



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ARQUITECTURA
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA Y URBANISMO

DIVERSAS ESCALAS EN CUBIERTAS VELARIAS - experiencia profesional -

Trabajo Terminal que para obtener el grado de Especialista en Cubiertas Ligeras

Presenta:

Arq. Marcos Javier Ontiveros Hernández

SINODALES

Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
Dr. Agustín Hernández Hernández
Mto. Francisco Reyna Gómez





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradezco a mis maestros de quienes espero seguir aprendiendo:

Antonio Gaudí
Pier Luigi Nervi
Félix Candela
Eduardo Torroja
Fernando López Carmona
Juan Antonio Tonda
Francisco Reyna

Especialmente a Juan Gerardo Oliva y Juan Vicente Fernández de quienes sus enseñanzas trascienden el campo de la arquitectura

A mis amigos del equipo de trabajo del Laboratorio de Estructuras con especial estimación a Erick y Fernanda, por su incondicional cooperación.

Cuando los materiales concretos se ensamblan y se levantan, donde la arquitectura pensada se convierte en parte del mundo real quisiera agradecer a Héctor Mendoza

A mis padres
A mis hermanas
A mi sobrinos Andreita y Alan
Y con especial cariño al recuerdo de mi abuelita Catita

Índice

1	Introducción	6
2	La forma adecuada	7
3	Estructuras velarias	
3.1	Breve historia	9
3.2	La clave de la forma	11
3.3	Clasificación	17
4	TV Azteca	
4.1	Directrices de diseño	23
4.2	Búsqueda de la forma	25
4.3	Desarrollo constructivo	26
4.4	Planos ejecutivos	30
4.5	Memoria fotográfica	36
5	Trajineras	
5.1	Directrices de diseño	38
5.2	Búsqueda de la forma	39
5.3	Desarrollo constructivo	40
5.4	Planos ejecutivos	44
5.5	Memoria fotográfica	50
6	Conclusiones	54
7	Glosario	56
8	Referencias	57

1 Introducción

“Hemos hablado mucho de lo que es nuestro deber y cómo podríamos llegar a algo bueno, y hemos llegado a la conclusión de que nuestro fin en primer término debe ser el de hallar un lugar determinado y un oficio al cual podamos consagrarnos eternamente”

Vincent Van Gogh
Cartas a Theo

Es muy grato presentar este documento que tiene como fin mostrar el proceso de análisis, génesis y desarrollo, que he llevado en los últimos años de mi labor profesional, fincado en una filosofía arquitectónica-estructural que fui adquiriendo poco a poco de los brillantes profesores con los que he tenido la suerte de encontrarme y que con el paso del tiempo he logrado hacerla propia.

El fundamento de esto se resume en la idea de las estructuras que resisten por forma y no por masa, lo cual, es un tema fundamental de sustentabilidad y ahorro de energía, condiciones necesarias para garantizarnos un futuro como sociedad.

De forma tal que ahora expongo este documento que, si bien tiene como requerimiento académico “la demostración”; también busca, a un nivel personal, ser de agradecimiento registrando en este ensayo algo de los diálogos que encontré en los seminarios de la Especialización y que hicieron que me apasionara de mi trabajo.

Pese a que la Especialización abarca varias posibilidades de sistemas constructivos, los ejemplos que abordo en este trabajo se refieren únicamente a cubiertas velarias, debido a que en ellos participé como director de proyecto, teniendo la responsabilidad de la creación, desarrollo y resultado.

Finalmente es importante comentar que pese a que se trata de un solo sistema constructivo, es un tema tan basto que no es posible en este Trabajo Terminal profundizar en todos sus aspectos, por lo cual me enfocaré en aprovechar los contrastes en las dimensiones y usos de los espacios que generan para ejemplificar la versatilidad del sistema y comparar las metodologías de trabajo con la finalidad de exponer los conceptos arquitectónicos y estructurales que les dieron forma.

Marcos Javier Ontiveros Hernández, “*el kete*”,
Septiembre de 2007



Fig. 1.1
Estructura natural



Fig. 2.2
Patio principal Palacio de Minería

2 La forma adecuada

“Los hombres imponemos formas a los materiales para satisfacer necesidades de producción y de uso, y es así que la armonía entre ambos aspectos conduce a la forma adecuada para los materiales y la forma adecuada es la temática formal de la arquitectura”

Fernando López Carmona¹
EMCYC 202 - 1988

Resultaría poco fructífero buscar una variante en la forma que las arañas tejen sus redes, persiguiendo mejorar su sistema constructivo, siendo que el esquema actual es el resultado de miles de años de evolución en los que se ha ido depurando hasta lograr que todos los elementos cumplan una función óptima, sin dar lugar a componentes caprichosos. En este tipo de sistemas las variaciones se presentan únicamente como reacción a transformaciones de su entorno, llegando siempre a “**la forma adecuada**” o a la extinción.

Las estructuras naturales, como el ejemplo de la telaraña, cumplen con dos importantes factores; por un lado son formas que derivan de las cualidades intrínsecas del material y por otro tienen la obligación de satisfacer un rígido programa de necesidades definido por su entorno².

En este sentido soy un convencido de que la belleza que encontramos en ellas se debe en gran medida a esos factores, siendo estructuras que sin ningún tipo de compromiso cultural responden únicamente a las leyes de su medio físico logrando impactarnos sensiblemente y al sentirnos atraídos por su “**belleza natural**”, de la que también formamos parte, terminamos, en muchos casos, incorporando dichas formas a nuestro quehacer artificial.

Sin el deseo de iniciar una exposición sobre la belleza, sólo quiero declarar que para mí, la forma adecuada o forma natural de las estructuras es donde reside la esencia de su belleza y cuando se lleva al ámbito de la arquitectura logrando consolidarla equilibradamente con los factores programáticos, intrínsecos a cada proyecto, se llega a lo que Eero Saarinen llamo *expresionismo estructural* y que a través de la historia encontramos bellísimos ejemplos que me inspiran en una búsqueda personal del diseño arquitectónico.

Para ilustrar lo anterior me gustaría referirme al Panteón de Agripa en Roma o al Palacio Güell de Antonio Gaudí; así como al dialogo equilibrado y respetuoso que entablan, un magnifico edificio centenario como es el Palacio de Minería con nuestra contemporaneidad expresada en la velaria que cubre su patio central.

3 Estructuras velarias

Dentro del amplio espectro de estructuras ligeras, un sistema que actualmente ha tenido un gran desarrollo a nivel mundial son las estructuras velarias también llamadas tenso-estructuras, arquitectura textil o, simplemente, lonarias.

A pesar de que sus antecedentes datan desde los inicios de las civilizaciones nómadas, es en la segunda mitad del siglo XX y hasta nuestros días que al conjugarse una serie de factores tecnológicos en su producción y diseño han permitido potencializar sus aplicaciones e impulsar su desarrollo a un ritmo acelerado.

Esencialmente una estructura velaria se puede definir como una cubierta formada de una delgada **membrana flexible**, carente de rigidez propia, sujeta a un continuo esfuerzo de **tracción** (*postensado*) que logra su estabilidad formal, ante fuerzas externas, mediante la inclusión en su diseño geométrico de una **doble curvatura inversa** también llamada *anticlástica*.

Como puede verse en la definición, el sistema constructivo no determina un material específico, sino un comportamiento equilibrado de las fuerzas en el sistema, que tienen que ver directamente con las características físicas del material y con la forma que se le debe dar a éste.

Es importante hacer notar que las fuerzas externas ante las que se mantiene la estabilidad formal incluyen a la gravedad, lo que significa que una estructura velaria puede tomar la dirección en el espacio que se desee y esto se debe a que el peso propio de la membrana de 700 a 1500 gr es muy inferior a la capacidad de carga del sistema traccionado.

Esta tracción de la velaria se da perimetralmente a través de un cable o faja deslizable que se une al borde de la membrana lo que conforma el sistema denominado *relinga* y/o mediante uniones ajustables tipo tensores a un punto de anclaje o a un borde rígido.

En referencia al material con el que actualmente se fabrican las velarias contamos principalmente con dos opciones, por un lado las membranas hechas a base de fibras de poliéster recubiertas con PVC, que pueden llegar a garantizar una vida útil de 12 años y las membranas de fibra de vidrio, menos común en México, que se garantizan hasta 25 años.

Finalmente, en lo que se refiere a la forma de las velarias se hablará con profundidad en el capítulo 3.2 "La clave de la forma".



Fig. 3.1
Cable deformado por una carga puntual sujeto a tracción



Fig. 3.2
Membrana textil flexible con la forma que le da su caída natural

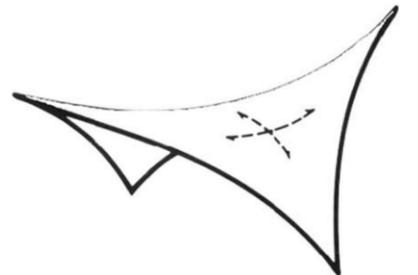


Fig. 3.3
Doble curvatura inversa, "anticlástica"

3.1 Breve historia

“Cada época debe crear su propia arquitectura, empleando su propia tecnología, para expresar el espíritu de su propio tiempo”

Eero Saarinen



Fig. 3.4
Vivienda prehistórica en Siberia
(hipótesis)



Fig. 3.5
Tepee de Indios Norteamericanos



Fig. 3.6
Tiendas nómadas de Arabia

Si bien las llamadas estructuras velarias son consideradas novedosas y contemporáneas, se pueden rastrear sus antecedentes, en reconstrucciones arqueológicas de campamentos en Siberia que datan de hace 40,000 años³, en las que los paleontólogos sugieren tiendas hechas con pieles de animales y una estructura portante a base de huesos. (Fig. 3.4)

A partir de entonces, sin pertenecer enteramente a un estilo o periodo específico, el hombre ha utilizado las membranas textiles como un elemento más dentro de sus construcciones con un carácter temporal o itinerante tal es el caso de las tiendas nómadas en Arabia o los tepees indios del norte de América. (Fig. 3.5, Fig. 3.6).

Otro ejemplo de este uso de la arquitectura textil nos lo plantea el arquitecto Carpiceci⁴, en su tesis extensamente aceptada sobre los toldos desmontable en el Coliseo Romano (Fig. 3.7); así mismo es importante destacar el aporte que nos legan los circos y teatros itinerantes en donde se experimentan y perfeccionan muchos de los sistemas de montaje y anclajes que actualmente seguimos usando.

Pese a estos antecedentes no es sino hasta 1861 cuando Gottfried Semper describe las formas de la construcción textil como uno de los cuatro elementos básicos de la edificación³. Tuvieron que pasar casi 100 años para que ocurriera el verdadero despertar, cuando en 1954 el llamado padre de las estructuras velarias, el arquitecto alemán Frei Otto, liderando un grupo de investigación del Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart; con sus primeros prototipos y en su disertación “the Suspended roof”, sentó las bases para el desarrollo de este sistema a nivel mundial. (Fig. 3.8)

La conjunción de las bases asentadas por Frei Otto, el aporte posterior de más personas en la misma línea de investigación con la incorporación de la herramienta computacional tanto para el cálculo de la forma como de los esfuerzos, aunado al descubrimiento de nuevos materiales y la optimización en la manufactura ha permitido en apenas 50 años un crecimiento pocas veces visto en el habitual lento avance de las técnicas constructivas.

En México las velarias llegan primero como una imagen de la modernidad que se está dando en el extranjero, pero formalmente el conocimiento y desarrollo de este tipo de estructuras se inicia en el Laboratorio de Estructuras Laminadas de la UNAM, con el arquitecto José Mirafuentes, lamentablemente fallecido en pleno desarrollo de su labor académica y profesional; de forma tal que se produce un *impasse* hasta la llegada a escena del arquitecto Juan Gerardo Oliva

Salinas que a principios de los noventas toma la estafeta y en el mismo espacio académico genera un particular desarrollo de investigación y enseñanza de las estructuras ligeras, en el cual he tenido la suerte de colaborar.

Actualmente son varias las universidades en México que cuentan con un espacio para el trabajo sobre estructuras ligeras, además de algunas empresas que de forma profesional han invertido tanto en tecnología como en capacitación, lo que ha sembrado un campo fértil para que nuestro país se incorpore paulatinamente a este auge mundial, siendo posible a la fecha abordar prácticamente cualquier reto que sobre estructuras velarias se proponga.



Fig. 3.8
Estadio Olímpico de Munich 1972; Frei Otto

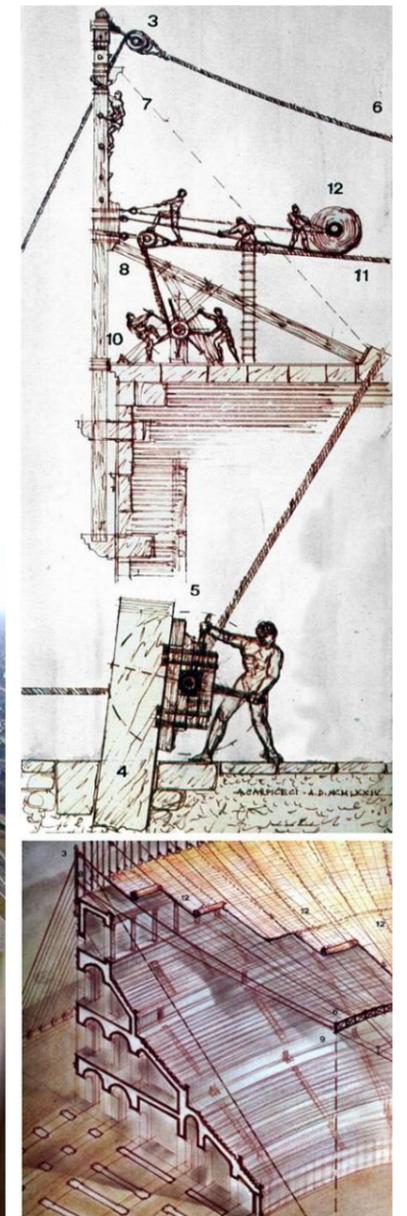


Fig. 3.7
Tesis de sobre una posible Cubierta textil en el Circo Romano

3.2 La clave de la forma

“Conocer algo de forma meramente cualitativa es conocerlo de manera vaga. Si tenemos conocimiento cuantitativo – captando alguna medida numérica que lo distinga de un número infinito de otras posibilidades – estamos comenzando a conocerlo en profundidad, comprendemos algo de su belleza y accedemos a su poder y al conocimiento que proporciona. El miedo a la cuantificación supone limitarse, renunciar a una de las perspectivas más firmes para entender y cambiar el mundo”

Carl Sagan
Miles de millones 1998

Debido a mi educación como arquitecto encuentro en “el espacio” un especial interés, tanto el espacio contenido, que es el que habitamos, como el espacio continente o contenedor, que se refiere a los elementos físicos que delimitan el contenido; estos elementos poseen una forma propia y la búsqueda de ella en la velarias siempre es la gran interrogante. ¿Las tensiones definen la forma o la forma puede ser modelada a gusto del diseñador? Tal vez la única respuesta a ésta interrogante esta en el proyecto mismo.

Una de las características de las estructuras velarias que las hace especialmente atractivas, es el hecho de que el darle la forma adecuada al material no es una alternativa, sino una condición *sine qua non* existirían. Cuando se trabaja con un material laminar que no admite ningún tipo de flexión, la forma se supedita al equilibrio de fuerzas; sin embargo, las fuerzas en vez de ser un elemento limitativo de la creatividad se convierten en el cincel para modelar el objeto siempre dentro de las estrictas reglas de la física.

Lo anterior no resulta tan claro, ni siquiera dentro de nuestro medio, siendo común encontrarse con opiniones que ubican a las velarias como caprichos formales, moldeados a voluntad y objetan la curvatura como poniendo en duda la existencia de las columnas que soportan un edificio o argumentando soluciones a proyectos imposibles.

Esto no es privativo de las velarias, sino que ocurre también con otros sistemas estructurales lo cual limita su aplicación y difusión. Por lo que resulta importante para los arquitectos entender mejor los conceptos estructurales básicos que están generando la dinámica arquitectónica actual, acercándonos a la idea de la “forma resistente”.

