



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Arquitectura,

Centro de Investigaciones y Estudios de Posgrado

Tema:

La Geometría en la Arquitectura

Trabajo Terminal de Especialización en Cubiertas Ligeras

Presenta: Arq. Arturo Ríos Santa Cruz Polanco

Noviembre 2009



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.

JURADO

DIRECTOR DE TESINA:

DR. FERNANDO LOPEZ CARMONA

SINODALES:

DR. AGUSTÍN HERNANDEZ HERNANDEZ

DR. JAIME FONT FRANSI

SINODALES SUPLENTE:

DR. ANTONIO LOYOLA VERA

DR. IVÁN SAN MARTIN CÓRDOVA

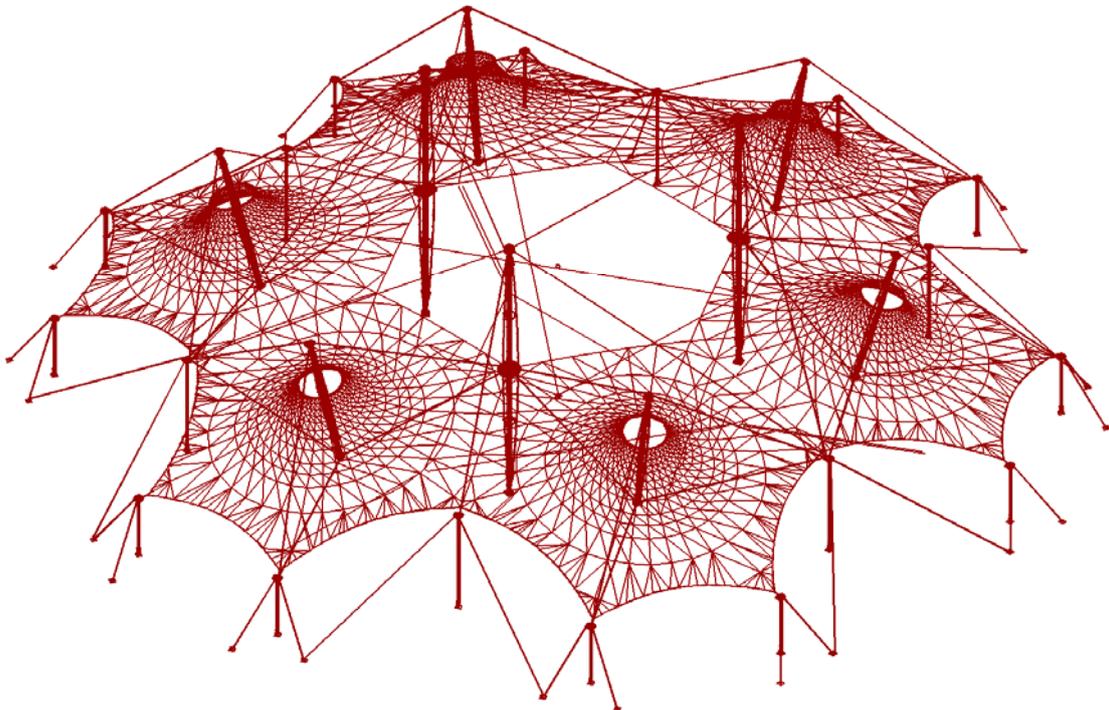
A MIS PADRES..... POR SU INFINITO CARIÑO Y APOYO

A MI ESPOSA PATY.....CON AMOR Y ADMIRACIÓN

A MIS HIJAS PATY Y MARY

A MI MAESTRO DR. FERNANDO LÓPEZ CARMONA

LA GEOMETRÍA EN ARQUITECTURA



Índice

1. Reseña Histórica.....	2
2. Curvas Cónicas.....	15
2.1. Análisis del cono y su intersección con diferentes planos.	
2.1.1. Cilindro, elipsoide de revolución, paraboloides hiperbólico, hiperboloides de un mantos	
3. Clasificación de las estructuras por su geometría.....	17
3.1. Ceroclásticas	
3.2. Monoclásticas	
3.3. Sinclásticas	
3.4. Anticlásticas	
4. Velarias: Fundamentos Geométricos y Estructurales.....	19
4.1. Derivación general del diagrama de cortante y momento de una carga uniformemente repartida	
4.2. Diagrama del cortante en el espacio de una carga uniforme	
4.3. Diagrama de momentos en el espacio de una carga concentrada	
5. Exploración geométrica.....	24
5.1. Geometría por rotación.....	25
5.1.1. Anticlásticas.	
5.1.1.1. Logarítmica de revolución	
5.1.1.1.1. Cubierta en Jardín Terapéutico en “El Criq”	
5.1.1.1.2. Velaria en área de Usos Múltiples en P&G	
5.1.1.1.3. Sombrillas en área de Fast Food en Parques Polanco	
5.2. Geometría de translación.....	49
5.2.1. Anticlásticas.	
5.2.1.1. Paraboloides Hiperbólico	
5.2.1.1.1. Velaria Patio en preparatoria ITESM	
6. Conclusiones.....	54
7. Bibliografía.....	55

RESEÑA HISTÓRICA.

El dominio de la geometría es esencial para el diseño arquitectónico. Es la herramienta central que el hombre creó para dar FORMA a las cosas, y como tal, es un medio ineludible para el Arquitecto. No controlar la geometría desfavorece la generación del orden compositivo e imposibilita la relación armónica entre volúmenes y planos.

El conocer y manejar la geometría permite hacer propuestas arquitectónicas y constructivas en una línea muy relacionada con el concepto de “La resistencia por Forma”, tema central de este trabajo.

Para exponer el tema, haré énfasis en la necesidad de conocer y manejar la geometría de doble curvatura, ya sea simple (curvaturas del mismo signo) o inversa (curvaturas de signo contrario). Este concepto se ha desarrollado probablemente, desde la aparición del arco. A partir de este descubrimiento, la tendencia por cubrir espacios cada vez más grandes, y utilizar menos material, ha definido la trayectoria del desarrollo tecnológico en la construcción.

El desarrollo y perfeccionamiento de la construcción del arco, dio pie a nuevas creaciones. Tomando el arco y lo haciéndolo girar alrededor de un eje, crearon cúpulas semiesféricas. Otro ejercicio fue tomar el mismo arco y haciéndolo girar alrededor de un eje fuera de su centro, crearon bóvedas toroidales.

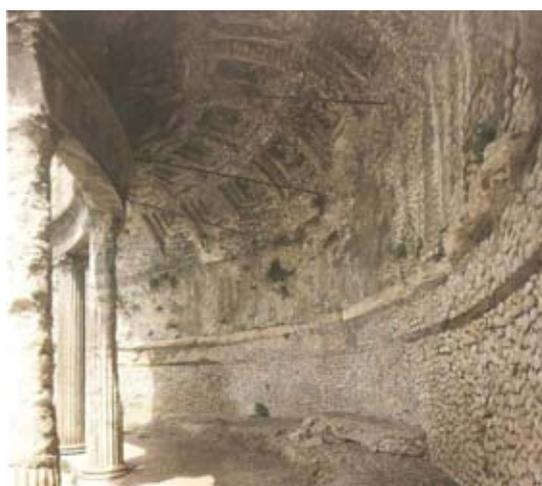
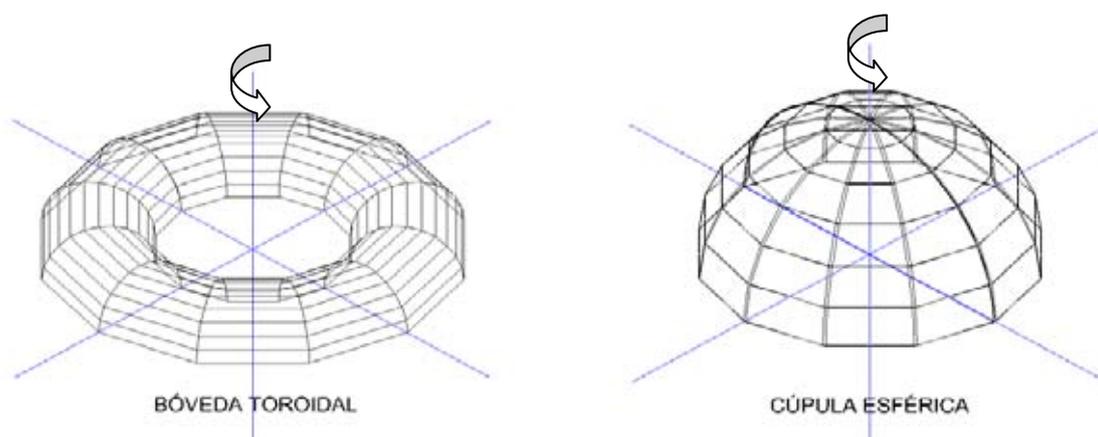
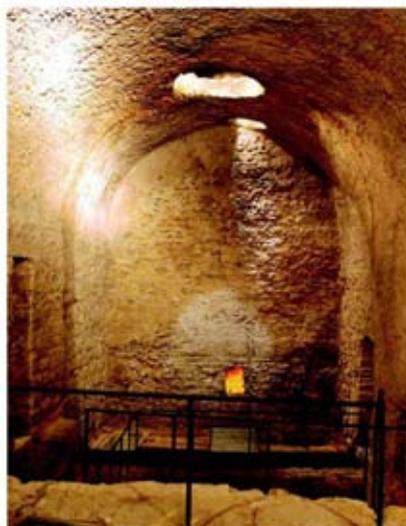
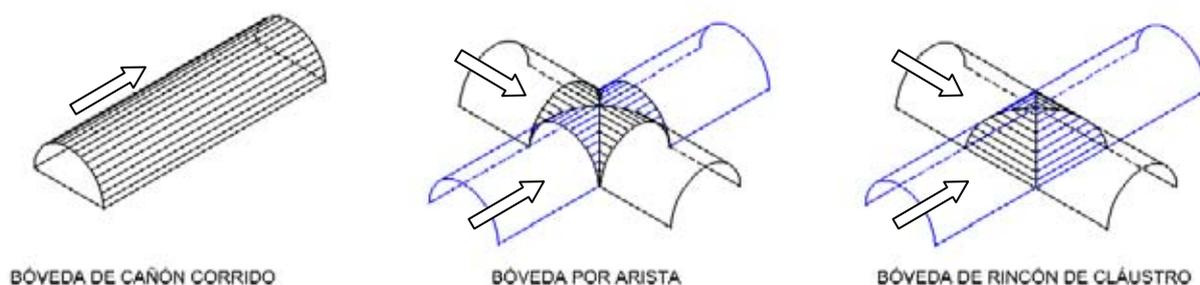


Fig. Nº 1 Bóveda Toroidal



Fig. Nº 2 Bóveda semiesférica de Santa Sofía de Constantinopla Artemio de Tralles e Isidoro de Mileto

Imaginando el desplazamiento del arco sobre una directriz recta, crearon la bóveda de cañón corrido. El cimbrado que se requiere para realizar estos cañones consume muchos recursos en tiempo y horas hombre. En el afán de reducir estos tiempos de construcción y por ende sus costos, estudiaron otros métodos de construcción hasta que aprendieron a construir bóvedas de directriz parabólica hechas con adobe sin utilizar cimbra de contacto. Esta ingeniosa técnica consiste en construir una bóveda con arcos inclinados, recostados sobre los muros del tímpano, en un ángulo aproximado de 60° de tal manera que al ir recargando arco con arco, pueden desechar la cimbra de contacto. Esta técnica fue difundida en otras culturas y permeó en la construcción de bóvedas cilíndricas de directriz circular hechas con ladrillo y tan populares en lugares como Lagos de Moreno, Jalisco Mex. Al desarrollar otras posibilidades geométricas, fueron encontrando nuevas soluciones como la bóveda por arista, que está generada por dos superficies semicilíndricas ortogonales cuyas líneas de intersección o aristas salientes en el intradós, son arcos de elipse que se cruzan en el vértice superior. Los dos cilindros tienen la misma flecha. La bóveda de rincón de claustro es otra solución formada por la intersección de dos bóvedas de cañón perpendiculares, de la misma flecha y con aristas entrantes en el intradós.



Figs. Nº 3 Bóveda cilíndrica.



Figs. Nº 4 Bóveda por arista.

Con estas ideas geométricas y el desarrollo de nuevos materiales y técnicas de construcción, aparecen nuevas soluciones que llegan a propuestas verdaderamente sorprendentes, ya sea por su simplicidad o por su complejidad imaginativa. El concepto del arco de descarga es otra aportación de los romanos. Estos arcos de descarga se emplean inicialmente con la idea de redireccionar las fuerzas dentro de los muros hacia los apoyos convenientes. Este concepto se utiliza posteriormente en algunas bóvedas como en la del Panteón de Agripa, construido en el año

125 D.C. concebido y construido por Apolodoro de Damasco. Es la cúpula semiesférica más grande del mundo en ese momento, con diámetro de 43.44 m.

