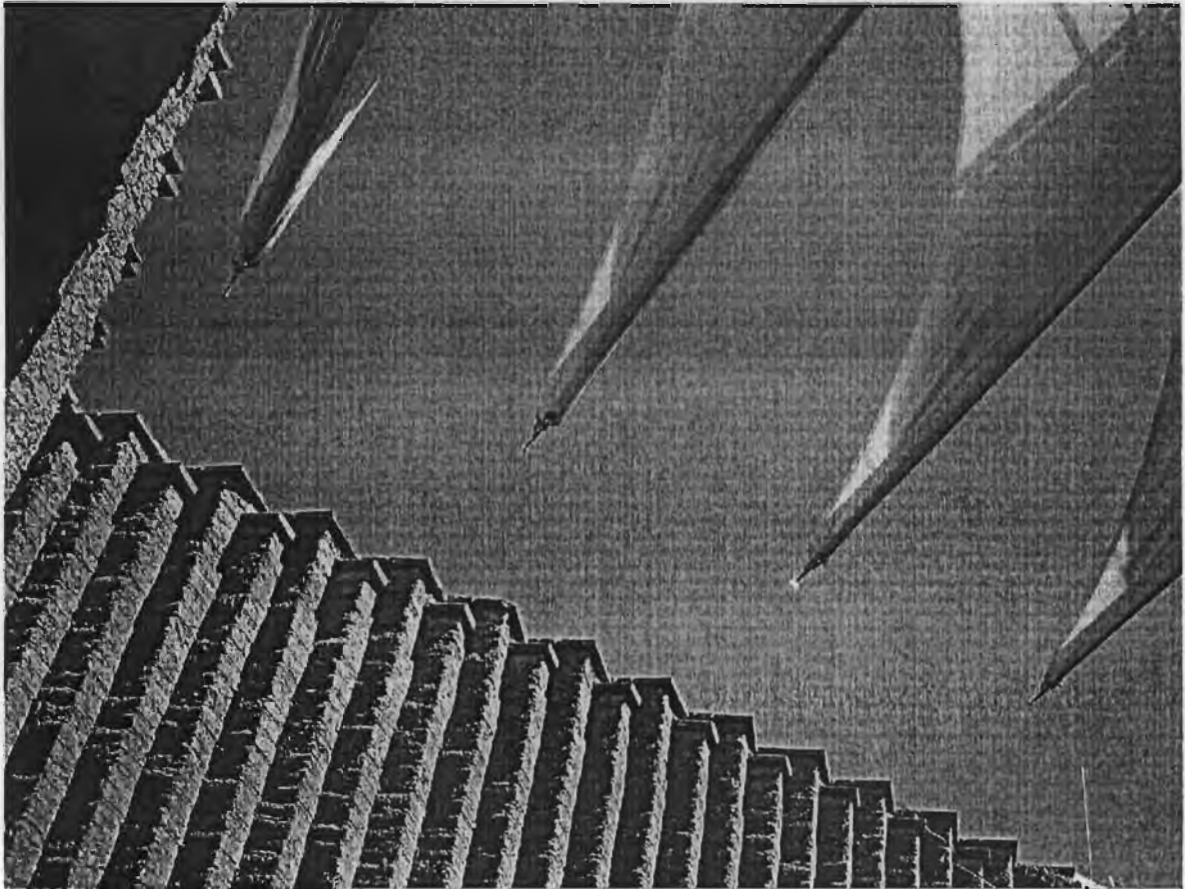


Figura 48. Cubierta terminada, restaurante Los Danzantes, Oaxaca

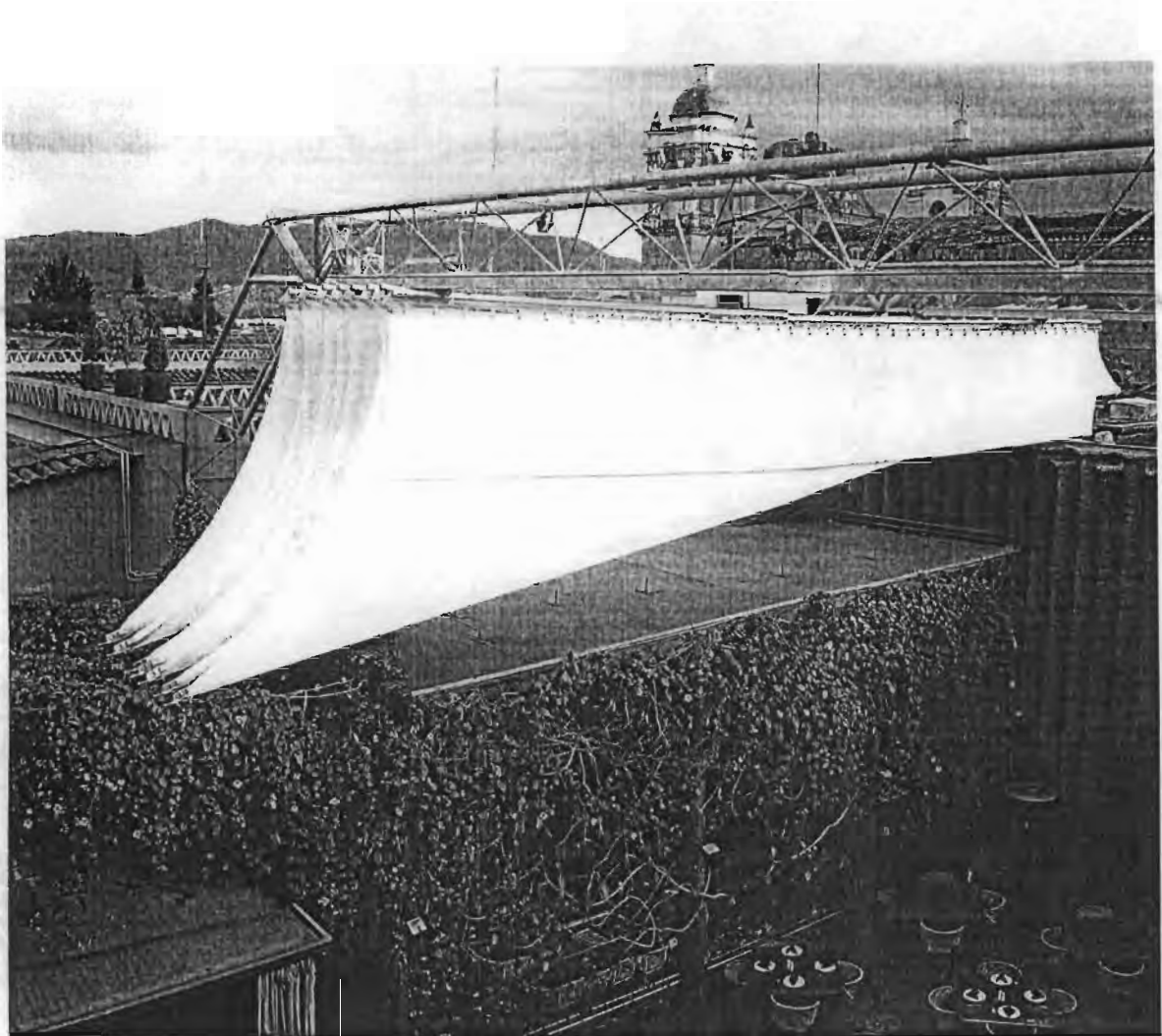
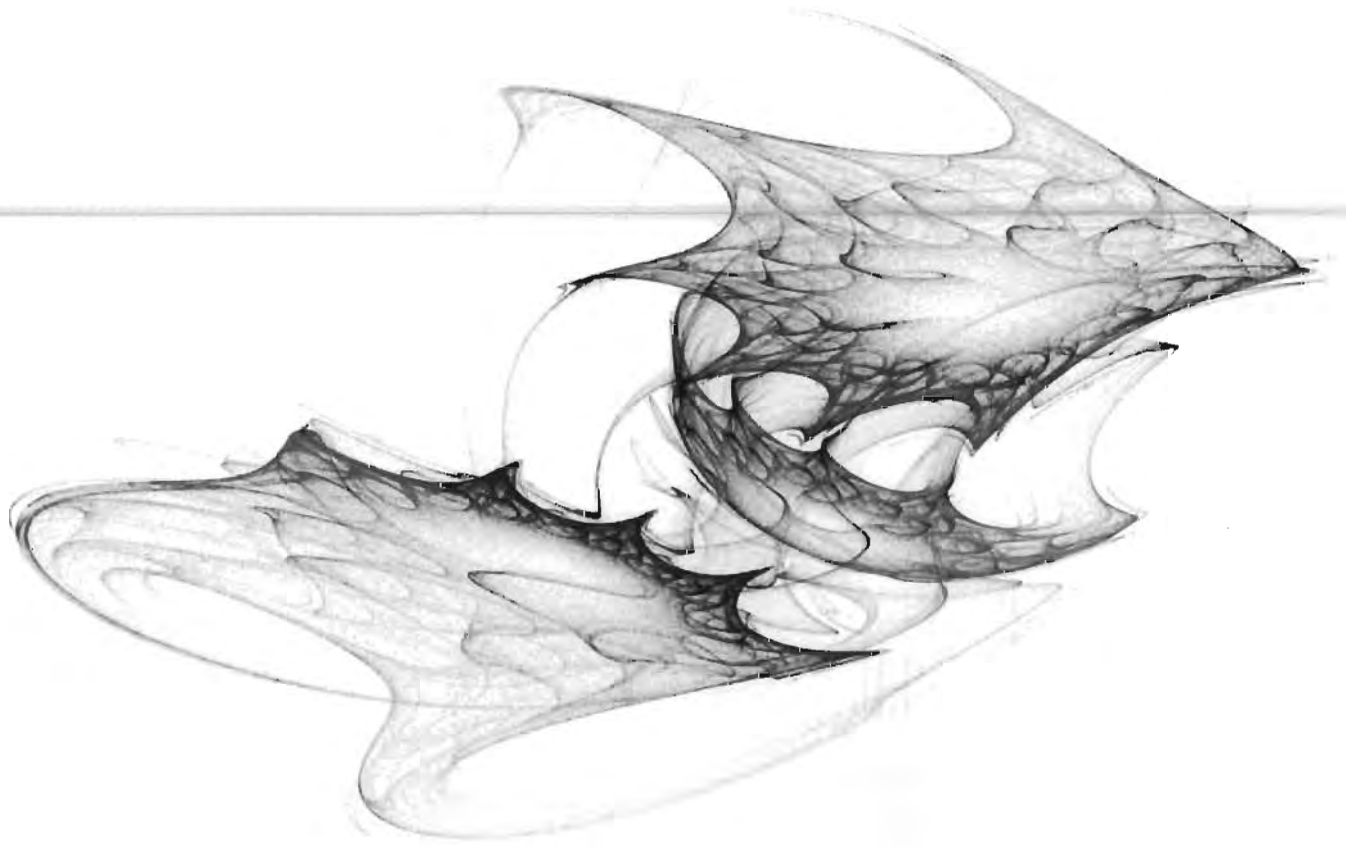


Figura 49. Cubierta terminada, posición abierta.



# Capítulo 4

Propuesta para la Academia de San Carlos



## Antecedentes

El inmueble donde hoy se ubica La Academia de San Carlos fue originalmente el Hospital del Amor de Dios, construido en el siglo XVI y aunque la academia inició cursos en el año de 1781 usando como espacio provisional La Real Casa de Moneda (hoy Museo de las Culturas), no fue sino hasta 1791, con la llegada de Manuel Tolsá y la colección de reproducciones de yeso de esculturas europeas, que se estableció definitivamente en la esquina de la calle de Moneda y Academia.

Debido a la guerra de independencia, La Academia de San Carlos suspendió actividades entre 1821 y 1824. En 1843 gracias a Antonio López de Santa Anna y al ministro de instrucción Manuel Baranda, se decreta su reorganización y en 1847 se vuelven a contratar maestros provenientes de Europa, entre ellos el Arq. Xavier Cavallari quien diseñó la fachada principal que conocemos hoy.



Figura 1. Vista del patio principal y sus esculturas

En 1867, bajo la ley Orgánica de Instrucción Pública en el Distrito Federal dispuesta por don Benito Juárez la Academia tomaría el nombre de Escuela Nacional de Bellas Artes.

La escuela de Arquitectura fue albergada por este recinto hasta 1954 cuando cambió su ubicación a Ciudad Universitaria.

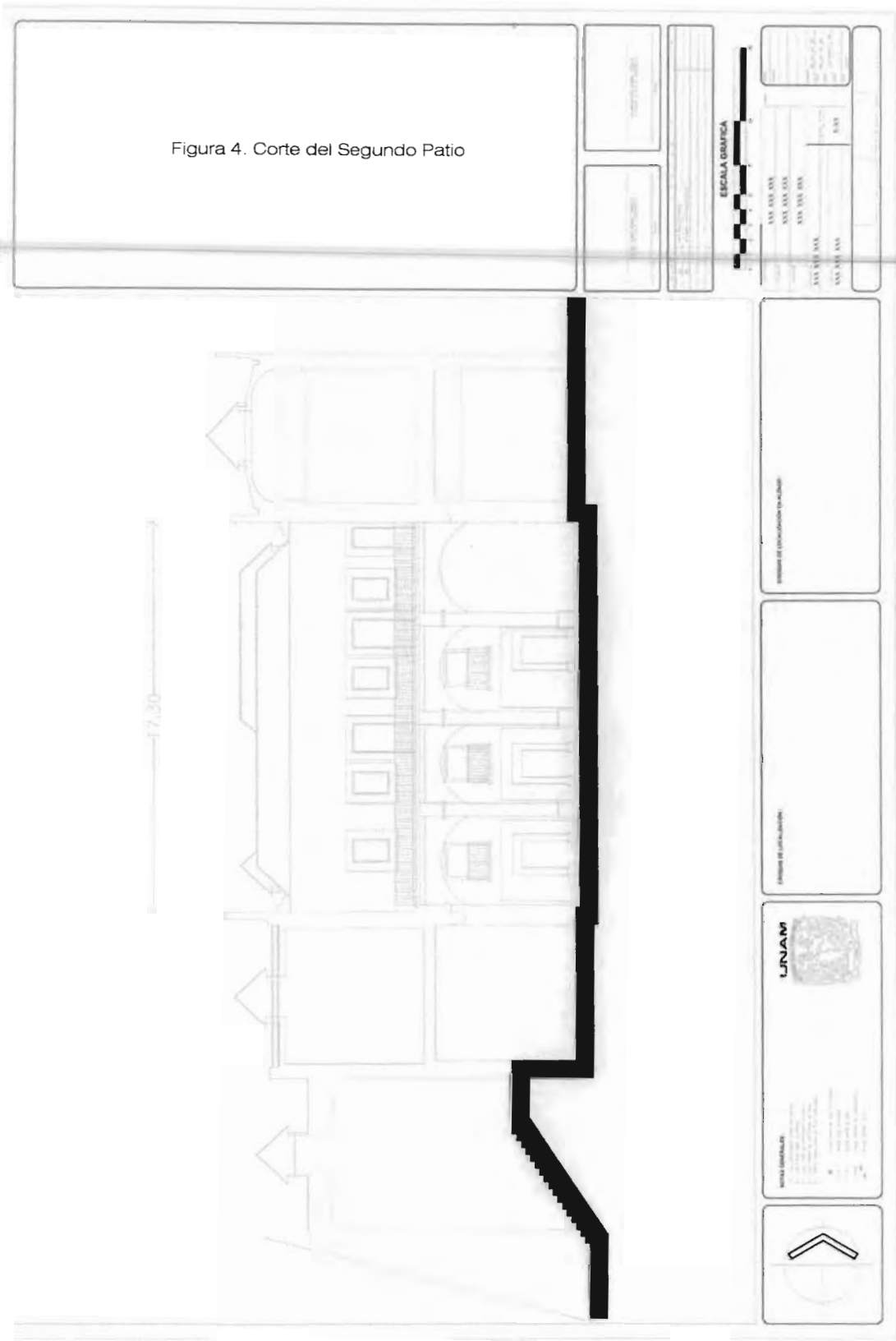
En la actualidad está integrada a la Universidad Nacional Autónoma de México, la Academia de San Carlos alberga la División de Estudios de Posgrado.

Este edificio tiene 2 patios, el principal es de planta cuadrada y está cubierto por un domo de cristal esmerilado proyecto del Arq. Antonio Rivas Mercado quien fuera director de la academia de 1903 a 1912. El Segundo Patio, pertenece hoy en día a la Facultad de Arquitectura y en él se realizan distintas actividades que van desde usos académicos como espacio alternativo a la Facultad en Ciudad Universitaria hasta fiestas y banquetes como el de alumnos de nuevo ingreso.

A continuación se presenta el levantamiento que realizamos por parte del Laboratorio de estructuras para poder realizar la maqueta y empezar el proyecto.









Estudiando el patio y la planta de azoteas notamos que los espacios para apoyos de la cubierta son limitados y una opción podría ser anclar la cubierta a los muros, sin embargo dadas las características del inmueble, lo ideal es bajar las cargas totalmente verticales por los muros que pertenezcan a los ejes estructurales del edificio.

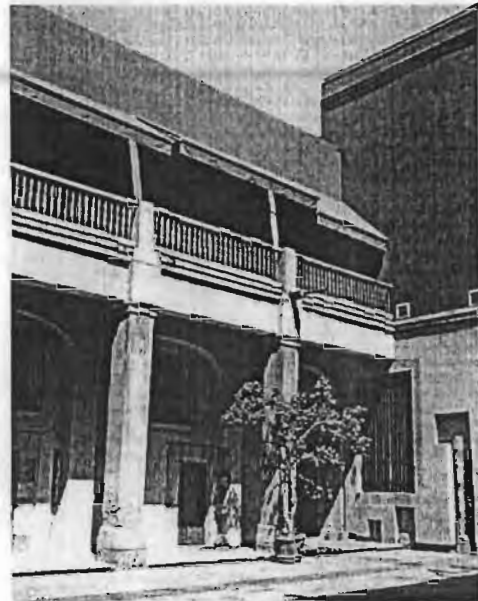
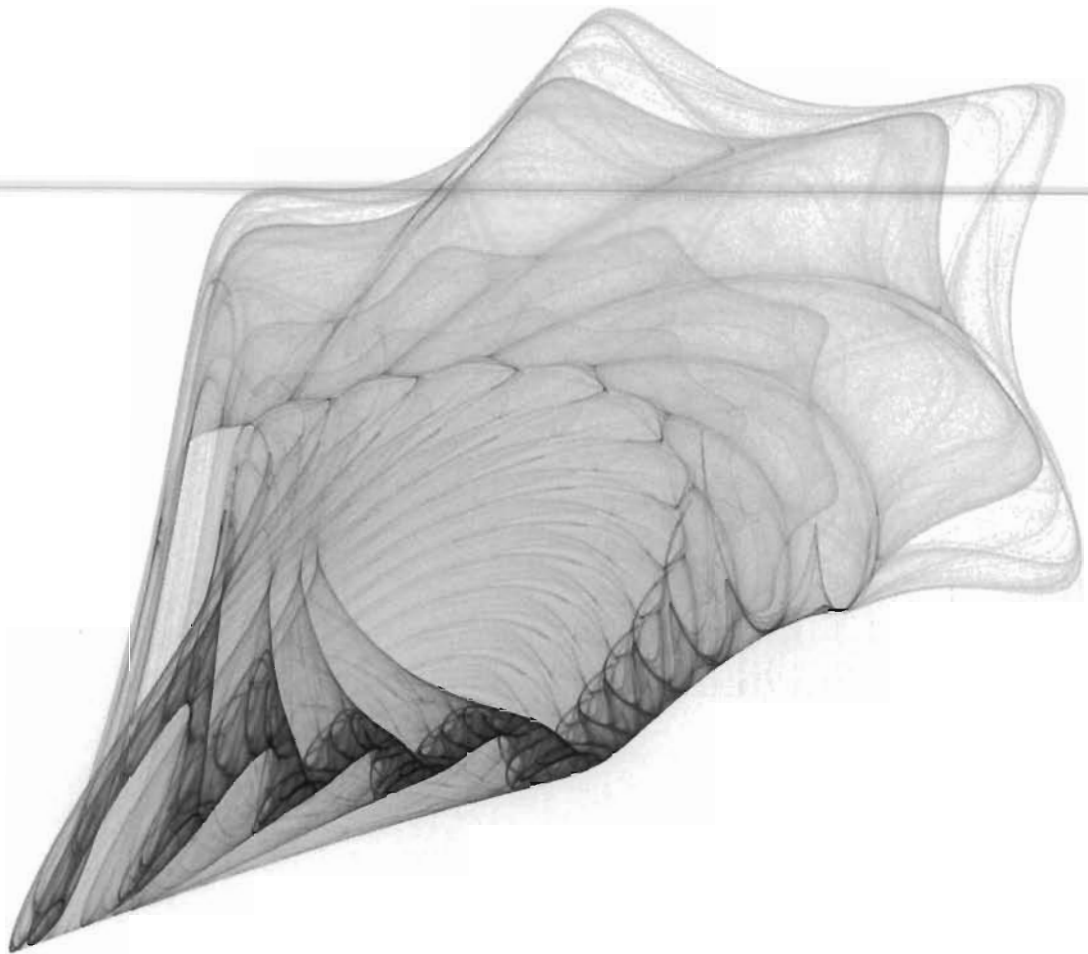


Figura 6. Domo del patio principal y Segundo Patio



# Capítulo 5

Concepto





Ésta es una propuesta muy sencilla y funcional, consiste en piezas que se deslizan por rieles paralelos a los muros del patio, se estudiaron distintas opciones para solucionar el problema usando esta tipología.