3.2.1 Antecedentes

El acercamiento a esta llamada “forma resistente” podría iniciarse echando un vistazo atrás, afianzando la herencia constructiva contemporánea que inicia a principios de 1900 con Eugenio Freyssinet; para después lograr un mayor desarrollo con personajes como Antonio Gaudí y Eduardo Torroja en España así como Pier Luigi Nervi en Italia, llegando a un punto culminante en Latinoamérica

a través del trabajo de los cascarones de concreto realizado por Félix Candela en México y la estructura cerámica de Eladio Dieste en Uruguay.

El primer gran paso encaminado a lo que hoy nos permite entender tanto numérica como constructivamente las formas de doble curvatura se da en 1931 cuando Adolf Pucher, investigador alemán, demuestra la viabilidad de una estructura sujeta a esfuerzos de membrana, que se logra cuando una superficie esta sometida únicamente a esfuerzos que fluyen axialmente a su superficie y no presenta esfuerzos flectores ni de torsión.

Lo anterior se conoce como la "teoría de la membrana", en la cual Pucher plantea tres ecuaciones diferenciales que involucran a los tres esfuerzos de membrana estableciendo el posible equilibrio entre cualquier superficie y las fuerzas externas.

Esto resulta fundamental cuando Félix Candela determina que las deformaciones en las superficies de doble curvatura son tan pequeñas, con relación a las dimensiones generales, que pueden ser despreciables y sustentando su trabajo en la teoría de la membrana, realiza la gran aportación en el cálculo de superficies de doble curvatura; específicamente en el *Paraboloide Hiperbólico (PH)*,

Así es como dejando a un lado la teoría de la elasticidad desarrolla un sistema práctico y confiable de fórmulas sencillas derivadas de la ecuación del PH para ejes oblicuos de la forma $z=kxy$ donde z , x , y son los ejes coordenados y k la constante de la forma⁵.

Esto fue el elemento de talento único y personal que permitió el desarrollo en México de una arquitectura en donde la forma lógica y natural de los cascarones de concreto se aprecian como un valor arquitectónico y cultural significativo de su momento histórico y que tuvo excelentes exponentes como Enrique de la Mora (el Pelón), Fernando López Carmona, Porfirio Ballesteros o Juan Antonio Tonda entre otros.

Una vez abierta la caja de Pandora de una arquitectura sin límites formales en el último cuarto del siglo pasado, se incorporaron al juego dos nuevos elementos que han hecho increíblemente versátiles las posibilidades de cálculo y búsqueda de la geometría. Por un lado la consabida llegada de la herramienta de cómputo y por otro la aparición y desarrollo del cálculo por elemento finito en el que personajes como John Abel juegan un papel significativo, permitiendo abordar el análisis estructural de casi cualquier forma y material mediante la búsqueda del equilibrio en un sistema de esfuerzos y deformaciones.

3.2.2 Métodos numéricos

En el caso específico de las estructuras textiles la búsqueda de la forma por métodos numéricos se inicia con *David Geiger Associates*, cuando en 1970 calcularon la estructura inflable del pabellón de Estados Unidos para la Expo de

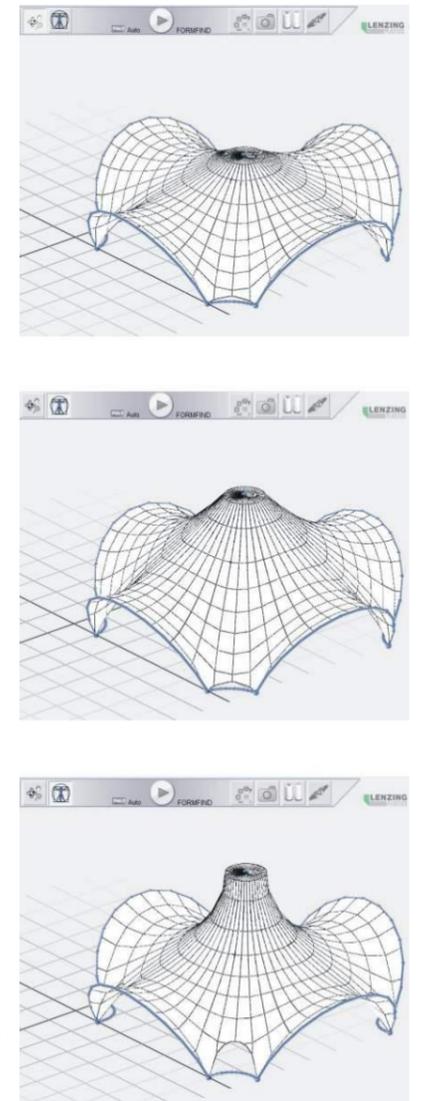


Fig. 3.9 Posibilidades formales con la variación de parámetros de tensión y altura en el programa Formfinder.

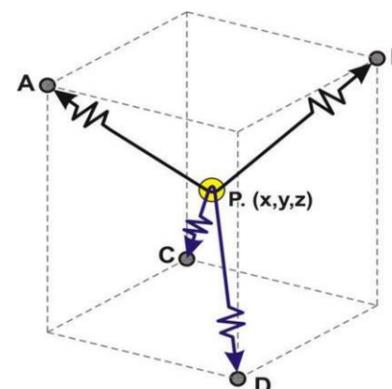


Fig. 3.10
Esquema básico de la estabilidad formal en la doble curvatura

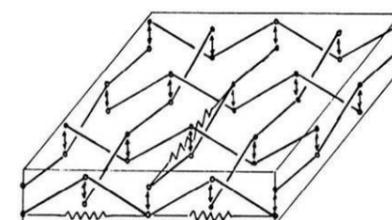


Fig. 3.11
Interacción de varios puntos durante la búsqueda de la forma de la doble curvatura

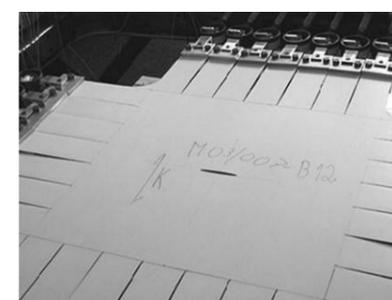


Fig. 3.12
Prueba Biaxial de membrana para definir su módulo de elasticidad.

Osaka⁶; Posteriormente el reto es tomado por universidades americanas y alemanas que con varias décadas de desarrollo han producido programas computacionales muy eficientes para el cálculo de la forma, de los esfuerzos y del patrón de corte de la membrana.

Ejemplo de estos programas son el desarrollado en Alemania EASY; o el originario de Austria FORMFINDER (Fig. 3.9), entre otros que se pueden localizar dentro de la red informática en páginas especializadas, p.e. la Asociación Europea Tensinet¹.

El inconveniente que el uso de esta herramienta trae consigo, es el problema dogmático del *software* que se usa sin entender cabalmente la teoría que lo sustenta ni los procesos de cálculo que elabora, lo cual puede acarrear errores de concepción o de interpretación de resultados que el programa no puede detectar.

A grandes rasgos este proceso parte con la definición en el espacio de los puntos de anclaje y/o bordes rígidos que van a definir a la membrana, para después alimentar al programa con parámetros del comportamiento mecánico del material.

El esquema básico que ejemplifica lo anterior se ilustra con el cubo de la figura Fig. 3.10, donde hacemos pasar un cordel elástico por los vértices A y B, que se hilvana a otro que une los vértices C y D, donde son tan solo dos las variables que determinan la ubicación del punto de unión, P, el cual define la forma.

Por un lado es necesario conocer las fuerzas aplicadas en cada extremo de los cordeles y por otro saber las propiedades físicas que determinan la deformación del cordel mismo (módulo de elasticidad). Lo interesante de este sencillo modelo es que demuestra cómo podemos desplazar el punto P a cualquier lugar, en área central del cubo, variando únicamente las fuerzas que aplicamos en cada punto de anclaje.

Cuando llevamos este sencillo esquema a casos más complejos (Fig. 3.11), aumentando el número de nodos y puntos de anclaje, surge el problema de un cálculo no lineal de la forma. Esto se debe a que al obtener la ubicación de un punto específico, se afecta la ubicación de los puntos vecinos los cuales deben ser recalculados formándose un ciclo indefinido que se detiene cuando las variaciones pueden considerarse despreciables.

Estas condiciones de cálculo serían imposibles de abordar sin la ayuda de la computadora que va aproximando la ubicación de los miles de puntos que definen la forma de la velaria en millones de corridas que pueden llevar varios días de procesamiento.

¹ <http://www.tensinet.com/>

La otra variable para definir la forma se refiere a las propiedades del material y específicamente a conocer su módulo de elasticidad que, en el caso un material heterogéneo y anisótropo, como es la membrana que usamos, más que un dato preciso, se refiere a un valor medio.

Para lo anterior se desarrolló una prueba llamada *Biaxial* (Fig. 3.12), en el que en base a un ensayo de elongación y fatiga, en las dos direcciones del tejido, se miden las variaciones obteniendo promedios que son interpretados para definir el módulo de elasticidad de diseño.

En el caso de las normas europeas y norteamericanas la prueba *Biaxial* se debe aplicar a cada lote de material que será utilizado en el proyecto, pero lamentablemente la falta de normatividad en México y la limitante de que ningún laboratorio en el país tenga la herramienta para realizarla, nos ha obligado a utilizar datos genéricos conservadores que varían entre los 650 y 700 kN/m², y que son resultados recurrentes de pruebas hechas a materiales análogos en el extranjero. Con lo que logramos conclusiones validas, manteniéndonos dentro de la seguridad.

Una vez solucionado el problema de la forma; la incorporación de acciones externas, como el viento y la nieve, en el cálculo de los esfuerzos fue el siguiente paso que siguieron los desarrolladores de los programas, que junto con los procedimientos para definir las plantillas de corte definen los tres elementos que un buen programa de cálculo de velarias ofrece.

3.2.3 Método alternativo

Resulta importante comentar que antes de los avances tecnológicos, aquí descritos, para encontrar la forma, el método utilizado era a base de modelos físicos, como el de la pompa de jabón (Fig. 3.13), que en un perfecto equilibrio de la tensión superficial logra la superficie mínima, o con modelos físicos a escala perfectamente manufacturados sobre los cuales se median las plantillas.

Como se podrá comprender, este sistema implicaba una gran inversión de tiempo y recursos, además de una gran limitante en versatilidad y búsqueda de variantes.

En el caso particular de las cubiertas aquí presentadas, y en función de los recursos que estaban a nuestro alcance se desarrolló un método alternativo, para definir la forma, ubicado entre el software de cálculo especializado, de alto costo económico, y el procedimiento original a base de modelos físicos.

Este sistema alterno se explica ampliamente en una ponencia que en octubre de 2006 presentamos en el simposio de la Asociación Internacional de Cascarones y Estructuras Espaciales (IASS) en Beijing⁷ y que resumiré a continuación.



Fig. 3.13
Búsqueda de la forma mínima a través de la pompa de jabón

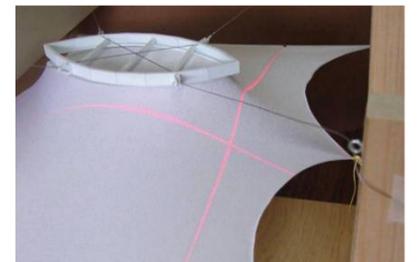


Fig. 3.14
Confirmación de curvas topográficas mediante la proyección de una luz láser sobre un modelo a escala a base de licra

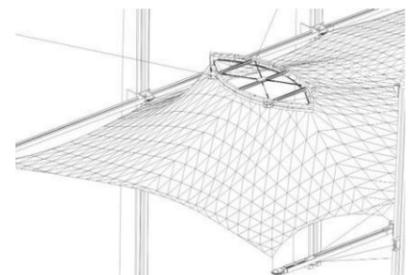


Fig. 3.15
Modelo tridimensional digital de la membrana con los anclajes.

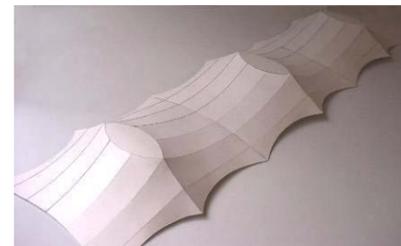


Fig. 3.16
Modelo a escala con plantillas de cartón rígido para confirmar el correcto desarrollo geométrico.

Inicialmente se plantea el esquema deseado mediante croquis, partiendo de esquemas racionales (en base a la experiencia adquirida), los cuales llevamos a maquetas de estudio con una membrana elástica de licra (Fig. 3.14), que nos da fiable garantía de la lógica formal-estructural del sistema y de una recomendable tensión superficial equilibrada.

Una vez dado el visto bueno, dicha maqueta nos sirve para analizar su topología proyectando con un nivel láser líneas sobre su superficie, definiendo las curvas que van a generar el modelo. (Fig. 3.14)

Estas curvas las llevamos a un modelo digital en tres dimensiones dentro de un programa de CAD (Fig. 3.15) donde realmente hacemos la maqueta detallada que antaño se hacía a escala física y en donde virtualmente esculpimos la doble curvatura, que los métodos numéricos hacen mediante el cálculo no lineal en los programas computacionales.

Posteriormente este modelo digital nos sirve por un lado para obtener las plantillas de corte, que confirmamos con maquetas de cartón rígido (Fig. 3.16), y por otro para generar un archivo que puede ser admitido en los programas de elemento finito que nos permiten calcular los esfuerzos en los anclajes.

El cálculo de estos esfuerzos toma en consideración principalmente al viento, dejando la nieve y la lluvia o granizo fuera de sus alcances; debido a que en nuestras latitudes no se presenta nieve y que la solución a la lluvia y el granizo se debe dar desde la concepción inicial de la geometría, no permitiendo drenes menores a un 15% de pendiente, ya que sería impráctico y altamente oneroso considerar el peso muerto de la lluvia o granizo acumulado para diseñar la estructura portante y los anclajes.

Finalmente el proceso de la búsqueda de la forma se complementa en este momento con ajustes finos para lograr un óptimo equilibrio del sistema, ya que en ocasiones el darle a una relinga una flecha ligeramente mayor o aumentar un metro la altura del poste, logra una repercusión en el sistema global que permite disminuir significativamente las fuerzas aplicadas a los anclajes.

3.2.4 Cálculo de esfuerzos y ajuste final de la forma

Prácticamente cualquier sistema es calculable y estructurable, pero como, nuestra intención de diseño es la búsqueda de la eficiencia, estos últimos ajustes de forma resultan indispensables y a la vez gratificantes en función de acercarnos a **la forma adecuada**.

En este cálculo final de los esfuerzos con cargas externas es importante mencionar que la forma de la velaria y la dirección de acometida del viento puede generar succiones o presiones de magnitudes variables.

En los casos de formas simples como cubiertas curvas o a dos aguas los reglamentos aplicables señalan de forma precisa las zonas de succión o presión

con los factores de carga aplicables pero dejan fuera de sus alcances las geometrías complejas, como el caso de las velarias, señalando únicamente la necesidad de un estudio al proyecto específico.

Para solventar esta situación hemos adoptado las siguientes tres posibilidades que, dentro de sus propias limitantes, garantizan buenos resultados:

- zonificar la cubierta por rangos de pendientes y asignarles los valores de presión de acuerdo al reglamento (Fig. 3.17)
- Utilizar los coeficientes de presión "Cp" para formas básicas estudiadas en túnel de viento que podemos encontrar en bibliografía especializada como el Guía de Diseño Europea⁸ (Fig. 3.18)
- Construir un modelo físico del proyecto en particular para analizarlo en el túnel de viento y generar coeficientes específicos.

Finalmente una cuarta posibilidad, que no hemos explorado todavía, son los programas que simulan las condiciones del túnel de viento y teóricamente terminan generando resultados similares al túnel de viento real con un costo menor.

3.2.5 Conclusiones

En resumen, se han expuesto dos caminos para lo obtención de la geometría de las velarias; uno que por métodos numéricos calcula la forma a partir de los esfuerzos y las deformaciones del sistema y otro, que desarrollamos en el laboratorio de estructuras, que a partir de una forma lógica se calculan los esfuerzos, manteniendo las deformaciones en un rango mínimo aceptable² en función del comportamiento esperado de las estructuras velarias y de las características del material que pensamos ocupar.