Fue construida con concreto puzolánico romano. La superficie semiesférica, está estructurada con una serie de arcos de descarga, que permiten trasladar los esfuerzos hacia las zonas donde se ubican las columnas de apoyo. Cuenta con una serie de anillos concéntricos de casetones hechos con dos fines: uno, de carácter constructivo para aligerar la masa de la cúpula, y el otro con fines estéticos para no perder la percepción de la profundidad de la cúpula. Cuando una cúpula se deja lisa, la percepción de ésta parece ser mucho más plana de lo que es en la realidad.

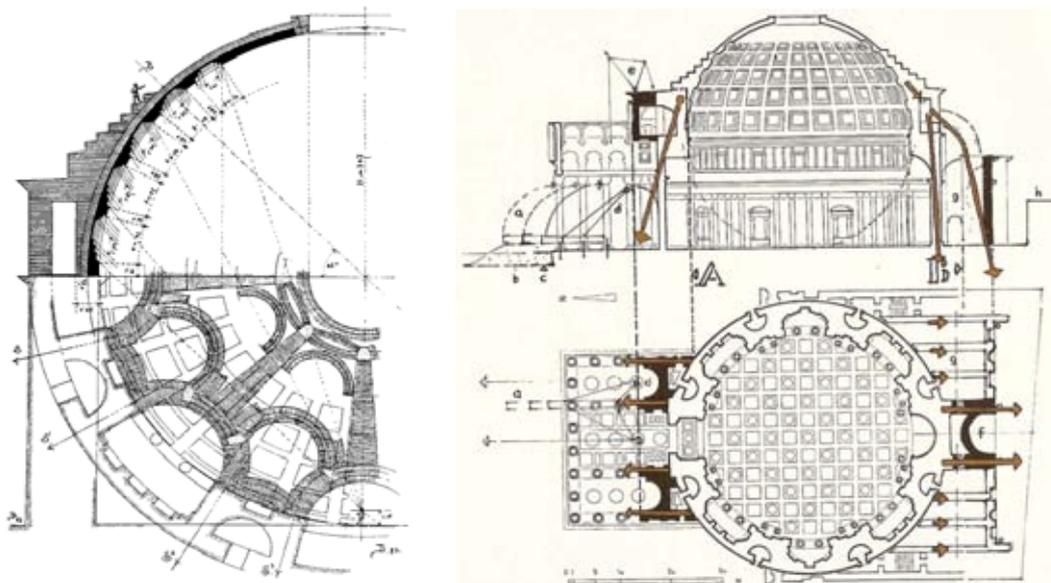


Fig. No 5 Arcos de descarga en la cúpula Figs. No 6 Planta y corte con esfuerzos principales.

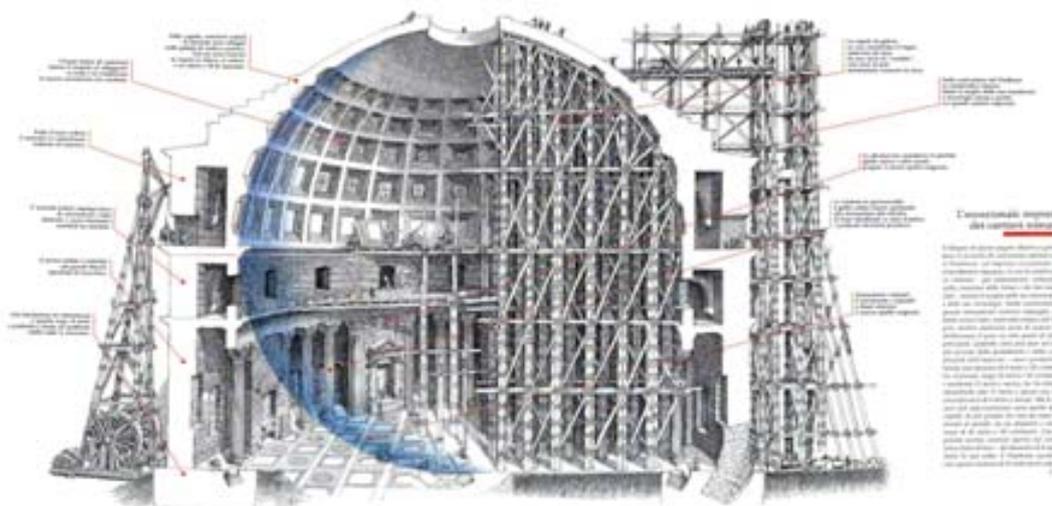
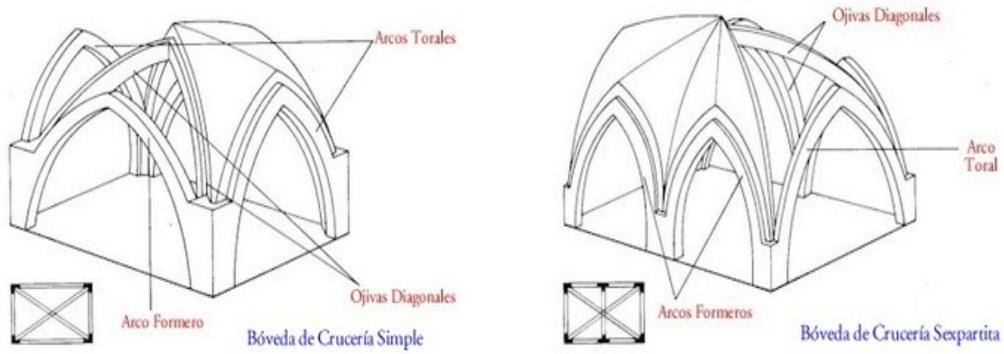


Fig. No 7 Sección del Panteón de Agripa. Apolodoro de Damasco

Durante el período Gótico (siglos XII a XV), en su afán por buscar una manera más fácil de controlar e industrializar el procedimiento de construcción de sus elementos, proponen el arco apuntado logrando uniformizar el radio de curvatura de los arcos. Las nervaduras en el intrados, tienen como función principal el de una cimbra perdida, para poder controlar la geometría en el espacio de estas cubiertas. Los arbotantes, botareles y pináculos, permiten adelgazar muros y contrafuertes. Su última expresión son las hermosas bóvedas de abanico, construidas en Inglaterra y otras partes del mundo.



Figs. Nº 8 y 9 Bóveda Cuadripartita y Sexpartita

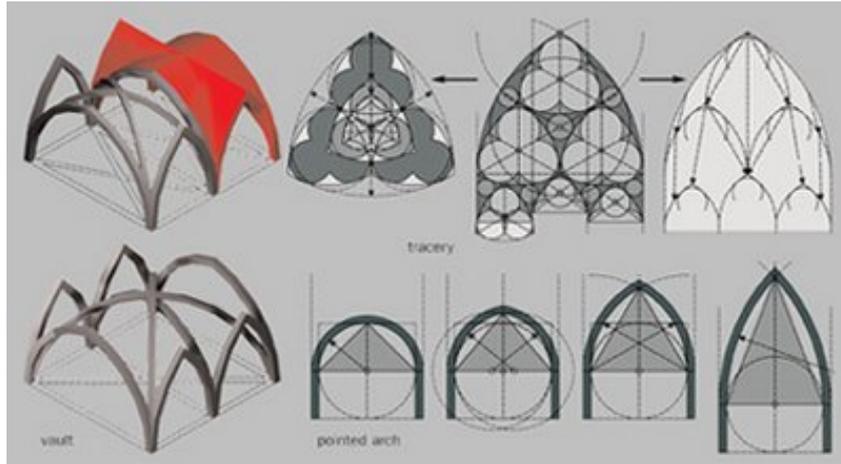
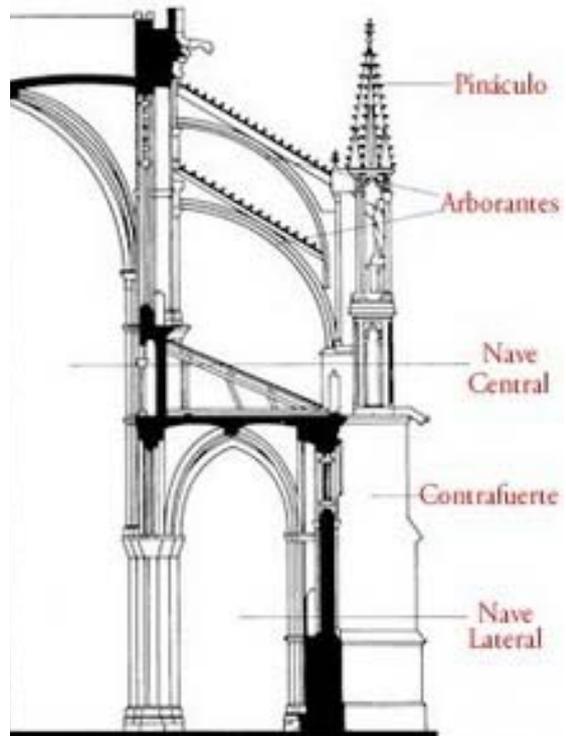
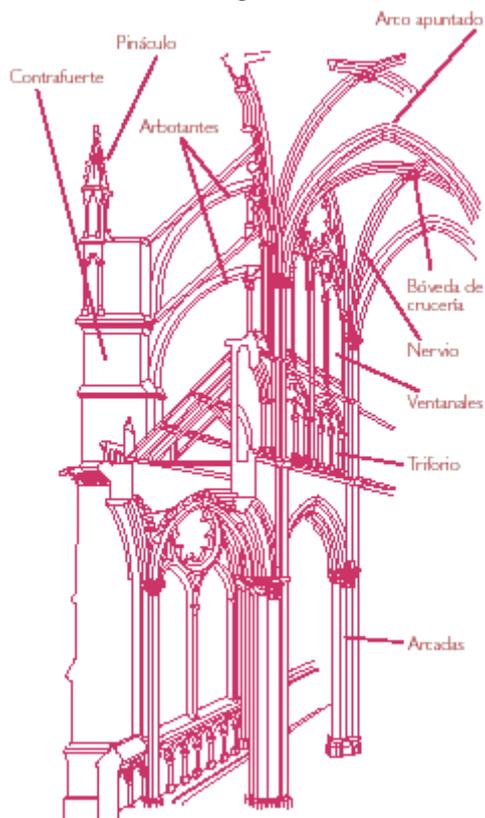


Fig. Nº 10 Trazos de arcos y bóvedas apuntadas



Figs. Nº 11 y 12 Secciones de una catedral gótica

En México, tenemos en algunos templos del siglo XVI, sorprendentes ejemplos de estas cúpulas nervadas, como Tepozcolula, Huejotzingo, Yuriria, Zempoala y Yecapixtla, por mencionar algunos, lo que supone que el estilo Gótico muere en México.



Figs. Nº13 y 14 Cúpulas nervadas en Tepozcolula y Huejotzingo

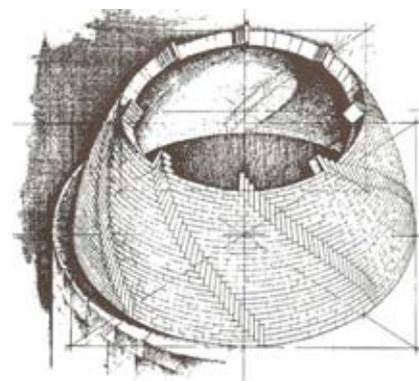
No es sino hasta el año 1420, a finales del período Gótico y principio del Renacimiento, cuando Filippo Brunelleschi diseña y construye la cúpula de la iglesia de Santa María de las Flores, con un diámetro de 44.308 m. con una tecnología inovativa. Esta es una cúpula octaédrica, a base de gajos cilíndricos orientados a la manera de arcos apuntados. La cúpula, de doble velo, no requirió cimbra de contacto durante su construcción. Los dos velos, interconectados con anillos y arcos, están construidos con ladrillo con un aparejo de espina de pez, que permitió mantener a la construcción de la cúpula en equilibrio, en varias etapas de la obra aunque los anillos horizontales no estuvieran totalmente cerrados. La construcción de sus anillos, va acusan una pendiente que se va incrementando a medida que avanza la construcción de la cúpula.



Fig. Nº 15 Brunelleschi tuvo el cuidado de diseñar un andamio que no tocara las paredes de la cúpula para no tener que empotrar mechinales en ésta.