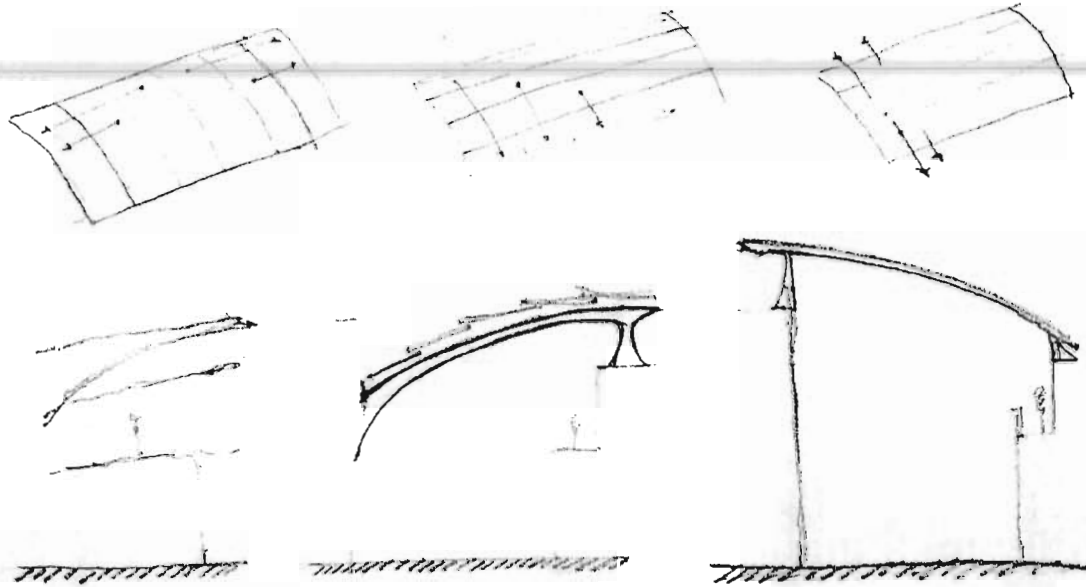


Figura 2. Propuesta deslizable en paralelo usando una superficie cilíndrica

El análisis incluyó la dirección del movimiento el tipo de superficie, y la forma de las secciones móviles.

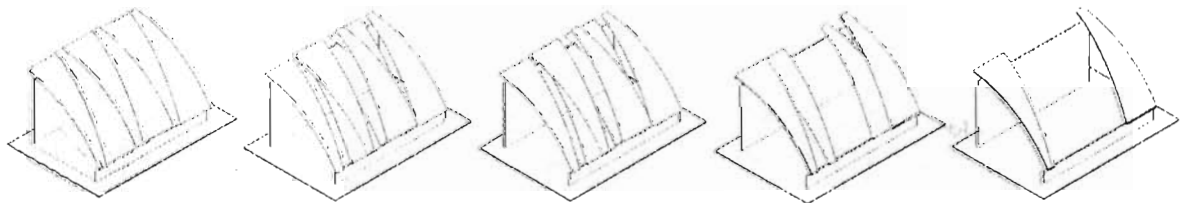


Figura 3. Variación de la propuesta deslizable en paralelo

Concluimos que como mejor funciona el sistema deslizable en paralelo es con una geometría de superficie cilíndrica, sin embargo también se pueden usar superficies cónicas y hasta de curvatura gaussiana positiva, usando superficies de revolución, donde los rieles son paralelos al eje.

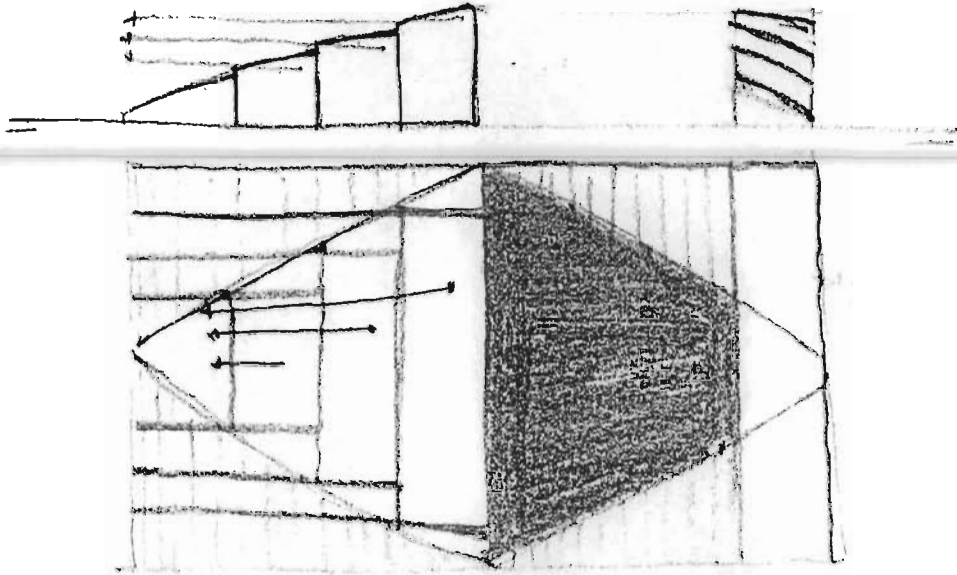


Figura 4. Propuesta deslizable en paralelo usando superficies cónicas

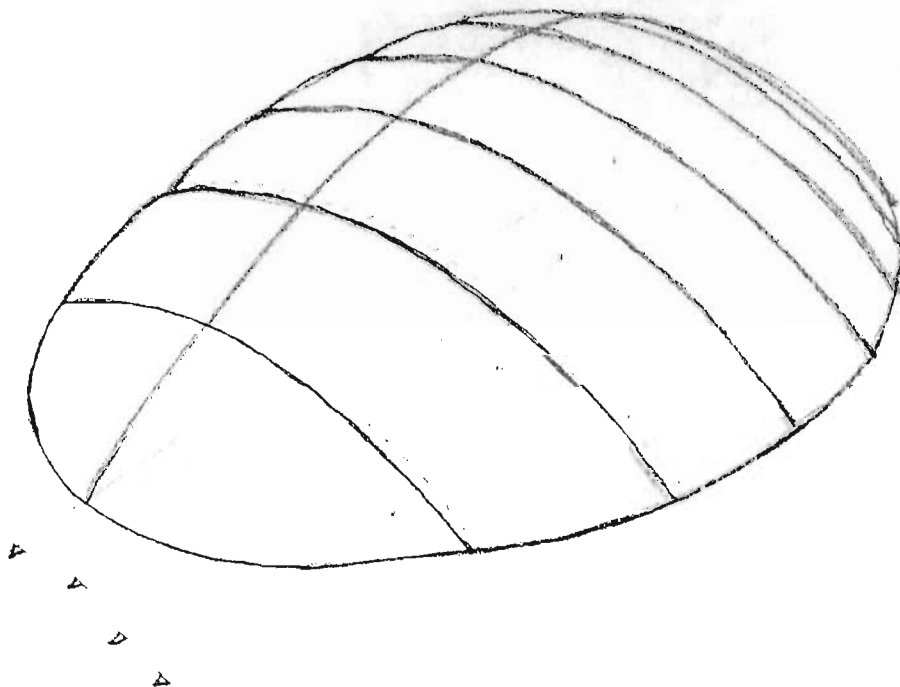


Figura 5. Propuesta deslizable en paralelo usando una superficie de revolución

La plegable en paralelo consiste en elementos tipo persiana que giran para convertir el espacio.

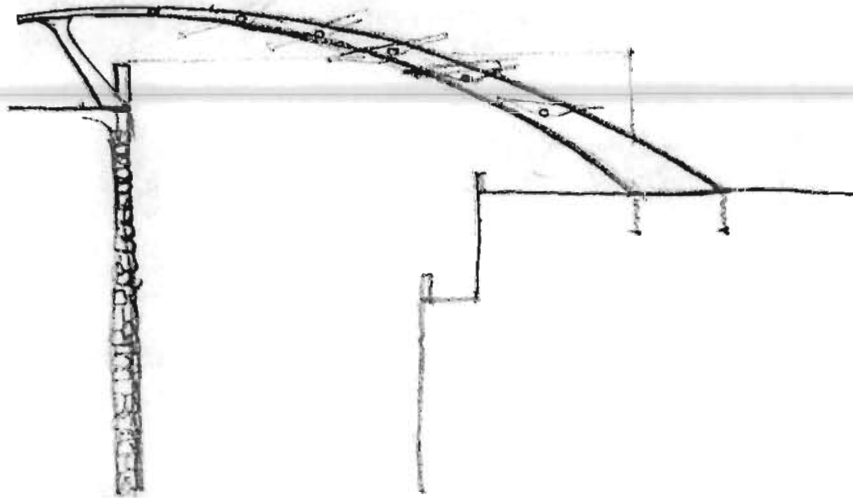


Figura 6. Propuesta plegable en paralelo

Los elementos que son los ejes de giro están soportados por secciones fijas, por donde también pasan cadenas con la transmisión del motor.

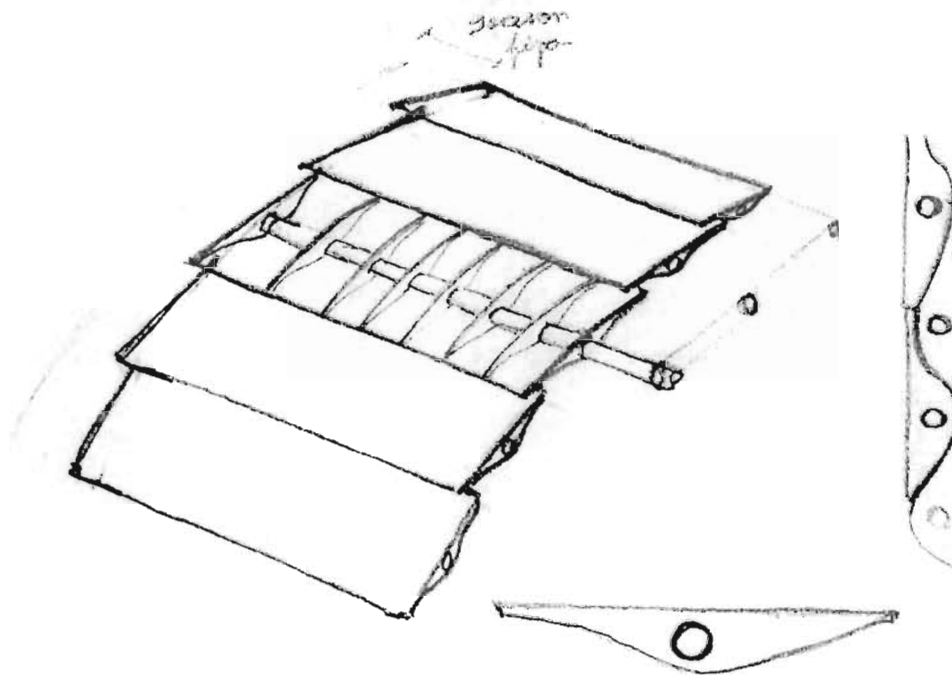


Figura 7. Detalle de la estructura y teselación para el corte de piezas

Una variación sobre este sistema era que giraran los elementos para después estibarlos en un extremo. Sin embargo la viabilidad de esto se dificulta por la complejidad del mecanismo.

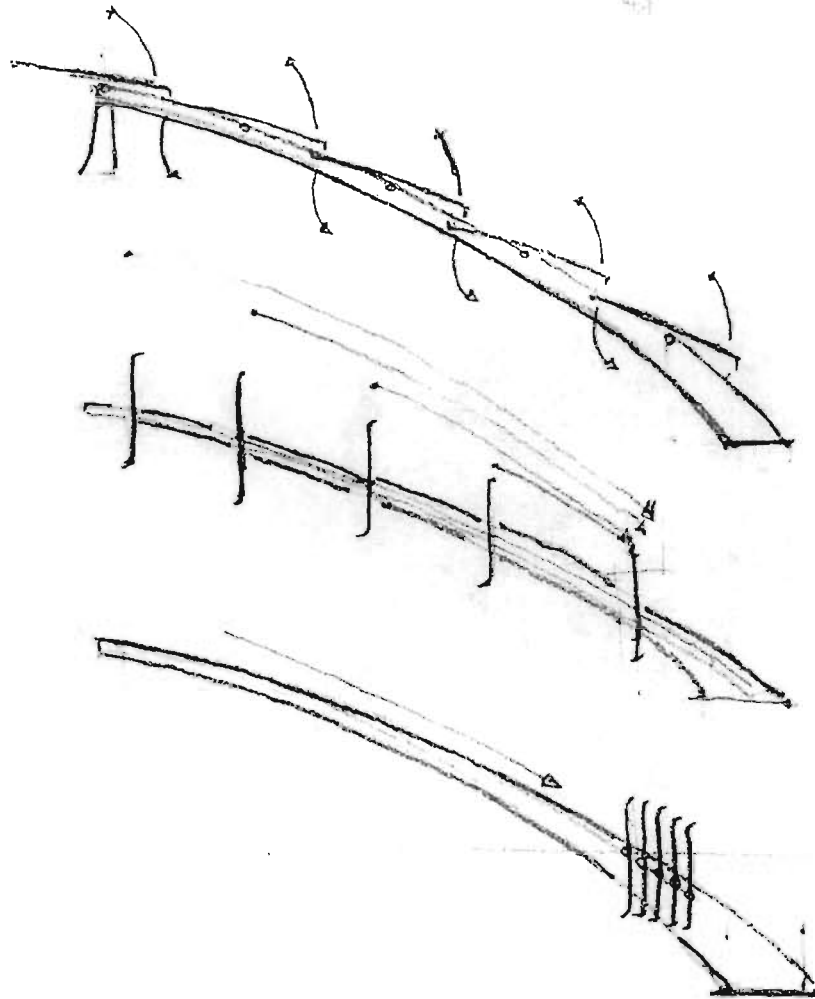


Figura 8. Mezcla de propuestas plegable-deslizable en paralelo

La tercera y definitiva propuesta es un sistema plegable periférico y las razones principales por la que se escogió esta propuesta son las siguientes:

Parte de nuestro trabajo como investigadores es innovar en sistemas estructurales y ya habíamos tenido un acercamiento a cubiertas deslizables paralelas con el proyecto del restaurante Danzantes en la ciudad de Oaxaca, en este caso el reto del equipo es usar esta nueva tipología y materiales rígidos.

Se busca generar una geometría anticlástica y usar sus características de resistencia para aligerar la estructura.

Usando un sistema neumático en lugar de rieles y ruedas, pretendemos evitar la transmisión de vibraciones al edificio.

Por medio del uso de cristal esmerilado y estructura de acero, generamos correspondencia entre el domo del patio principal de la Academia y el nuevo a proponer.

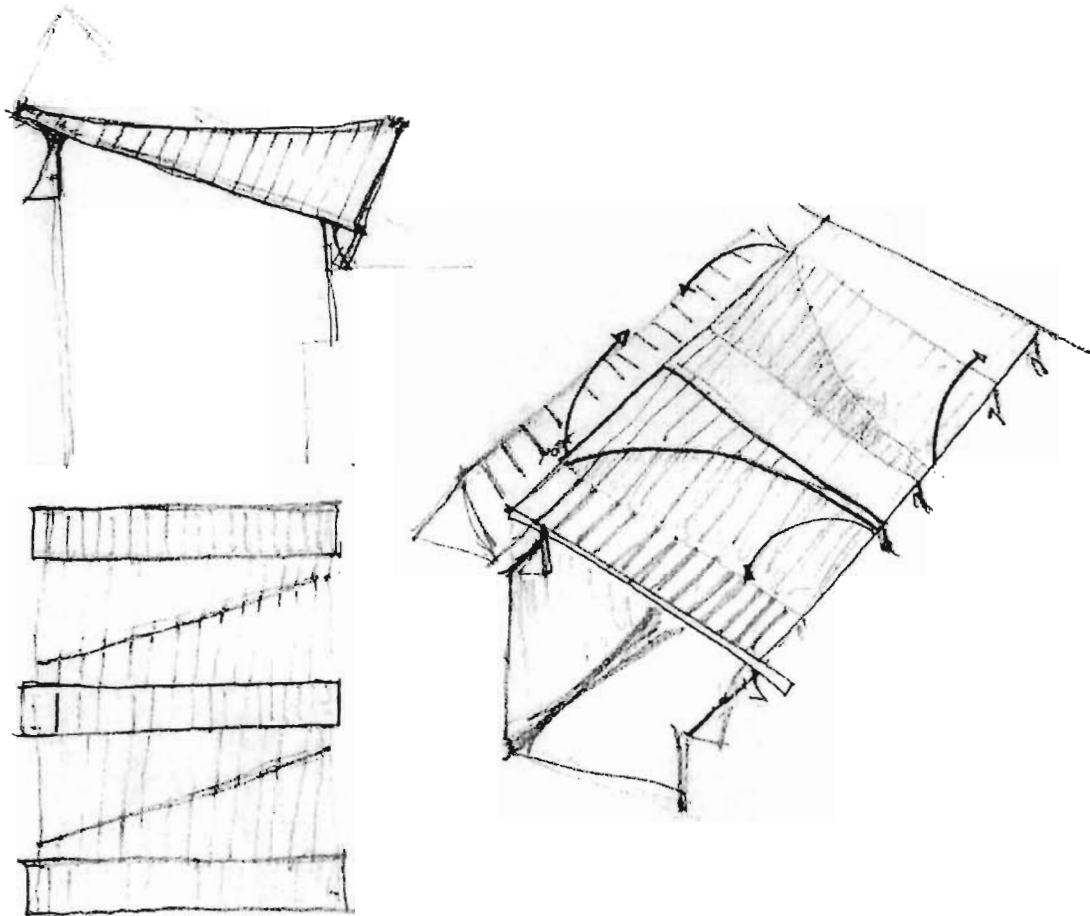


Figura 9. Primeros bocetos de la propuesta

Los primeros estudios sobre la generación geométrica de la cubierta incluyeron variaciones de la ubicación del eje de giro y la proporción de la forma con respecto al vano.

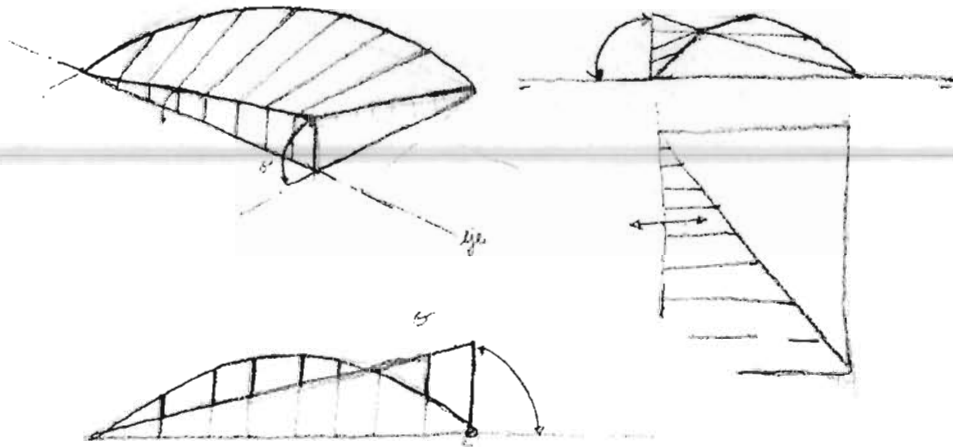


Figura 10. Estudio sobre el eje de giro de la cubierta

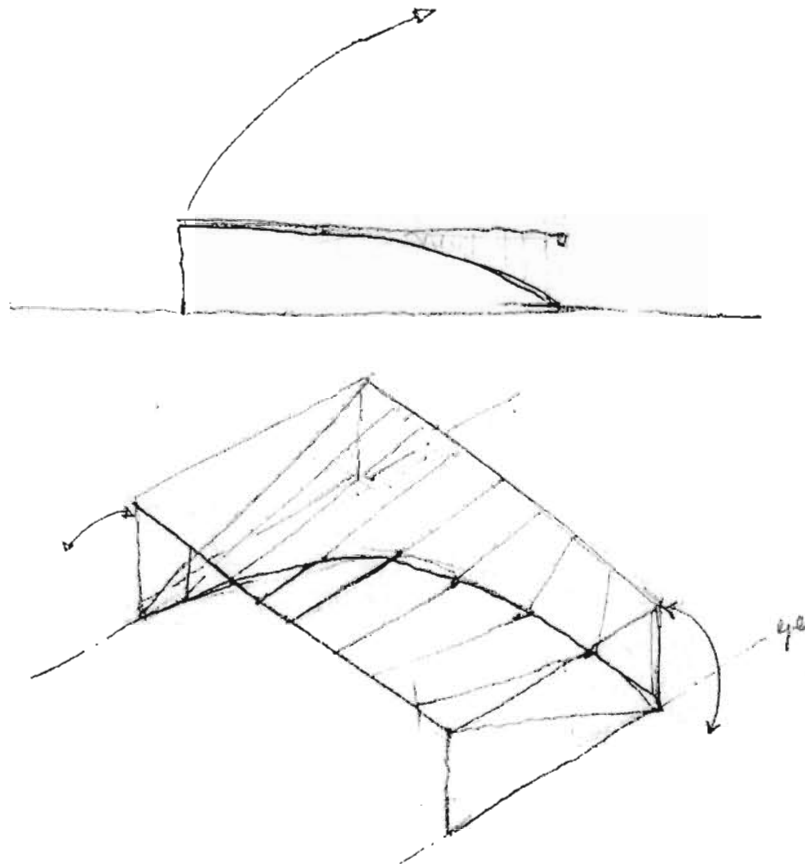


Figura 11. Estudio sobre la generación de la superficie

## Concepto formal

La superficie de la cubierta está generada por cuatro conoides. La conoide es una superficie anticlástica y no deberá ser confundida con un cono o superficie cónica. Esta superficie ha sido un recurso empleado por varios arquitectos, entre ellos esta Félix Candela en su proyecto para la Fábrica Fernández construida en San Bartolo, Estado de México en 1950 (fig. 12).