El único inconveniente de este sistema alternativo se refiere a la experiencia que se necesita para proponer una forma lógica inicial, la cual se adquiere de manera empírica y en muchos casos después de algunos sin sabores.

En conclusión los resultados de los dos sistemas expuestos, para la generación de la forma, cuando son llevados a cabo adecuadamente dan resultados muy parecidos y altamente confiables, siendo el cálculo numérico mediante la computadora el más práctico en cuanto a tiempo y posibilidad de adecuaciones posteriores se refiere.

² Para el caso de las membranas de fibra de poliéster como la Ferrari, la deformación aceptable durante el tensado inicial que le da la forma (*prestres*) es de un 1% y el consejo es no hacerlo trabajar a más del 20% de la carga de ruptura.

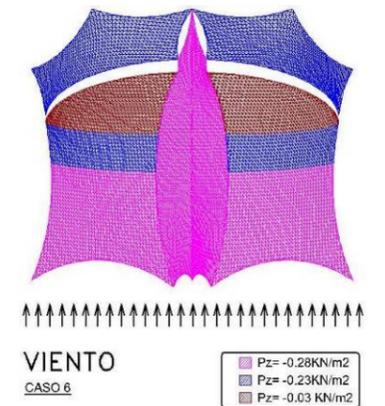


Fig. 3.17
Zonificación de cargas de acuerdo a la pendiente de la forma y dirección de incidencia del viento. (Ejemplo tomado del proyecto de Minería II; información generada por la empresa de cálculo estructural TORG)

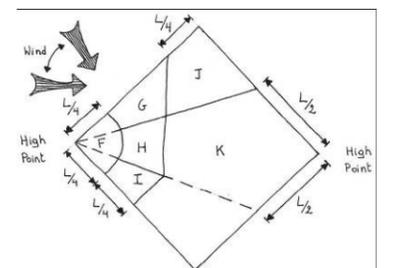
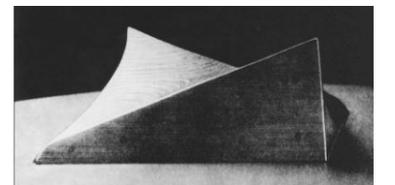


Fig. 3.18
Modelo físico para túnel de viento y zonificación de Coeficientes de Presión Cp resultante (Imagen tomada de la Guía europea de diseño de estructuras tensiles)

3.3 Clasificación

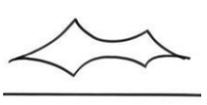
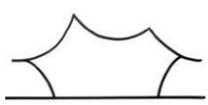
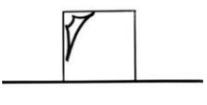
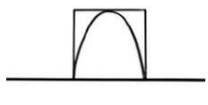
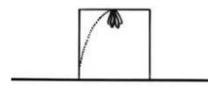
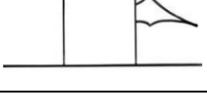
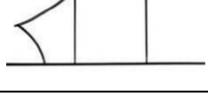
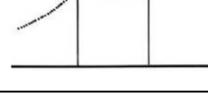
“Lo que me interesa de aquellas estructuras es cuándo y dónde emplearlas. Analizando sus posibilidades, uno llega a la conclusión de que no se trata de fórmulas matemáticas que han de ser llevadas a cabo de una determinada manera, sino que existen muchas maneras lógicas y efectivas de hacerlo”

Eero Saarinen

En referencia de la obra de Candela, Torroja y Nervi durante el desarrollo de la terminal aérea de la TWA

Como en muchos otros ámbitos del quehacer humano, para poder asimilar una información de manera adecuada haciéndola un “conocimiento significativo”, surge la necesidad de clasificarlas en base a criterios generalmente discrecionales.

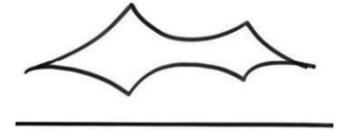
En este caso presento la clasificación propuesta por Marijke Mollaert y que se incluye dentro de la Guía Europea de Diseño para Velarias⁸ En la cual hace referencia al tipo de espacio que genera, con un código gráfico de croquis de alzados, que considero una aproximación gratamente arquitectónica, sencilla y didáctica. Siendo importante apuntar como lo hace su autora que no es la única clasificación, ni pretende ser absoluta o restrictiva.

	ABIERTO	CERRADO	ADAPTABLE
EXENTO			
INTERNO			
ADOSADO			

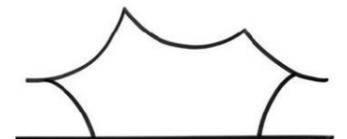
A continuación se mostraran obras y proyectos que ejemplifican esta clasificación y en algunos de los cuales me ha tocado participar.

<p>MODUNAM 1997 / 200 m²</p> <p>Propietario: UNAM</p> <p>Ubicación: Itinerante</p> <p>Proyecto y supervisión: Juan Gerardo Oliva Salinas Equipo del Laboratorio de Estructuras de la Fac. de Arq.</p> <p>Realización: Cubiertas a tensión (membrana) Aries (estructura)</p>	
<p>Resultado de un desarrollo en investigación, es este primer prototipo de cubierta velaria itinerante de fácil montaje y versatilidad de disposiciones.</p> <p>Con una estructura portante en acero inoxidable, cubre aprox. 200 m² en un solo módulo, el cual puede integrarse a otros para cubrir el área deseada.</p>	
<p>Museo del Palacio 2005 / 1,300 m²</p> <p>Propietario: Gobierno del Edo. de Oaxaca</p> <p>Ubicación: Centro Histórico, Oaxaca, Oax.</p> <p>Proyecto y supervisión: Juan Gerardo Oliva Salinas Marcos J. Ontiveros Hernández Víctor Hugo Ruiz (restauración) Alejandro Rojas (estructura)</p> <p>Realización: Carrusel S.A. de C.V.</p>	
<p>En el corazón de la Ciudad de Oaxaca, reutilizando el antiguo Palacio de Gobierno se proyecta el "Museo del Palacio", espacio de la diversidad.</p> <p>Con una estructura exenta apoyada en la azotea, esta cubierta integra tres patios, de distintas dimensiones, mediante una velaria seccionada de 1,300 m², al centro con una linternilla elíptica de 7.3 x 3.8 m, y dos laterales de perfil circular, cerrando el espacio membranas verticales de tejido abierto.</p>	

EXENTO ABIERTO



EXENTO CERRADO



EXENTO ADAPTABLE



Palacio de Minería
2002 / 1,225 m²

Propietario:
Fac. de Ingeniería UNAM

Ubicación:
Centro Histórico, México D.F.

Proyecto y supervisión:
Juan Gerardo Oliva Salinas
Ernesto Nataren de la Rosa
Equipo del Lab. de Estruct.
Alejandro Rojas (estructura)

Realización:
Cubiertas a tensión (membrana)
CIPSA (obra civil).



De disposición radial acusando los ejes compositivos del gran patio y rematándolo con una linternilla que pone el acento de luz cenital, se levanta la velaria resultado del concurso, entre equipos de estudiantes y profesores, para cubrir patios del Patrimonio Universitario en el Centro Histórico de la Ciudad de México.

El proyecto cubre el patio central con una membrana de 35 x 35 m, que apenas toca al edificio en búsqueda de integración y respeto. La concepción inicial del proyecto buscaba la adaptabilidad, mediante un sistema de malacates y postes que servían de grúas para remover la velaria cuando se requiriese.

INTERNO ABIERTO



Escuela
2004

Ubicación:
Bobingen Alemania.

Proyecto:
Dr. Off. Hans Jürgen Garten.

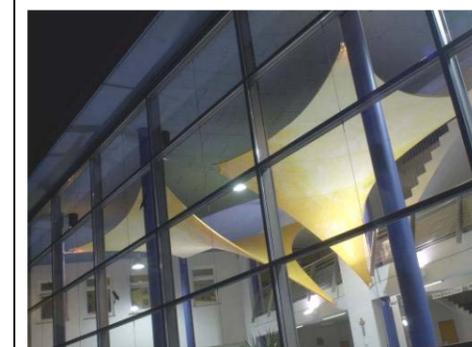
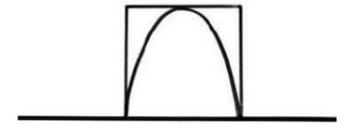


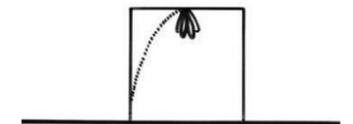
Imagen tomada de Tensinet Symposium, de la ponencia de Marijke Mollaert, Universidad de Bruselas

<p>Oficinas 2002 / 16 m2</p> <p>Propietario: Refurbishment inc.</p> <p>Ubicación: Bélgica</p> <p>Proyecto y supervisión: ECO membrane</p>	
<p>Membrana transparente interior que genera confort térmico, absorción acústica y permite la iluminación natural.</p> <p>Imagen tomada de Tensinet Symposium, de la ponencia de Marijke Mollaert , Universidad de Bruselas</p>	
<p>Oficinas AMP 2002 / 16 m2</p> <p>Propietario: AMP, empresa financiera</p> <p>Ubicación: Tokio, Japón</p> <p>Proyecto: Dytham Architecture</p> <p>* Referencia ⁹</p>	
<p>En la ciudad de Tokio donde el espacio interior disponible es de lo mas preciado, estas pantallas plegables en color rojo potencializan el área útil y sirven para dividir sutilmente la zona de bar del área principal de trabajo durante el día.</p> <p>Las pantallas también pueden enrollarse en la parte superior y unificar el espacio en caso de ser necesario.</p>	

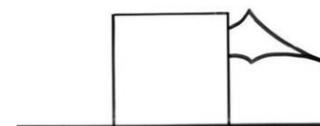
INTERNO CERRADO



INTERNO ADAPTABLE



ADOSADO ABIERTO



Terraza Monte Ararat
2005 / 12 m²

Propietario:
Praxis Arquitectura

Ubicación:
Reforma Lomas, México D.F.

Proyecto y supervisión:
Marcos J. Ontiveros Hernández.

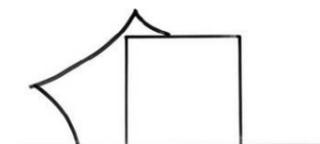
Realización:
Cubiertas a Tensión



En la terraza sur de un edificio de oficinas en la Ciudad de México se planteo esta cubierta velaria como una visera buscando la mayor sencillez posible.

La estructura portante son dos ménsulas de placa de acero electro-pintado cada una de las cuales genera tanto un punto alto como uno bajo a través de un brazo articulado

ADOSADO CERRADO



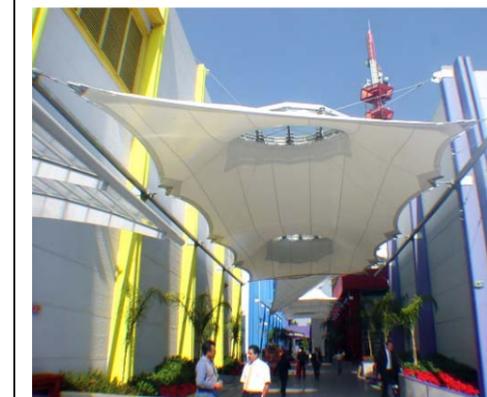
Pasillo de las Estrellas
2004 / 700 m²

Propietario:
Televisión Azteca

Ubicación:
Ciudad de México

Proyecto y supervisión:
Juan Gerardo Oliva Salinas
Marcos J. Ontiveros Hernández
Alejandro Rojas (estructura)

Realización:
CARRUSEL (membrana)
CLYP (linternillas)



Adosado a dos paños de los edificios de foros que cierran el espacio se desarrollo esta velaria tema del presente trabajo terminal.

El espacio sombreado de la cubierta roto rítmicamente por cinco linternillas cenitales, de cristal y aluminio, logran generar un amable ambiente para estar o transitar entre los foros.

Restaurante los Danzantes
2005 / 130 m2

Propietario:
Restaurante los Danzantes

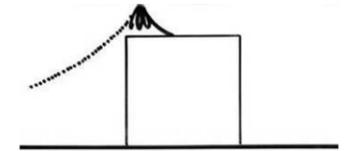
Ubicación:
Centro Histórico, Oaxaca, Oax.

Proyecto y supervisión:
Juan Gerardo Oliva Salinas
Marcos J. Ontiveros Hernández
Juan Felipe Heredia M.
(estructura)

Realización:
Carrusel S.A. de C.V.



ADOSADO ADAPTABLE



Siete módulos en forma de "V" soportados por dos traveses carril, como armaduras triangulares logran este sistema plegable que mediante motores y micro-sensores permiten una apertura y cierre automático de la cubierta.

La posibilidad de un sistema ligero y adaptable es un tema recurrente en las necesidades de los espacios y aquí se logra una solución que sin ser propiamente una velaria utiliza la estructuración a base de tijeras articuladas y largueros de acero para tensar los módulos individualmente y lograr una cubierta robusta y segura ante esfuerzos externos.



Fig. 3.1
Pasillo previo a la intervención.



Fig. 4.2
Croquis conceptual inicial

4 TV Azteca

“Mi vida y mi obra han consistido siempre en intentar hacer lo que no sabia hacer”

Eduardo Chillida

CLIENTE: Televisión Azteca
IDEA ORIGINAL: Arq. Jorge Páez Viera y D.I. Pilar Carrasco
ÁREA CUBIERTA: 710 m²
CONSTRUCTOR: Carpas y Lonas el Carrusel S.A. de C.V.
INGENIERÍA: M en Arq. e Ing. Alejandro Rojas Contreras

4.1 Directrices de diseño

En el proyecto de remodelación integral del pasillo de foros de Televisión Azteca, se logro convertir un andador de servicios en un paseo jardín, con una fresca calidad de espacio exterior, donde la cubierta se convierte en la columna vertebral de la composición jugando un papel protagonista en la imagen e identidad del lugar.

El pasillo existente constituye una necesidad de traslado cotidiana para el personal y los visitantes de las instalaciones y nuestra intención era convertir este espacio en un “pabellón” de convivencia para los usuarios, un escenario que represente el espíritu de la empresa y de sus proyectos

Esencialmente el proyecto integral se puede explicar identificando tres elementos compositivos básicos:

- 1) **La Jardinería:** sugerimos una serie de taludes sinusoidales, cubiertos de vegetación rasante, que sean la liga entre el plano horizontal y los muros de foros.

En medio de estos taludes se formaran pequeñas salas de estar al exterior que cambien la escala del espacio y propicien un lugar de descanso adecuado, a la sombra de algunos árboles.

- 2) **Los nuevos muros:** los paramentos existentes serán recubiertos con nuevos materiales. Se propone un rodapié del mismo material del pavimento que permita entender el desplante de los edificios y a su vez la continuidad formal y material.

Después del rodapié sugerimos recubrir los muros y columnas a base de un panel de concreto “Duroc”, permitiendo ordenar visualmente el paseo.

Sobre la celosía se han proyectado espectaculares que generan un mural policromático de identidad con la empresa.

- 3) **Las cubiertas:** Se opto por un sistema a base de velarias modulares de color blanco y apariencia vanguardista.

El gran paseo queda cubierto a base de una "espinas dorsal" de velarias con un ritmo marcado por la luz que atraviesa sus cinco linternillas ojivales de aluminio y cristal, el cual es interrumpido por una velaria de mayor altura concebida como pantalla para proyectar lo que sucede en los foros y que da jerarquía a la plaza que también puede utilizarse como cafetería al aire libre.

El acceso principal y el acceso al edificio de producción serian techados con una cubierta ligera de cristal y arco cables de acero.



Fig. 4.3
Perspectiva de anteproyecto



Fig. 4.4

Planta de Conjunto de anteproyecto

- | | | | |
|------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 1.- Acceso principal | 3.- Primer pasillo - jardín | 5.- cafetería al aire libre | 8.- Segundo pasillo-jardín |
| 2 y 7.- Acceso a foros | 4.- Plaza central | 6.- Bancas en áreas de estar | 9.- Remate Icónico (logo TV Azteca) |

4.2 Búsqueda de la forma

La geometría aplicada en este proyecto fue definida rápidamente, decidiéndonos por formas que veníamos estudiando y que se adaptaban perfectamente a los requerimientos del espacio.