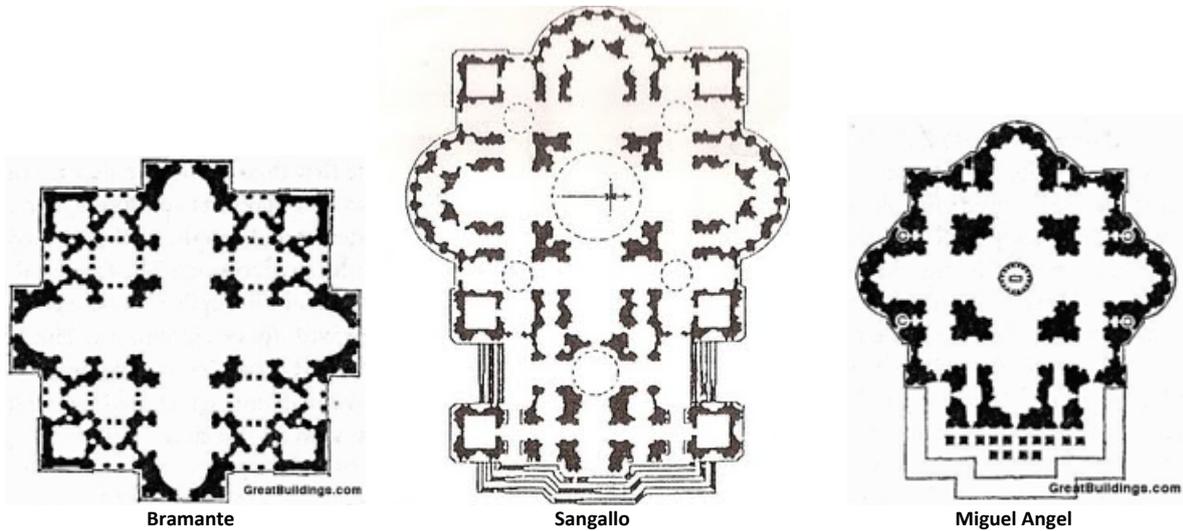
El doble velo estaba interconectado a través de anillos horizontales y nervios que se integraban a los dos velos

Fig. Nº 16 El aparejo de espina de pez iba confinando los anillos de construcción, aún sin estar totalmente cerrados.



En el Renacimiento, Miguel Ángel fue nombrado arquitecto de la Basílica de San Pedro en 1546 a los 72 años de edad, a la muerte de Antonio da Sangallo el joven. La construcción de la basílica se había empezada sobre la anterior basílica paleocristiana, por mandato del papa Julio II y bajo la

dirección del arquitecto Donato Bramante; a partir del fallecimiento de este último, Rafael Sanzio toma el cargo, modificando la planta y transformándola en una cruz latina. Cuando Miguel Ángel recibió el encargo de las obras, modificó de nuevo la planta y volvió, con una concepción diferente, a la idea original de Bramante de cruz griega. Redujo las cuatro esquinas del cuadrado para que las áreas más pequeñas pudieran tener luz directa. Miguel Ángel le dio a la cúpula un perfil más elevado y al suprimir las torres, la cúpula se convirtió en el elemento predominante.



Figs.17,18 y 19 Plantas de la Basílica de San Pedro realizadas por Donato Bramante (Cruz Griega), Antonio da Sangallo (Cruz Latina) y Miguel Ángel Buonarrotti (regresa a La cruz Griega)

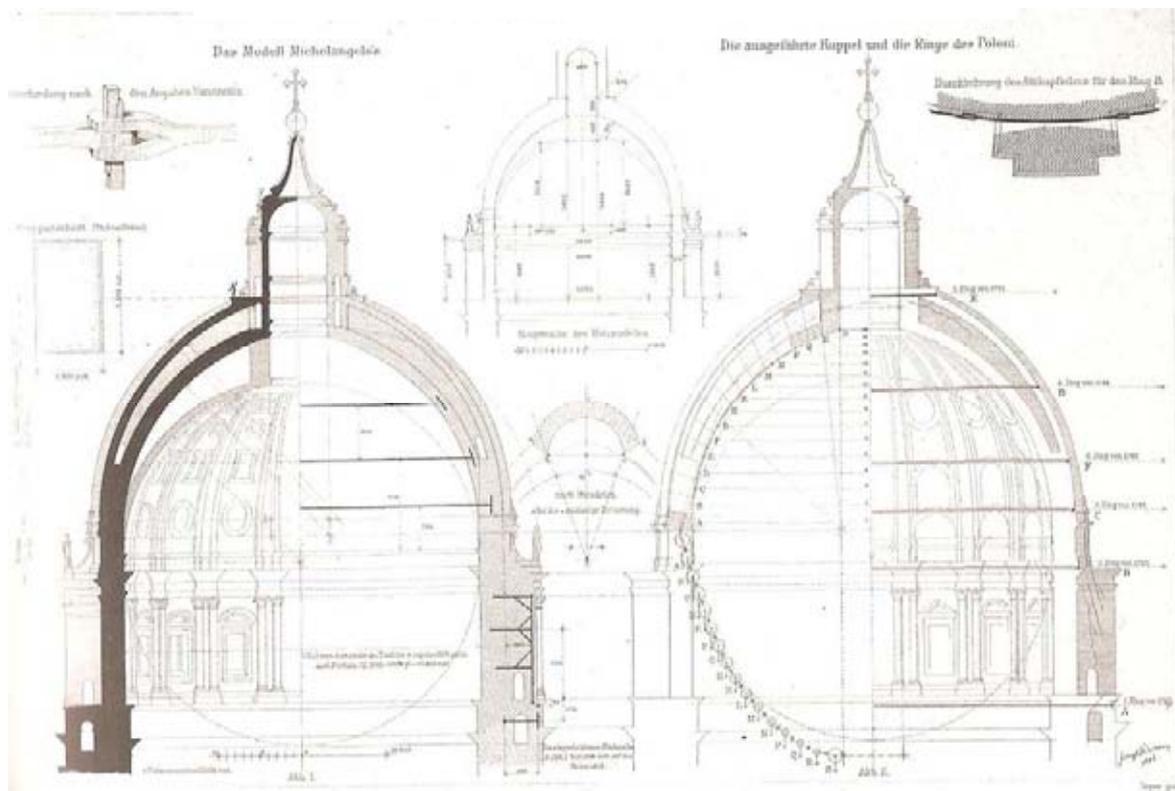
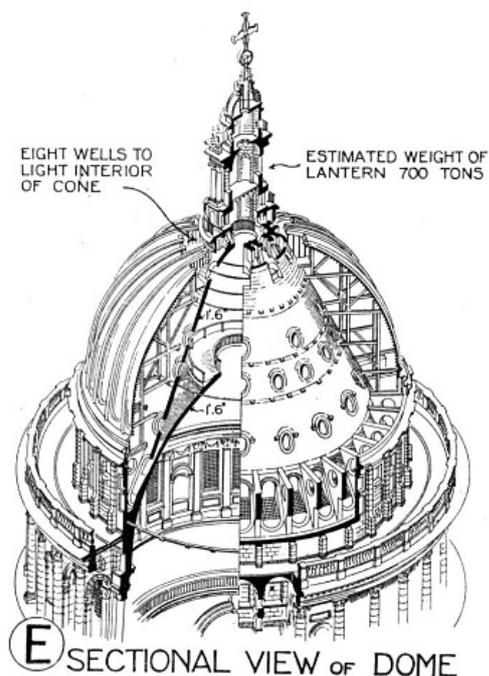


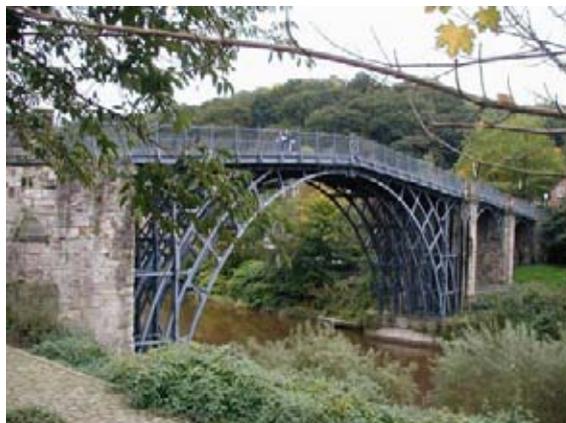
Fig. Nº 20 Sección de la cúpula de San Pedro de Miguel Ángel y esquema de grietas y ubicación de los nuevos anillos de hierro propuesto por Poleni .

Un ejemplo notable del Neoclásico, es la catedral de San Pablo en Londres, construida por Sir Christopher Wren entre 1676 y 1719. Su cúpula tiene 30 m. de diámetro y la parte más alta de la linternilla está a 111.5 m. de altura. Es una cúpula de triple velo, la primera es una cúpula hemisférica, hecha de ladrillo, la intermedia es una estructura cónica de mampostería, que básicamente sirve para cargar la linternilla, la cual tiene un peso estimado en 700 Tons. Su forma responde al diagrama antifunicular de la carga concentrada, producida por el peso de la linternilla. Finalmente la tercer cúpula exterior, está apoyada sobre una estructura de madera y esta a su vez a la cúpula cónica de ladrillo. La cubierta exterior esta forrada de plomo.



Figs. Nº 21 y 22 Perspectivas con cortes axonométricos . Christopher Wren

La primera revolución industrial trajo consigo grandes transformaciones tecnológicas y, como consecuencia, transformaciones económicas, sociales y culturales. El gran auge del hierro trae consigo nuevos sistemas constructivos que permitirán la creación de estructuras de dimensiones impensables hasta entonces. El hierro con remaches, se usa en la construcción de puentes y torres de comunicación.



Figs. Nº 23 y 24 Primer puente de hierro cerca de Telford Shropshire. Inglaterra. 1779

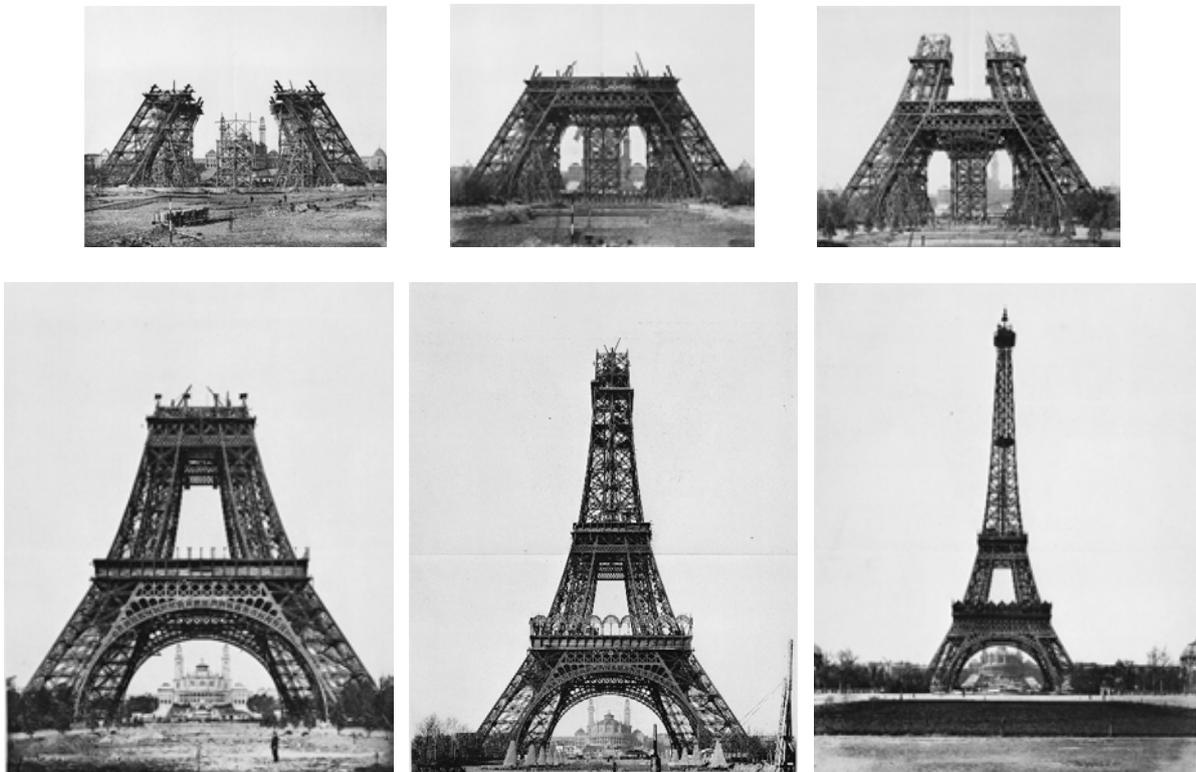
Se construyen grandes bóvedas de cañón y cúpulas hemisféricas para cubrir invernaderos. Joseph Paxton diseña y construye El Palacio de Cristal. Es una estructura de hierro y cristal que abre nuevas posibilidades en la construcción contemporánea. El uso del cristal como un material estructural, ve su principio en este edificio construido para la Exposición Universal de Londres en 1851.



Figs. Nº 25 y 26 Palacio de Cristal. 1851 Joseph Paxton

Otra tipología en que se usa el hierro con remaches, es en la construcción de puentes y torres de comunicación. Su uso se ve incrementado al desarrollarse la tecnología del acero, material más resistente con el que producen perfiles estructurales laminados. Estos permiten, nuevamente, ampliar las posibilidades tecnológicas en el mundo de la construcción.

La Torre Eiffel, actualmente con sus 330 m. de altura, fue un prodigio constructivo. Su perfil parabólico responde al diagrama de momentos de una mensula con una carga uniforme empotrada en su base. Dibujando la curva en las cuatro direcciones en que se puede presentar el viento o sismo.



Figs. Nº 27 a 32 Proceso constructivo de la Torre Eiffel. 1889 Gustav Eiffel

La invención del concreto armado, fue otro adelanto tecnológico que permitió explorar nuevas formas arquitectónicas. Esto fue posible gracias al desarrollo de la teoría de la flexión en vigas de Leonhard Euler y Daniel Bernoulli. En los años 50's, el desarrollo del concreto armado genera diferentes corrientes en el mundo, dependiendo de las condiciones económicas y sociales del lugar donde se aplica.