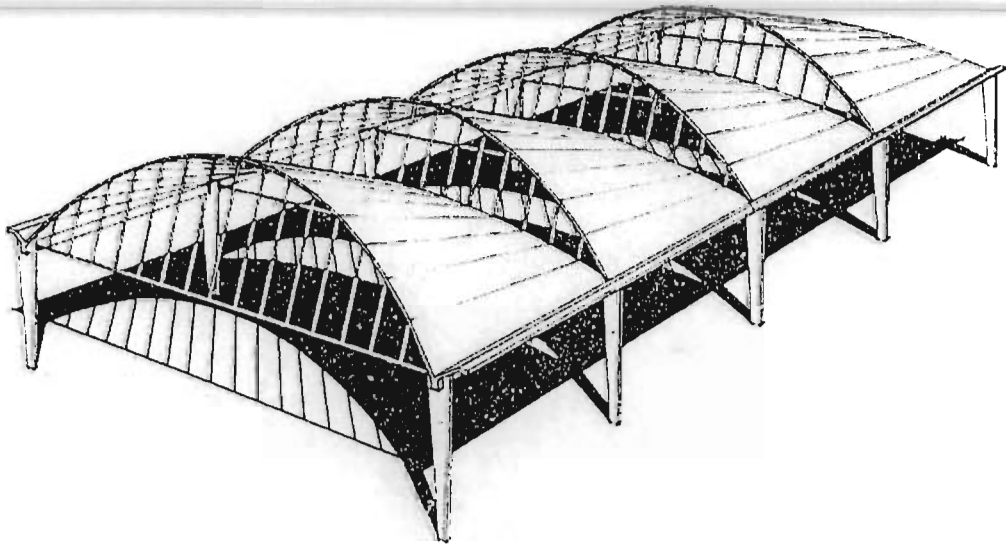


Figura 12. Cascarones con geometría de conoide, Félix Candela 1950

La regla de generación de la conoide es: Una recta y una curva que no sean coplanares como directrices y generatrices rectas que tocando en un punto a cada directriz, son paralelas a un plano director. En el ejemplo anterior, se podría creer que son cilindroides usando dos curvas como directrices sin embargo se trata de conoides cortadas por planos verticales, donde el resultado de la intersección genera las curvas bajas.

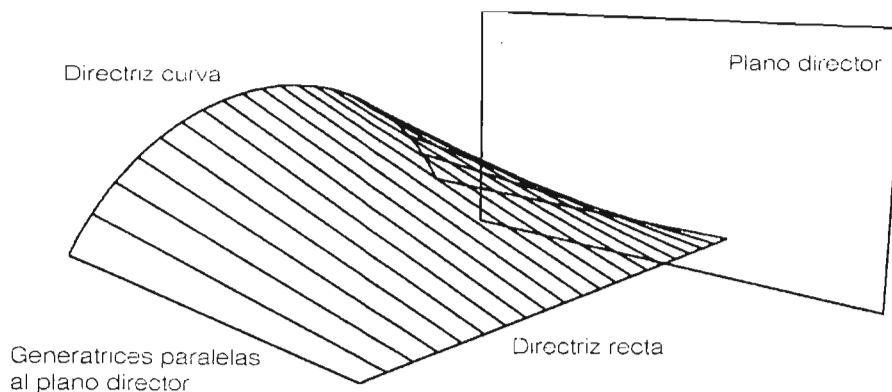


Figura 13. Generación de una conoide

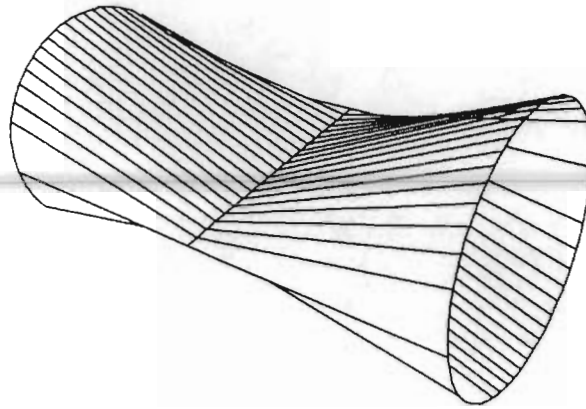


Figura 14. Conoide circular recta

Una conoide al igual que las superficies cónicas tiene dos mantos, y la clara diferencia es que lo que separa a un manto del otro en el caso de un cono se trata de un punto y en el caso de una conoide es una recta (fig. 14). Si a una conoide circular recta se le hacen cortes con planos paralelos a la directriz circular, el resultado de la intersección son elipses, figura que también aparece en un cono recto cuando se le secciona con planos que no sean paralelos al eje, a alguna generatriz o a la directriz circular.

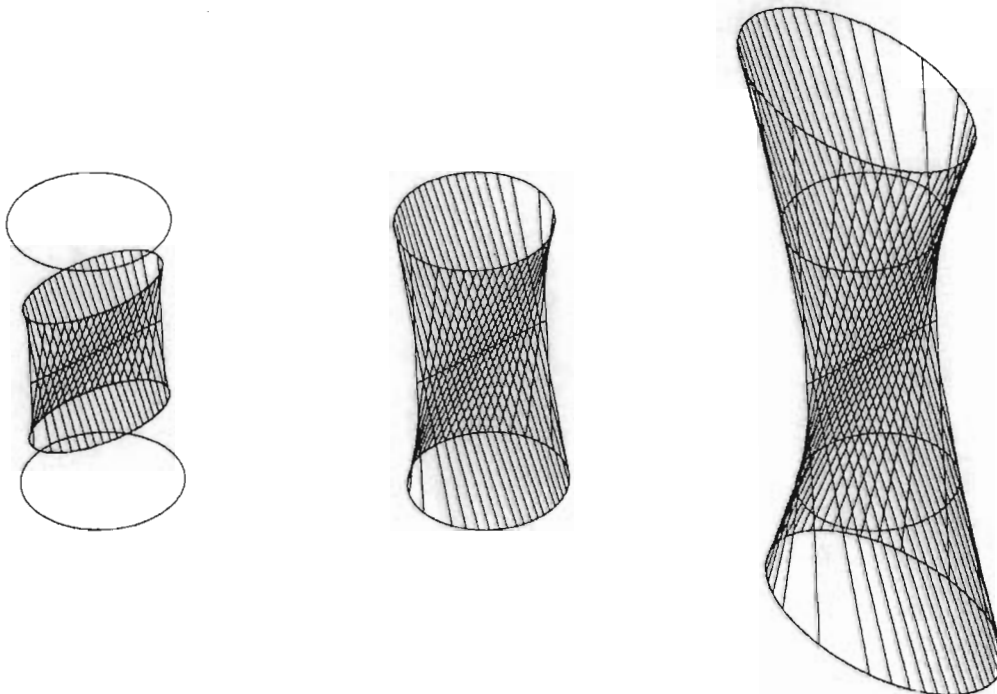


Figura 13. Elipses como resultado de la intersección con planos



La disposición de las conoides en mi propuesta de cubierta se debe a la idea de usar el menor número de pistones y reducir las torsiones y esfuerzos en las distintas posiciones del proceso de movimiento.

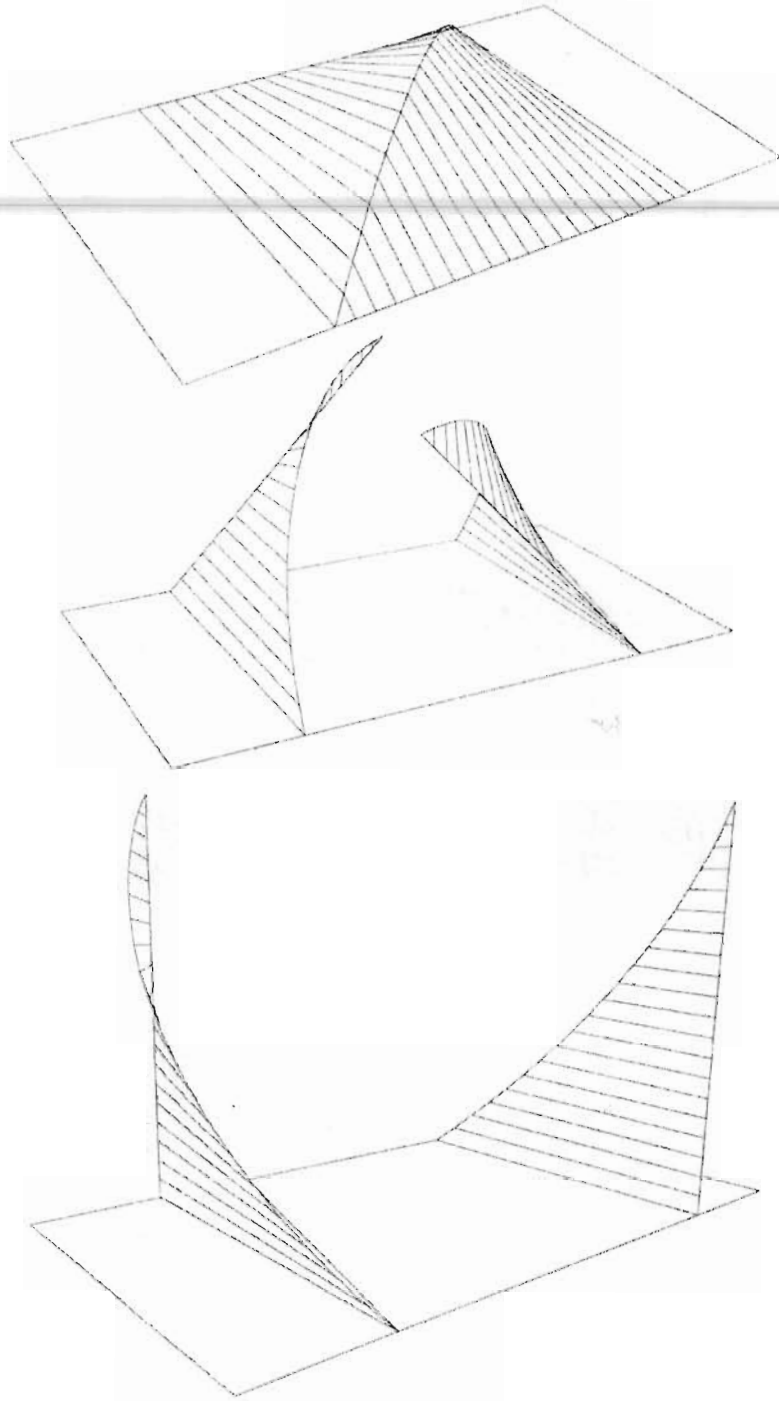


Figura 16. Concepto inicial de conoides

Originalmente se planteó el proyecto con un solo par de conoides pero por el claro y proporción de los gajos se llegó a la conclusión de reducir el tamaño usando 2 pares de gajos más pequeños.

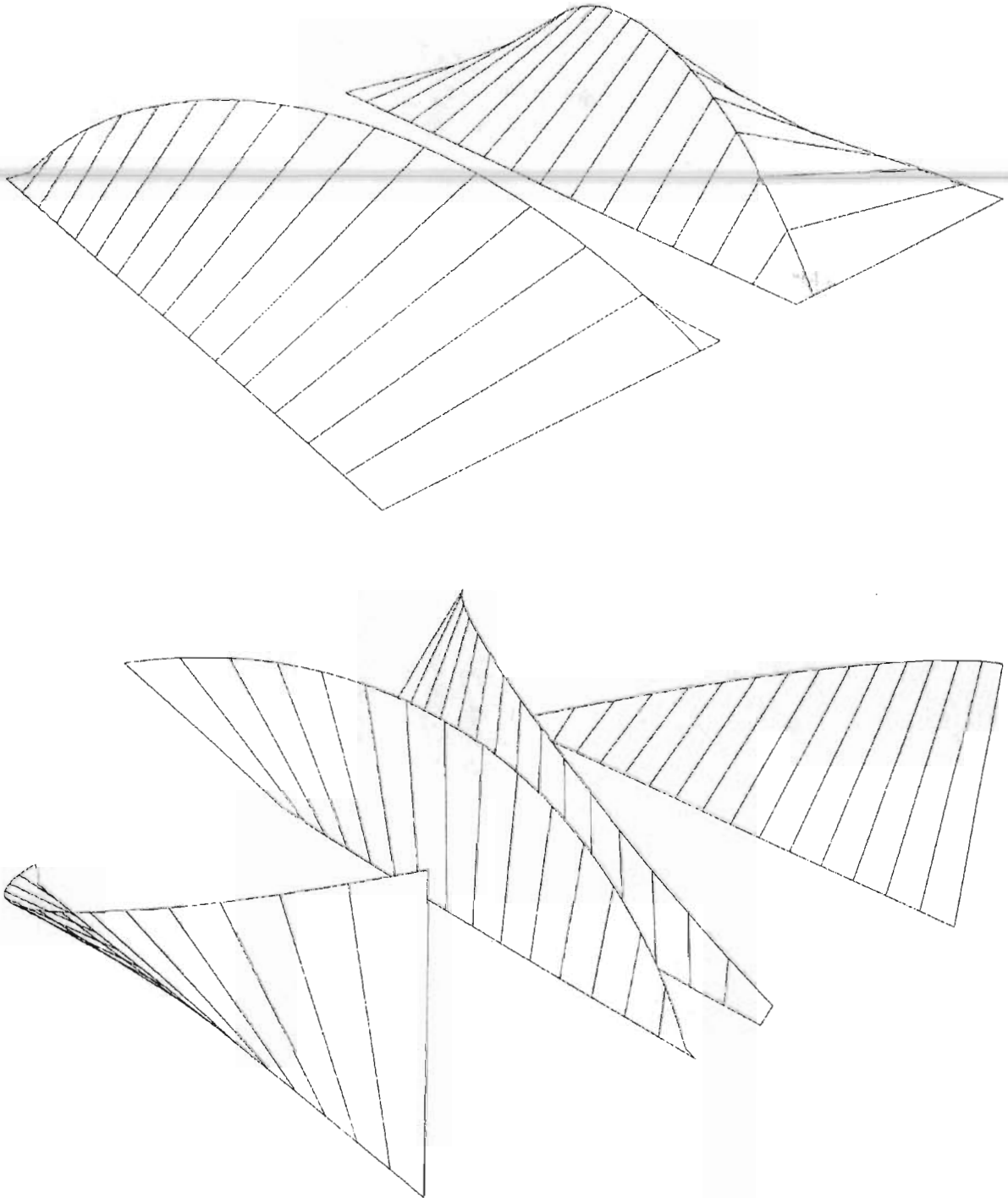


Figura 17. Concepto de forma final con cuatro conoides

## Concepto estructural

La estructura estará hecha de acero y cubierta con cristal esmerilado. Placas de acero de sección variable en forma de ménsulas saldrán del eje de giro de la cubierta, siendo ésta una de las directrices de la conoide hacia el arco que es la otra directriz. El arco, hecho también de placa de acero cambiara de sección igual que las ménsulas para aligerar la parte alta de la cubierta. Todo el domo descansará en una *cimentación* apoyada en la azotea de la academia, con el fin de distribuir las cargas y poderlas encausar adecuadamente a través de los muros de piedra.

A continuación presento el primer acercamiento a los perfiles propuestos en placa para el domo.

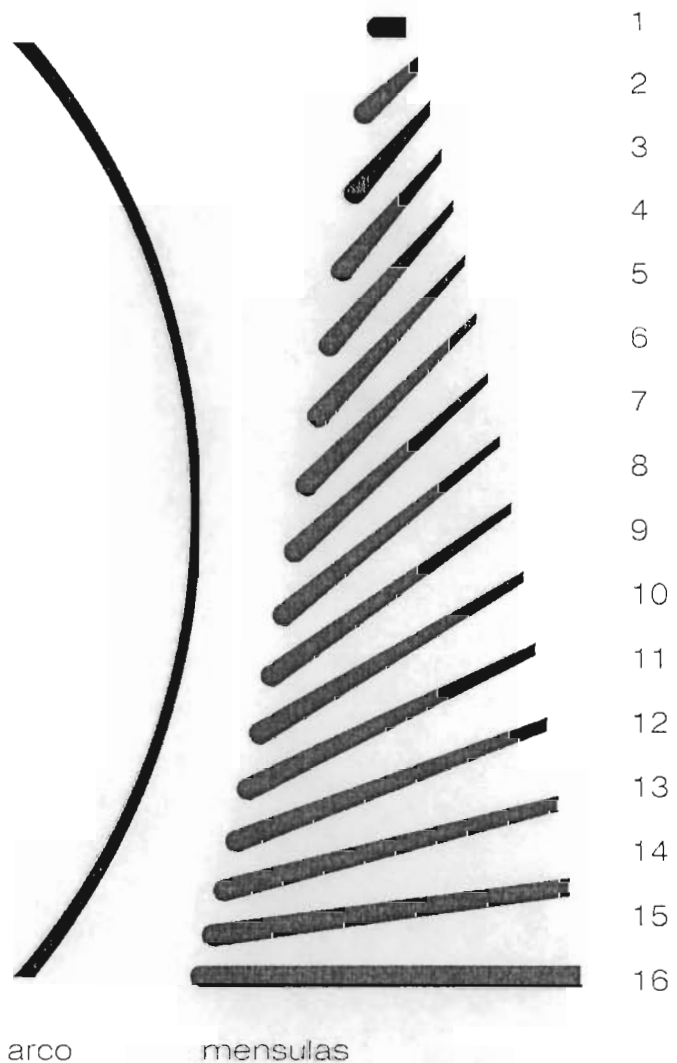


Figura 18. Despiece inicial de las ménsulas y la forma del arco

## Concepto mecánico

El diseño de la cubierta tomó desde un principio en cuenta el concepto mecánico y se construyeron algunos modelos de prueba (fig. 20) para definir el mecanismo adecuado, el sistema al que llegué consiste en cuatro correderas comunes con cuatro pistones que mueven las conoides (fig. 19), de esta forma se pretende lograr un movimiento suave y que no transmita vibraciones al edificio.

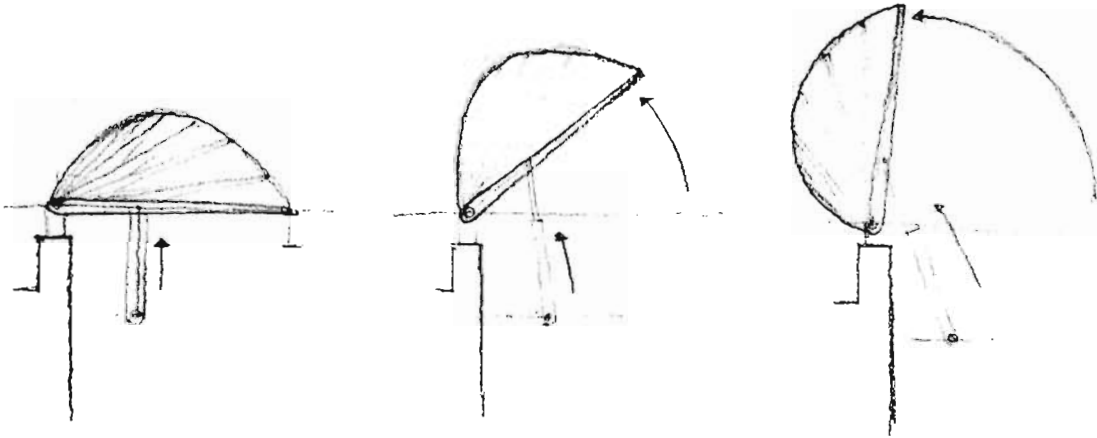
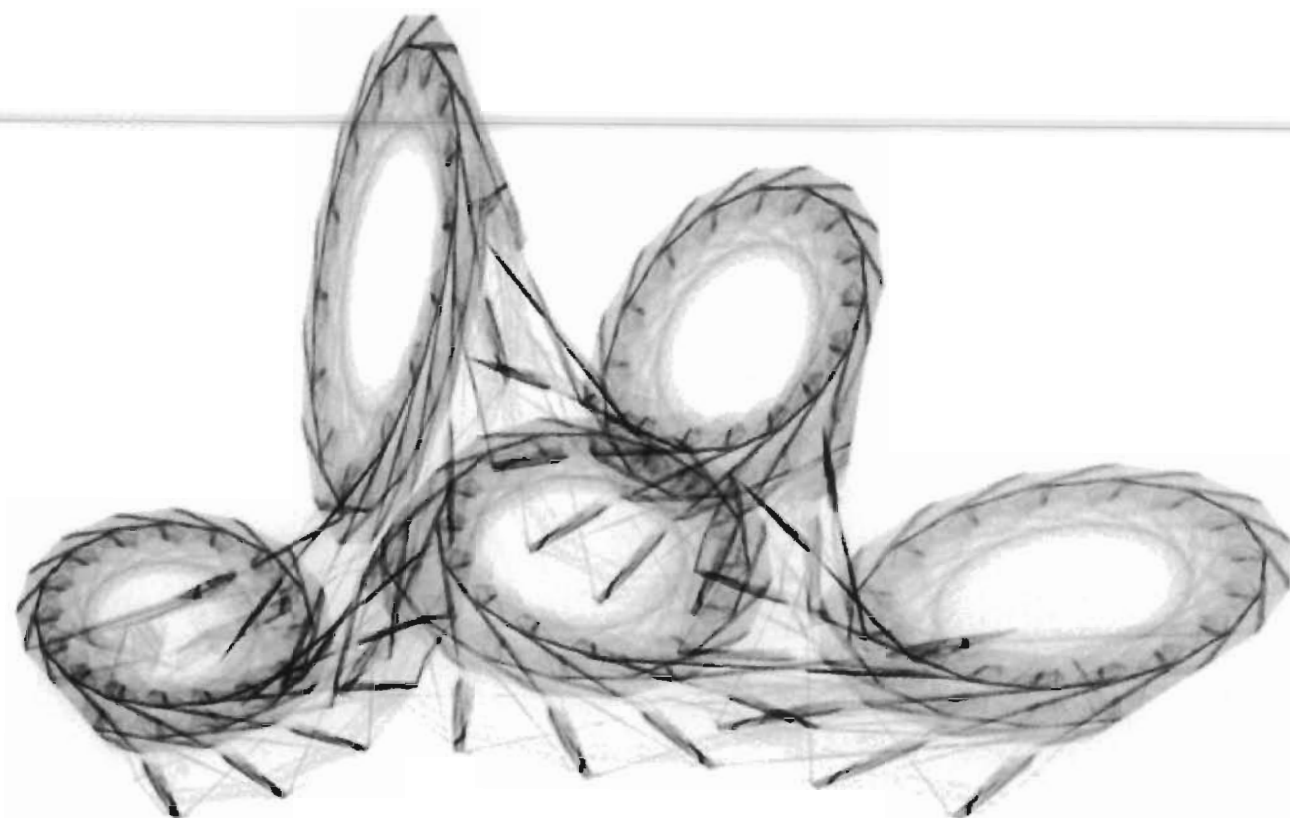


Figura 19. Concepto de mecánico



# Capítulo 6

Proyecto arquitectónico

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS



**NOTAS**  
 1. LAS MEDIDAS EN PULGAS SE DEBE MANTENER EN TODOS LOS CASOS. LAS MEDIDAS EN METROS SE DEBE MANTENER EN TODOS LOS CASOS. LAS MEDIDAS EN METROS SE DEBE MANTENER EN TODOS LOS CASOS. LAS MEDIDAS EN METROS SE DEBE MANTENER EN TODOS LOS CASOS.