Para la elección de la forma del pasillo modular se retomó la experiencia de una geometría semi-cónica aplicada a una pequeña velaria en el nuevo Edificio de Biología en Ciudad Universitaria, realizada por Juan G. Oliva y Víctor H. Roldán, con la variante de la integración de una linternilla ojival para generar el punto alto. (Fig. 4.5 y Fig. 4.7)

Mientras que en la gran velaria central se buscó la sencillez de un doble PH, alternado puntos bajos y altos, deformado el manto por dos costillas a lo largo de sus diagonales. (Fig. 4.6)

Sin embargo la pronta definición de la forma contrastó con el trabajo que representó el desarrollo; sobre todo en el modelado manual-digital, descrito con anterioridad, de los espacios de transición entre las geometrías puras (cónicas y PH) deformadas por elementos rígidos como las puntas de la linternilla o el cable de las costillas.

Otro de los contratiempos que genera el modelado previo a la definición de fuerzas, son las tangentes de las puntas a los anclajes, las cuales varían una vez que se hace el corte de la curvatura de la relinga. Sin embargo todos esos problemas fueron sorteados y se pudieron hacer las plantillas adecuadas.

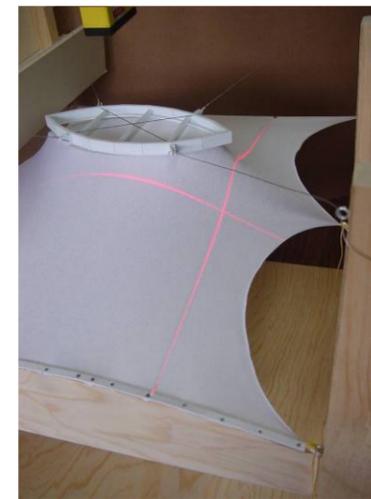


Fig. 4.5
Maqueta de licra del modulo con linternilla con la proyección de láser para estudio de la geometría

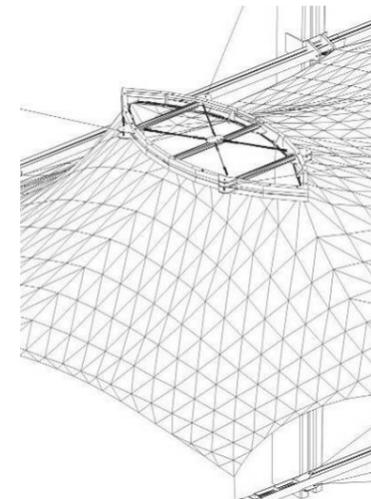


Fig. 4.7
Modelo digital resultante del módulo de pasillo con linternilla



Fig. 4.6
Maqueta de presentación del conjunto

Diversas escalas en estructuras velarias

4.3 Desarrollo constructivo

4.3.1 Antecedentes

El conjunto de edificios en los que se plantea el proyecto fue diseñado por el arquitecto Dr. Jesús Aguirre Cárdenas en 1972 con una ingeniosa idea de prefabricación, semejante a las ataguías, en la que los muros de los foros son paneles de concreto aligerado unidos mecánicamente, en una junta seca, a las columnas de concreto armado mediante una detalle tipo machihembrado.

4.3.2 Anclajes

A fin de lograr un equilibrio entre la economía y las expectativas, se planteo utilizar las columnas existentes como estructura portante; por lo que el primer paso fue determinar la confiabilidad de la edificación, para ello el ingeniero Alejandro Rojas realizo un dictamen técnico donde identifico que la estructura se encontraba sana y que si la construcción se había realizado con los requerimientos mínimos de calidad podía soportar los esfuerzos que la velaria le induciría.

Si embargo en función de la seguridad e importancia de los edificios así como de la incertidumbre en la calidad en la construcción, se acordó tomar el criterio de “falla dúctil” en los anclajes, diseñándolos como una camisa de acero que abrazan la columna fijándose a ella con tornillos expansivos, de forma tal que antes que se trasmite una carga que ponga en riesgo la estructura existente, se doblara la placa y fallaran los tornillos, liberando así la columna de la carga. (Fig. 4.8)

4.3.3 La viga acostada

El sistema de seguridad de los anclajes se complementa por una viga “I” Perfil Rectangular (IPR) que liga y reparte los esfuerzos entre los anclajes bajos. Esto es debido a que, cuando se considera el viento, son estos anclajes los de mayor requerimiento, y como, dependiendo de la dirección del viento este requerimiento no es uniforme la viga trasmite parte de la sollicitud de carga de un anclaje sobre esforzado a sus anclajes vecinos. (Fig. 4.9)

Un dato interesante de esta viga es que se colocó horizontalmente, en función de la tangente que toma el vector de anclaje, debido a la forma de la velaria.

Además de la función descrita, esta viga nos sirvió para ampliar el área cubierta más allá del paño de los edificios mediante la prolongación de una ménsula del mismo IPR, con un cabezal de polea articulado para tomar el ángulo de la tangente de anclaje. (Fig. 4.11)

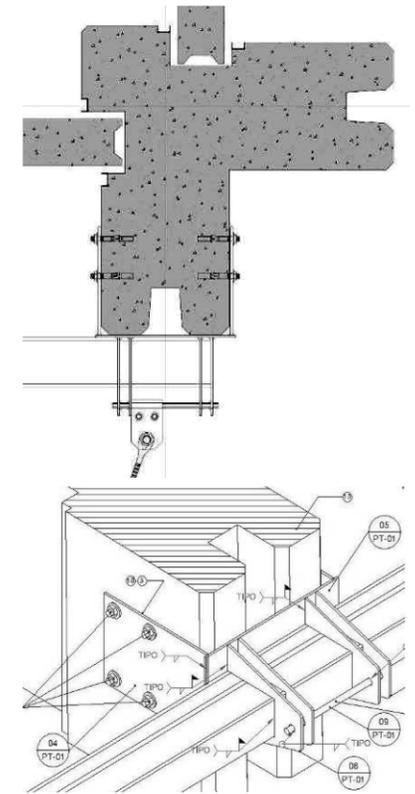


Fig. 4.8
Detalles de anclaje de viga IPR a columnas existentes



Fig. 4.9
Trabajos de soldadura en campo

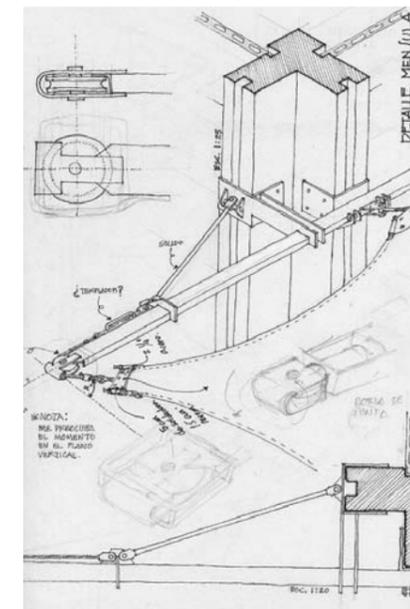
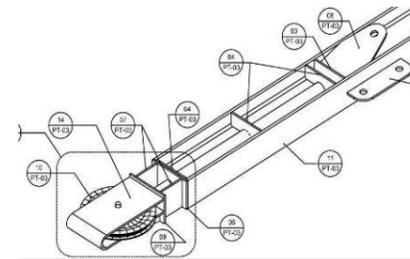


Fig. 4.11
Croquis, detalle en plano e imagen de la prolongación de la viga IPR, para formar la mensula que toma el punto de anclaje en la esquina final de la cubierta

La idea de esta trabe de liga que se convierte en la ménsula que integra el sistema de anclaje y tracción de la velaria logra sintetizar el discurso compositivo del proyecto donde todos los elementos tienen una razón de ser tanto estructural como arquitectónica y donde no existen elementos de ornato o formas arbitrarias.

4.3.4 Las linternillas

Después de la experiencia del Palacio de Minería, retomamos el tema de las linternillas intentando mejorar el sistema de izado y sujeción a la par de lograr un mayor tamaño del elemento. Así es como propusimos linternillas en anteproyectos como el Aeropuerto de la ciudad de México que lamentablemente no se concretó; y es hasta que nos encontramos con la propuesta para TV Azteca que se nos permitió aplicar lo imaginado.

El diseño de las velarias con linternilla flotantes, si bien no es una invención propia, si representó una variante en las posibilidades de aplicación en México, además de ser una adecuada integración entre las posibilidades arquitectónicas y las estructurales, cumpliendo con 3 funciones de distinta índole, como son:

1. Ser el punto alto que riga la forma.
2. Ser el elemento de izaje para el montaje del sistema completo.
3. Ser la ventana cenital que logra la ambientación deseada, de espacio exterior, acentuando la sensación de ligereza de la membrana y permitiendo la salida del aire caliente en una ventilación cruzada.

Además de tener el compromiso de desempeñar lo anterior, decidimos que en búsqueda de la innovación podíamos arriesgarnos en hacer la estructura en aluminio que siendo tres veces más ligero que el acero nos podría facilitar mucho las maniobras.

Para solventar lo referente al montaje se diseñó una linternilla en dos secciones, una baja y robusta que tomara los esfuerzos de la membrana y una alta mas ligera que sirviera de bastidor a un cristal templado laminado 3+3. Con la idea de subir primero la ligera con los cristales y después la robusta con la membrana a fin de evitar movimientos bruscos durante el montaje que rompieran o desarmaran los cristales.

Finalmente, aunque se hicieron las dos linternillas, se decidió montarlas unidas haciendo el izaje con suavidad, dando un resultado satisfactorio. De hecho el único cristal que se rompió fue en el piso durante su colocación y tuvo que ser repuesto en el aire con la membrana ya instalada.



Fig. 4.10
Maqueta de estudio linternilla
Diversas escalas en estructuras velarias

En cuanto al uso del aluminio, que en la industria es de empleo común, se intento hacer una transmisión de tecnología hacia un elemento estructural; a la manera de Eero Saarinen.

Esto resultó ser más complicado de lo que imaginamos en un principio, debido a que en México no se cuenta con las posibilidades de aleaciones, calidades y perfiles; de hecho no existe una Línea Estructural en la producción de aluminio.

Por lo anterior se diseño con la Línea Industrial, única en el mercado que nos daba garantía de resistencia con una aleación 6063 temple 5 y un sistema de microsoldadura.

Aunque inicialmente se hicieron probetas para ensayos de soldadura que dieron resultados aceptables, cuando el soldador se enfrenó a un cordón corrido de varios centímetros de longitud no logro pasar las pruebas de laboratorio, auto impuestas, a base de líquidos penetrantes. Lo que nos obligo a cambiar el diseño de uniones soldadas por uniones mecánicas atornilladas.

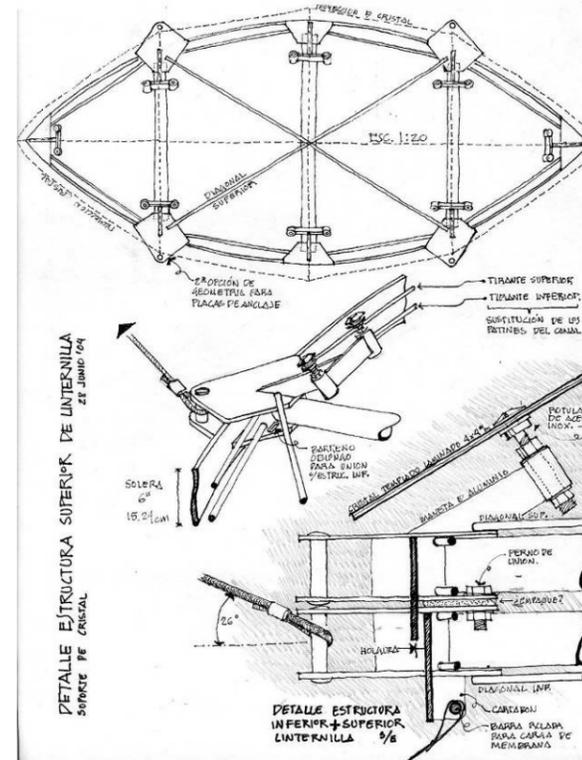


Fig. 4.15 Croquis de desarrollo de proyecto de linternilla

El resultado final fueron linternillas de aprox. 150 Kg c/u, con cristales instalados en un sistema de manetas, de amplio rango de maniobra, diseñado especialmente para permitir el movimiento junto con la membrana y el ajuste de los cristales con las diferencias de manufactura.

Como colofón a esta situación adversa, se debe comentar que después de entregado este proyecto se ha seguido trabajado con la soldadura de aluminio, para el Laboratorio de Estructuras, obteniendo una calidad estructural confiable.

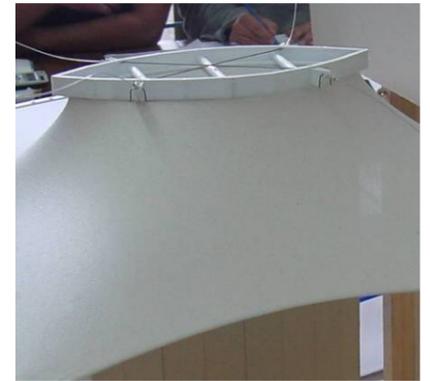


Fig. 4.12 Maqueta de linternilla inferior con membrana



Fig. 4.13 Vista interior del marco de la linternilla inferior



Fig. 4.14 Instalación de cristales a linternilla superior

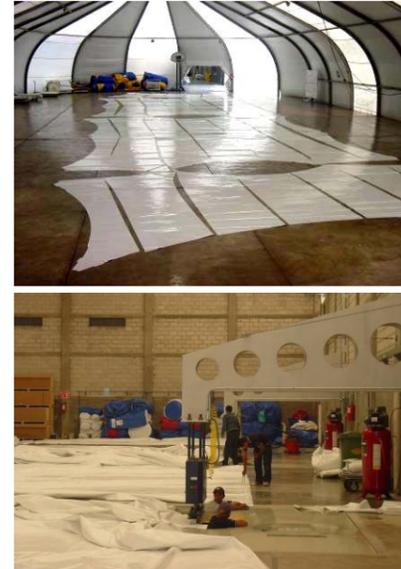


Fig. 4.18
Despiece y vulcanizado en alta frecuencia en el taller de membranas “Carrusel”.

4.3.5 La membrana y el montaje

Para la manufactura de esta velaria se selecciono una membrana blanca de fibra de poliéster modelo *Preconstraint 702 serie S* de la marca Ferrari, siendo que nos había dado buenos resultados en el Palacio de Minería.

La forma de armado fue a base del corte de las plantillas con patrones impresos a escala 1:1, uniendo los lienzos con un traslape de 1”, vulcanizándolos con maquinaria de alta frecuencia (Fig. 4.18), proceso que implica hacer pasar un arco eléctrico de alta frecuencia calibrado para garantiza una unión perfecta del recubrimiento plástico sin afectar la fibra ni quemar el recubrimiento.

Debido a la ajustada agenda impuesta por el cliente el montaje se tuvo que realizar en dos fines de semana seguidos trabajando día y noche, debido a que el riesgo de lluvia o viento en una velaria sin tensión puede llevarla a una sobrecarga no considerada en diseño y un colapso prematuro.