En México, el Arq. Felix Candela desarrolla los cascarones de concreto armado. Su gran aportación es el análisis matemático para determinar los esfuerzos en las geometrías de superficies de doble curvatura inversa, entre los que se encuentran el paraboloide hiperbólico, las conoides y el hiperboloide de revolución. Una condición que ayudó al, éxito en esta aventura, fue haber montado una constructora con la que hizo posible la construcción de estas ideas. Junto con el Dr. Fernando López Carmona construyen cubiertas de 4 cm de espesor de grandes claros, con una imaginación desbordada antes no construida. La relación longitud-espesor se puede expresar con la expresión: $\text{Espesor} = 1/500$ del claro.



Fig. N° 33 Palacio de los Deportes 1968 Felix Candela



Figs. N° 34 La Medalla Milagrosa Felix Candela



Fig. N° 35 Los Manantiales Felix Candela

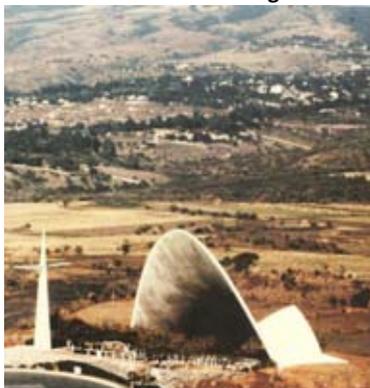


Fig. N° 36 Capilla de Palmillas Felix Candela



Fig. N° 37 Bolsa de Valores
 Candela-Lopez Carmona

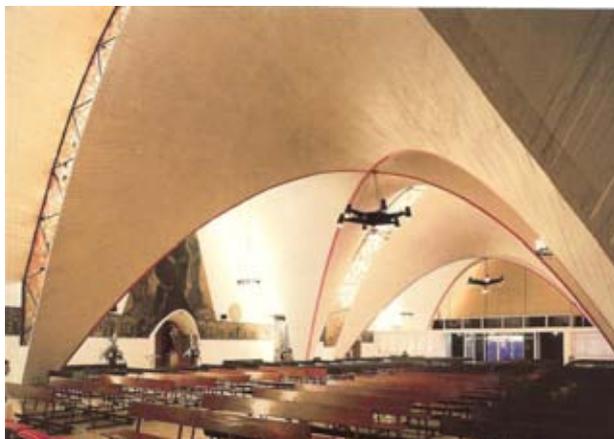


Fig. N° 38 San Antonio de las Huertas Candela-Lopez Carmona

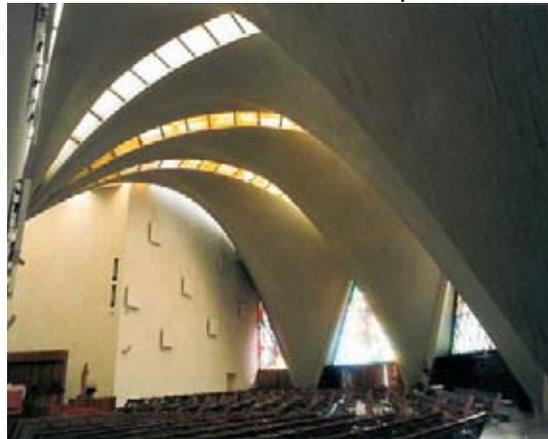
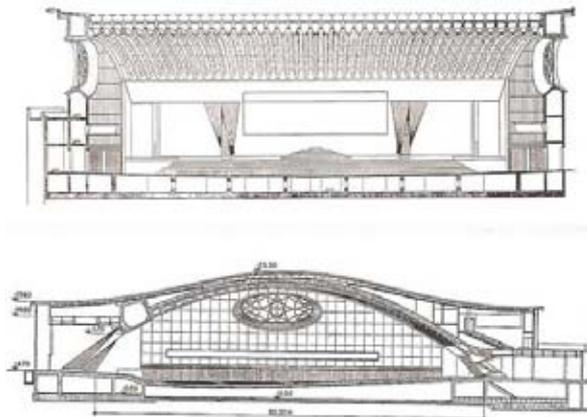


Fig. N° 39 Santa Mónica Fernando López Carmona

El ferrocemento inventado por el Ing. Pier Luigi Nervi le permite la construcción de grandes cubiertas de geometría cilíndrica y esférica con elementos prefabricados de 2.5 cm. de espesor, utilizados como cimbra perdida, logrando edificios de muy alta calidad. El desarrollo industrial y económico en Italia, le permitió disponer de una organización y una tecnología adecuada a sus propuestas constructivas.

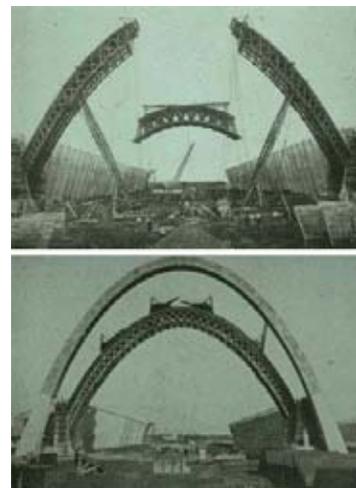


Figs. Nº 40 y 41 Palazzetto dello Sport. Pier Luigi Nervi



Figs. Nº 42,43 y 44 Sala de audiencia Papal Juan Pablo II. Pier Luigi Nervi

El concreto postensado, inventado por el Ing. Eugene Freissinet, se desarrolla en Francia, gracias a la investigación y avance tecnológico de su país. El desarrollo de concretos más controlados y resistentes con esfuerzos a la ruptura de $f'c = 400 \text{ kg/cm}^2$ y de aceros de muy alta resistencia con límites a la falla de $f_y = 19,000 \text{ kg/cm}^2$, así como el desarrollo de gatos hidráulicos y anclajes mecánicos para amordazar los cables de presfuerzo al concreto, son elementos que hicieron posible esta tecnología logrando librar grandes claros con peraltes de la mitad de los requeridos en el concreto reforzado.



Figs. Nº 45,46 y 47 Hangar de Orly y proceso de construcción. Eugene Freissinet

Paralelamente, en Alemania surge otra figura que aprovechando su tradición de investigadores y su disciplina personal, desarrolla una tecnología olvidada por muchos siglos. Las estructuras de tracción, que probablemente tuvieron su origen en diversos lugares: entre los indios americanos con la construcción de sus viviendas llamadas Tipis, por otra parte los beduinos, que al ser una raza nómada, cargaban con sus viviendas por todas partes. Esto los obligó a imaginar sistemas constructivos muy ligeros y fáciles de transportar armar y montar como las tiendas a base de pieles, cables y postes de madera. El otro antecedente es el velarium que se montó en el Coliseo Romano para dar sombra a los espectadores. Era una estructura fijada a mástiles y un sistema de cables tomado de la tecnología para construir las velas de sus barcos (de ahí su nombre de velarium), para colocar un toldo de tela corredizo, que se podía montar y desmontar con los marineros de su flota naval.

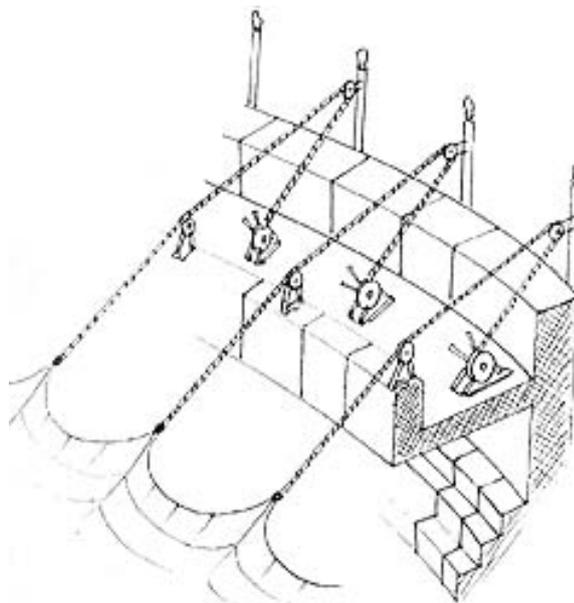
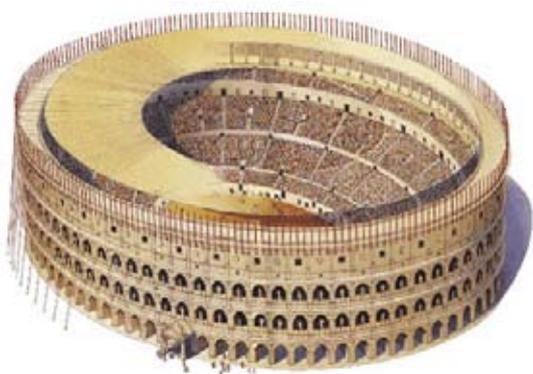


Figs. Nº 48 y 49 Tiendas Tipis



Figs. Nº 50 Tienda Beduina

Fig. Nº 51 El Velarium era al cubierta anular de tela que se montaba para los grandes eventos en el Coliseo Romano. En la estructura de piedra, tenía los candeleros para montar los mástiles de soporte de la cubierta de tracción.
Fig. Nº 52 Detalle del equipo de montaje del Velarium.



Con estos antecedentes, el Dr. en Ing. Frei Otto, desarrolla en el “Instituto para Superficies Ligeras de tracción” (Institut für leichte Flächentragwerke) de la universidad de Stuttgart, la tecnología para construir cubiertas de tracción, desarrollando procedimientos de construcción,

aún sin tener a su disposición la tecnología de construcción ni los materiales adecuados. Para este fin, investiga la superficie mínima necesaria para cubrir grandes claros, utilizando métodos experimentales para medir superficies hechas con la burbuja de jabón, hojas delgadas de látex y telas elásticas como la lycra.



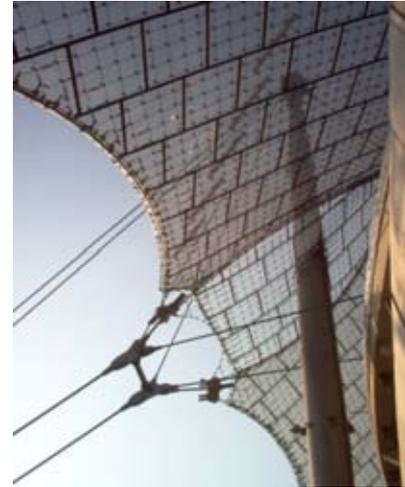
Fig. Nº 53 Velaria con red de cables. Frei Otto



Fig. Nº 54 Pista de baile en Colonia Frei Otto



Fig. Nº 55 Olimpiya Park Red de cables Frei Otto



Nº 56 Anclajes cables de relinga Frei Otto

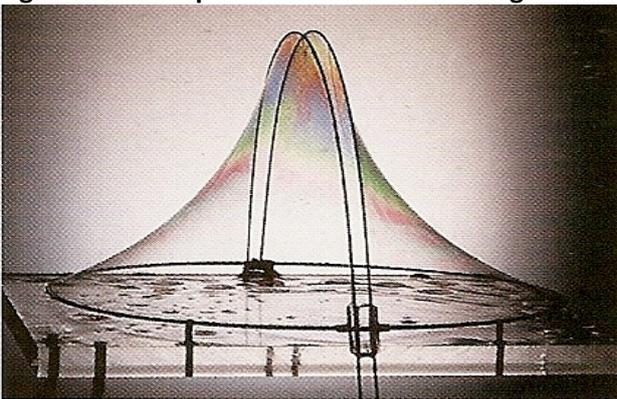
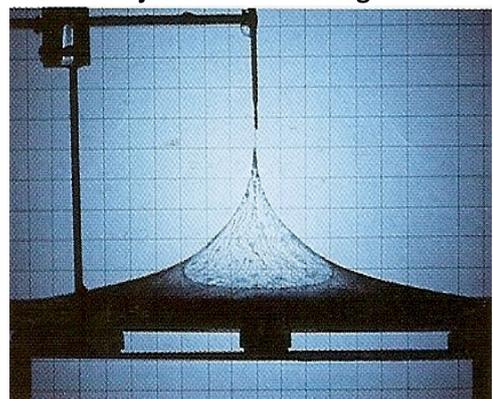


Fig. Nº 57 y 58 Modelo de jabonadura superficie. Frei Otto



Implementa sofisticadas mesas de medición de alta precisión, para determinar en modelos de diferentes materiales, las coordenadas de cada punto de la superficie y poder generar con estas, las plantillas necesarias para su construcción, usando materiales como telas plásticas que no son deformables, y así, poder construir superficies de doble curvatura inversa. Investiga la manera de poder ponerlas en tracción con el mínimo de material posible, como con cables de relinga, y así le da rigidez a una superficie cuyo material no tiene rigidez propia, solamente a través de la forma.