**PROYECTO:**  
 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE EDIFICACIÓN TRANSFORMABLE EN UN ESPACIO DE USO MULTIFUNCIÓN.

**UBICACIÓN:**  
 Academia de San Carlos

**PLANO:**  
 PLANTA DE CONJUNTO

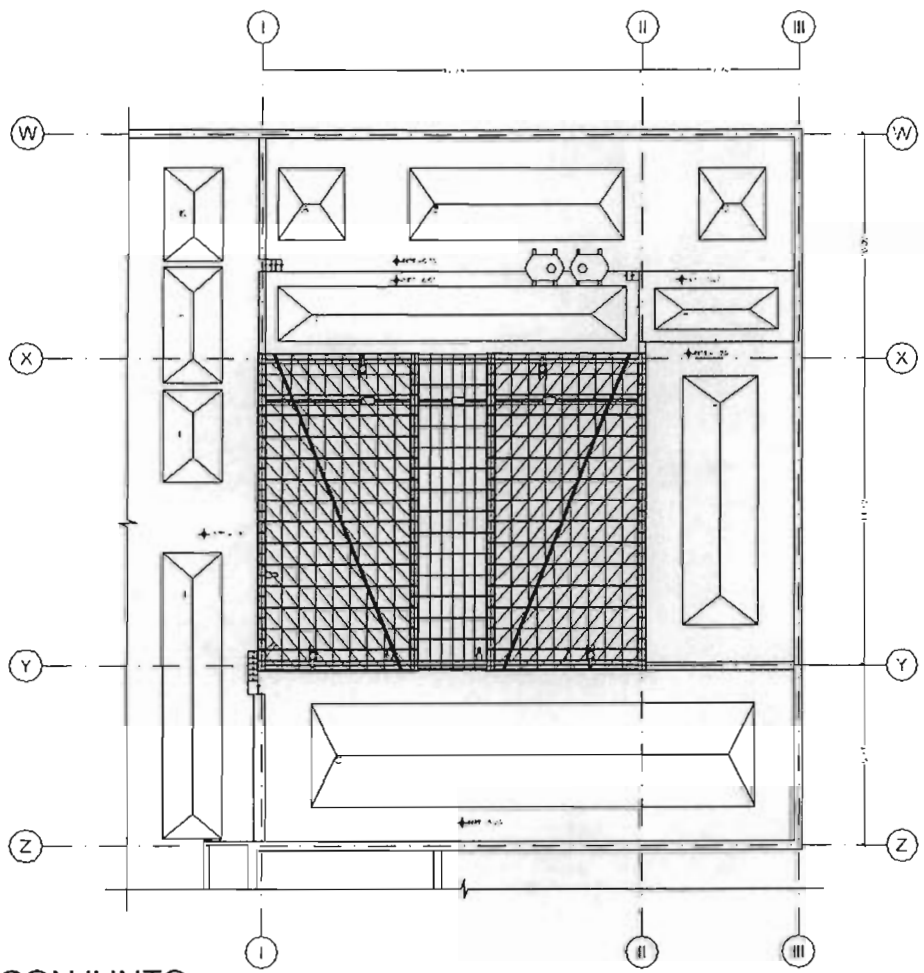
**DISEÑO:**  
 C.Z.G.

**FECHA:**  
 Mayo 2003

**L.S.C.:**  
 17/03

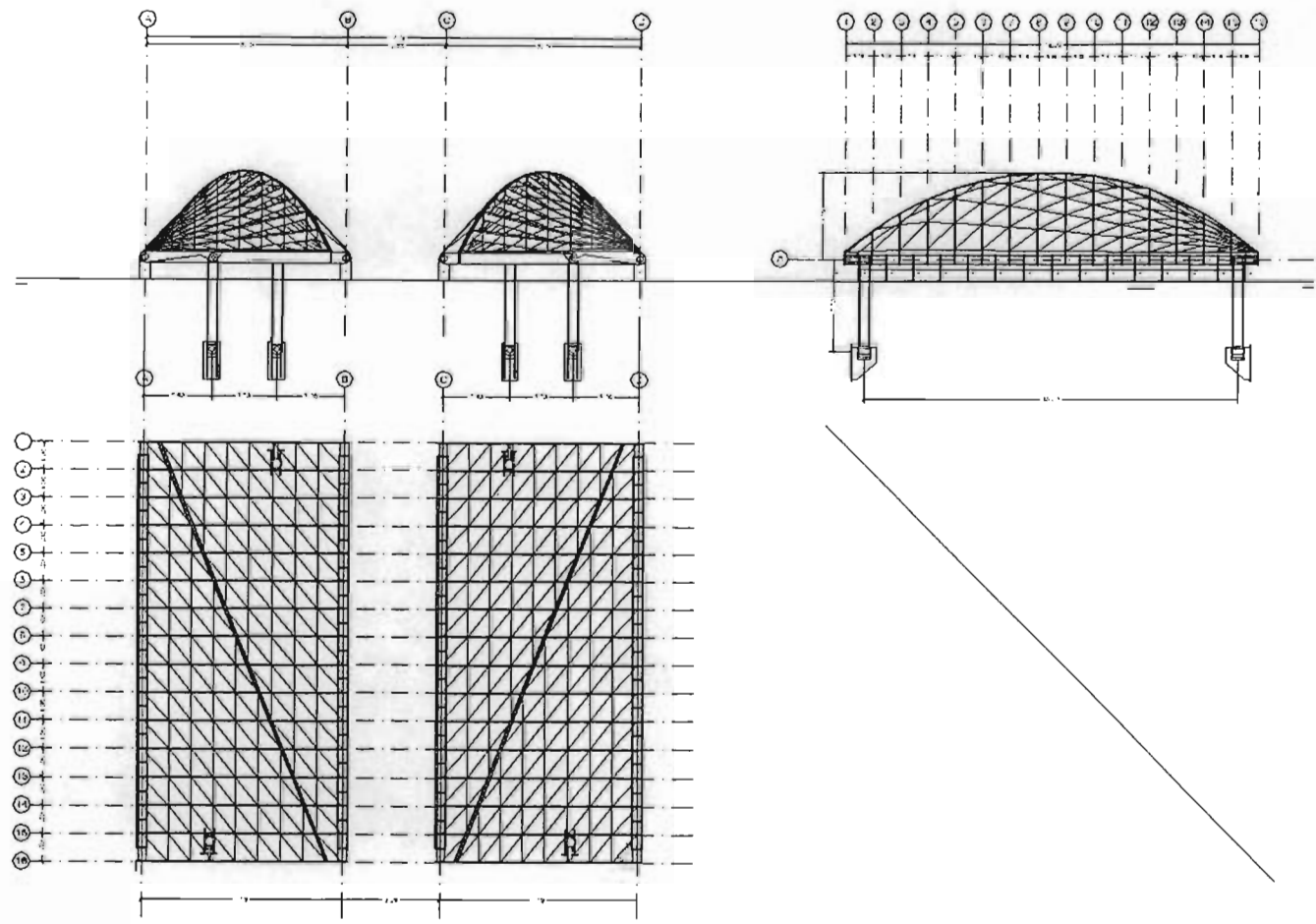
**CLAVE:**

**A-01**



PLANTA DE CONJUNTO  
 ESC. 1:100

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS



POSICIÓN CERRADA  
 ESC. 1:75

**NOTAS**  
 LAS CUBIERTAS CONVERTIBLES SON SISTEMAS ESTRUCTURALES  
 TRIDIMENSIONALES QUE SE ADAPTAN A DIFERENTES  
 CONFIGURACIONES DE USO Y CARGAS. ESTOS SISTEMAS  
 DEBEN SER DISEÑADOS PARA SU USO EN LAS DIFERENTES  
 CONFIGURACIONES EN LAS QUE SE VAN A UTILIZAR.  
 POR ESO, EN ESTOS DISEÑOS SE HA CONSIDERADO UN  
 ESTADO DE CARGA QUE CORRESPONDE A LA POSICIÓN  
 DE CERRADA.

**PROYECTO:**  
 PAPIET IN ARSENAL  
 SISTEMA DE PLIEGUE EN DOME CONTE PAPIET  
 DE CALIBRÓN FERRONIER

**Domo convertible:**  
 Academia de San Carlos

**UBICACIÓN:**  
 Av. Insurgentes Sur, México, D.F.

**PLANO:**  
 POSICIÓN CERRADA

**DIBUJÓ:** ELVISEU  
**CZG**

**FECHA:**  
 México 2008

**LSO:** 1:75  
**COPIAS:** 11

**CLAVE:**

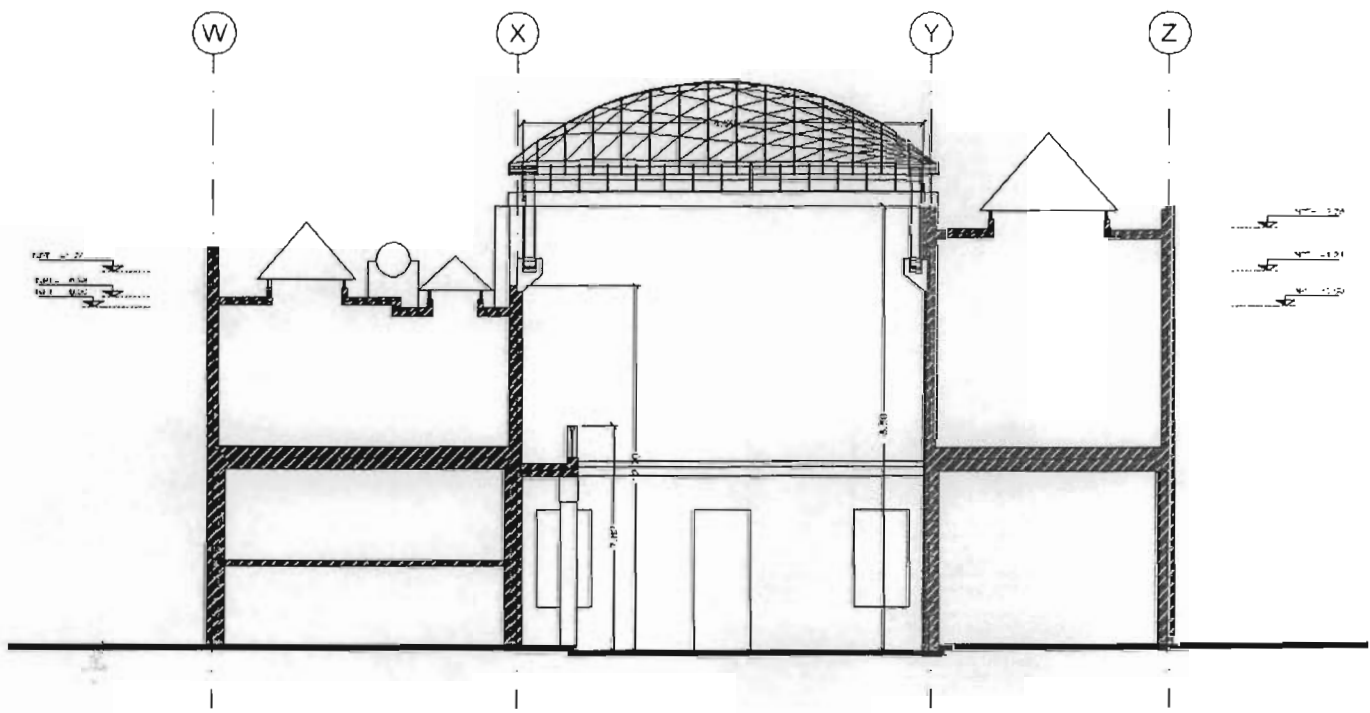
A-02







LABORATORIO DE ESTRUCTURAS



**NOTAS:**  
 1. EL DOMO SE PUEDE DESMONTAR EN CUALQUIER MOMENTO Y EL ESPACIO INTERNO TRANSFORMAR EN SALA DE REUNIONES, SALA DE TRABAJO, SALA DE CLASES, ETC. EN CUALQUIER MOMENTO DE SU VIDA ÚTIL. EL DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS EN LA PARTE DEL DISEÑO DE PROYECTO SE HA HECHO CONSIDERANDO LA POSIBILIDAD DE QUE EL DOMO SE PUEDE DESMONTAR EN CUALQUIER MOMENTO DE SU VIDA ÚTIL.

**PROYECTO:**  
 PAPIET IV AMAROS  
 Sistema de plegables para cubrir plazas de estacionamiento.

**UBICACIÓN:**  
 Av. Amador 27, Centro Histórico, Ciudad de Guatemala.

**PLANO:**  
 CORTE LONGITUDINAL

**DIBUJÓ:** C.Z.G. **REVISÓ:**

**FECHA:**  
 Mayo 2008

**ESCALA:** 1:75 **COTAS:** M

**CLAVE:**  
**A-05**

CORTE LONGITUDINAL  
 ESC. 1:75



LABORATORIO DE ESTRUCTURAS



DESPIECE VIDRIO  
S/E



NOTAS:

Las dimensiones de los paneles de vidrio se refieren a las dimensiones reales de los paneles de vidrio. Las dimensiones de los paneles de vidrio se refieren a las dimensiones reales de los paneles de vidrio. Las dimensiones de los paneles de vidrio se refieren a las dimensiones reales de los paneles de vidrio.

PROYECTO:  
PAPIET IV 404903  
Sistema de plegado de paneles de vidrio de edificios residenciales

Domo convertible,  
Academia de San Carlos

UBICACIÓN:  
Avenida 457, Centro Histórico, Ciudad de México

PLANO:  
VIDRIOS

DISEÑO: CZG	PLUNO: .
----------------	-------------

FECHA:  
MAYO DE 2008

LEGO: 15	CÓPIAS: 11
-------------	---------------

CLAVE:

V-01

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS



**NOTAS**  
 Este documento es propiedad de la Universidad de Chile y no puede ser reproducido ni utilizado sin el consentimiento expreso de la Universidad de Chile. Toda infracción será sancionada de acuerdo a lo establecido en el Reglamento de Propiedad Intelectual de la Universidad de Chile.

**PROYECTO:**  
 PAPIET IN 454803  
 Sistema de puentes en para cubrir patios de edificios históricos

**Ubicación:**  
 Domos convertibles  
 Academia de San Carlos

**UBICACIÓN:**  
 Alameda 225, Santiago, Chile

**PLANO:**  
**VIDRIOS**

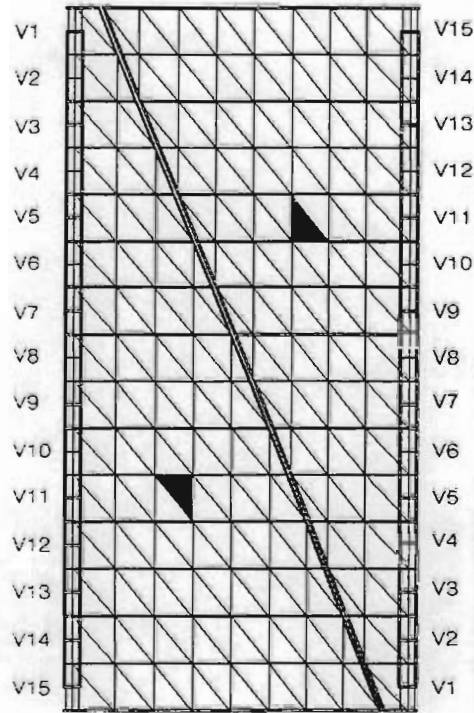
**DISEÑO:** CEG **REVISÓ:**

**FECHA:** 14 de Julio 2005

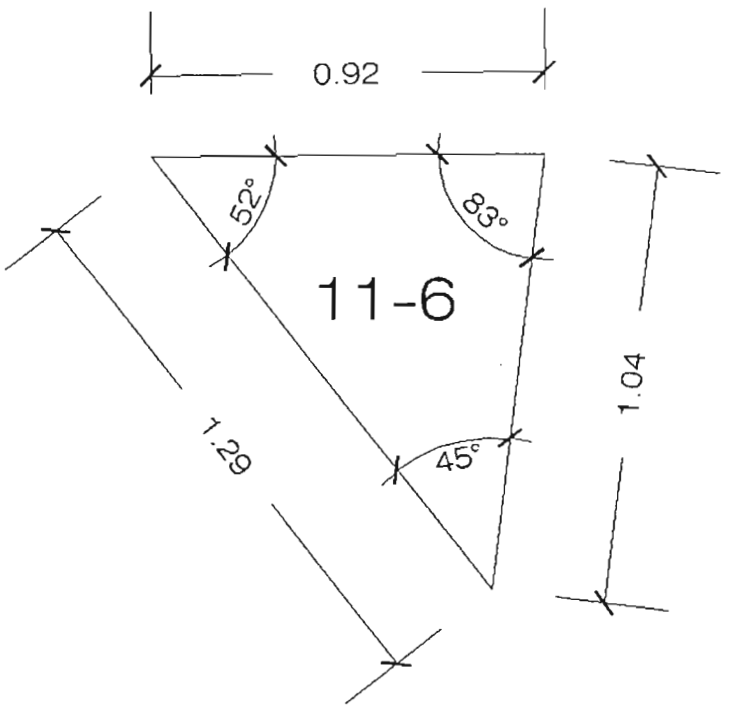
**LSC:** **COTAS:**

**CLAVE:**

**V-11-06**

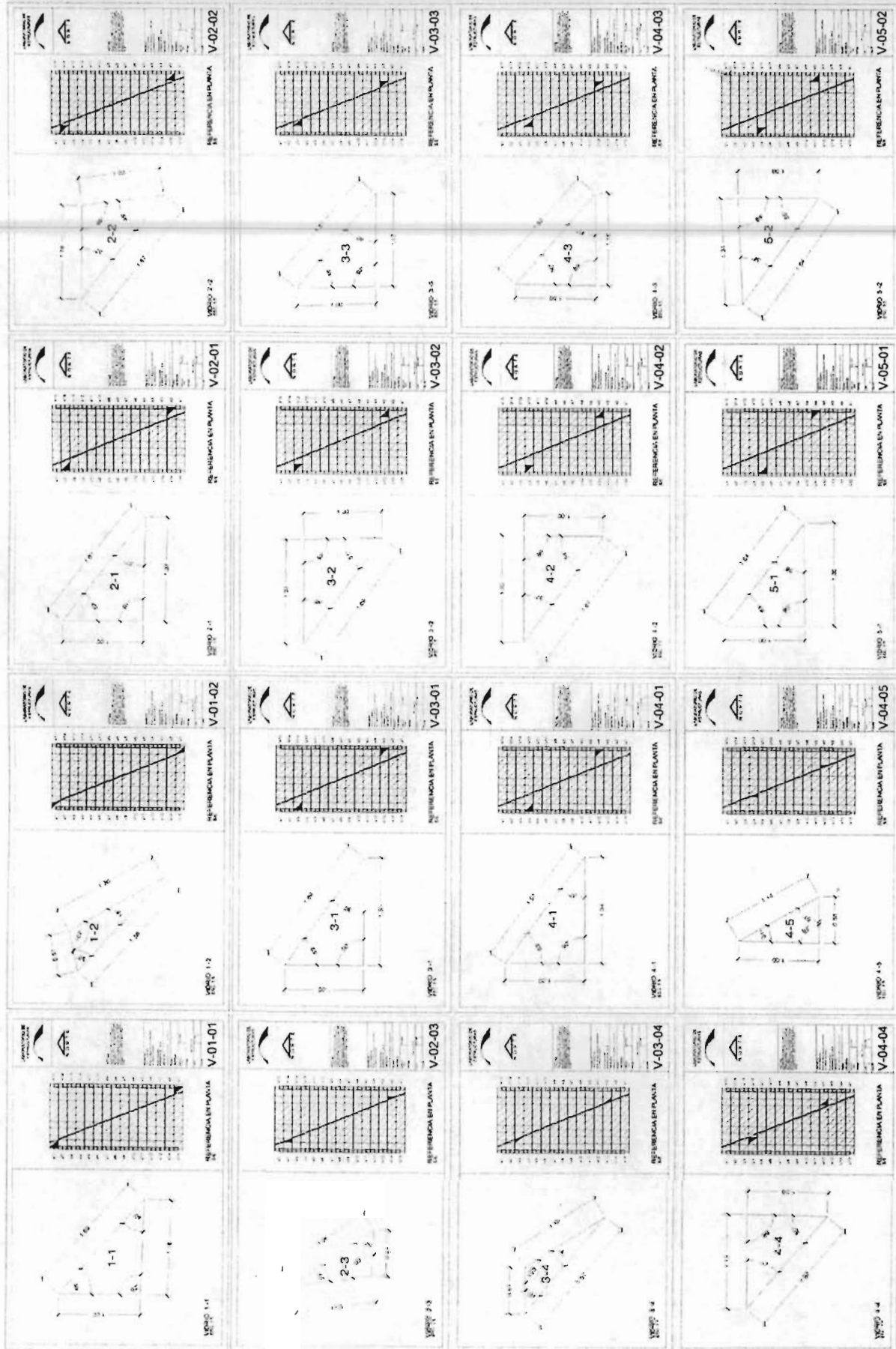


REFERENCIA EN PLANTA  
 S/E

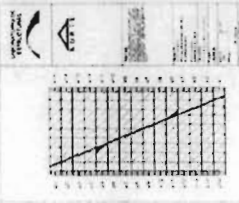
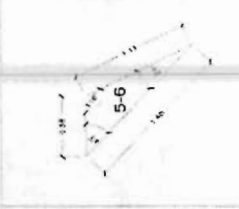
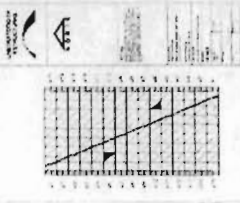
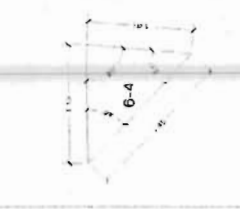
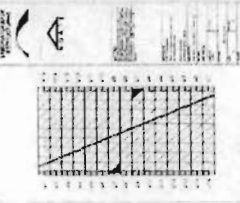