En las imágenes inferiores se puede ver el sistema de izaje de las linternillas con la membrana en una sola pieza y el personal de montaje sobre la viga “IPR” maniobrando los 16 malacates que izan pausadamente el sistema completo. (Fig. 4.17 y Fig. 4.16)



Fig. 4.17
Proceso de montaje de la velaria central



Fig. 4.16
Proceso de montaje de las velarias modulares de pasillo

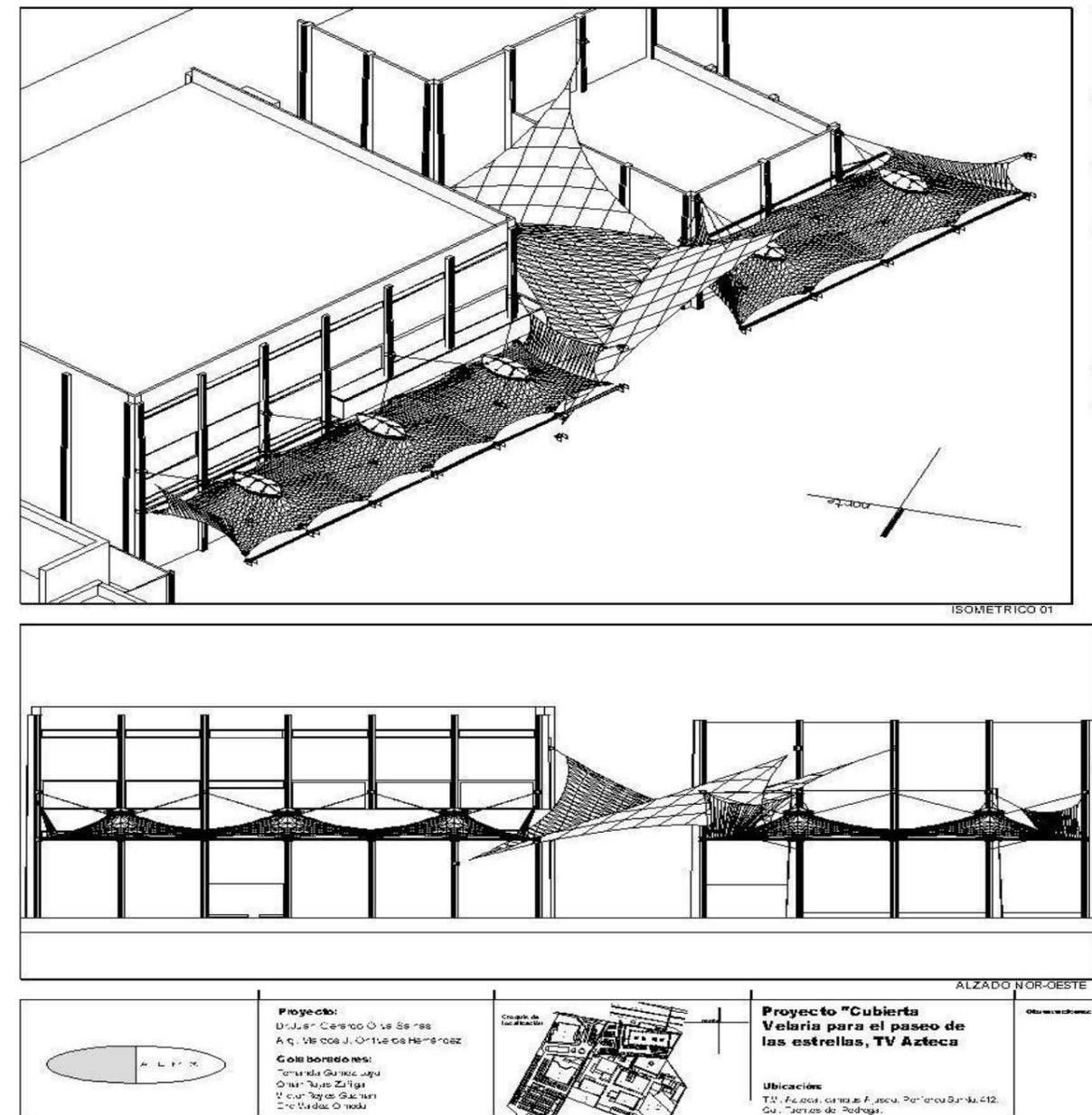


Fig. 4.20 – ISOMÉTRICOS ILUSTRATIVOS

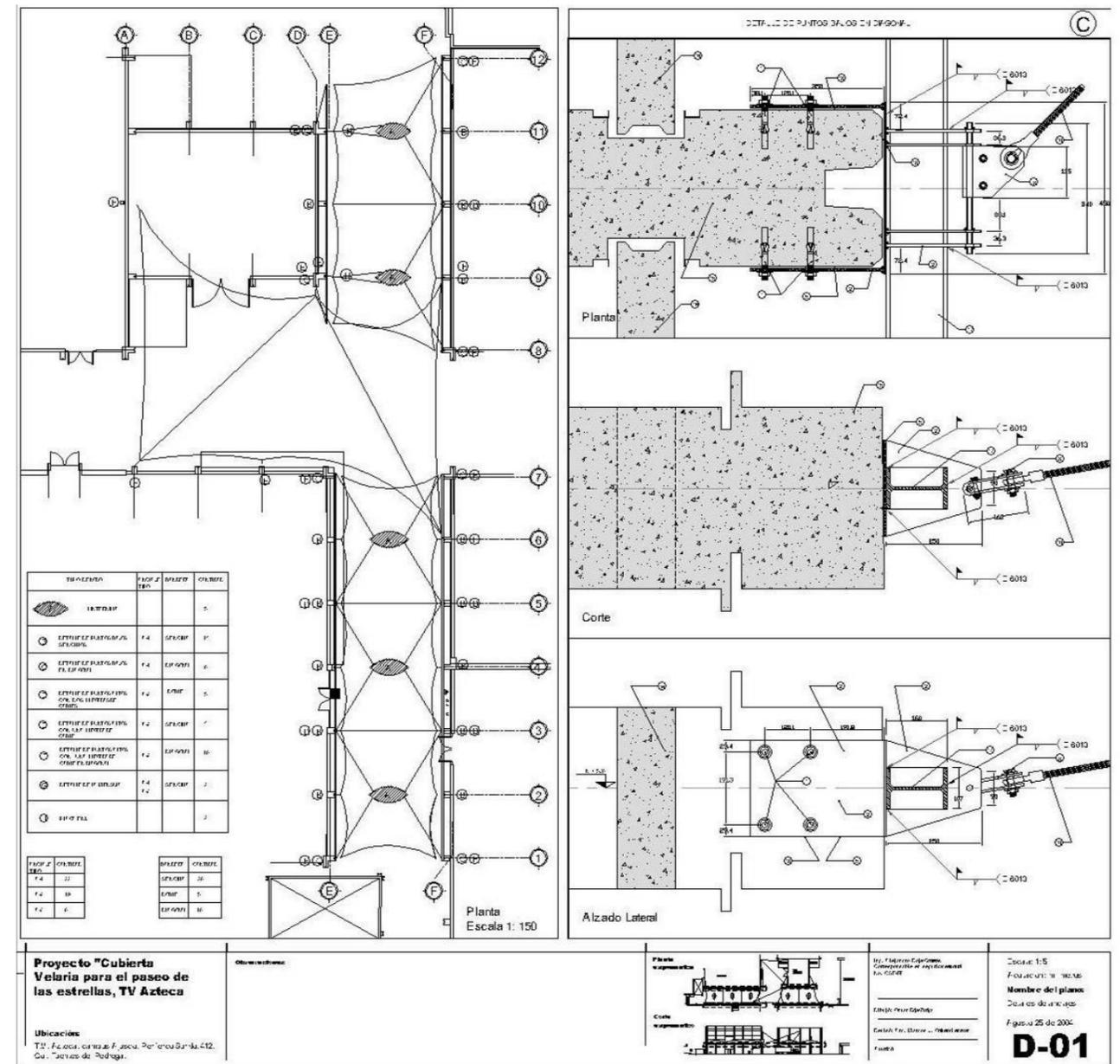


Fig. 4.21 – PLANO DE ANCLAJES A COLUMNAS EXISTENTES

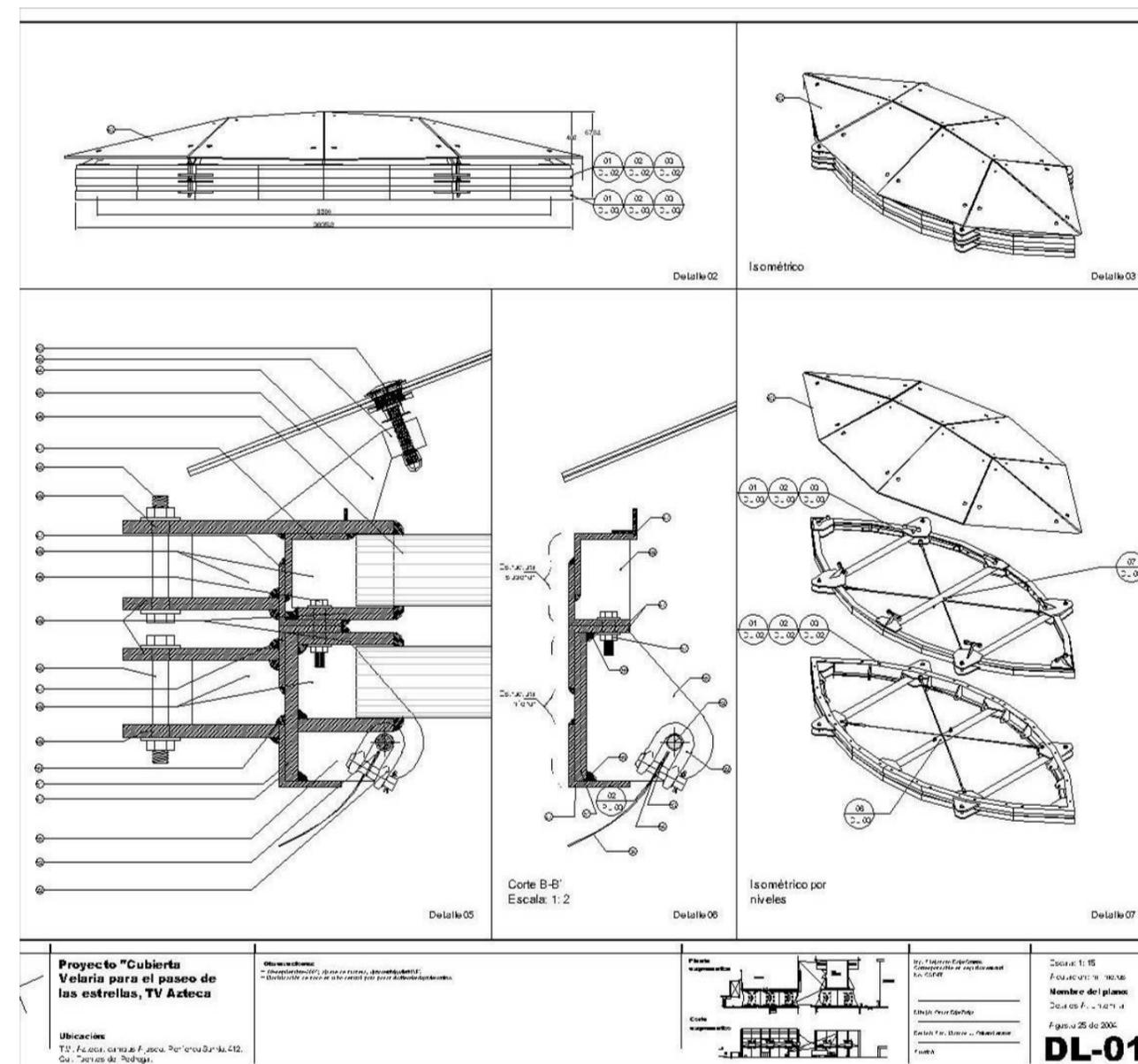


Fig. 4.22 - LINTERNILLA

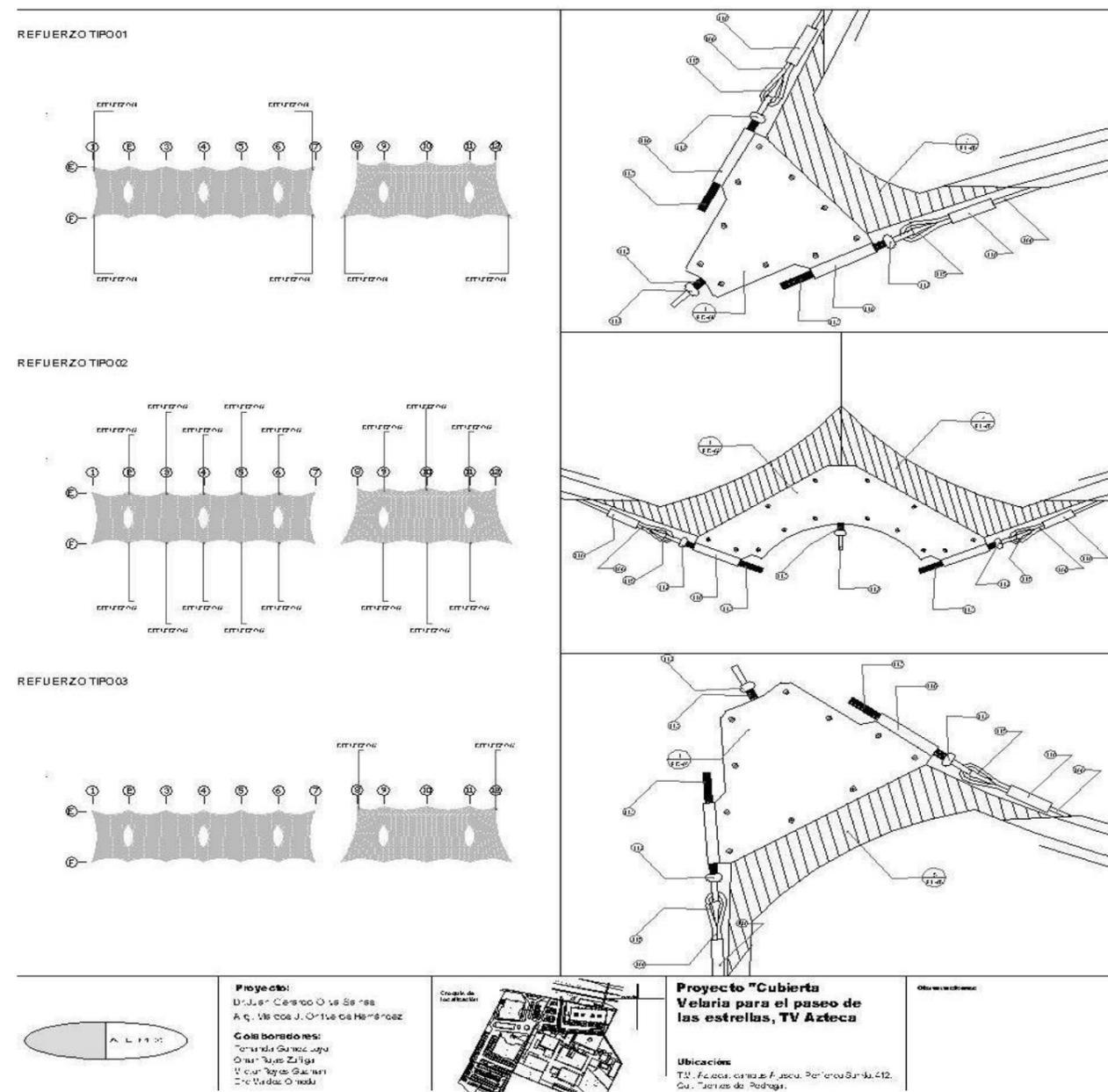


Fig. 4.24 – DETALLES DE REFUERZOS EN PUNTA DE MEMBRANA

4.5 Memoria fotográfica



Fig. 4.25 – VISTAS GENERALES



5 Trajineras

“La construcción es el arte de configurar un todo con sentido a partir de muchas particularidades..... El núcleo propio de toda tarea arquitectónica reside para mí, en el acto de construir. Es aquí cuando los materiales concretos se ensamblan y se levantan, donde la arquitectura pensada se convierte en parte del mundo real”

Peter Zumthor¹⁰

PROYECTO:	Transporte interno para los canales del hotel “Mandarin Oriental”, ubicado en la Riviera Maya
CLIENTE:	Desarrollos Marítimos DEMA
IDEA:	Arq. Gilberto Borja y Maestro Pablo Amor
ÁREA CUBIERTA	7.5 m2 c/u
CONSTRUCTOR:	Carpas y Lonas el Carrusel S.A. de C.V
CALCULISTA:	Ing. Enrique Papaqui
PREMIO:	“Outstanding Achievement Award 2007” otorgado por la “Industrial Fabrics Association International” (IFAI).



Fig. 5.1
Trajineras típicas en Xochimilco

5.1 Directrices de diseño

Dentro de un hotel de gran turismo en la Riviera Maya, concebido con una baja densidad de habitaciones en cabañas tipo bungalow vinculadas entre sí por serpenteantes veredas y canales tipo cenotes, surge la idea de un transporte acuático, culturalmente simbólico pero característico del hotel.

Así es como empieza la búsqueda de rescatar la esencia de la tradicional trajinera, en una pequeña embarcación con cubierta velaria de carácter contemporáneo.