Este último tema, que trata sobre las superficies de tracción, enmarca de estudio al que voy a referirme en este trabajo, cuya inquietud nace de una serie de conceptos muy valiosos, aprendidos en la especialización de Cubiertas Ligeras, principalmente con el Dr. Fernando López Carmona, conceptos que explican las bases científicas en el campo geométrico y analítico y que permiten entender el comportamiento de estas estructuras de tracción. El fundamento principal del que parte todo este trabajo, lo podemos resumir diciendo que **“podemos conseguir la resistencia de las estructuras a través de su forma”** y no únicamente a través de su masa, como se hizo, de manera dominante, en el siglo pasado.

Para clarificar este concepto, quisiera describir este ejercicio mental:

“Si tomamos una hoja de papel, la cual sabemos es muy delgada, que no tiene rigidez propia y la sometemos a su peso propio, tomándola de su lado corto, veremos que ésta se dobla ante la acción de la gravedad. Pero si esta misma hoja, la tomamos y la doblamos ligeramente, sacando su material del plano, instantáneamente adquiere una rigidez provocada por el cambio de su forma. Ahora, podemos colocar sobre esta hoja un lápiz y la hoja tendrá la capacidad de cargarlo. Cabe aclarar que es la misma hoja, del mismo material y espesor, pero ahora es capaz de resistir su peso propio y cargar algo más. Ahora, si esta misma hoja, en un segundo experimento, la doblamos con una serie de pliegues, acercándonos a la forma de un acordeón, veremos que su rigidez, así como su capacidad de carga, se incrementa notablemente comparada con el primer ejercicio, siendo ahora capaz de cargar el peso de dos teléfonos celulares sin mayor dificultad. Podríamos hacer un tercer ejemplo con otro sistema de pliegues e incrementar su capacidad de carga, sin embargo, lo interesante sería saber que fue lo que hizo el milagro en la hoja de papel. Está claro, lo que estamos variando con el cambio de forma es el momento de inercia (I), y esto nos dice que la resistencia de un elemento es directamente proporcional a su momento de inercia e inversamente proporcional a la distancia de la fibra más alejada de su centroide. Estamos describiendo lo que representa el módulo de sección, que es la expresión que representa la capacidad resistente de una sección. ($S=I/y$)”

Estas cubiertas ligeras que vamos a presentar, son algunas donde se ha puesto en práctica la premisa de dar resistencia a través de la forma.

Es importante reiterar, que esto no es posible sin el estudio profundo de la geometría, disciplina que nos abre un mundo amplísimo de formas y que nos permite conocer sus características desde puntos de vista cualitativos y cuantitativos.

Una razón que viene a mi mente es que, el arquitecto, trabaja con **la forma** como **materia prima** en la concepción y desarrollo de proyectos. Esto permite inferir, que la relación entre forma y geometría, es un binomio inseparable que permite armonizar los proyectos arquitectónicos con valores tales como la proporción, el claroscuro, el ritmo, la modularidad, la resistencia y la racionalidad constructiva en beneficio de una economía de recursos.

Para abordar este tema, es importante recordar cómo se obtienen las **curvas cónicas**, que son las curvas más usadas dentro de la arquitectura (Ver capítulo 2), y una clasificación de las superficies que las ordene en relación a sus características geométricas (Ver capítulo 3):

Ceroclásticas
Monoclásticas
Sinclásticas
Anticlásticas

De esta clasificación, **haremos énfasis en las superficies Sinclásticas y en las Anticlásticas**, por ser estas, las que tienen doble curvatura del mismo signo ó contrario, y ser las más compatibles con los conceptos de diagramas antifuniculares.

2. Curvas Cónicas.

2.1 Análisis del cono y su intersección con diferentes planos.

Se denomina sección cónica a la intersección de un cono con un plano que no pasa por su vértice.

La ecuación del cono refiriendo su origen en el vértice de sus dos ramas es:

$$X^2/a^2 + Y^2/b^2 - Z^2/c^2 = 0$$

La intersección del cono con un plano horizontal genera una circunferencia. La ecuación de la circunferencia referida a su centro es:

$$X^2 + Y^2 = r^2$$

La elipse es la intersección de un cono de revolución con un plano inclinado que corta únicamente una de sus ramas.

La ecuación de la elipse referida a su centro es:

$$X^2/a^2 + Y^2/b^2 = 1$$

donde "a" es el semieje mayor y "b" el semieje menor.

La parábola es la intersección de un cono de revolución con un plano que corta una de sus ramas y que es paralelo a una de las generatrices.

La ecuación de la parábola donde su vértice se ubica en el origen de coordenadas es:

$$Y = pX^2$$

Donde "p" es el parámetro de apertura de la parábola

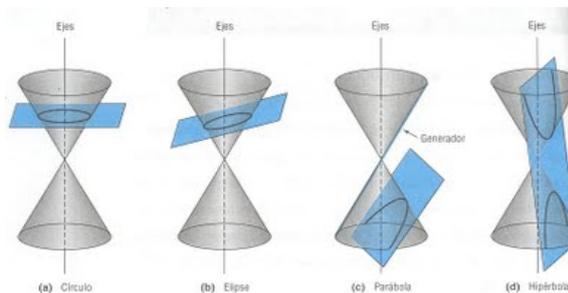


Fig. N° 59 Curvas Cónicas.

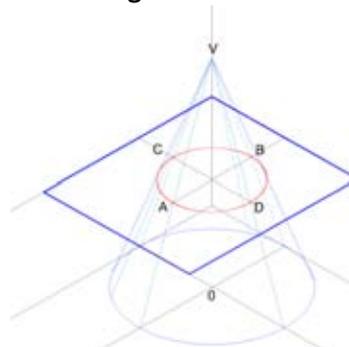


Fig. N° 60 Circunferencia.

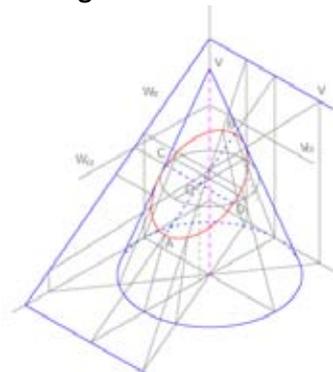


Fig. N° 61 Elipse.

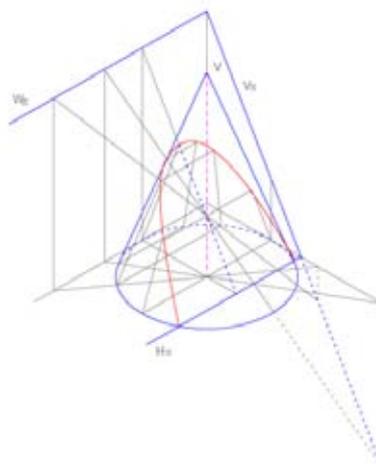


Fig. N° 62 Parábola.

La hipérbola es la sección de un cono de revolución con un plano que corta sus dos ramas. Las generatrices del cono, viendo la curva en posición frontal, son sus asíntotas.

La ecuación de la hipérbola refiriendo su origen en el corte de sus asíntotas es:

$$x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1$$

donde "a" y "b" determinan la pendiente de sus asíntotas.

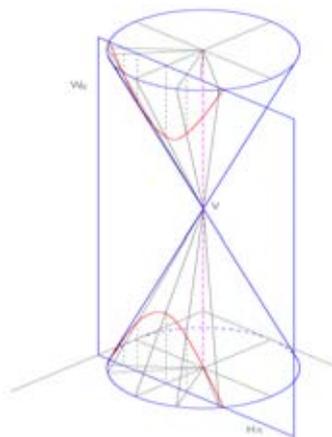


Fig. Nº 63 Hipérbola.

Estas curvas cónicas también aparecen al cortar otras superficies ó volúmenes con otros planos. Algunos ejemplos son:

2.1.1 Esfera, cilindro, elipsoide de revolución, paraboloides de revolución, paraboloides hiperbólicos, hiperboloides de un manto.

En una esfera, si la cortamos con planos en cualquier dirección, la intersección siempre serán circunferencias. Su ecuación refiriendo el origen de coordenadas a su centro es:

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2$$

En un cilindro de directriz circular, encontramos circunferencias, si cortamos la superficie con planos paralelos al plano "XY", y elipses, si lo cortamos con planos inclinados que giren alrededor de su eje "Y", excepto cuando es perpendicular al plano "XY". Su ecuación refiriendo su origen al centro de la circunferencia es:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad \text{Al no aparecer el termino } z, \text{ nos indica que es un cilindro y su directriz es paralela al eje } z.$$

En un elipsoide de revolución donde $a=b$, encontramos circunferencias, si cortamos la superficie con planos paralelos al plano "XY", y elipses, si cortamos la superficie con planos perpendiculares al plano "XY" ó planos que giren alrededor de su eje "Y", excepto cuando es perpendicular al plano "XY". Su ecuación refiriendo su origen al centro del elipsoide es:

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 + z^2/c^2 = 1,$$

En un paraboloides de revolución donde $a=b$, encontramos circunferencias, si cortamos la superficie con planos paralelos a su plano "XY", y parábolas, si cortamos la superficie con planos perpendiculares a su plano "XY". Su ecuación refiriendo su origen al centro del paraboloides es:

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 = z,$$

En un paraboloides hiperbólico, si lo cortamos con planos verticales en cualquier dirección, encontramos parábolas, y si lo cortamos con planos horizontales ó planos inclinados que giren alrededor de su eje "Y", encontramos hipérbolas, excepto cuando el plano sea perpendicular al plano "XY". Su ecuación refiriendo su origen al vértice de sus parábolas y que coincide con las generatrices de corona es:

$$y = p x^2$$

En un hiperboloides de un manto, encontramos las 4 curvas cónicas de la misma manera que en el caso del cono de dos ramas, con la diferencia que la parábola aparecerá cuando el plano de corte sea paralelo a la pendiente de las asíntotas del hiperboloides. La ecuación refiriendo su origen en el corte de sus asíntotas es:

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 - z^2/c^2 = 1, \quad \text{donde } a=b$$

3. Clasificación de las estructuras por su geometría:

3.1 CEROCIÓNICAS:

Son aquellas superficies que no tienen curvatura. Su generatriz y directriz están sobre un mismo plano. En esta clasificación encontramos a los muros rectos, losas planas, cubiertas plegadas, poliedros etc.

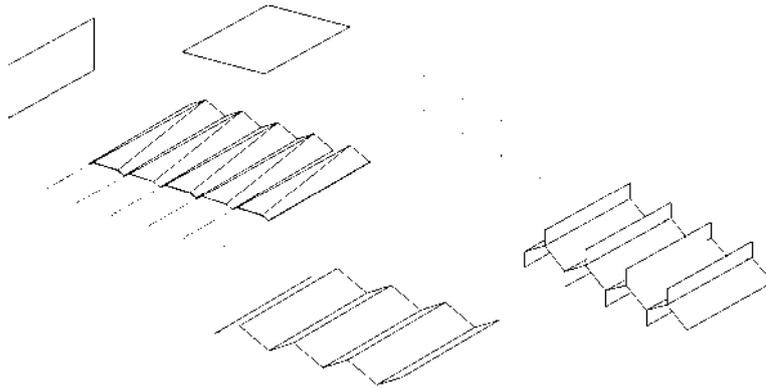
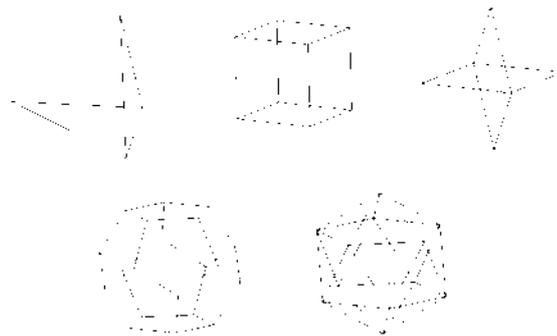


Fig. N° 64 Figuras Cerociónicas



3.2 MONOCIÓNICAS:

Son aquellas superficies que en un sentido están generadas por generatrices curvas y en el otro sentido por generatrices rectas. En esta clasificación encontramos las bóvedas de cañón corrido, bóvedas cónicas y diversas geometrías generadas con la intersección de éstas.



Fig. N° 65 Superficies Monociónicas.

3.3 SINCLÁSTICAS:

Son aquellas superficies que tienen doble curvatura pero de un mismo signo. Podemos decir que su generatriz y directriz son curvas. En esta clasificación, encontramos a las esferas, elipsoides de revolución, paraboloides de revolución, hiperboloides de dos mantos y superficies construidas con la parte exterior del toro de revolución.