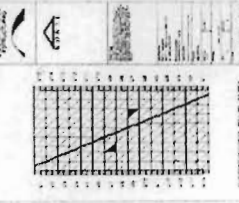

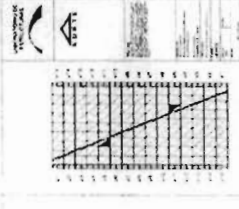

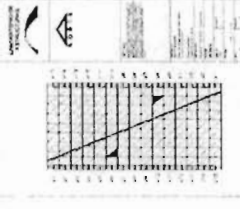

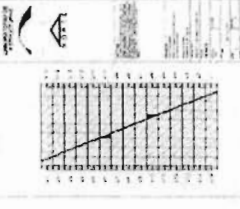

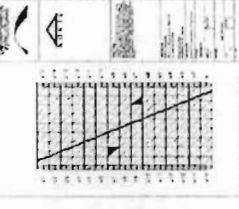

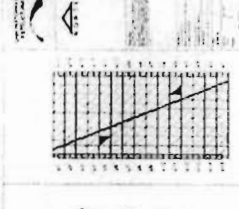

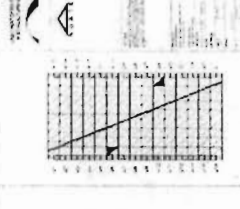

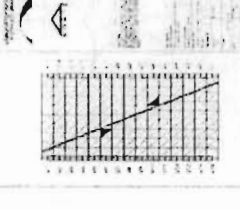

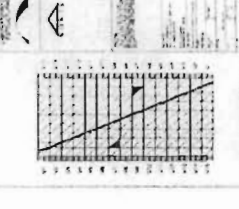
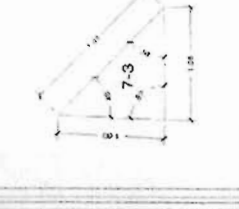
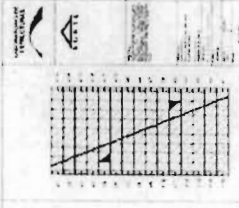

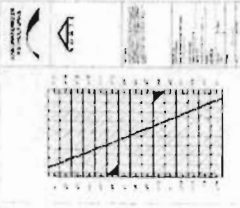

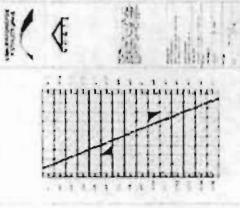

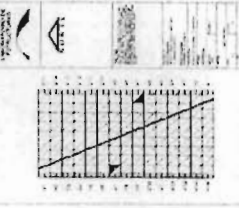



VIDRIO 11-6  
 ESC. 1:5

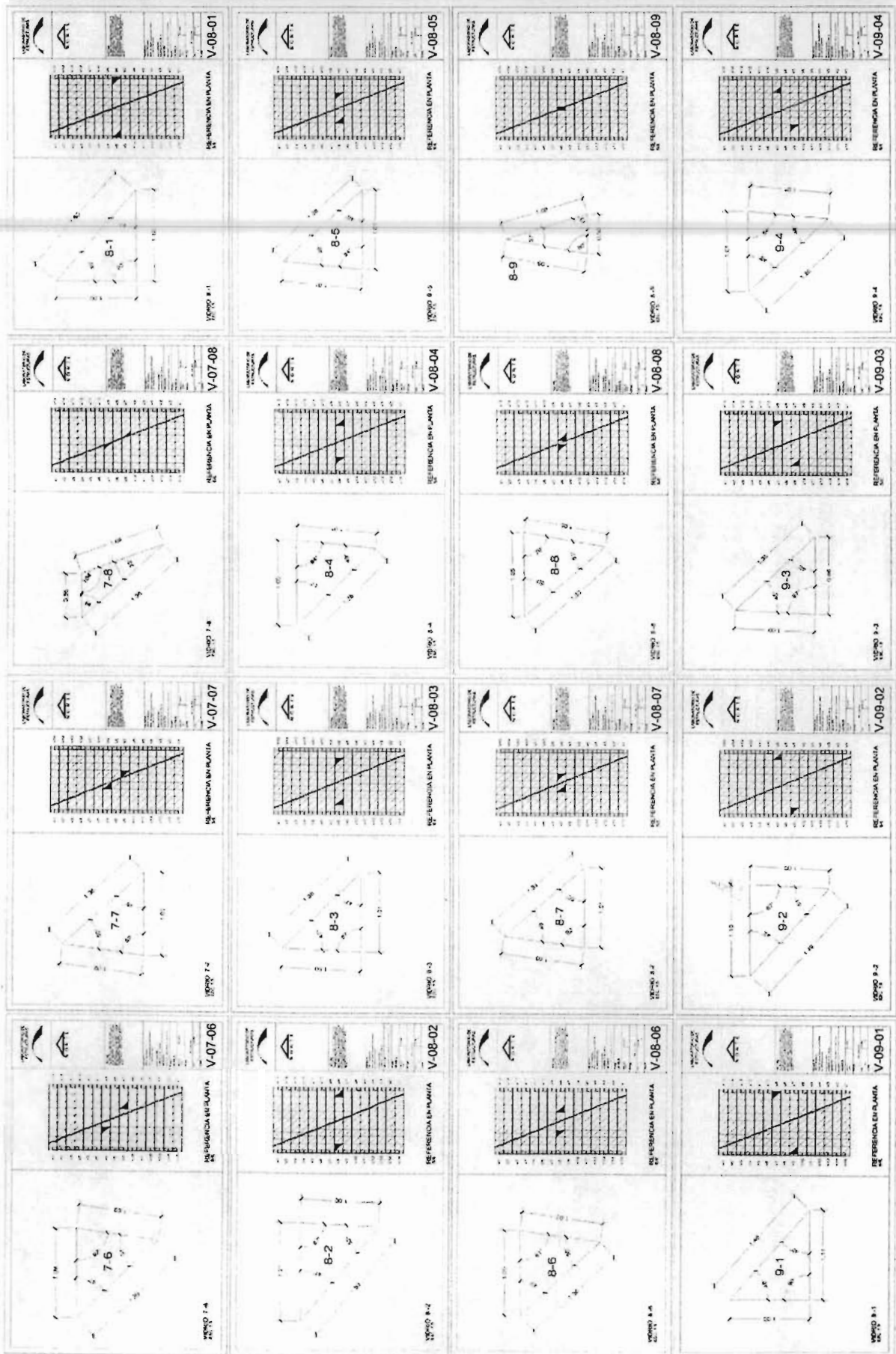
Planos de taller para la fabricación de los vidrios



Planos de taller para la fabricación de los vidrios

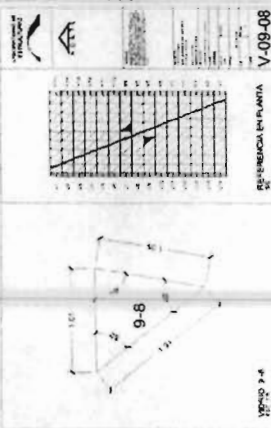
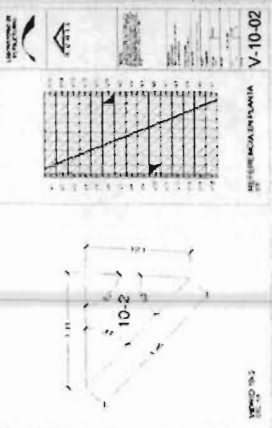
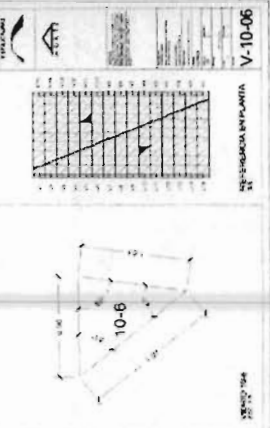
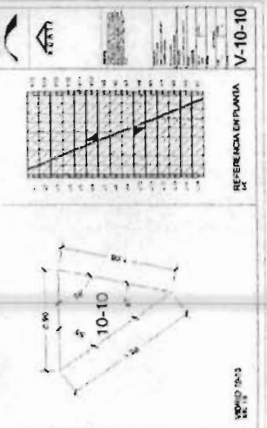
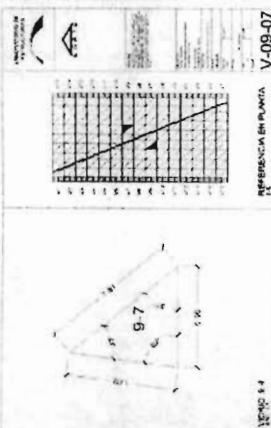
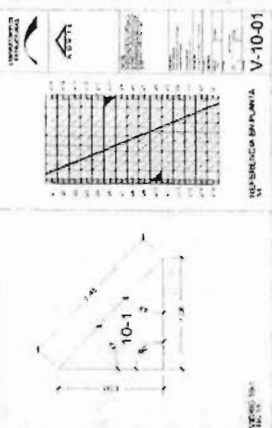
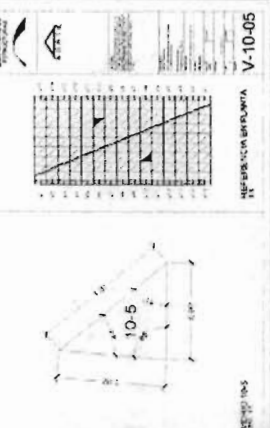
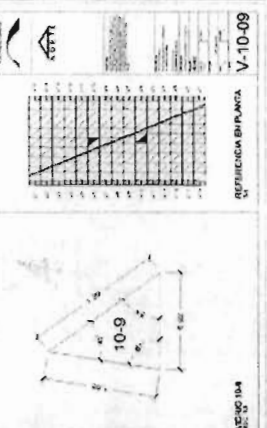
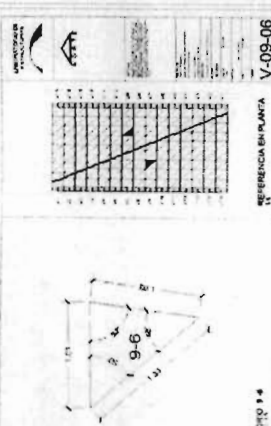
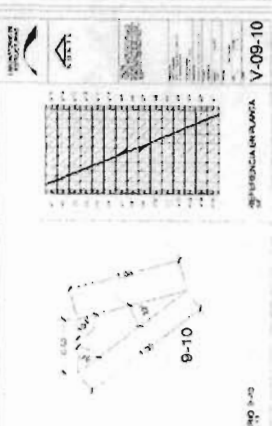
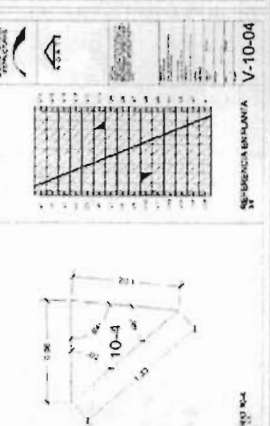
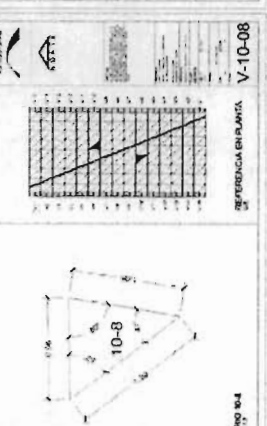
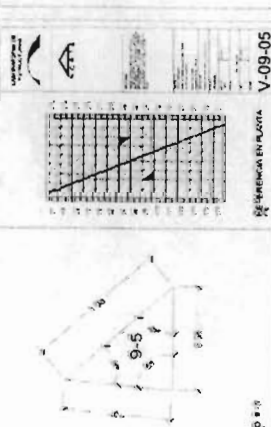
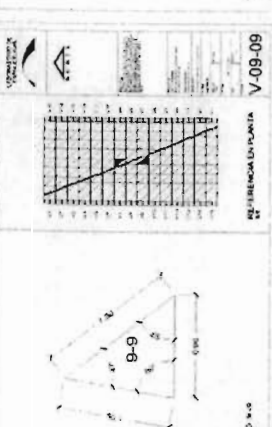
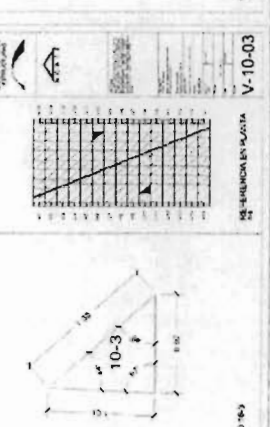
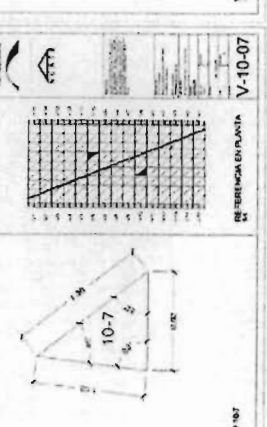
 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-05-06</p>	 <p>NÚMERO 5-6</p>	 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-06-04</p>	 <p>NÚMERO 6-4</p>	 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-07-01</p>	 <p>NÚMERO 7-1</p>	 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-07-05</p>	 <p>NÚMERO 7-5</p>
 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-05-05</p>	 <p>NÚMERO 5-5</p>	 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-06-03</p>	 <p>NÚMERO 6-3</p>	 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-06-07</p>	 <p>NÚMERO 6-7</p>	 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-07-04</p>	 <p>NÚMERO 7-4</p>
 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-05-04</p>	 <p>NÚMERO 5-4</p>	 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-06-02</p>	 <p>NÚMERO 6-2</p>	 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-06-06</p>	 <p>NÚMERO 6-6</p>	 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-07-03</p>	 <p>NÚMERO 7-3</p>
 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-05-03</p>	 <p>NÚMERO 5-3</p>	 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-06-01</p>	 <p>NÚMERO 6-1</p>	 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-06-05</p>	 <p>NÚMERO 6-5</p>	 <p>REFERENCIA EN PLANTA</p> <p>V-07-02</p>	 <p>NÚMERO 7-2</p>

Planos de taller para la fabricación de los vidrios

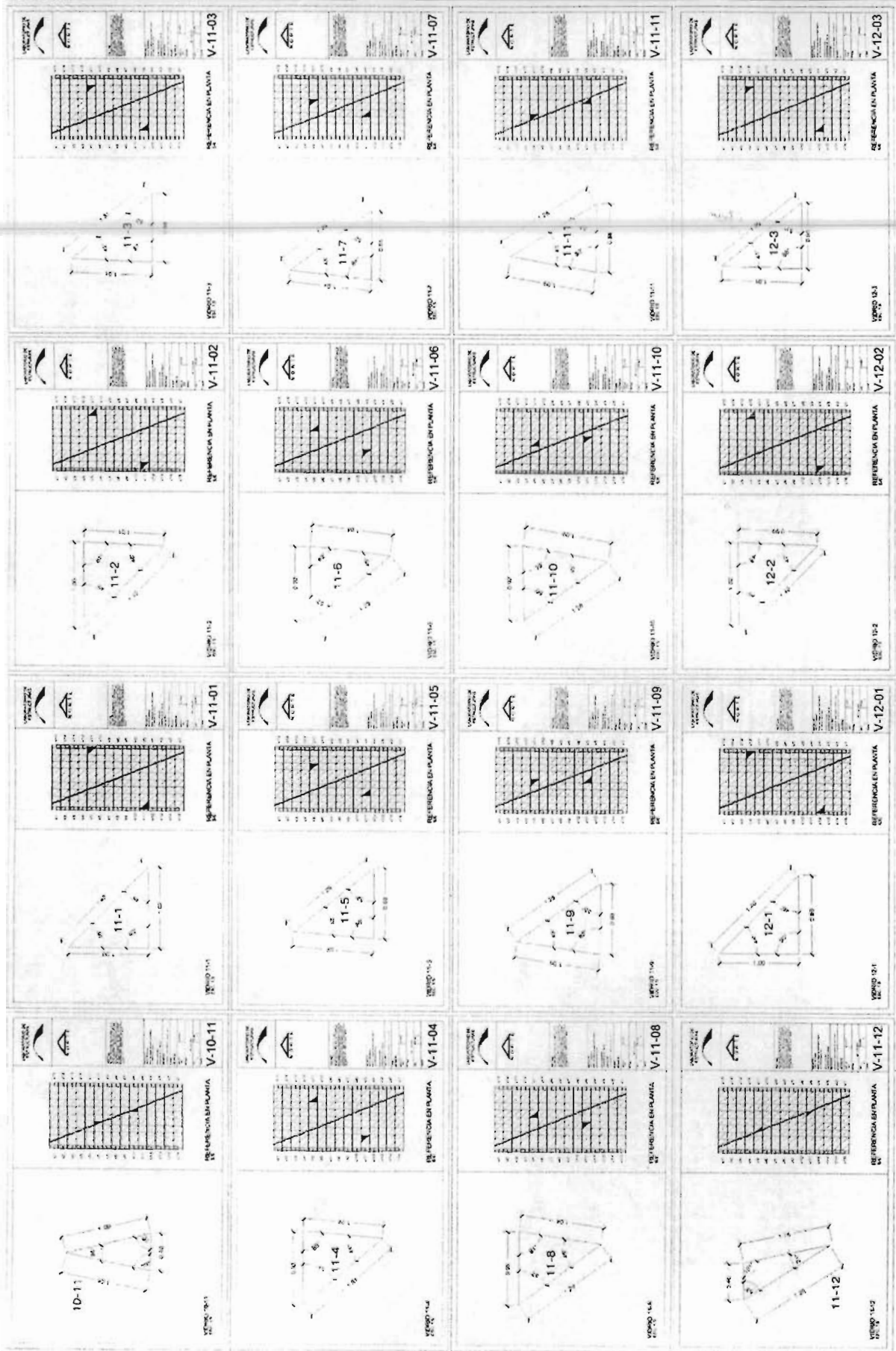




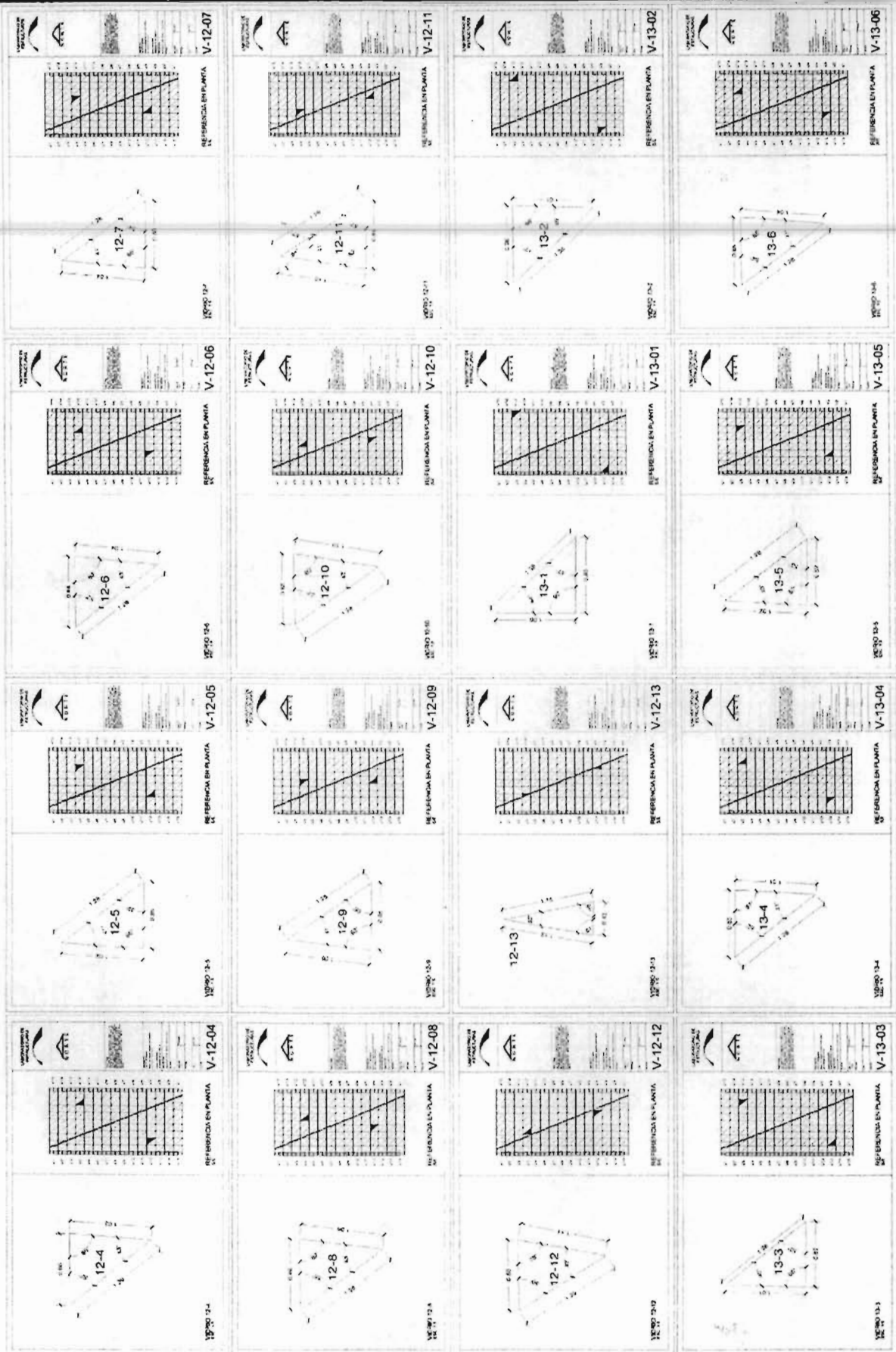
Planos de taller para la fabricación de los vidrios