Fig. 5.3
Maqueta de presentación prototipo “A”

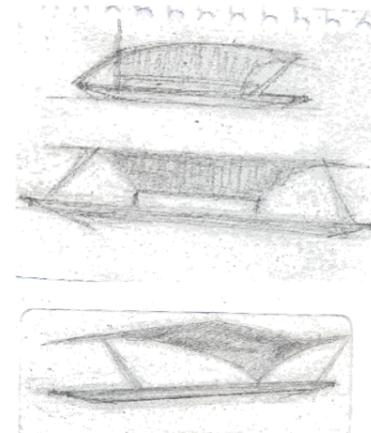


Fig. 5.2
Croquis conceptuales originales Arq. Gilberto Borja

5.2 Búsqueda de la forma

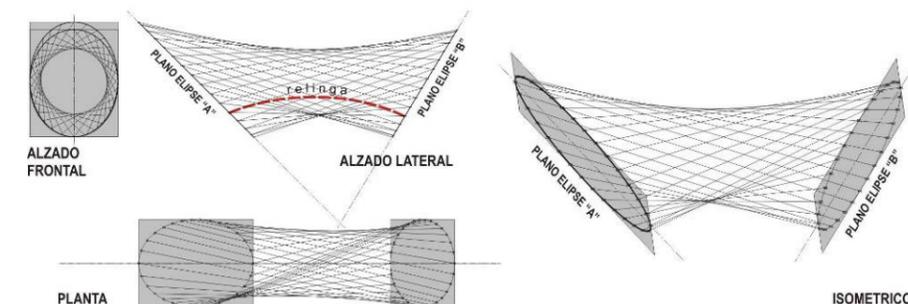


Fig. 5.4
Trazo geométrico prototipo "A"

Uno de los primeros retos que se tuvieron que enfrentar para la realización de este proyecto, fue encontrar una forma adecuada, no solo a los requerimientos utilitarios y constructivos comunes a todos los proyectos; sino que respondiera principalmente a la intención que la estaba originando, la cual buscaba crear un arte-objeto que evocara una trajinera pero con las cualidades tectónicas y visuales de una velaria.

Esta situación cobró tal importancia, que fue imposible obtener un solo resultado y se optó por tres prototipos seleccionados de varios anteproyectos.

El primer prototipo tiene una forma parecida a la cubierta de una carreta y desde el punto de vista geométrico se desarrolla como un hiperboloide de revolución pero con curvas generatrices de perfiles elípticos de diferente curvatura y contenidos en planos convergentes (Fig. 5.4.). Esta geometría nos planteó una problemática especial con referencia al preesfuerzo necesario para generarla.

En un inicio, a fin de aumentar el espacio interior utilizable, se consideró la conveniencia de una curva amplia entre los dos arcos, con una flecha menor al 10% del claro, que si bien funcionaba en los modelos de papel (Fig. 5.5) y en la maqueta de tela (Fig. 5.3), cuando se intentó montar por primera vez en sitio, fue imposible lograr una tensión superficial equilibrada que permitiera una membrana sin arrugas.

Además de la escasa curvatura inicial de la membrana, lo anterior se debió a que la madera de la canoa no permitió inducirle los esfuerzos necesarios para tensar el sistema, a diferencia de las velaria que se apoyan en la robusta estructura de un edificio o en un terreno firme donde el material base de los anclajes soporta grandes esfuerzos.

Finalmente se optó por sacrificar el espacio interior útil a fin de reducir los preesfuerzos de la forma aumentando la curvatura de la membrana, optimizando así el comportamiento estructural y de paso mejorando la apariencia general.



Fig. 5.5
Maquetas de papel para estudio y comprobación de plantillas, prototipo "A"

Con esta primera experiencia en mente, el prototipo "B" se abordó utilizando la geometría del *Paraboloide Hiperbólico* para definir un esquema estructural en el que quedarán contenidas las resultantes del preesfuerzo dentro de la misma estructura portante.

Así es como se logra configurar una tenso-estructura sencilla y eficiente que descansa en cuatro puntos articulados a los lados de la canoa; utilizando una aproximación de traslación en la clásica *silla de montar* y cortando en puntos de anclaje predefinidos (Fig. 5.7).

Finalmente para el último prototipo, denominado "C", se optó por un módulo sencillo de valle y crestas que rememora la imagen de una gran hoja de árbol con la que se cubre la canoa.

Con este diseño se buscó el ligero alabeo que da una superficie reglada generada por una directriz recta al centro del valle y dos directrices curvas en los bordes de las crestas (Fig. 5.6).

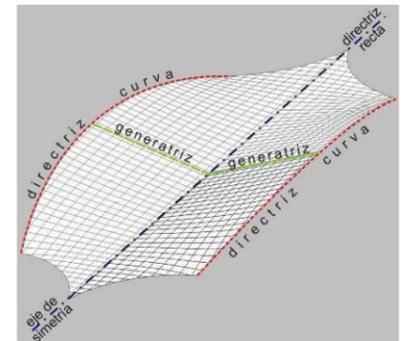


Fig. 5.6
Geometría prototipo "C"

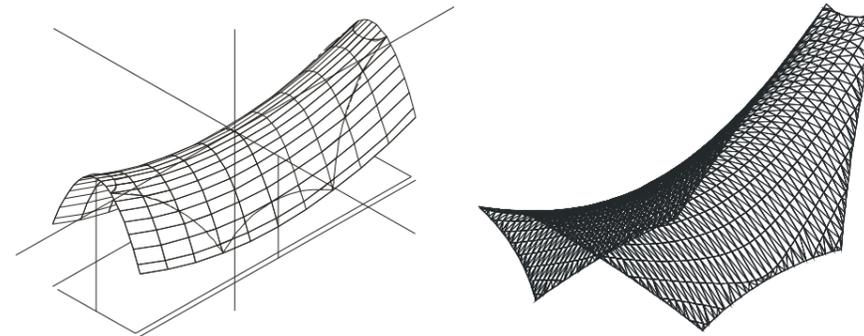


Fig. 5.7
Desarrollo geométrico Prototipo "B"

5.3 Desarrollo constructivo

A diferencia de las grandes velarias donde la percepción humana se remite al conjunto de elementos y al espacio generado, cuando se proyecta una velaria a pequeña escala, los detalles se convierten en parte importante de la vivencia y es en ese sentido cuando resulta indispensable considerar en el diseño hasta el último tornillo en el desarrollo constructivo.

Otra situación que se lleva al límite en las velarias pequeñas es la posibilidad de ajuste; ya que en una gran cubierta, si por cualquier circunstancia existiera la necesidad de mover un anclaje algunos centímetros, el sistema se adaptaría a las nuevas condiciones utilizando la elasticidad de la membrana y reequilibrando las tensiones en las relingas adyacentes, hasta encontrar su estado de equilibrio, minimizando las irregularidades (arrugas).



Fig. 5.8
Taller de canoas en las Chinampas

Sin embargo en sistemas de dimensiones similares a las de este ejercicio, un desfase de mas de 3 cm en los puntos de anclaje es imposible subsanar durante la instalación, siendo poco probable encontrar el punto de equilibrio en el cual no se presenten arrugas, ya que las deformaciones de los materiales resultan significativas para esta escala.

5.3.1 Base

El desarrollo constructivo se inició con la canoa y para ello se recurrió a los especialistas artesanos de Xochimilco que por varias generaciones las han construido tanto para las típicas trajineras como para las de uso común en sus labores de agricultura dentro de las Chinampas.

Utilizando como materia prima tablonés de madera de Oyamel y haciendo injertos de madera de Pino, la canoa se arma íntegramente a base de empalmes y clavos de acero, sin utilizar pegamentos (Fig. 5.9). Una vez armada se calafatean las juntas con fibra de coco y resinas naturales quedando lista para recibir el acabado final de 3 manos de pintura de esmalte marino lo que, además del colorido, le confiere, una barrera impermeable, protección a la intemperie y por ende una mayor vida útil.

Las dimensiones con que fueron construidas se definieron para que pudieran ser maniobrables en los estrechos canales del hotel, resultando ser menores aun que las mas pequeñas que tradicionalmente se fabrican, lo cual limitaba el peso transportable, ello nos obligo a buscar maximizar la eficiencia de la estructura y diseñar con materiales como el aluminio para reducir peso y permitir el transporte de mas pasajeros.



Fig. 5.9
Detalles construcción de canoa

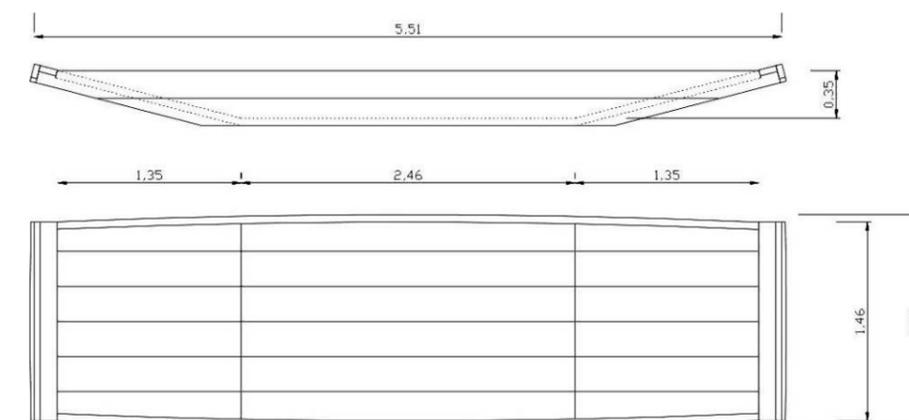


Fig. 5.10
Dimensiones de la canoa para el prototipo "A"

5.3.2 Anclajes

Si bien esta canoa era lo que conceptualmente se buscaba, estructuralmente hablando, el anclaje es tan resistente como el material base al que se instala y en este caso, una madera que va a estar sometida a la intemperización de un clima tropical no da garantías para anclar directamente cables de tracción o empotrar postes.

Por lo tanto, en el diseño de la estructura portante, se puso especial atención en la unión de los arcos y postes con las paredes laterales de la trajinera diseñando una articulación con una camisa metálica que abraza la madera de lado a lado evitando desgaste por rozamiento y momentos en la pared, además de tapar la entrada de agua por el barreno.

Debido a las virtudes de este sistema de articulación se decidió utilizarlo para los tres prototipos, que a partir de esa base común se desarrollan independientemente de acuerdo a las necesidades de membrana predefinida.



Fig. 5.12
Articulación de poste a pared de canoa

Otro de los detalles comunes a los tres prototipos se da en las esquinas de la canoa, donde se colocaron los anclajes de los cables que estabilizan el sistema aprovechando los refuerzos metálicos que tradicionalmente se instalan a manera de parachoques (Fig. 5.11). Cabe aclarar que estos cables sirven para estabilizar los postes debido a su base articulada; no para tensar la membrana.

5.3.3 Estructura portante

En el caso del prototipo "A" en la búsqueda de la eficiencia se logró tener la menor cantidad de estructura. El esquema lo componen solo dos arcos elípticos, que se hicieron de acero inoxidable, en vista de que el tubular de aluminio sufría desgarres al rolarlo con la curvatura deseada.

La experiencia adquirida en el prototipo "A" permitió decidir que si bien resultaba económico un sistema de dos arcos y cables, el equilibrio de las tensiones de la membrana y los cables de anclaje podría ser optimizado agregándole un larguero superior que tomara las tracciones en las puntas dejando los cables de las esquinas únicamente para estabilizar la velaria.



Fig. 5.11
Parachoques en acero inoxidable en esquina con tensor de estabilidad



Fig. 5.13
Armado de estructura portante del prototipo "C" en taller

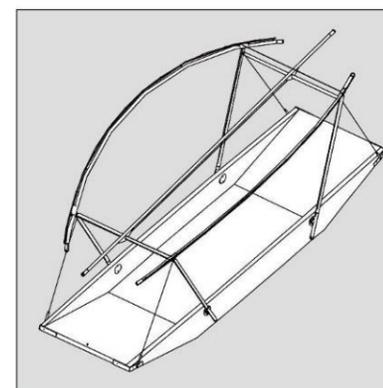
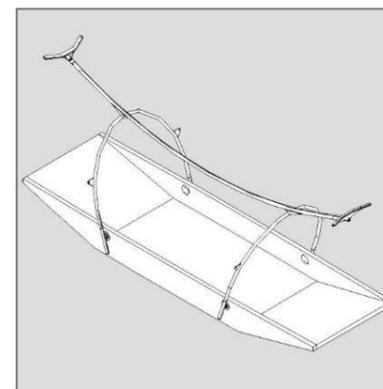
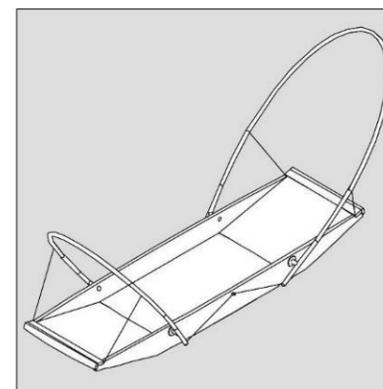


Fig. 5.14
Estructuras portante de los prototipos "A",
"B" y "C", respectivamente.

Esta conjetura generó buenos resultados al implementarla en el prototipo "B", donde el larguero superior que une los dos arcos fluye paralelo en el intradós de la curvatura del P.H., integrándose a la velaria y manteniendo su ligereza visual.

Este mismo larguero se proyecta afuera de los arcos en unas puntas de tracción que como en el caso de la ménsula del proyecto de TV Azteca, representa un elemento que busca equilibrar lo útil y estético para cumplir con el tema de esta tesis, de una arquitectura integral.

Finalmente para el prototipo "C"; la estructura portante resultó ser la que más material requirió, si bien buscaba los mismos principios que las anteriores, la necesidad de un borde rígido en las crestas curvas obligó a tener dos largueros extras.

Debido a esto, para reducir el peso en este tercer prototipo, se decidió hacer la estructura en aluminio a excepción de los nodos; ya que otro inconveniente de los estos bordes rígidos es la alta deformación que presentaron una vez tensado el sistema, debido a la torsión que la membrana le inducía.