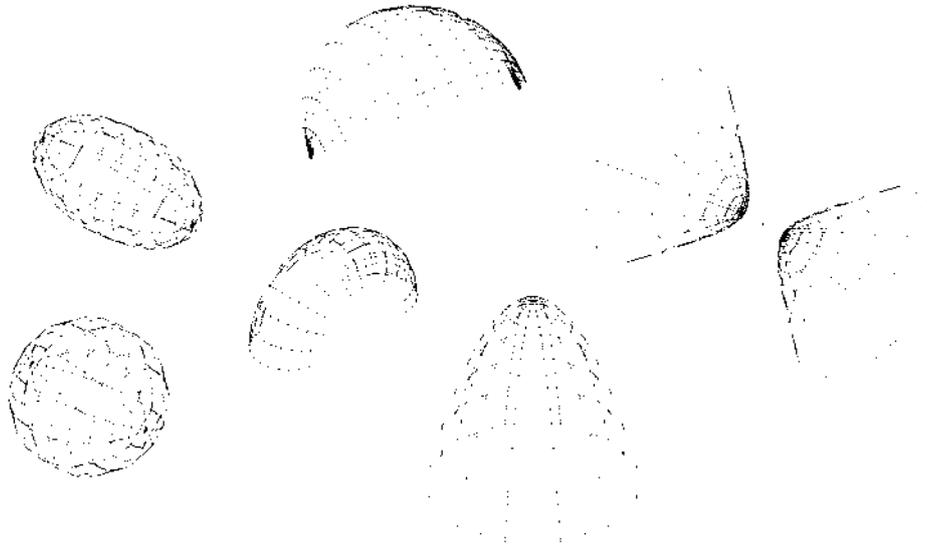


Fig. N° 66 Superficies Sinclásticas.

3.4 ANTICLÁSTICAS:

Son aquellas superficies que tienen doble curvatura, pero de con signo contrario. La generatriz es una curva positiva y la directriz, una curva negativa. En esta clasificación encontramos las superficies logarítmicas de revolución, el paraboloides hiperbólico, el hiperboloide de un manto y la parte interior del toro de revolución.

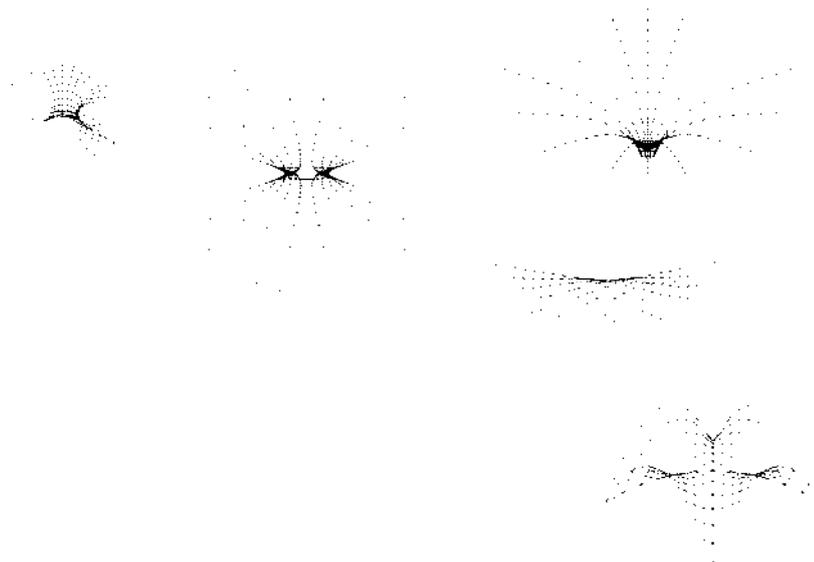


Fig. N° 67 Superficies Anticlásticas.

4. Velarias: Fundamentos Geométricos y Estructurales.

Encontrar la resistencia a través de la forma implica:

Conocer las condiciones de carga a las que va a estar sujeta una estructura.

Visualizar la forma que producen las fuerzas a través de sus diagramas de cortante y momento.

Establecer una relación, entre voluntad formal y las necesidades estructurales y constructivas.

Elegir la geometría más adecuada para un sistema estructural, que resuelva las necesidades del programa arquitectónico.

En una primera etapa, es importante conocer las condiciones de carga dominantes en la estructura para poder visualizar la forma que tendrían los diagramas de cortantes y momentos. Los diagramas podrán variar en forma y magnitud dependiendo de las cargas, el claro, la altura y las condiciones de apoyo de la estructura. Sabemos que los diagramas son una simplificación del fenómeno en dos dimensiones que se produce en el espacio. En otras palabras, la forma que toman los diagramas, son la dirección de las fuerzas en el espacio, es la manera cómo fluyen las fuerzas desde su punto de aplicación hasta sus apoyos. En esta trayectoria es donde debe procurarse la existencia de material suficiente y resistente, haciendo coincidir la trayectoria de fuerzas con la forma de la estructura propuesta. Es en esta búsqueda, donde la geometría toma un papel determinante, de tal manera que permite sugerir un orden espacial, una red modular y facilita establecer una lógica constructiva, que satisfaga las necesidades tecnológicas y el programa arquitectónico del proyecto. Este proceso se da a través de la capacidad de análisis y síntesis del arquitecto (Voluntad Formal).

A lo largo de la historia de la construcción, las curvas cónicas aparecen en muchos proyectos arquitectónicos. Estas curvas tienen cualidades intrínsecas en su forma, que responden a principios generales de la estática y muestran propiedades geométricas peculiares que las diferencia unas de otras. Es probable que la razón de la belleza que se aprecia en estas curvas, resulte de sus condiciones matemáticas, que establecen una ley, un orden, una armonía y una razón lógica en su trazo y construcción.

4.1 Derivación general del diagrama de cortante y momento de una carga uniformemente repartida.

Basado en el razonamiento de Navier, podemos obtener la derivación del diagrama de cortante, momento, pendiente y flecha de una carga uniformemente repartida sobre una placa de dimensión infinita (Ver Lam. Nº 1), con su origen de coordenadas ubicado al centro de ésta.

$$V = \frac{Tx^2w}{2Tx} = \frac{w}{2} x \quad (\text{ver fig. 1}) \text{ y siguiendo a Navier}$$

$$M = \frac{DV}{DX} \quad M = \frac{wx^2}{4} + C; \quad C = 0 \text{ si } x = \frac{L}{2}$$

$$M = \frac{wx^2}{4} - \frac{wL^2}{16} \quad (\text{ver fig. 2})$$

$$\frac{DM}{DX} = 0 = \frac{wx^3}{12} - \frac{wL^2x}{16} + C; \quad C = 0 \text{ si } x = 0$$

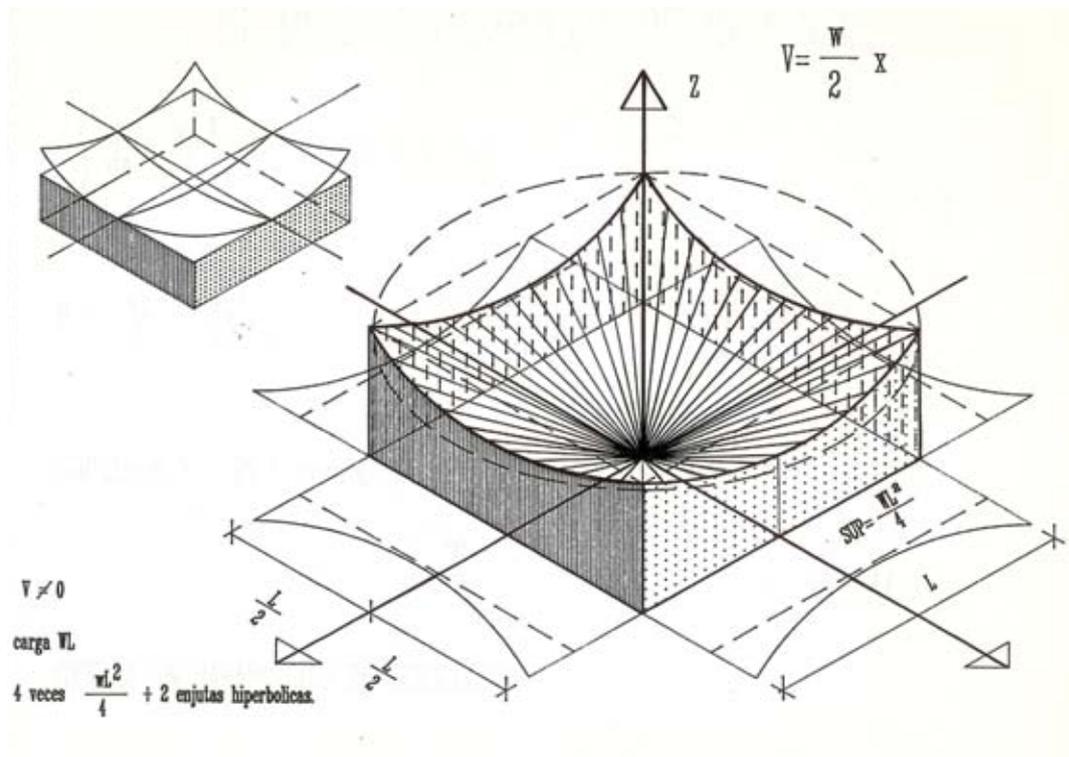
$$Y = \frac{wx^4}{48} - \frac{wL^2x^2}{32} + \frac{5wL^4}{768}$$

La expresión de la pendiente y la elástica se consideran divididas por $EI = 1$

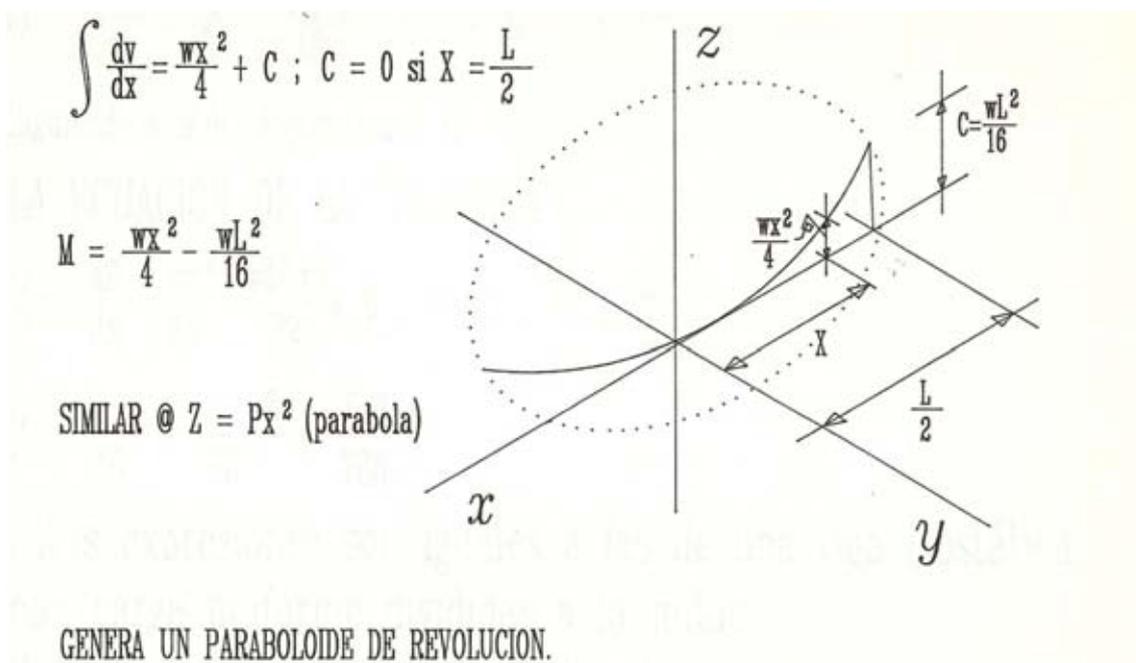
Lam. Nº 1 Derivación del diagrama de cortante y momento.

(Dr. Fernando López Carmona)

La representación gráfica de la integración del diagrama de cortantes y momentos de una carga uniformemente repartida sobre una placa de dimensión infinita, queda representada por un cono, con un origen de coordenadas ubicado al centro del cono y el diagrama de momentos queda representado por un paraboloides de revolución (Ver Lams. Nº 2 y 3).



Lam. 2 Representación gráfica del diagrama de cortante en el espacio.
 (Dr. Fernando López Carmona)



Lam. 3 Representación gráfica del diagrama de momentos en el espacio.
 (Dr. Fernando López Carmona)

4.2 Diagrama del cortante en el espacio de una carga uniforme.

El paraboloides hiperbólico es un campo de esfuerzos (Ver Fig. Nº 68) que está representado por el diagrama de cortante en el espacio de una carga uniformemente repartida.

Si planteamos un sistema de losas planas apoyadas sobre traveses y columnas (Ver Fig. Nº 68) y la carga aplicada sobre las losas supone una carga uniforme, el cortante en el centro del claro de las vigas, será igual a cero (0 Tons) pero el valor del cortante en los apoyos resulta el valor máximo. En el centro de las losas descubrimos una línea de ceros que es constante a lo largo de la losa, de viga a viga. Entre esta línea de ceros y el valor máximo de cortante, hay una variación en dichos valores que van de un máximo en los apoyos de la viga, a cero en el centro de la losa. Esta variación en el diagrama, describe con precisión la geometría de $\frac{1}{4}$ de paraboloides hiperbólico cortado en sus generatrices de corona. Si vemos lo que sucede alrededor de cada columna, veremos que se genera la típica solución de un paraguas formado por cuatro cuadrantes de paraboloides hiperbólico, donde el borde recto del paraguas corresponde a las generatrices de corona. Si hacemos coincidir el diagrama de cortantes en el espacio con la forma de la estructura, el área entre el diagrama de cortantes y la forma de la estructura desaparece, no existe, por lo tanto y siguiendo a Navier, la siguiente integral, que sería el momento, tendrá un valor igual a cero, lo que quiere decir, que el momento sobre dicha estructura desaparece.