 <p>V-09-06 REFERENCIA EN PLANTA V-09-06 V-09-06</p>	 <p>V-10-02 REFERENCIA EN PLANTA V-10-02 V-10-02</p>	 <p>V-10-06 REFERENCIA EN PLANTA V-10-06 V-10-06</p>	 <p>V-10-10 REFERENCIA EN PLANTA V-10-10 V-10-10</p>
 <p>V-09-07 REFERENCIA EN PLANTA V-09-07 V-09-07</p>	 <p>V-10-01 REFERENCIA EN PLANTA V-10-01 V-10-01</p>	 <p>V-10-05 REFERENCIA EN PLANTA V-10-05 V-10-05</p>	 <p>V-10-09 REFERENCIA EN PLANTA V-10-09 V-10-09</p>
 <p>V-09-08 REFERENCIA EN PLANTA V-09-08 V-09-08</p>	 <p>V-09-10 REFERENCIA EN PLANTA V-09-10 V-09-10</p>	 <p>V-10-04 REFERENCIA EN PLANTA V-10-04 V-10-04</p>	 <p>V-10-08 REFERENCIA EN PLANTA V-10-08 V-10-08</p>
 <p>V-09-05 REFERENCIA EN PLANTA V-09-05 V-09-05</p>	 <p>V-09-09 REFERENCIA EN PLANTA V-09-09 V-09-09</p>	 <p>V-10-03 REFERENCIA EN PLANTA V-10-03 V-10-03</p>	 <p>V-10-07 REFERENCIA EN PLANTA V-10-07 V-10-07</p>

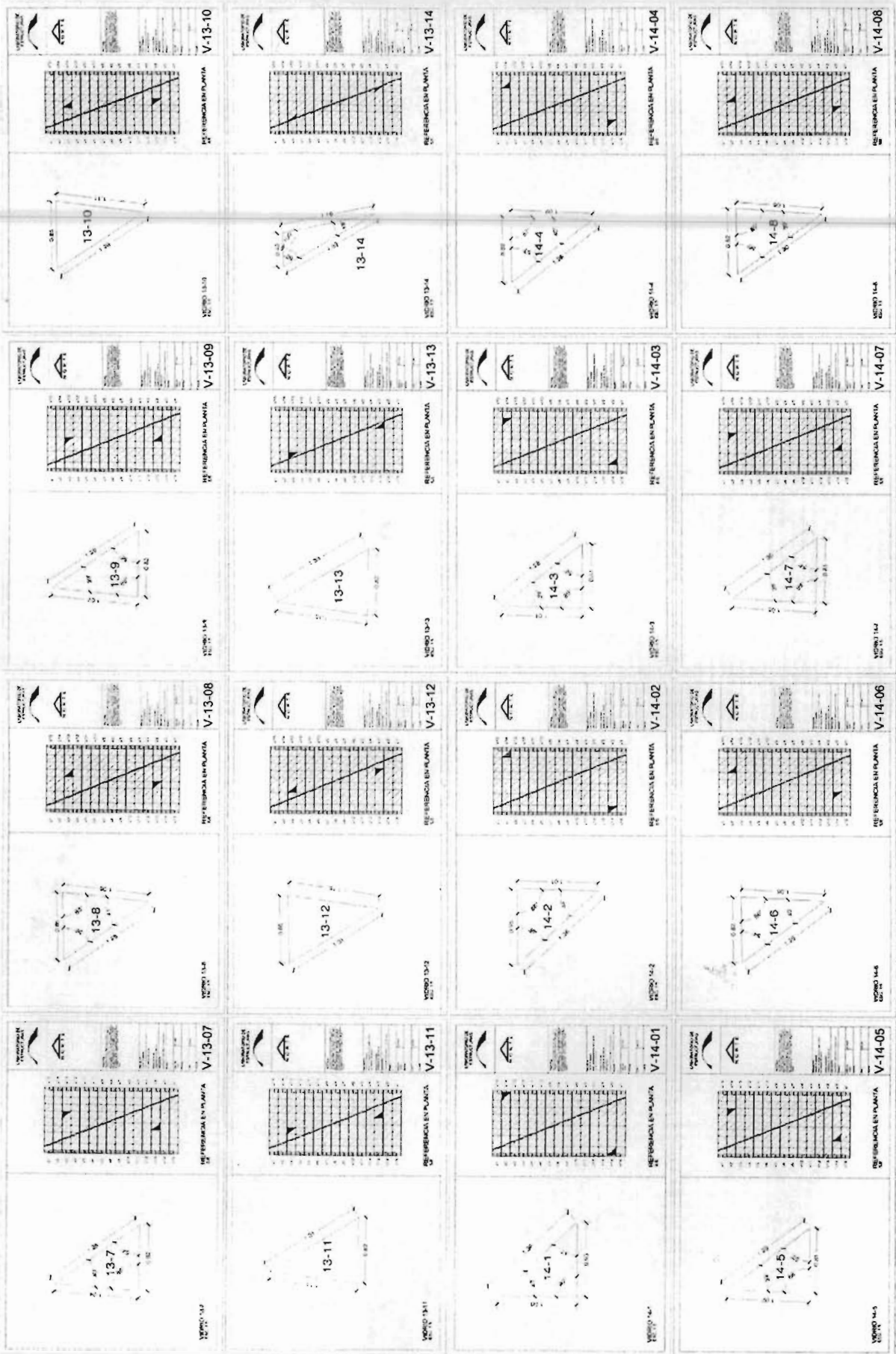
Planos de taller para la fabricación de los vidrios



Planos de taller para la fabricación de los vidrios



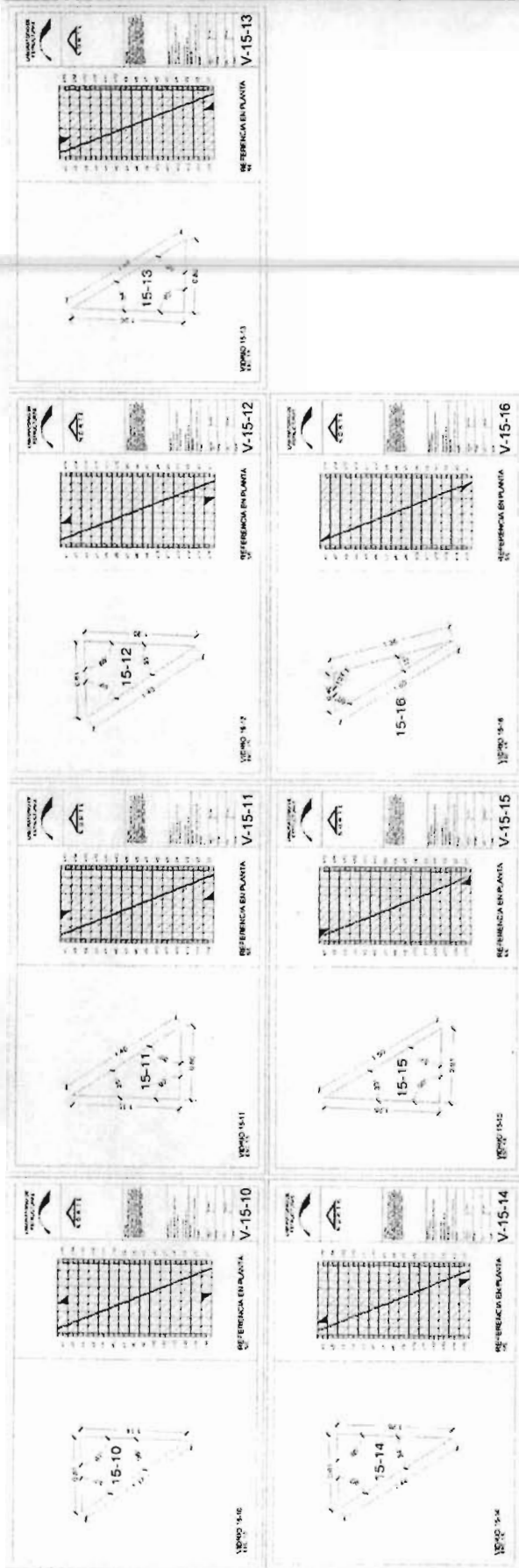
Planos de taller para la fabricación de los vidrios



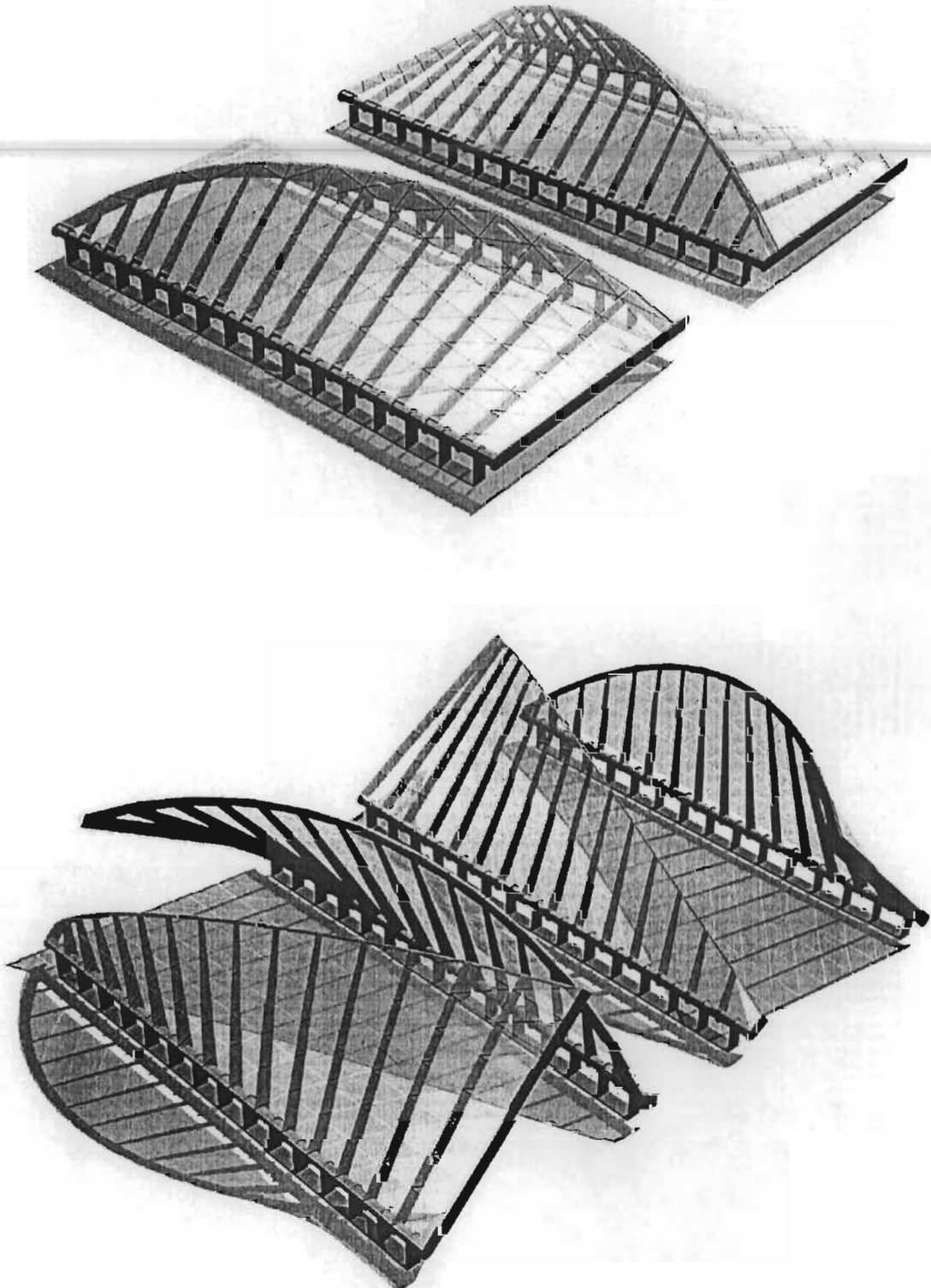
Planos de taller para la fabricación de los vidrios

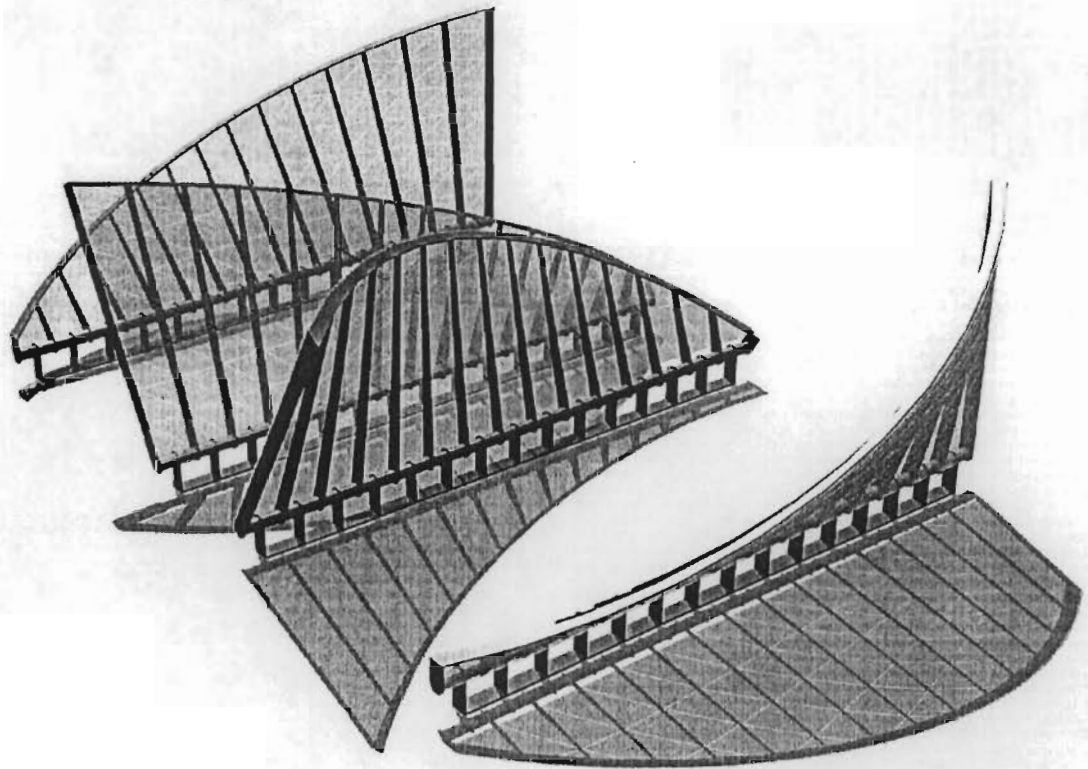
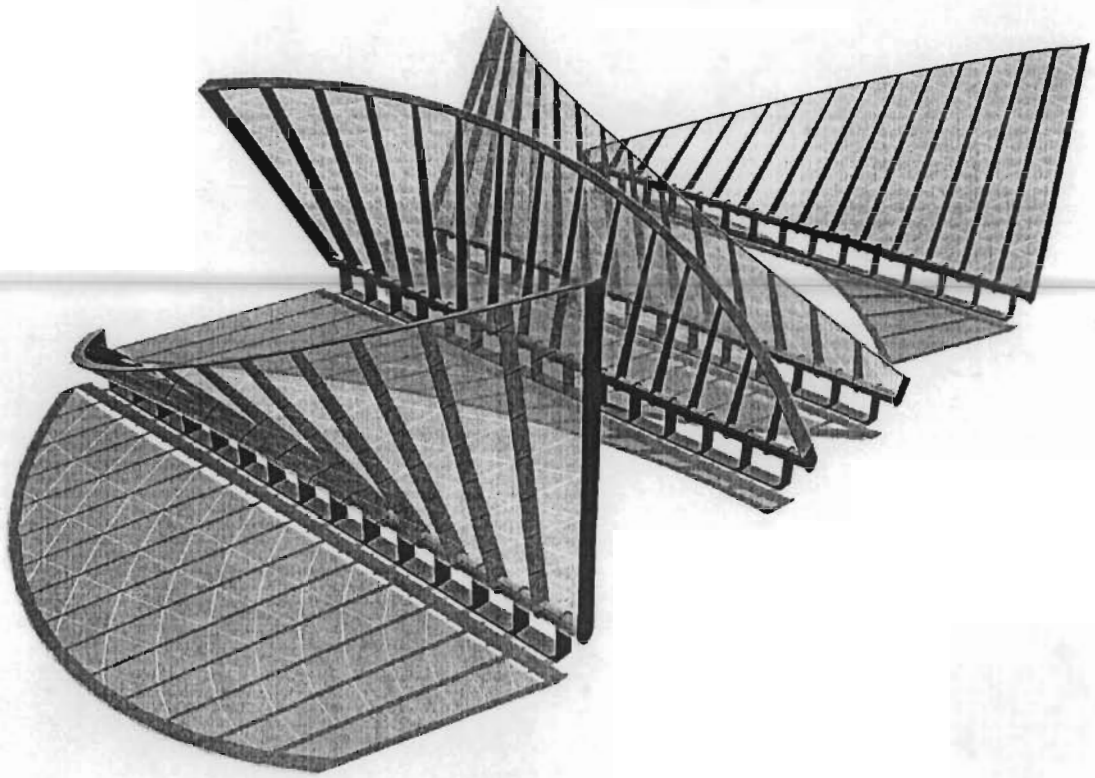
<p>V-14-12 REFERENCIA EN PLANTA 14-12</p>	<p>V-15-01 REFERENCIA EN PLANTA 15-1</p>	<p>V-15-05 REFERENCIA EN PLANTA 15-5</p>	<p>V-15-09 REFERENCIA EN PLANTA 15-9</p>
<p>V-14-11 REFERENCIA EN PLANTA 14-11</p>	<p>V-14-15 REFERENCIA EN PLANTA 14-15</p>	<p>V-15-04 REFERENCIA EN PLANTA 15-4</p>	<p>V-15-08 REFERENCIA EN PLANTA 15-8</p>
<p>V-14-10 REFERENCIA EN PLANTA 14-10</p>	<p>V-14-14 REFERENCIA EN PLANTA 14-14</p>	<p>V-15-03 REFERENCIA EN PLANTA 15-3</p>	<p>V-15-07 REFERENCIA EN PLANTA 15-7</p>
<p>V-14-09 REFERENCIA EN PLANTA 14-9</p>	<p>V-14-13 REFERENCIA EN PLANTA 14-13</p>	<p>V-15-02 REFERENCIA EN PLANTA 15-2</p>	<p>V-15-06 REFERENCIA EN PLANTA 15-6</p>

Planos de taller para la fabricación de los vidrios

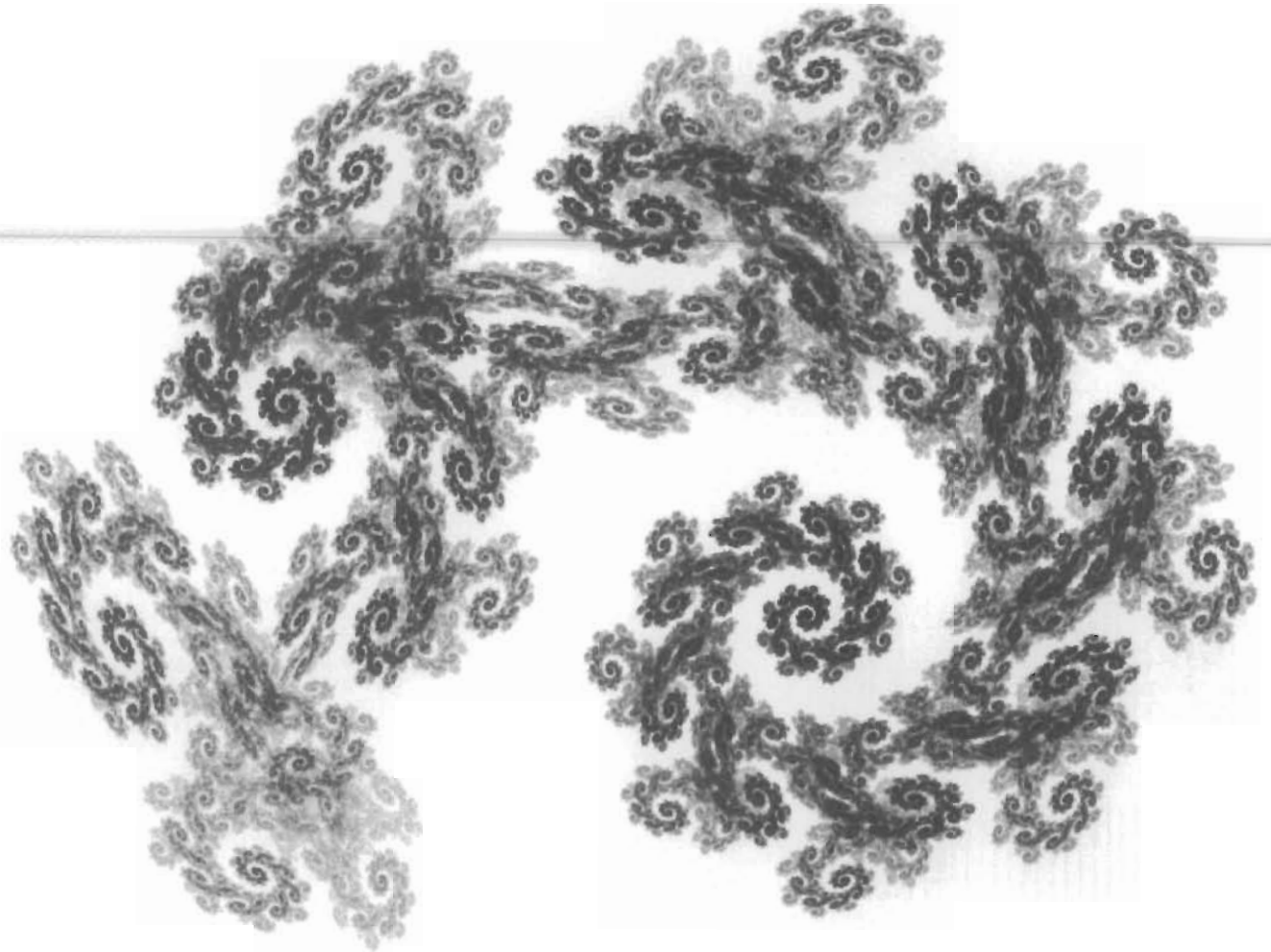


Perspectivas, cerrada, intermedia









# Capítulo 7

Criterio estructural

## Peso de la cubierta

Con el análisis geométrico de los cristales, se obtuvieron el área y el volumen de vidrio en la cubierta, tomando en cuenta que cada elemento está conformado por 2 hojas de vidrio de 6 mm y una película de seguridad intermedia. Siendo el área 261.25 m<sup>2</sup> el volumen resultante es de 0.7838 m<sup>3</sup>, y usando parámetros de pesos volumétricos y secciones propuestas, se realizó un cálculo preliminar del peso de la cubierta.