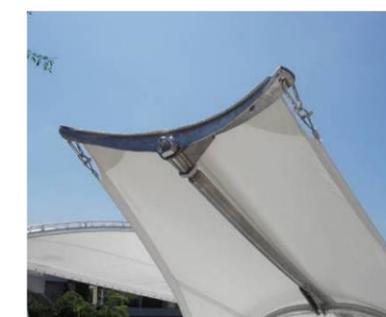
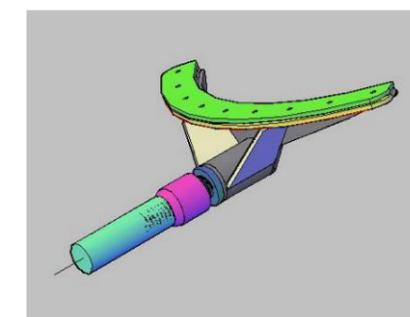


Fig. 5.16
Puntas de tracción prototipo "B", dibujo de proyecto y pieza terminada

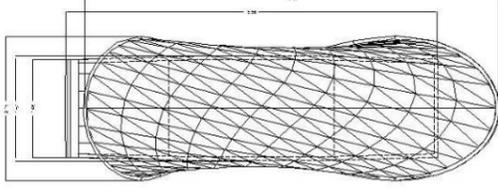
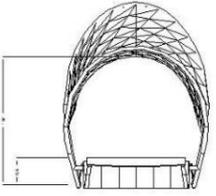
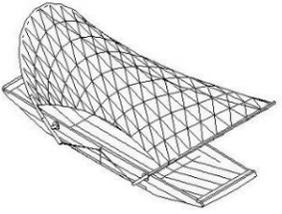
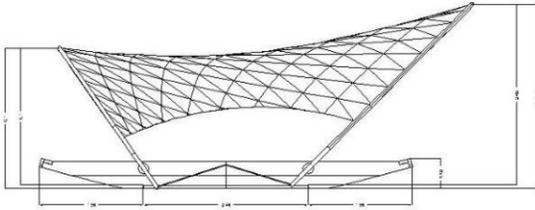
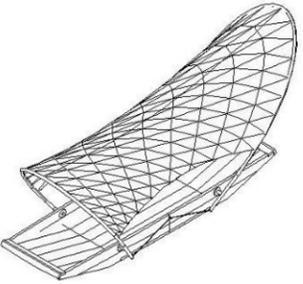
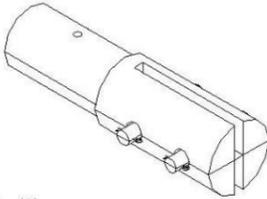
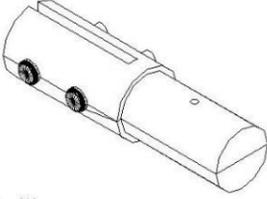
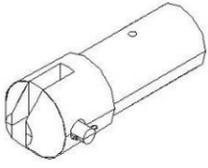
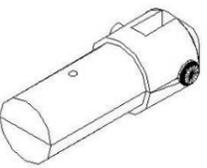
5.3.4 Comentario final

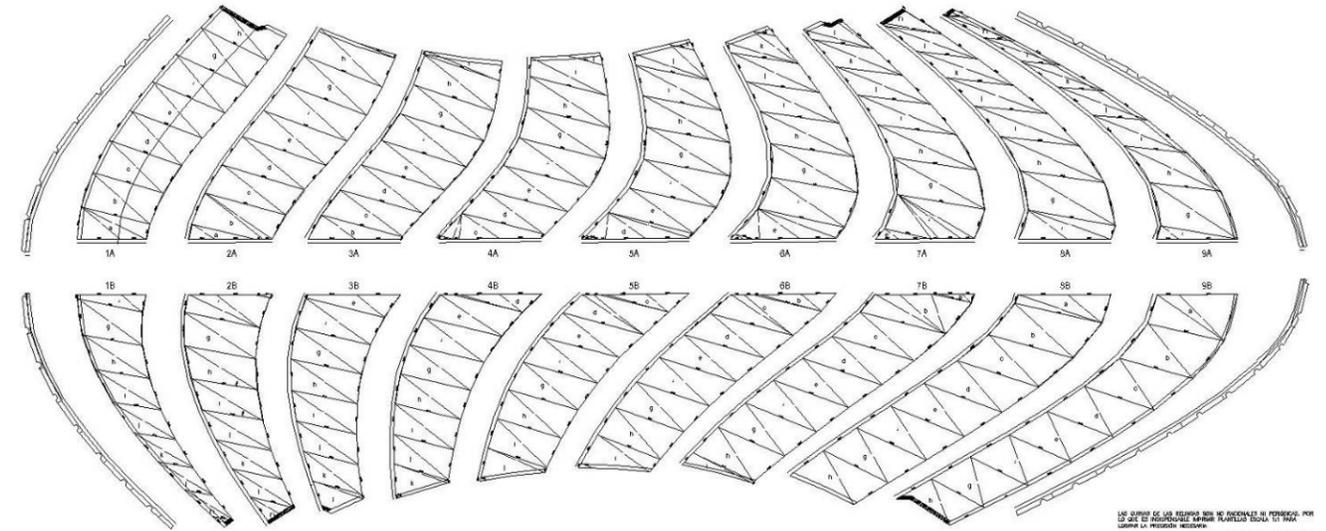
Una de las situaciones que se presentaron en el desarrollo del proyecto y que se convirtió en un aprendizaje significativo, fue el hecho de que pese a que las dimensiones de los tres prototipos son semejantes, la problemática que presentaron cada uno de ellos fue muy diferente, dando como resultado tres proyectos únicos.

Finalmente me es grato comentar que gracias a la iniciativa de la empresa constructora de las trajineras *Carrusel*, este proyecto se postuló para el concurso anual de la IFAI, resultando ganador del "Outstanding Achievement Award 2007".

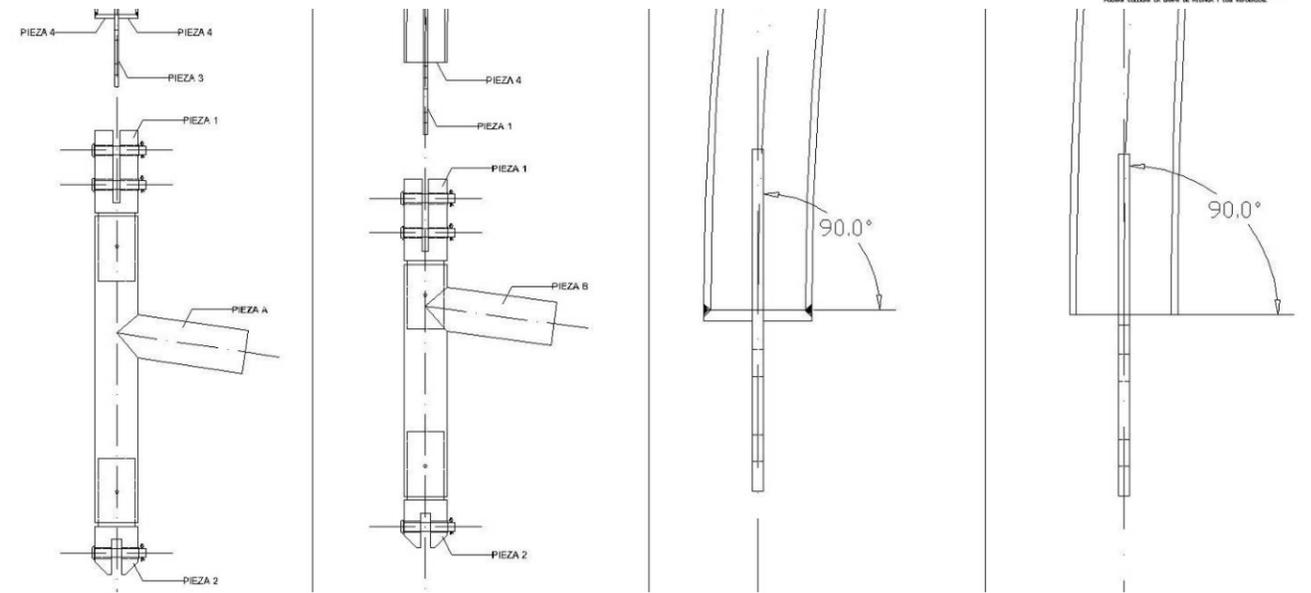
5.4 Planos ejecutivos

5.4.1 Prototipo "A"

 <p>Planta</p>	 <p>Alzado frontal</p>	 <p>Isométrico</p>			
 <p>Alzado lateral</p>	 <p>Isométrico</p>				
 <p>Isométrico</p>	 <p>Isométrico</p>	 <p>Isométrico</p>	 <p>Isométrico</p>		
	<p>Proyecto: A.C. J.S.P. "100 años del PUEBLO" A.C. 1882001-0154-001/18-1002 O.M. "100 años del PUEBLO"</p>	<p>Proyecto: "Trajinera siglo XXI"</p>	<p>Ubicación: Los Hornos - Ometepe, Granada</p>	<p>Plano: Estructura</p> 	<p>Escala: 1:25 Fecha: 01/01/2005 Nombre del plano: P-1-16 Autor: Marcos Javier Ontiveros Hernández Dibuja: Marcos Javier Ontiveros Hernández Fecha: 01/01/2005 D-03</p>

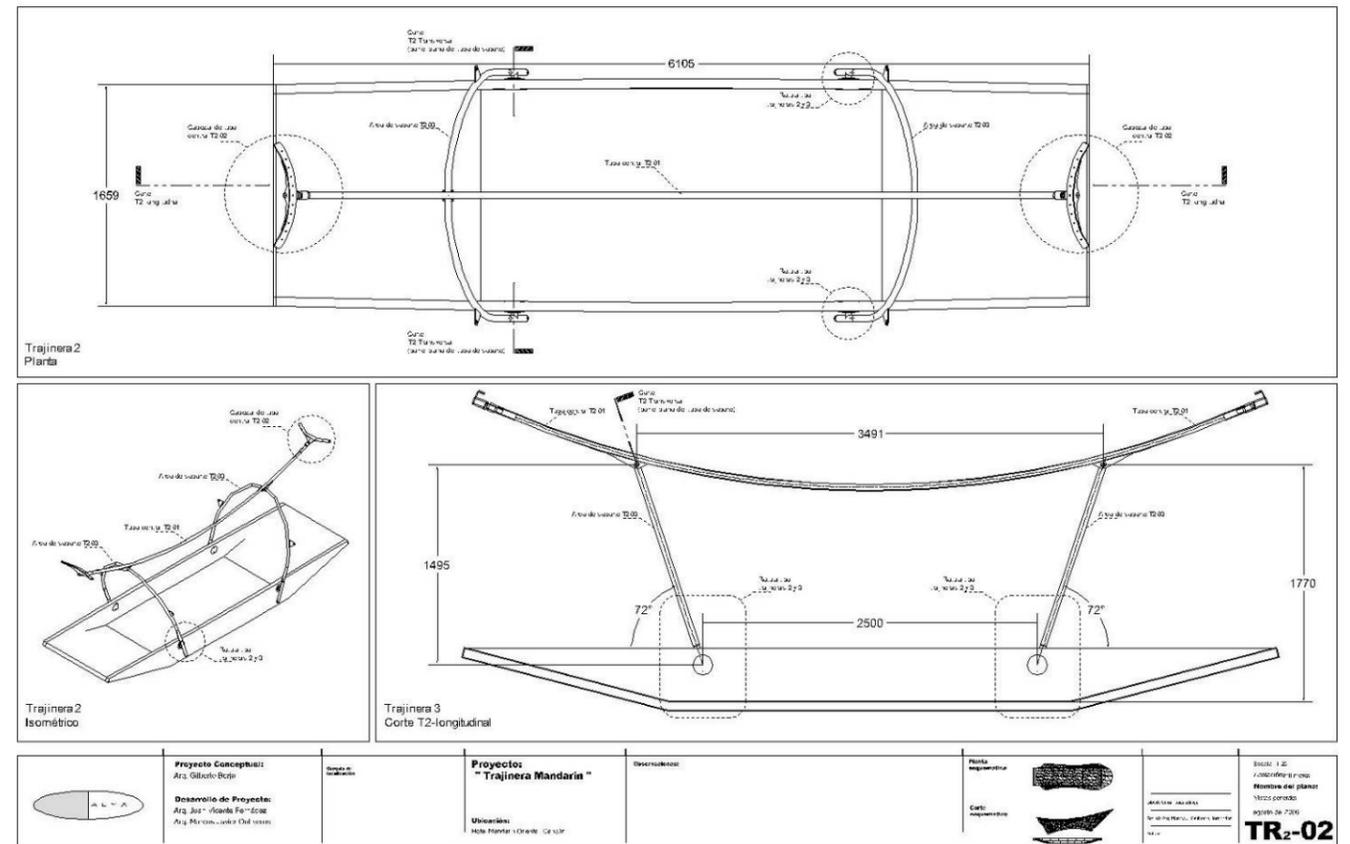


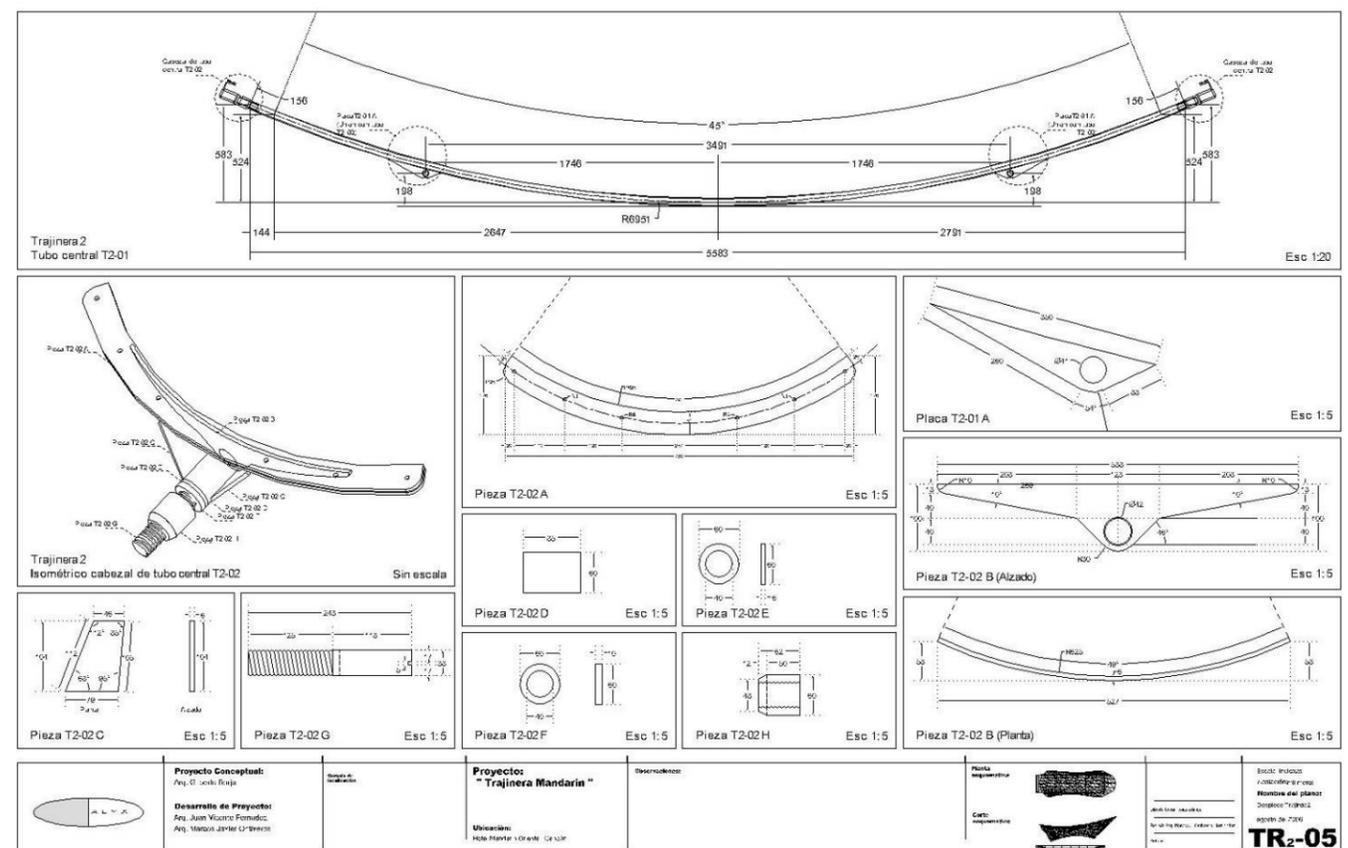
LOS SUPORTES DE LAS ESCALAS SON DE ESTRUCTURA DE PERFILES POR LO QUE SE INDICARON LAS PLACAS DE UNIÓN EN LA PARTE INTERNA Y EXTERNA DELA, SI SON DE CONSTRUCCIÓN DE ACERO Y DE ALUMINIO Y DEBERÁN VERSE COMO UN POCO DIFERENTE.
 LA FORMA DEBEN SER DE UN POCO QUE SON PLACAS DE UNIÓN EN LA PARTE INTERNA Y EXTERNA DELA, SI SON DE CONSTRUCCIÓN DE ACERO Y DE ALUMINIO Y DEBERÁN VERSE COMO UN POCO DIFERENTE.
 LA ESCALERA DEBE CONSTRUCCION CON UNO DE LOS MATERIALES QUE SON ACERO Y ALUMINIO Y DEBERÁN VERSE COMO UN POCO DIFERENTE.
 DESPUES DE SER LA UNIÓN PARA LA ESCALERA, SE TENDRAN QUE HACER UNOS DISEÑOS DE UNIÓN QUE SEAN DE UN POCO DIFERENTE.
 DESPUES DE SER LA UNIÓN PARA LA ESCALERA, SE TENDRAN QUE HACER UNOS DISEÑOS DE UNIÓN QUE SEAN DE UN POCO DIFERENTE.
 DESPUES DE SER LA UNIÓN PARA LA ESCALERA, SE TENDRAN QUE HACER UNOS DISEÑOS DE UNIÓN QUE SEAN DE UN POCO DIFERENTE.