Ecuación del Paraboloides Hiperbólico:

$$Z = k X Y$$

Para encontrar el valor del campo de fuerzas de cortante horizontal, aplicamos la ecuación:

$$\tau = \omega / 2k$$

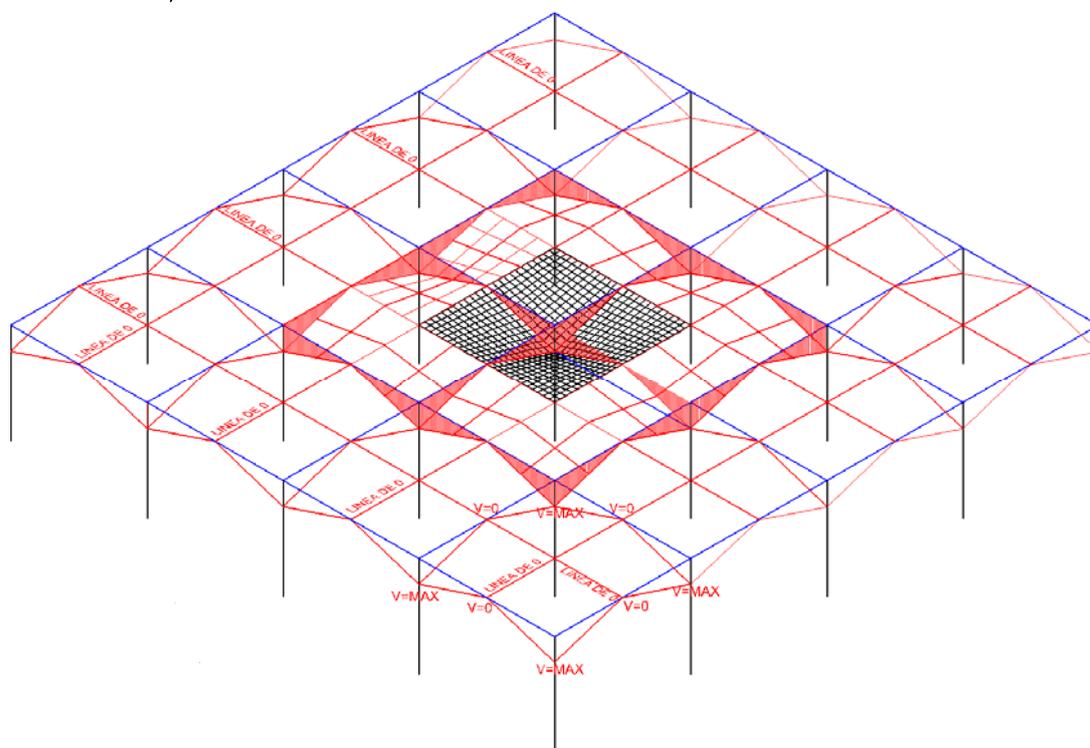


Fig. 68 Diagrama de cortantes en el espacio de una carga uniformemente repartida.

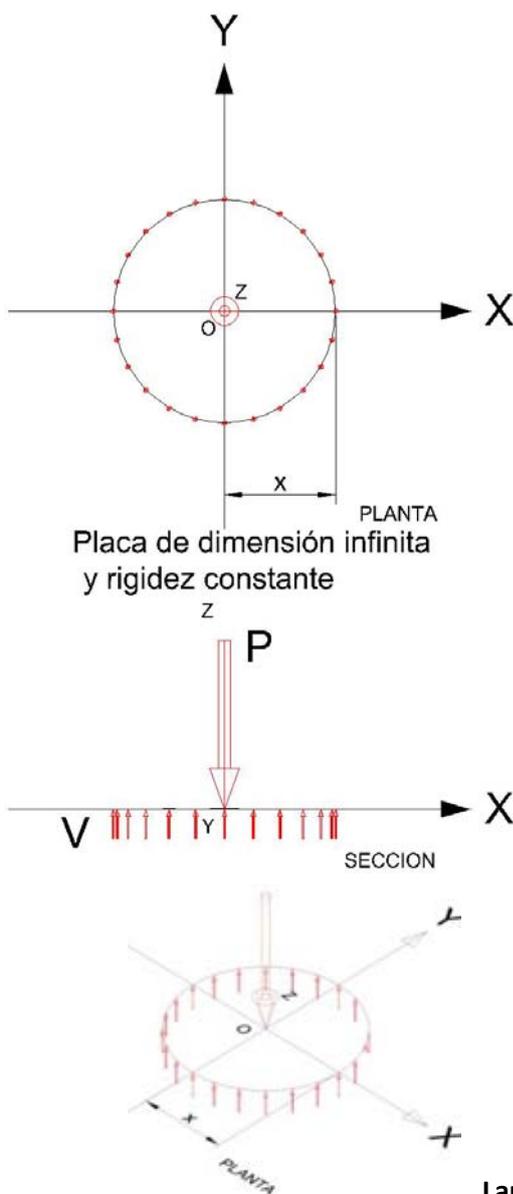
(Dr. Fernando López Carmona)

4.3 Diagrama de momentos en el espacio de una carga concentrada.

La superficie logarítmica de revolución representa al diagrama de momentos en el espacio de una carga concentrada (Ver Lams. Nº 4 y 5). Para poder visualizarlo, debemos determinar el valor del cortante en un segmento circular, de radio unitario y que es igual a $1/x$ (ya simplificado) y siguiendo nuevamente a Navier, podemos integrar este valor y el resultado será el momento que queda expresado con la ecuación: $y = \ln x$.

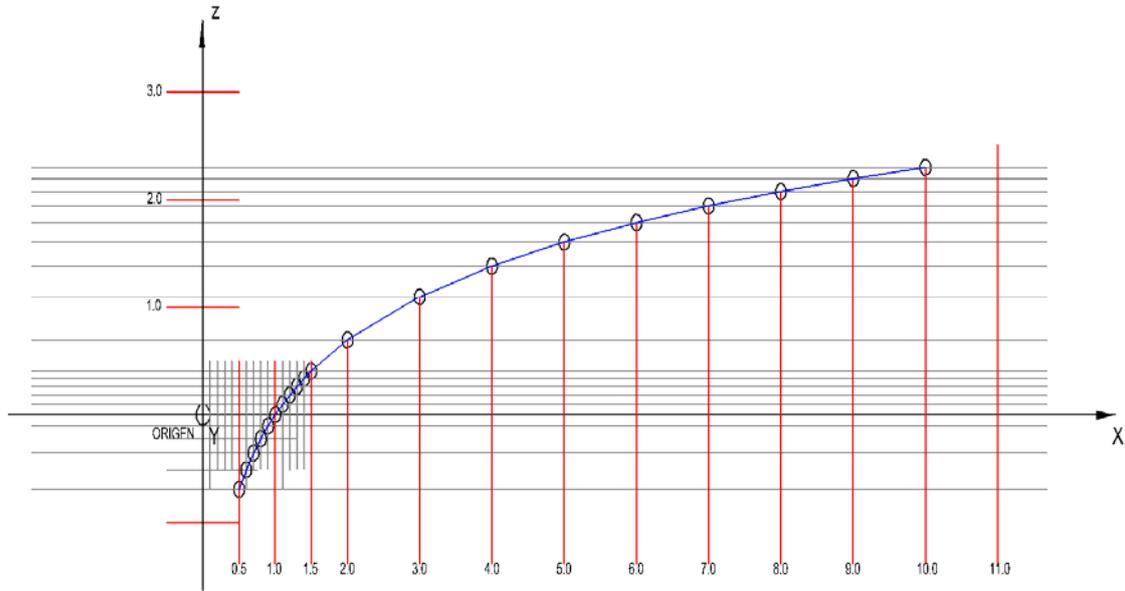
Si hacemos girar esta curva, alrededor de su eje "Z" como cuerpo de revolución, nos describe la típica forma de las velarías, con forma semejante a una trompeta. En esa superficie obtenida, podemos ajustar la escala vertical sobre el eje "Z" y así manejar la proporción adecuada de la forma. (Nuevamente interviene la voluntad formal)

Elemento diferencial circular



1) Determinación de la carga		
P=carga unitaria x área		
$P = w * \pi x^2$		
Donde w = la carga de viento + PP		
2) Determinación del cortante		
V= carga / perímetro		
$V = P / 2\pi x$		
simplificando		
$V = 1 / x$ (P, 2 y π son constantes)		
3) Determinación del momento		
$M = \int 1/x = \ln x$		

Lam. Nº 4 Integración de diagramas de cortante y momento para una carga concentrada.
 (Dr. Fernando López Carmona)



Lam. 5 Curva logarítmica $Y=\log n x$ (Dr. Fernando López Carmona).

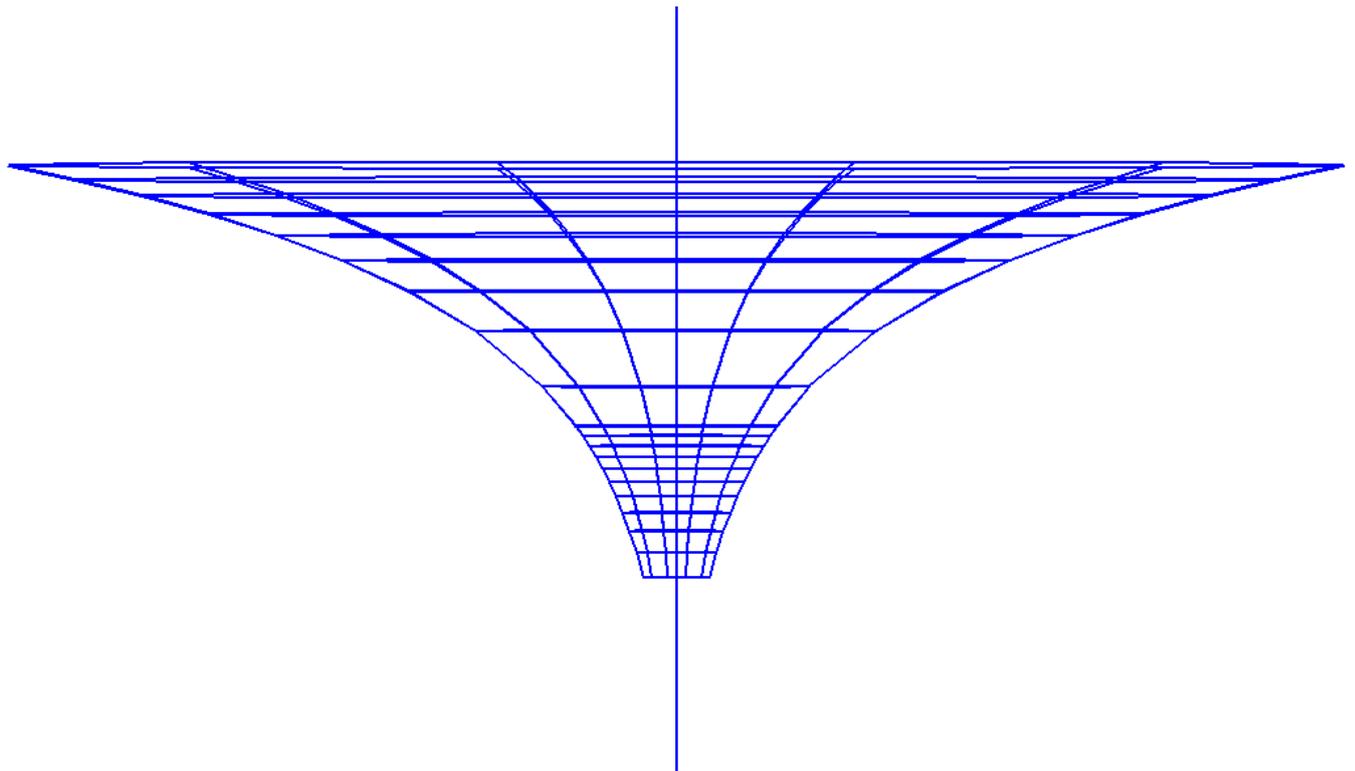


Fig. 69 Superficie logarítmica de revolución.

5. Exploración geométrica.

En este estudio de superficies, podemos identificar dos grupos muy semejantes en su concepción geométrica:

1. Las superficies de rotación
2. Las superficies de translación.

Podemos decir que hay un parecido notable en estas dos familias de superficies, sin embargo existen diferencias que pueden resultar muy apreciadas desde el punto de vista constructivo.