## Áreas tributarias

Elemento Estructural nombre	Area Vidrio m <sup>2</sup>	2 vidrios de 6 mm	Peso Vidrio: 2.6 ton/m <sup>3</sup>	Longitud barra m	Peso por m kg/m
		Volumen m <sup>3</sup>	Peso kg		
		0.012	2600		
1	0.3966	0.0048	12.374	0.50	24.748
2	1.2521	0.0150	39.066	1.22	31.919
3	1.9693	0.0236	61.442	1.98	31.071
4	2.6230	0.0315	81.838	2.63	31.074
5	3.1925	0.0383	99.606	3.20	31.146
6	3.6850	0.0442	114.972	3.68	31.223
7	4.1133	0.0494	128.335	4.10	31.324
8	4.4871	0.0538	139.998	4.45	31.447
9	4.8124	0.0577	150.147	4.76	31.570
10	5.1108	0.0613	159.457	5.02	31.774
11	5.3971	0.0648	168.390	5.25	32.076
12	5.6702	0.0680	176.910	5.46	32.393
13	5.9707	0.0716	186.286	5.67	32.862
14	6.3209	0.0759	197.212	5.89	33.473
15	6.7793	0.0814	211.514	6.16	34.358
16	3.5335	0.0424	110.245	6.50	16.961
Totales	65.3138		2037.7906		Promedio
<b>Total Cubierta</b>	261.255		8151.16224		30.5887

El peso estimado del vidrio en la cubierta es de 8.15 ton y un peso por área aproximado de 31.2 kg/m<sup>2</sup>. Con un proceso similar, obteniendo las formas de los elementos estructurales que tienen como ejes las generatrices de la superficie, se obtuvo el peso de cada una, variando en un rango de 60kg a 800kg, llegando a un peso aproximado de 34.59 ton y un peso por área de 101.7 kg/m<sup>2</sup>. En total, el peso del domo sería del orden de 42 ton y aproximadamente 125 kg/m<sup>2</sup>.

## Criterio para elementos estructurales

Se realizó un estudio preliminar a distintas posiciones de la cubierta, las posiciones críticas son totalmente abierta y totalmente cerrada, las intermedias no lo son debido a que solo están así por algunos minutos y es poco probable que las condiciones extremas de viento se presenten, de cualquier forma dado el caso, la posición totalmente abierta es más desfavorable por lo que resistirían de igual forma. En estas posiciones intermedias, la cubierta solo tiene que cargar su peso propio. Los miembros estructurales principales son los arcos diagonales, los pistones y la generatriz más larga de cada conoide. Todos los elementos generatrices estarán empotrados al eje de rotación y libremente apoyados en el arco. Los primeros acercamientos fueron hechos en un programa de análisis estructural que se llama RISA -3D Versión 6.0.1.5. Las posiciones críticas deben resistir todos los efectos posibles como peso propio, temperatura, cargas vivas para mantenimiento, cargas por viento y cargas sísmicas. Las cargas por sismo pueden ser despreciadas para la posición cerrada, dada la ligereza, poca altura y forma rígida de la cubierta, de igual manera la forma aerodinámica del domo en su posición cerrada hace que las cargas de viento sean mínimas en esta posición.

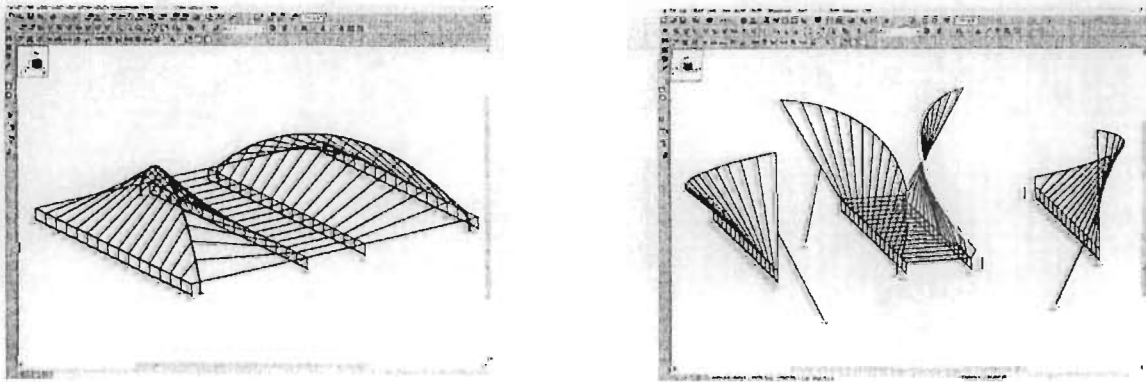


Figura 1. Análisis estructural preliminar

### Efectos dinámicos del viento

En la posición totalmente abierta, la forma del domo puede ser sensible a efectos dinámicos de viento como la inestabilidad aerodinámica conocida también como efecto de "flutter" o aleteo. El periodo de vibración del domo también debe de ser estudiado dados su altura y soportes, con estas características es necesario considerar sistemas que controlen los espasmos de viento y así evitar que aparezcan desplazamientos fuertes u otros efectos locales.

## Cálculo cinemático

Para obtener el largo, ángulo, localización, velocidades y aceleraciones angulares y velocidad lineal del pistón, se analizaron las siguientes variables:

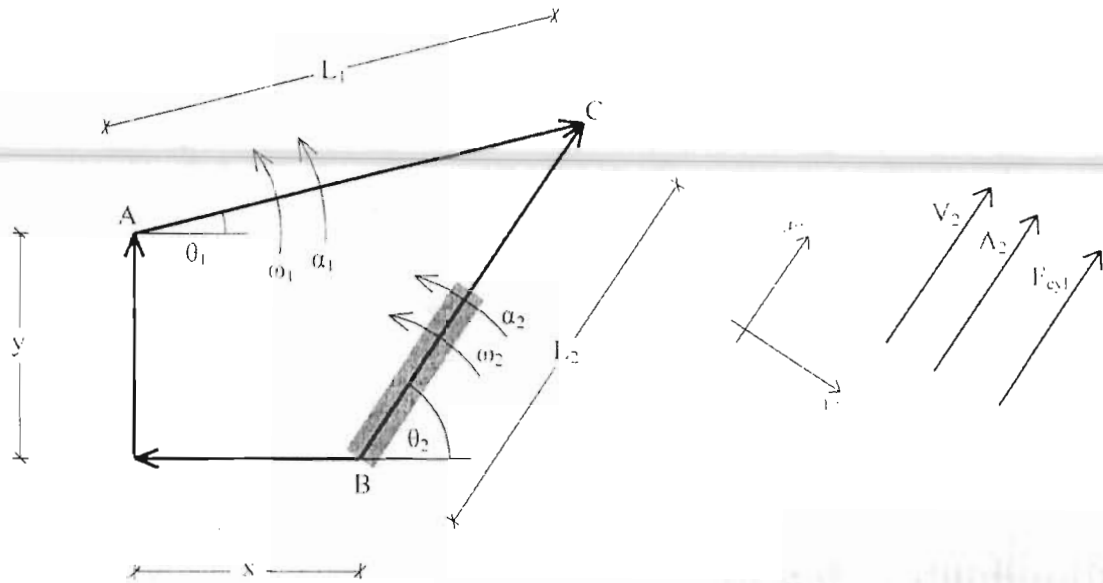


Figura 2. Diagrama de vectores

Donde el punto A es el eje de rotación del domo, el punto B es el origen y representa el punto donde el pistón se sujeta al edificio y el punto C es la unión entre el pistón y la cubierta. El segmento AC se le ha nombrado como elemento 1 y al segmento BC como elemento 2, de ahí que  $L_1$  es la longitud de AC y  $L_2$  de BC.  $\theta_1$  es el ángulo entre la horizontal y el elemento 1 y  $\theta_2$  entre la horizontal el elemento 2.  $\omega_1$  y  $\omega_2$  son las velocidades angulares, y de la misma forma  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  las aceleraciones angulares. Para la aceleración ( $A_2$ ), velocidad ( $V_2$ ) y carga del pistón ( $F_{cyl}$ ), se utilizó un nuevo sistema de coordenadas paralelo a él ( $x', y'$ ).

Los vectores están relacionados por la siguiente fórmula, pudiendo calcular con esta  $\theta_1$  y  $\theta_2$ .

$$\overline{L_1} + \overline{x} + \overline{y} = \overline{L_2}$$

Para calcular las velocidades angulares, se usó la fórmula del efecto Coriolis.

$$\overline{V_B} = \overline{V'_B} + \overline{V_{r\dot{\theta}_1}}$$

$$\overline{A_B} = \overline{A'_B} + \overline{A_{r\dot{\theta}_1}} + \overline{A_{coriolis}}$$

Usando este proceso de análisis, pudimos determinar que una posición, tamaño y velocidad adecuados para el pistón son:  $x=2.4$  m,  $y=3$  m,  $L_1=2.4$ ,  $L_2=3$  y  $V_2=0.005$  m/s, con una velocidad angular máxima para el elemento 1 de 0.004 rad/s y 0.0015 rad/s para el elemento 2, logrando abrir el domo en 9 min.

## Cálculo cinético

Para calcular la fuerza que necesita el pistón para mover el domo, se usaron las siguientes formulas.

$$\sum M_A = I_{O_{g_2}} \alpha_1 \quad \sum M_B = I_{O_{g_2}}$$

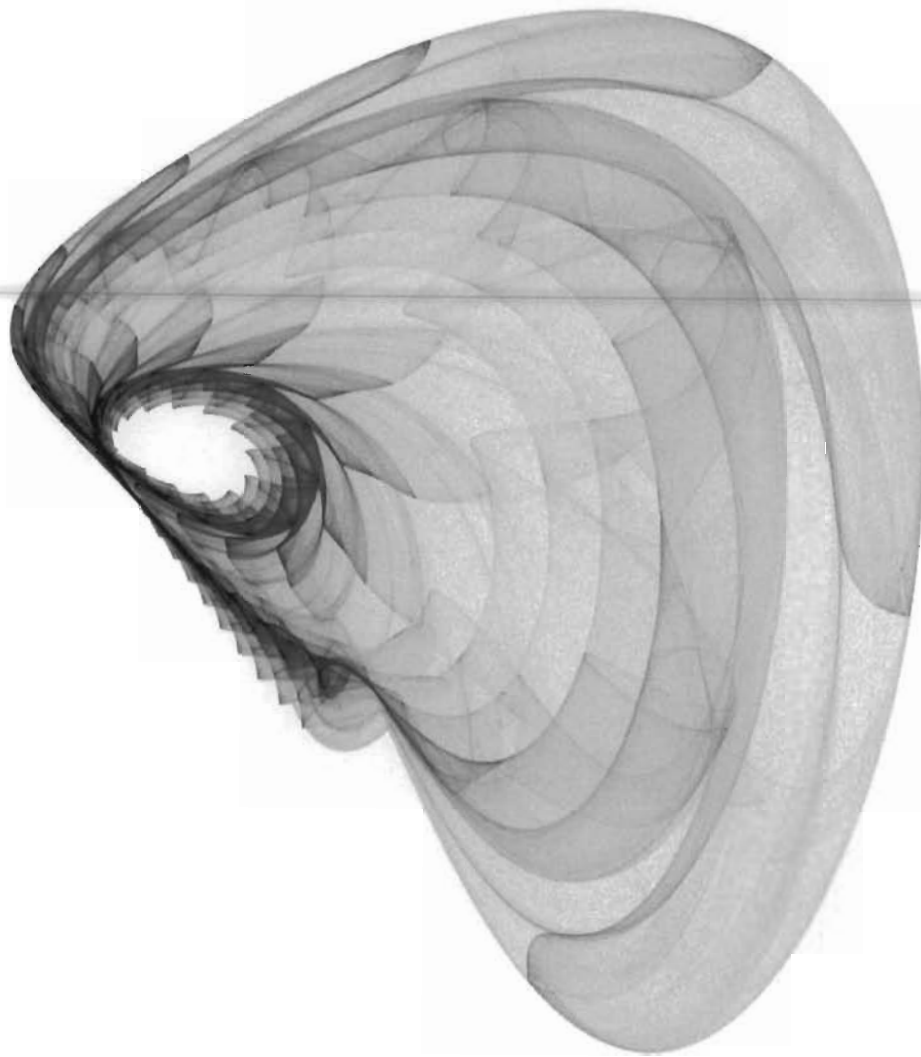
Donde la suma de momentos en el punto A es igual al momento de inercia por la aceleración angular del elemento 1, de igual forma para el punto B y el elemento 2. Usando estos valores podemos calcular la fuerza actuando en el cilindro igualando la suma de fuerzas en su dirección (y') con su masa por la aceleración de su centro de masa.

$$\sum F_{y'} = m_2 \cdot A_{g_{2,y'}}$$

Y finalmente podemos calcular la fuerza que necesita el cilindro en distintas posiciones usando el cálculo del peso estimado de la cubierta.



Figura 3. Fuerza en tres posiciones de la cubierta



# Capítulo 8

Prototipos

## Prototipos

A continuación presento fotografías de la maqueta de San Carlos que se construyó en el Laboratorio y modelos de estudio que se hicieron para entender el mecanismo a usar. Este primer modelo, nos sirvió para comprender el mecanismo y hacer experimentos variando las distancias entre los ejes de las articulaciones.

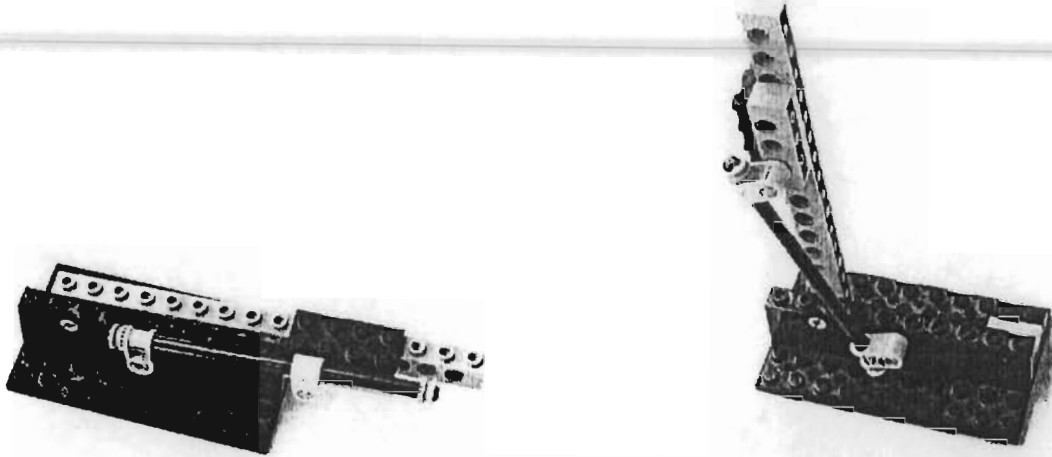


Figura 1. Primer prototipo del mecanismo

Una vez estudiado el mecanismo se procedió a construir un modelo con un pistón neumático (fig. 2) que representara de forma más precisa el funcionamiento del mecanismo. Después de estudiar estos movimientos se hicieron los cálculos correspondientes para determinar la fuerza, longitud y posición del pistón como ya se expuso en el capítulo 7.

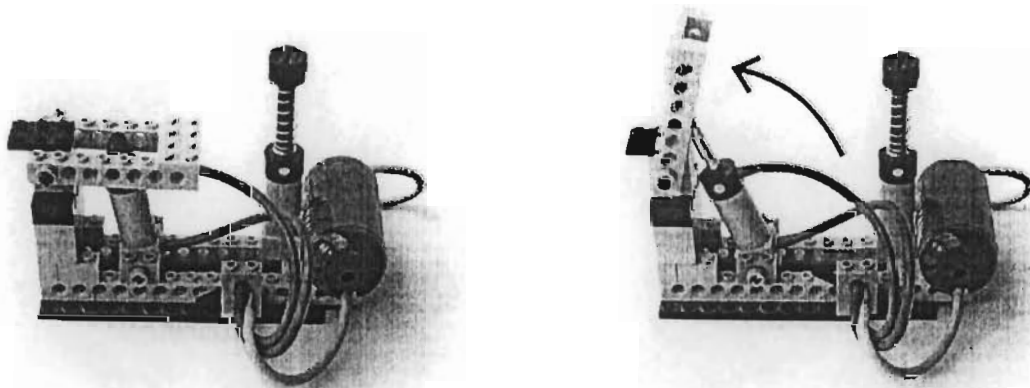


Figura 2. Prototipo con pistón neumático

Esta es una maqueta 1:50 de la Academia de San Carlos, se realizó en el Laboratorio de Estructuras con el propósito de montar sobre ella renders o prototipos.

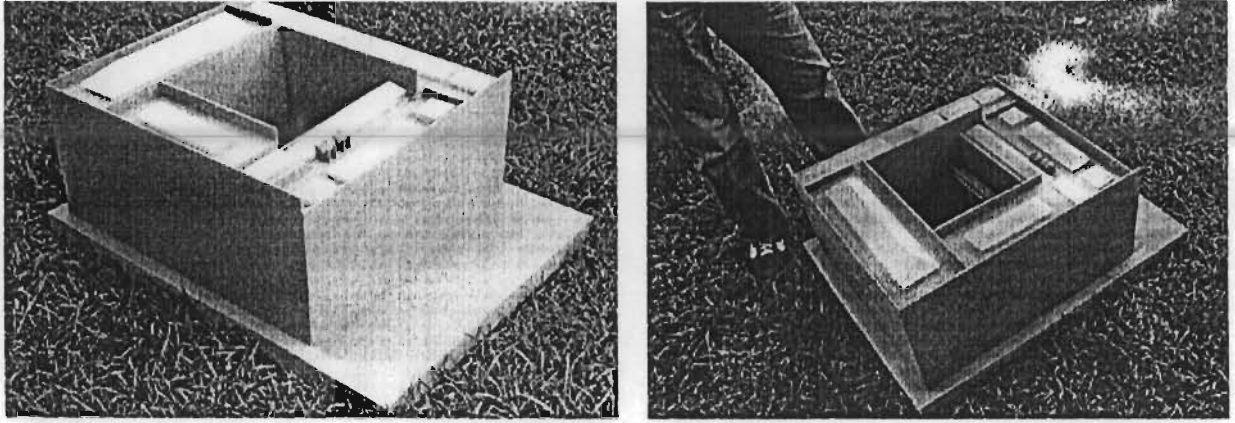


Figura 3. Maqueta del Segundo Patio

Aquí nos fue claro que los espacios en la azotea nos llevarían a un diseño con apoyos únicamente en el perímetro del vano. La maqueta está hecha de madera resanada y pintada y los domos con acrílico opacado por sandblast.