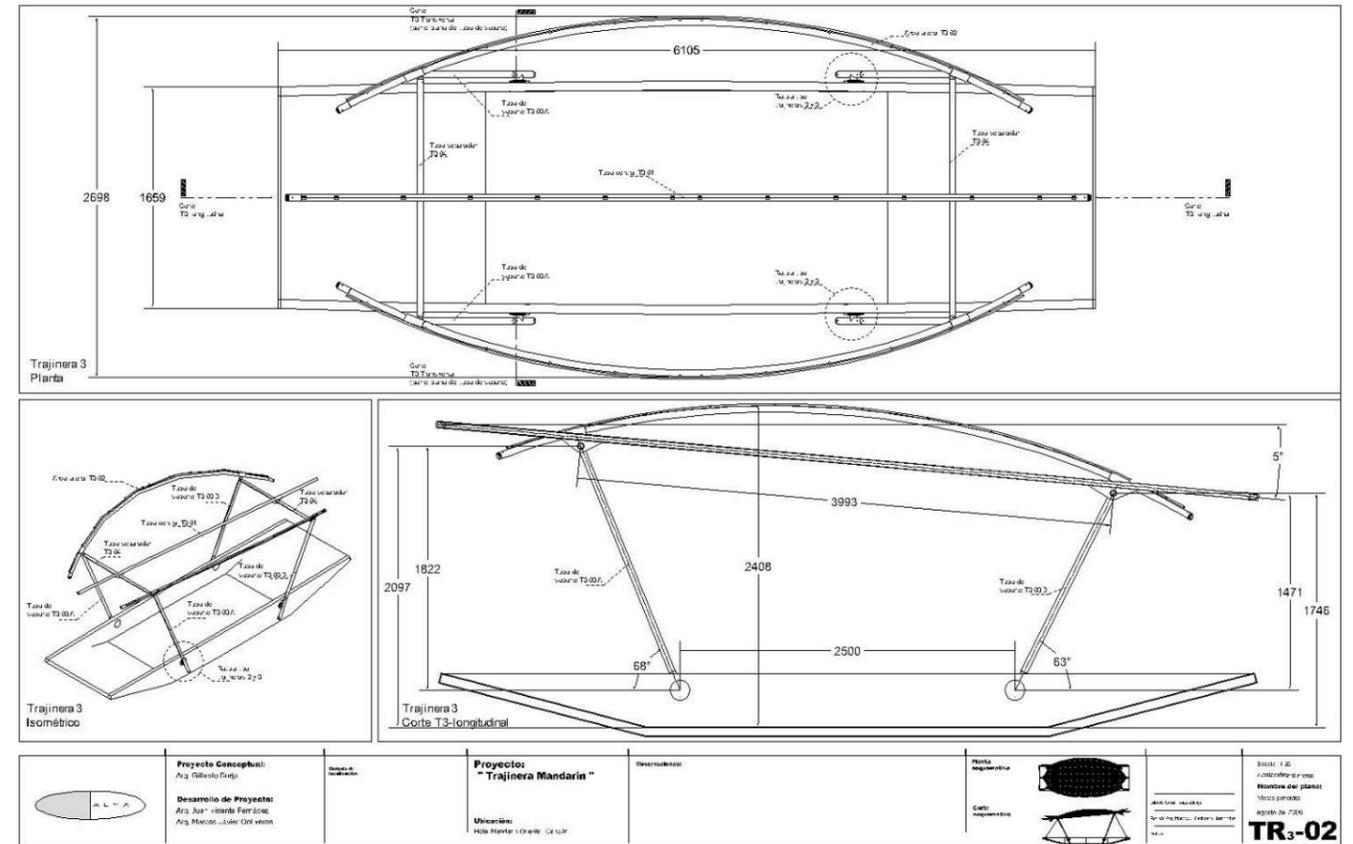
Diversas escalas en estructuras velarias

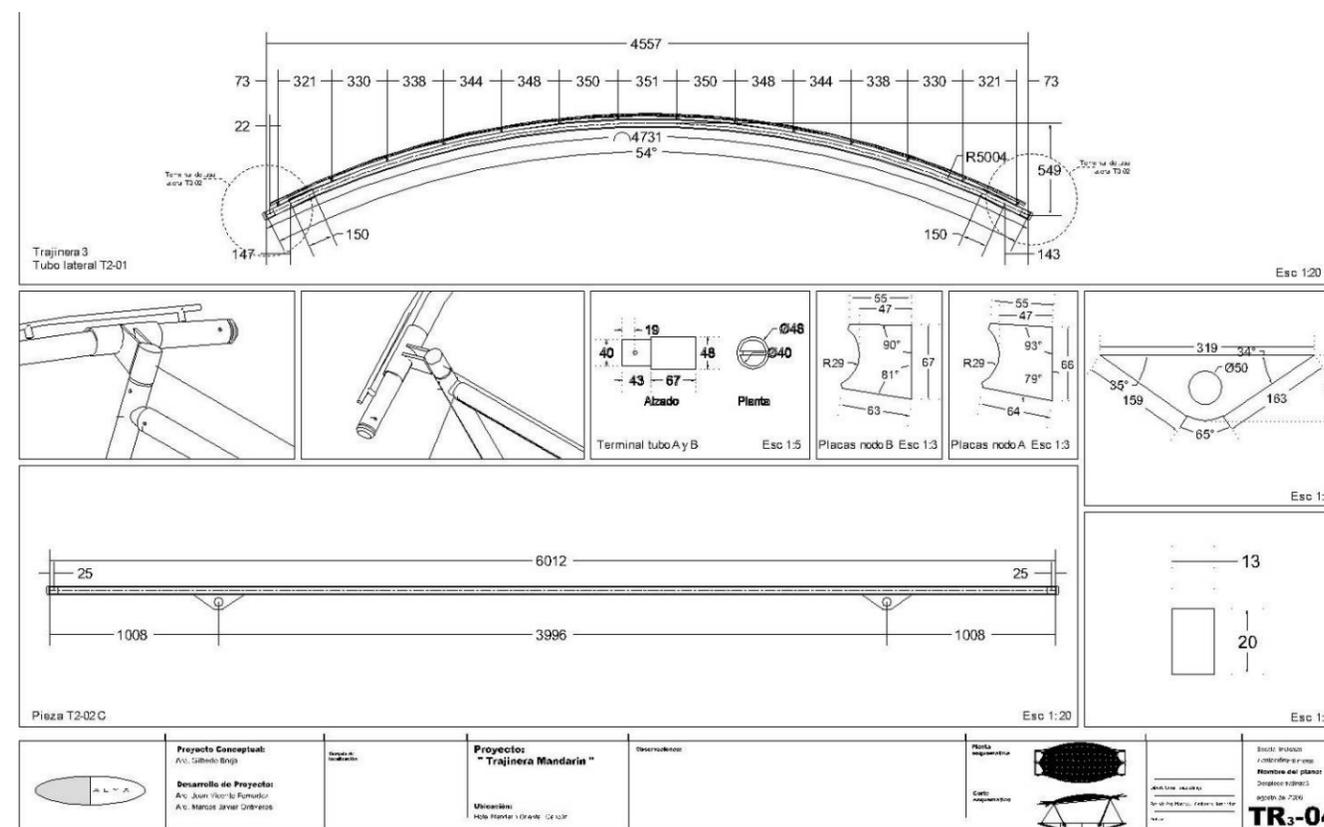
5.4.2 Prototipo B"



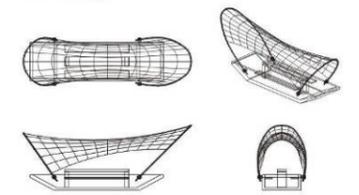
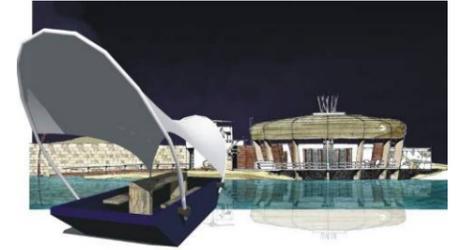


5.4.3 Prototipo "C"





5.5 Memoria fotográfica









6 Conclusiones

“Cada material tiene una personalidad específica distinta, y cada forma impone un diferente fenómeno tensional. La solución natural de un problema –arte sin artificio–, óptima frente al conjunto de impuestos previos que la originaron, impresiona con su mensaje, satisfaciendo, al mismo tiempo, las exigencias del técnico y del artista. El nacimiento de un conjunto estructural, resultado de un proceso creador, fisión de técnica con arte, de ingenio con estudio, de imaginación con sensibilidad, escapa del puro dominio de la lógica para entrar en las secretas fronteras de la inspiración. Antes y por encima de todo cálculo está la idea, modeladora del material en forma resistente, para cumplir su misión.”

Eduardo Torroja Miret¹¹
Razón y Ser de los Tipos estructurales, CSIC,

De las muchas enseñanzas que he obtenido en la elaboración de los trabajos presentados quisiera comentar las conclusiones que más han impactado tanto en mi labor profesional como en la docente.

1. En referencia a las escalas de los proyectos, tal vez la mayor enseñanza es, el nunca subestimar la complejidad de un proyecto por el hecho de que sea pequeño, ya que entre menor sea la escala el rango de error permisible también disminuye.

Aunado a lo anterior, el detalle estético que debe ser considerado de una forma más estricta, aumenta el tiempo necesario para el desarrollo y manufactura de la velaria.

2. En cuanto al sistema constructivo es importante estar conciente de sus virtudes y limitantes; y siempre hacérselas saber al posible usuario, por ejemplo:

- o Una membrana de 2 mm de espesor, debido a su baja masa térmica, por sí sola es incapaz de ser un aislante; de forma tal que resulta necesario enriquecer el proyecto con mecanismos de climatización pasiva, como la linternilla que además de ser un elemento estructural portante permite la salida del aire caliente en la parte superior de la cubierta.
- o Una membrana sin rigidez propia, aun pretensada, se va a deformar ante esfuerzos externos. Por lo que debe prevalecer el criterio de seguridad sobre el criterio estético.

siendo aconsejable diseñar con la máxima pendiente posible para un adecuado drenaje pluvial. Para ello considero que el 15% es una pendiente apropiada; y solo en áreas muy pequeñas podría aceptarse una pendiente mínima del 8%.

3. En cuanto a la forma de abordar un proyecto hay que considerar que, no obstante las directrices originales solo contemplen el generar sombra, es aconsejable diseñar integralmente las cubiertas para proteger también de la lluvia y del viento.
4. En cuanto a la experiencia académica, concluyo que la indispensable la liga con la ingeniería debe ser fomentada desde los primeros semestres de la carrera buscando un lenguaje común en el cual la geometría estructural (*mecametría*) puede jugar un papel significativo como enlace entre los proyectos planteados y las clases de estática y resistencia de materiales¹²
5. En cuanto al desarrollo de este sistema constructivo en nuestro país, y comparándolo con la situación en otros lugares considero que, los que nos dedicando a su estudio, diseño y construcción, tenemos la responsabilidad de pugnar por crear una normatividad mexicana, que nos de garantías de calidad y seguridad para bien de todos.
6. Finalmente y de forma particular, es importante señalar que la experiencia ganada con las linternillas del Palacio de Minería y TV. Azteca nos permitió desarrollar en Oaxaca una velaria con una linternilla elíptica de 7 metros de eje mayor, concatenando y mejorando las ideas, lo que me permite asegurar que las conclusiones de estos trabajos seguirán viéndose en futuros proyectos, donde espero continuar aprendiendo de este apasionante mundo de la arquitectura y las estructuras ligeras, aportando mi trabajo en el camino.

7 Glosario

- Anticlástica:** Se dice de una doble curvatura inversa, curvatura gaussiana negativa o curvatura anticlástica, cuando la superficie se presenta tanto cóncava como convexa a manera de una silla de montar.
- Las formas geométricas básicas en la construcción de velarias que presentan esta característica son: el *Paraboloide Hiperbólico* (PH), el *Hiperboloide de Revolución* y las *Conoides* cuando generan superficies de valles y crestas.
- Borde rígido:** Se refiere al borde de una velaria que no se deja libre anclando su geometría mediante un elemento estructural.
- Coefficiente de presión (Cp):** Es un valor paramétrico asignado a distintas zonas de la geometría de la velaria e indica como la presión del viento va a afectar dicha zona.
- Dependiendo de lo complejo de la geometría, estos coeficientes pueden asignarse mediante un análisis de las pendientes con la normatividad actual o por medio de un estudio de túnel de viento real o virtual.
- Mecametría:** Nuevo termino acuñado por el Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas que se refiere a la unión de la Mecánica y la Geometría para el estudio y aplicación en los sistemas estructurales.
- Pretensado:** Cuando hablamos de velarias, el pretensado o el anglicismo más usado "prestressed" se refiere al esfuerzo inicial que se le induce a la membrana para lograr su forma, sin considerar factores externos, al ser la membrana un elemento que no tiene rigidez propia este esfuerzo siempre es de tracción y se considera como una carga constante que se va a sumar a las cargas externas generalmente de viento.
- Durante el proceso de diseño el pretensado junto con la definición de los puntos de anclaje son los elementos que determinan la geometría.
- Relinga:** Borde libre de la velaria, que toma el equilibrio de fuerzas de tracción de la superficie mediante la inclusión de un cable o faja que se tensa en las puntas, para lograr un adecuado equilibrio entre la fuerza necesaria para tensar el borde de la relinga y la superficie útil a cubrir se aconseja utilizar una flecha aproximada de un 10% del claro.

8 Referencias

8.1 Páginas WEB

<http://www.ferrari-architecture.com/>

<http://www.tensinet.com/>

<http://www.technet-gmbh.com/>

<http://www.formfinder.at/>

<http://ciepfa.posgrado.unam.mx/laboratoriodeestructuras/>

http://www.cedex.es/iass/ia_iass.html

8.2 Bibliografía

- ¹ **López Carmona Fernando** “CUARENTA AÑOS TRABAJANDO CON BÓVEDAS; LA FORMA ADECUADA EN LA ARQUITECTURA”; EMCYC 2002; México, 1988
- ² **T. Wester** “STRUCTURAL PATTERNS IN NATURE – PART I” Royal Danish Academy of Fine Arts, School of Architecture, Copenhagen, Denmark, IASS 2004 SYMPOSIUM MONTPELLIER
- ³ **Berthold Burkhardt** “HISTORY OF TENT CONSTRUCTION”, DETAIL membranes, September 2000; Germany, pp 960 - 964
- ⁴ **Leonardo B. Dal Maso** “ROMA DE LOS CESARES”; Ed. Bonechi, Florencia Italia 1981; Col. Italia Artistia
- ⁵ **Juan Antonio Tonda y Eduardo Tonda** “PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS nomogramas para el cálculo de esfuerzos de membranas”, Edit. Limusa-Wiley, S.A., México 1972
- ⁶ **Sutherland Lyall** “MAESTROS DE LA ESTRUCTURA, ingeniería en las edificaciones innovadoras” Edit. Blume, Barcelona, 2002
- ⁷ **J. G. Oliva S., M. J. Ontiveros H., E. Valdez O., C. Zetina G.** “STRUCTURAL GEOMETRY APPLIED TO THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF SHELL AND SPATIAL STRUCTURES”, Symposium IASS Beijing 2006

- ⁸ **Brian Foster y Marijke Mollaert** "EUROPEAN DESIGN GUIDE FOR TENSILE SURFACE STRUCTURES"; Tensinet, 2004; Virje Universiteit Brussel.
- ⁹ **Alejandro Bahamón** "ARQUITECTURA TEXTIL, TRANSFORMADORA DEL ESPACIO" Colección Arquitectura y Diseño; IJB ediciones, Barcelona.
- ¹⁰ **Peter Zumthor** "PENSAR LA ARQUITECTURA" colección "Arquitectura con Textos", Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona 2004
- ¹¹ **Torroja Miret Eduardo** "RAZÓN Y SER DE LOS TIPOS ESTRUCTURALES"; Colección "Textos Universitarios No.13", Edit. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 10ª Reimpresión, Madrid 2004
- ¹² **Juan G. Oliva Salinas y Marcos J. Ontiveros Hernández** "GEOMETRÍA ESTRUCTURAL, UN PUENTE ENTRE LA ARQUITECTURA Y LA INGENIERÍA"; Ponencia del 2º Coloquio de Teoría de la Arquitectura, Agosto 2006