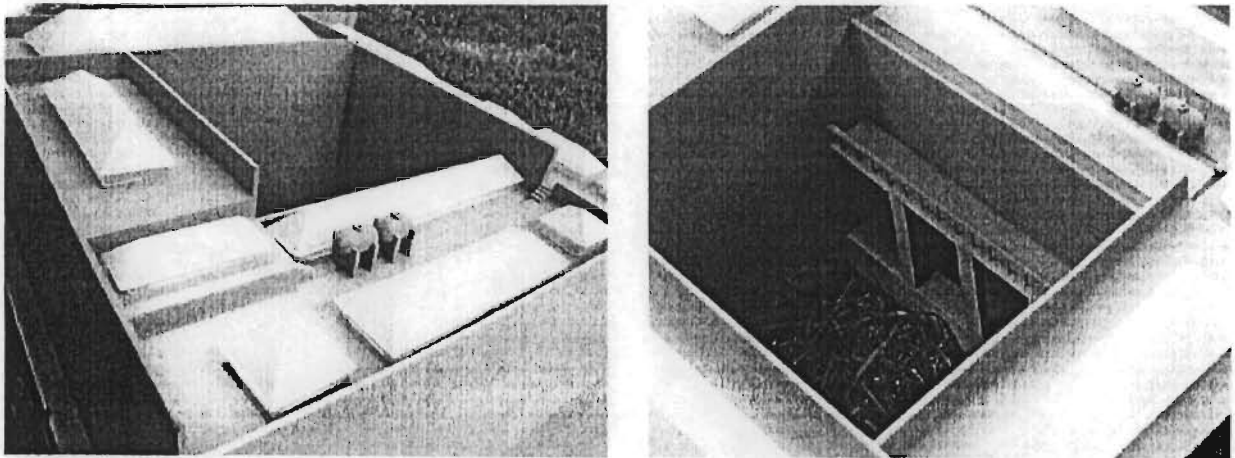


Figura 4. Maqueta del Segundo Patio



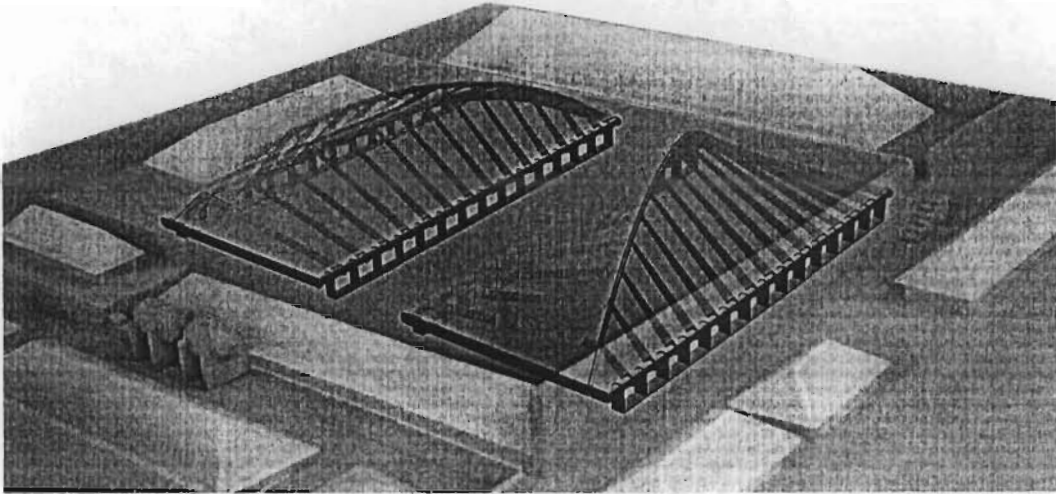


Figura 5. Fotomontaje del render sobre la maqueta

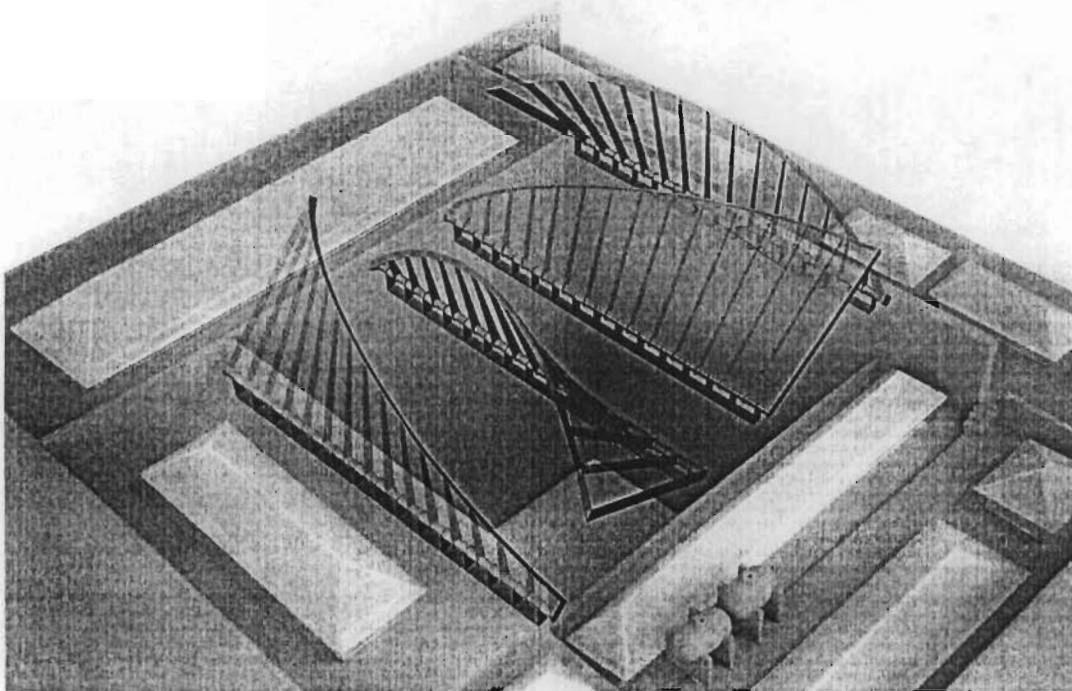
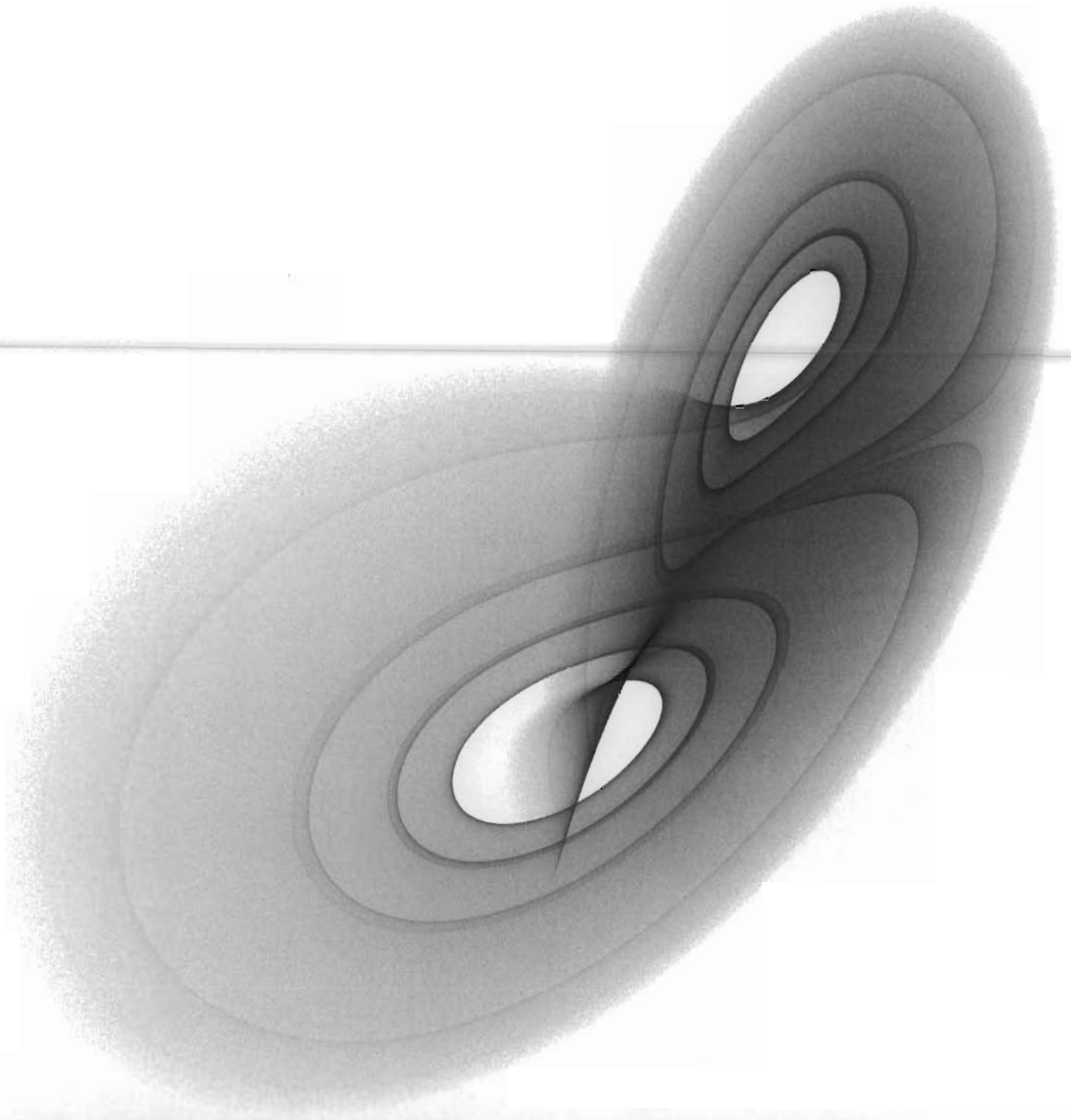


Figura 6. Fotomontaje del render sobre la maqueta



# Capítulo 9

Conclusiones

## Conclusiones

El mundo ha estado pasando en los últimos cientos de años por un proceso de homogenización; desde sistemas constructivos hasta costumbres familiares de alguna forma se han ido amalgamando haciendo una comunidad global, sin embargo esto posee ventajas y desventajas, quiero hablar en especial de construcciones y de cómo en lugares como la Ciudad de México que poseen un clima templado y bastante habitable la mayor parte del año, poco a poco las construcciones, recurren a sistemas de control de temperatura que si bien funcionan en lugares de clima más extremo, aquí no son totalmente necesarios e implican un gasto de recursos y energía no justificado. Hoy más que nunca, no nos podemos dar el lujo de la ignorancia ante el alto costo que paga nuestro planeta por soluciones no adecuadas. Los sistemas convertibles pretenden, como parte de lo que son en esencia, controlar la habitabilidad de un local, y esto constituye de forma directa una alternativa sustentable.

En este trabajo se presentaron los inicios de los sistemas convertibles desde analogías en la naturaleza hasta medios para desarrollar los aspectos básicos de una estructura plegable periférica con un sistema hidráulico y algunos de los detalles arquitectónicos del caso del Segundo Patio de la Academia de San Carlos. El trabajo que queda por hacer en este proyecto de investigación incluye un levantamiento topográfico realizado por personal especializado, análisis completo de la estructura del domo y del edificio para definir los lugares donde se debe reforzar, estudio de los efectos del viento sobre el domo y estudio de los efectos sísmicos tanto del domo como del edificio.

Implementando un domo convertible en el Segundo Patio de la Academia de San Carlos tenemos en mente extender la gama de posibilidades de uso que tiene, y las horas del día que puede usarse. Este patio ha sido usado ocasionalmente para banquetes y ceremonias en las últimas décadas, a veces usando una cubierta provisional de membrana textil, con la solución propuesta, pretendemos revitalizar esta parte del edificio histórico y contribuir con nuestra parte en el desarrollo cultural del centro histórico así como hacer énfasis en el enfoque sustentable que aportan las cubiertas convertibles.

Por ahora termino este ciclo con el presente escrito pero el proyecto de la cubierta y de otros sistemas estructurales sigue adelante, por mi parte y por parte del Laboratorio de Estructuras.

Quiero expresar que la experiencia que he obtenido hasta la fecha en las actividades del Laboratorio de Estructuras ha repercutido de manera importante en la concepción que tengo de la arquitectura. Cuando un sistema portante también es un elemento de diseño, y deliberadamente se le hace partícipe de un espacio, se gesta una armonía forma-estructura que si bien es el ideal de una construcción, a menudo se olvida y es sustituido por un formalismo, donde ni el costo ni la eficiencia de una estructura definen el proyecto. Aunque el formalismo como tal puede ser válido en el camino de la innovación arquitectónica, la búsqueda de nuevas formas sustentadas por una lógica geométrica es un ramo de estudio con posibilidades muy prometedoras a nivel eficiencia y definitivamente también a nivel estético.

En la propuesta de domo para San Carlos procuramos encontrar este punto medio esta correcta aplicación de los recursos, esta lógica constructiva, esta expresión artística responsable, que entiende la historia y el pasado que le ha dado lo que es hoy, un proyecto integral que contenga la media entre funcionalidad, constructividad y expresión, ese punto que con el tiempo se le ha llamado de diversas formas como solución orgánica o solución integral, en lo personal prefiero llamarlo arquitectura.

## Agradecimientos

Quiero agradecer al doctor Juan Gerardo Oliva Salinas por su apoyo en el proceso de este trabajo, al equipo del Laboratorio de Estructuras, al técnico Pablo Zetina por su intervención en el análisis cinético y cinemático, al ingeniero Uriel Balbuena por su intervención en el criterio estructural y a la UNAM por el apoyo financiero de dos cosas: la beca para realizar mi tesis por apoyo a la investigación y el proyecto PAPIIT "Sistemas plegables para cubrir patios de edificios históricos."



Equipo del Laboratorio de Estructuras, comida de fin de año, diciembre de 2008



# Capítulo 10

Referencias

## Impresos consultados

OTTO, Frei y colaboradores: Dieter Blümel, Rainer Graefe, Jürgen Hennicke, Friedemann Kugel, Uta Pankoke, , Hans-Joachim Schock, Jörg Wagner. "IL5: Wandelbare Dächer / Convertible Roofs" Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart, 1972.

ESCRIG, Félix. Revista: *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. Madrid, Vol. 41 (2000) n. 1. Artículo: "Transformable Architecture"

DE LA TORRE CARBÓ, Miguel. "Geometría Descriptiva" Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510 México D. F., 1983.

TZONIS, Alexander. "Santiago Calatrava's creative process" Birkhauser, España, 2001.

FABER, Colin. "Las estructuras de Candela" Compañía Editorial Continental S.A., México D. F., 1975.

DE CHURTICHAGA, Jose María. Publicación: *Arquitecturas ausentes del S.XX*. España, (2004) n. 3. Artículo: "La estructura veloz"

## URLs consultadas

UNAM : ENAP : Academia de San Carlos  
<http://www.artesvisuales.unam.mx/>

Hoberman Associates - Transformable Design  
<http://www.hoberman.com/home.html>

YOUNG + WRIGHT Architects Inc.  
<http://www.ywarch.ca/newsite/content.htm>

Obra de Dominik Baumüller  
<http://www.beyond-gravity.com/rotpneu.html>

Consultas varias  
<http://en.wikipedia.org>

## Índice de imágenes

### Capítulo 2: Orígenes

Figura 1: El Homo Rodans de Remedios Varo, Flickr

<http://www.flickr.com/search/?q=homo+rodans&m=text> modificada por Carlos Zetina Gargollo (CZG)

Figura 2: Dionaea Muscipula, Flickr

<http://www.flickr.com/search/?q=Dionaea+Muscipula&m=text>

Figura 3: Mimosa, Flickr

<http://www.flickr.com/search/?q=Mimosa+leaves&m=text>

Figura 4: Forficula Auriculae, Wikipedia

[http://en.wikipedia.org/wiki/Forficula\\_auricularia](http://en.wikipedia.org/wiki/Forficula_auricularia)

Figura 5: Diagrama del ala, University of Alberta

[http://bio-ditri.sunsite.ualberta.ca/detail?P\\_MNO=1484](http://bio-ditri.sunsite.ualberta.ca/detail?P_MNO=1484) modificada por CZG

Figura 6: Ala de murciélago y vela china, Gobierno de Queensland y Wikipedia

[http://www.epa.qld.gov.au/nature\\_conservation/wildlife/caring\\_for\\_wildlife/carers\\_kit/mammals/placental\\_mammals/insectivorous\\_bats/](http://www.epa.qld.gov.au/nature_conservation/wildlife/caring_for_wildlife/carers_kit/mammals/placental_mammals/insectivorous_bats/) y [http://en.wikipedia.org/wiki/Junk\\_%28ship%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Junk_%28ship%29) modificadas por CZG

Figura 7: Mano de niño, Wikipedia

<http://en.wikipedia.org/wiki/Hand> modificada por CZG

Figura 8: Serpiente, Flickr

<http://www.flickr.com/search/?q=snake+skeleton&m=text> modificada por CZG

Figura 9: Escultura kinetica, Theo Jansen

<http://www.cn20070802.p-client.net/>

Figura 10: Render de escultura kinetica, Theo Jansen

<http://www.cn20070802.p-client.net/>

Figura 11: Papilo Romano y Tienda medieval, Impreso y Flickr

"Transformable Architecture" Félix Escrig 2000 ver impresos consultados, modificada por CZG y

<http://www.flickr.com/search/?q=medieval+tent&m=text>

Figura 12: Tienda Berber, Flickr

<http://www.flickr.com/search/?q=berber+tent&m=text>

Figura 13: Diagrama de tienda Berber, Impreso

"IL5: Wandelbare Dächer / Convertible Roofs" ver impresos consultados, modificada por CZG

Figura 14: Tipi norteamericano, Wikipedia

<http://en.wikipedia.org/wiki/Tipi> modificada por CZG

Figura 15: Yurta, Ares Tents, Republica Checa

[http://www.ares.cz/tents/index\\_uk.htm](http://www.ares.cz/tents/index_uk.htm)

Figura 16: Toldos, Flickr

<http://www.flickr.com/search/?q=toldos+sevilla&m=text>

Figura 17: Grabado Asirio, Impreso

"IL5: Wandelbare Dächer / Convertible Roofs" ver impresos consultados, modificada por CZG

Figura 18: Coliseo Romano,

<http://www.eyeconart.net/history/ancient/Colosseum.htm>

Figura 19: Pajar en Istria, Impreso

"IL5: Wandelbare Dächer / Convertible Roofs" ver impresos consultados, modificada por CZG

Figura 20: Cubierta alberca 1929

"IL5: Wandelbare Dächer / Convertible Roofs" ver impresos consultados, modificada por CZG

Figura 21: Cubierta alberca 1935

"IL5: Wandelbare Dächer / Convertible Roofs" ver impresos consultados, modificada por CZG

Figura 22: Cubierta en Cannes

"IL5: Wandelbare Dächer / Convertible Roofs" ver impresos consultados, modificada por CZG

## Capítulo 3: Geometría estructural

Figura 1: Acuerdo de signos, creada por CZG

Figura 2: Curvatura Gaussiana positiva, creada por CZG

Figura 3: Curvatura Gaussiana negativa, creada por CZG

Figura 4: Hiperboloides de revolución, creada por CZG

Figura 5: Membrana con estructura portante fija, creada por CZG

Figura 6: Membrana con estructura portante móvil, creada por CZG

Figura 7: Estructura rígida, creada por CZG

Figura 8: Tipo de movimiento, creada por CZG

Figura 9: Dirección del movimiento, creada por CZG

Figura 10: Tabla de clasificación, Impreso

"IL5: Wandelbare Dächer / Convertible Roofs" ver impresos consultados, traducida y modificada por CZG

Figura 11: Nodos y barras, creada por CZG

Figura 12: Sistema de tijeras, creada por CZG

Figura 13: Marco estable, creada por CZG

Figura 14: Octaedro, creada por CZG

Figura 15: Angulos en el rombo, creada por CZG

Figura 16: Espacio para el movimiento de un rombo, creada por CZG

Figura 17: Diafragma octagonal, creada por CZG

Figura 18: Tijeras anguladas, creada por CZG

Figuras 19, 20, 21 y 22: Commerzbank-Arena, Flickr

<http://www.flickr.com/search/?q=Commerzbank-Arena&m=text> modificadas por CZG

Figuras 23, 24 y 25: Cubierta en Osaka Impreso

"IL5: Wandelbare Dächer / Convertible Roofs" ver impresos consultados, modificadas por CZG

Figuras 26 y 27: Estadio en Montreal, Roger Tallibert

<http://www.agencetallibert.com> , modificadas por CZG

Figura 28: Icosidodecaedro (creado por CZG) y esfera Hoberman, Chuck Hoberman

<http://www.hoberman.com/home.html> modificada por CZG

Figura 29 y 30: Plantas de domos iris y domo iris, Chuck Hoberman

<http://www.hoberman.com/home.html> modificada por CZG

Figuras 31 y 32: Skydome, Toronto, Flickr

<http://www.flickr.com/search/?q=Skydome&m=text> , modificadas por CZG



Figura 33: Render estadio para china 2008, Robbie & Young Architects  
<http://www.ywarch.ca/newsite/content.htm> modificada por CZG

Figura 34: Render Pabellón de Kuwait, Columbia University  
<http://www.arch.columbia.edu/osap/37831> modificada por CZG

Figura 35: Rotation Pneus, Dominik Baumüller  
<http://www.beyond-gravity.com/rotpneu.html> modificada por CZG

Figuras 36 a 44: Croquis, render, planos y fotografías de la maqueta de Danzantes, Laboratorio de Estructuras, Facultad de Arquitectura, UNAM

Figuras 45 a 48: Fotografías de cubierta Danzantes, cortesía de Marcos J. Ontiveros Hernández

## Capítulo 4: Propuesta para la Academia de San Carlos

Figura 1: Vista del patio principal, Flickr  
<http://www.flickr.com/search/?q=Academia+de+San+Carlos> modificada por CZG

Figuras 2 a 5: Planos del Segundo Patio, dibujados en el Laboratorio de Estructuras, Facultad de Arquitectura, UNAM

Figura 6: Fotografía del Segundo Patio, Laboratorio de Estructuras, Facultad de Arquitectura, UNAM

## Capítulo 5: Concepto

Figura 1: Proceso de análisis, creada por CZG

Figura 2: Deslizable en paralelo cilíndrica, creada por CZG

Figura 3: Variación deslizable en paralelo, creada por CZG

Figura 4: Deslizable en paralelo, cónica, creada por CZG

Figura 5: Deslizable en paralelo, revolución, creada por CZG

Figura 6: Plegable en paralelo, creada por CZG

Figura 7: Detalle de la estructura rígida, creada por CZG

Figura 8: Plegable-deslizable, creada por CZG

Figura 9: Primeros bocetos, creada por CZG

Figura 10: Estudio sobre el giro, creada por CZG

Figura 11: Estudio sobre la generación de la superficie, creada por CZG

Figura 12: Cascarones con geometría de conoide, Impreso  
"Las estructuras de Candela", ver impresos consultados, modificada por CZG

Figura 13: Generación de una conoide, creada por CZG

Figura 14: Conoide circular recta, creada por CZG

Figura 15: Elipses como resultado de la intersección con planos, creada por CZG

Figura 16: Concepto inicial de conoides, creada por CZG

Figura 17: Concepto final de cuatro conoides, creada por CZG

Figura 18: Despiece inicial, creada por CZG

Figura 9: Primeros bocetos, creada por CZG

## Capítulo 6: Proyecto arquitectónico

A-01: Planta de conjunto, dibujada por CZG

A-02: Posición cerrada, dibujada por CZG

A-03: Posición intermedia, dibujada por CZG

A-04: Posición abierta, dibujada por CZG

A-05: Corte longitudinal, dibujado por CZG

A-06: Corte transversal, dibujado por CZG

V-01 y V-00-00: Despiece y planos de taller de vidrio, dibujados por CZG

Renders del domo, creados por Verónica Reza y CZG

## Capítulo 7: Criterio estructural

Figura 1: Análisis estructural preliminar, creada por Uriel Balbuena y CZG

Figura 2: Diagrama de vectores, creada por Pablo Zetina y CZG

Figura 3: Fuerza en tres posiciones de la cubierta, creada por CZG

## Capítulo 8: Prototipos

Figura 1: Primer prototipo del mecanismo, maqueta construida por Pablo Zetina y CZG

Figura 2: Prototipo con pistón neumático, maqueta construida por CZG

Figura 3: Maqueta 1:50 del Segundo Patio de la Academia de San Carlos, construida por el equipo del Laboratorio de Estructuras

Figura 4: Fotomontaje del render en la maqueta, creado por Verónica Reza y CZG

## Capítulo 9: Conclusiones

Imagen: Equipo del Laboratorio de Estructuras, fotografía tomada en el Laboratorio en diciembre de 2008  
Personas que aparecen:

**Primera fila** (de izquierda a derecha): Alex Gómez Aguirre, Alfredo Reyes Licea, Hain Gerardo Mata, Eric Valdez Olmedo, Juan Gerardo Oliva Salinas, Jorge, Fernando Padierna, Juan Antonio del Cueto, Marcos Ontiveros Hernández, Agustín Hernández Hernández, Oscar Lara González, José Antonio Gallegos Dimas, Homero Carreto.

**Segunda fila** de izquierda a derecha: Carlos Zetina, Elsa Méndez, Sonia Georgette Alfaro, Fernanda Martínez Romo, Fernanda Gómez Loyo, Claudia Romero, Valeria Bonilla, Marisol Guerrero Baños.

**Tercera fila:** Oscar Calderón Cervantes y Gerardo Cárdenas Guzmán.

Este trabajo se terminó de escribir en Mayo de 2008 en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México.

México, Distrito Federal  
19°19'57.8" N  
99°11'00.3" W