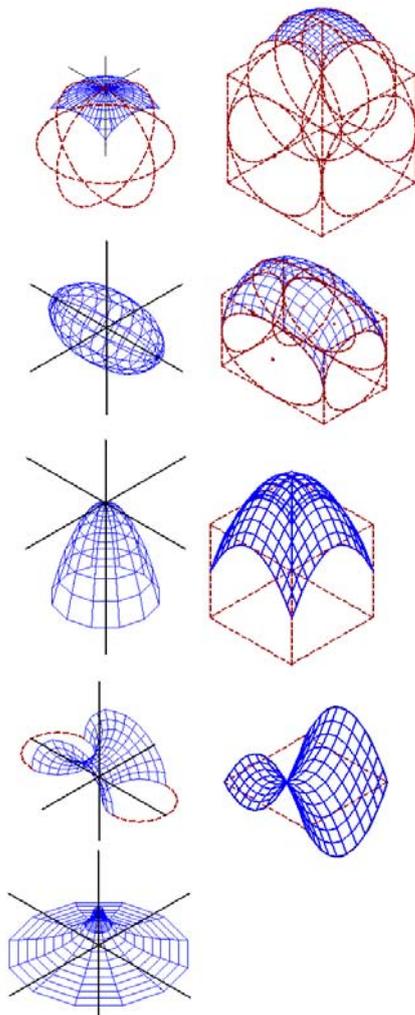
Las superficies de rotación se generan con rectas o curvas que giran alrededor de un eje, en tanto que las superficies de translación se generan con rectas o curvas, pero a diferencia de las primeras, la recta o curva que define la generatriz, se translada a lo largo de la otra recta o curva que define la directriz. Una tabla comparativa de estas geometrías podría ser la siguiente:

Superficies de Rotación

- Esfera
- Elipsoide de Revolución
- Paraboloide de revolución
- Toro de revolución
- Logarítmica de revolución

Superficies de Translación

- El Círculo en el Cubo
- La Elipse en el Cubo
- La Parábola en el Cubo
- El Paraboloide Hiperbólico
- XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX



EsferaCirculo en el Cubo

Elipsoide de Rev.....Elipse en el Cubo

Paraboloide de Rev.....Paráboloide de translación

Toro de Rev.....Paraboloide Hiperbólico

Logarítmica de revolución.....XXXXXXXXXXXX

Fig. N° 70 Geometrías comparativas de revolución y translación

5.1 Geometría de Rotación:

5.1.1 Anticlásticas. Logarítmica de Revolución.

5.1.1.1 Velaria en Jardín Terapéutico del Criq. En Querétaro



Fig. 71 Cubierta de Lona Fortoflex de 800 grs x m2 con black-out.

Esta velaria consiste en dos superficies logarítmicas de revolución, intersecadas entre sí, con un diámetro de 11.40 mts. La escala vertical de la curva queda definida por nuestra voluntad formal. El perímetro circular de estas superficies lo tenemos que modificar con una forma que nos permita dar una tensión uniforme en todo el perímetro. Si esta tensión debe ser uniforme, la forma más adecuada será una curva tal, que responda al polígono funicular de una carga uniformemente repartida. De este razonamiento, elegimos un sistema de parábolas en planta para aplicar una tensión perimetral a la superficie y poder dejarla totalmente tensa.

El esquema general de equilibrio se basa en una estructura Tensegrity que consta de dos mástiles en forma de huso y un sistema de cables de acero galvanizado anclados a los muros perimetrales del Jardín Terapéutico y a los mástiles.

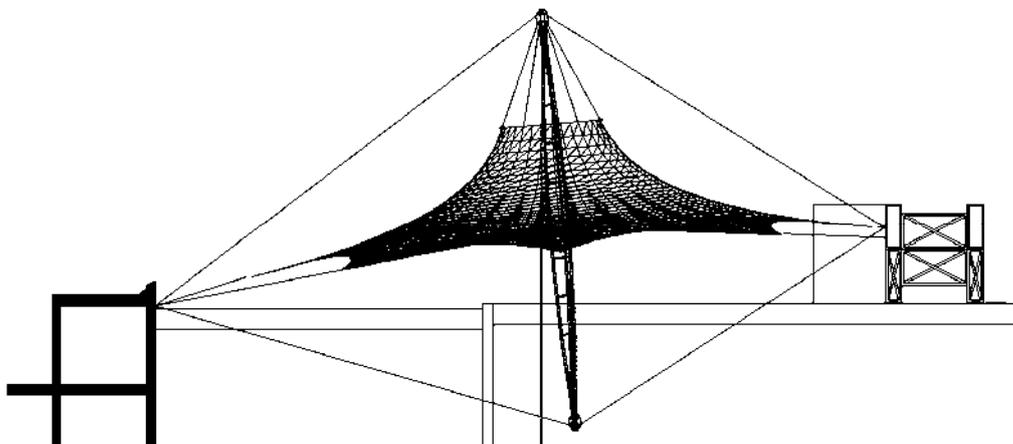


Fig. 72 Geometría de la velaria en alzado.

Las costuras de la lona se realizaron por termo fusión, dejando un traslape de 4cm para garantizar una buena conexión entre plantillas.



Fig. N° 73, 74, 75 y 76 Proceso de costura con piola, entre las dos logarítmicas.

La costura entre las dos logarítmicas se realizó con una junta impermeable unida con piola de nylon tejida entre los ojillos dejados en los dos extremos a conectar, protegiendo dicha piola de los rayos ultravioleta, traslapando la lona sobre la misma junta. Los cables de relinga se colocaron por fuera del manto de lona, gracias a una serie de ojillos @ 20 cm donde se usaron bandolas como conectores entre la lona ojillada y el cable de relinga.



Fig. N° 77 Detalle de conexión de Cable de relinga a manto y ojillos.

Los mástiles están fabricados con tres tubos de acero de $\varnothing 1 \frac{1}{2}$ " unidos con estribos de tubo de $\frac{3}{4}$ " soldados @70 cm. Los anclajes entre las puntas de la lona y los cables de relinga se fabricaron con placa de acero, mismos que se conectaron al manto con tornillos galvanizados de $\frac{1}{2}$ " usando una solera curva para lograr un anclaje uniforme con la lona. Los cables de relinga tienen una terminal roscada, que entra en una barra hueca soldada a la placa de anclaje. Esta terminal permite ajustar la tensión a la que deben quedar los cables de relinga.

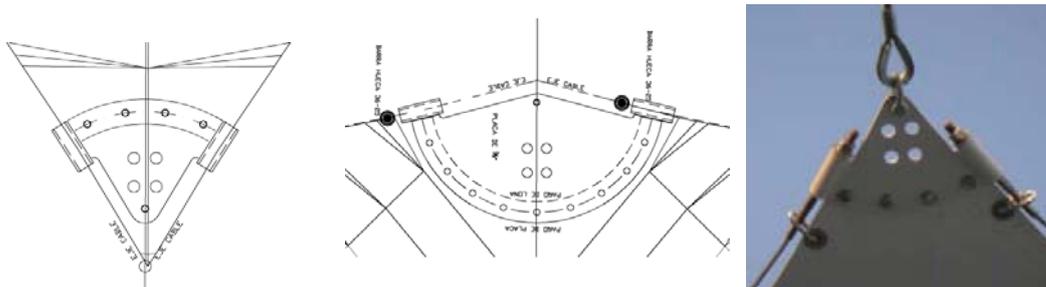


Fig. N° 78 Detalles de conectores de lona con cables de relinga a mástil.

Los mástiles cuenta con una base y un capitel iguales, contruidos con 4 placas de acero, que sostienen dos anillos de acero. Estos anillos sirven para conectar los cables a la estructura, uno se usa únicamente durante el montaje de la estructura y el otro, para anclar los cables definitivos, evitando con esta solución problemas de tiempo durante el montaje, al desenganchar los cables provisionales del mástil. Esto se traduce en tiempo grúa, un insumo bastante caro.

Cada cable de carga y contrarresto tiene, en uno de sus extremos, un templador que permitir el ajuste final para afinar la posición y tensión de la velaria. Los extremos de los cables cuando se hace una conexión en campo, debe contar con guardacabo ó rozadera, la cual protegerá al cable durante su vida, ya que debido a las fuerzas de viento, los extremos de los cables están en continua fricción con sus elementos de anclaje.



Fig. 79 Anclaje de extremo de cables con templadores a horquetas.

Los anclajes a los muros se hicieron aprovechando una trabe en el borde de la losa de cubierta. Se construyeron unas horquetas de acero de 1" de diámetro roscadas en sus dos extremos. Estas horquetas se empotraron en la trabe de concreto, haciendo unas perforaciones en ellas y colocando en su parte posterior una contra placa para distribuir el esfuerzo de tracción en un área mayor sobre la trabe.

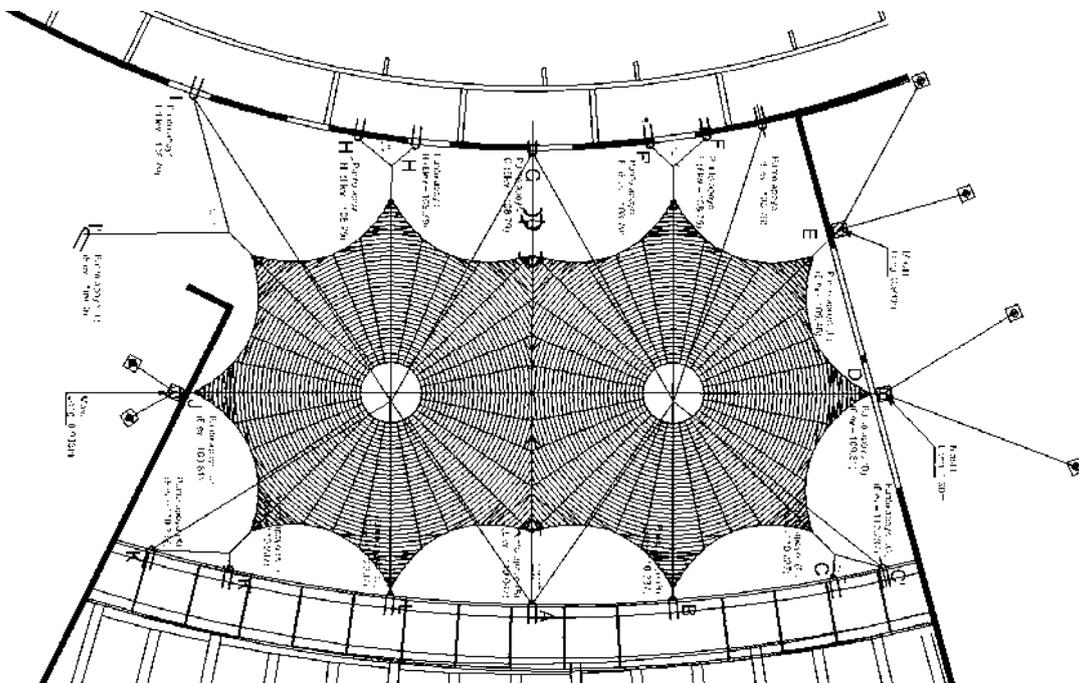


Fig. 80 Geometría en Planta con esquema de cables de anclaje y contrarresto.



Figs. 81 y 82 Proceso de montaje.



Figs. 83 y 84 Detalle de anclaje de lona a anillo y detalle de costura entre los dos mantos.

5.1.1.1.1 Velaria en Área de usos Múltiples.

En este ejemplo vamos a poner atención en el desarrollo geométrico, construcción del manto y la fabricación de la estructura metálica.

Desarrollo Geométrico:

Se plantea cubrir un área de 750 m² con una velaria. Las propuestas se estudian en principio con dos, tres y finalmente con 6 superficies logarítmicas (Ver Lam. 4 y fig. 124). La propuesta final plantea 7 superficies, cubriendo el módulo hexagonal central.

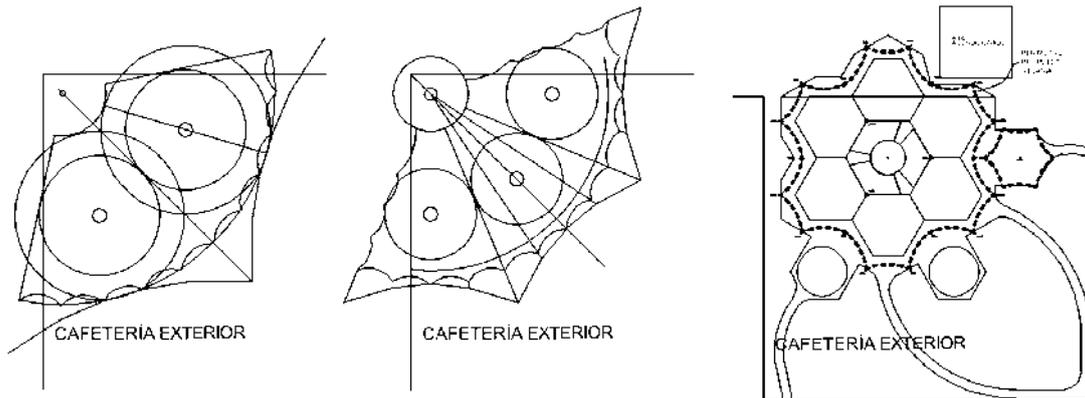


Fig. 85 Propuestas geométricas iniciales.

Durante el estudio de la geometría, se detectó que en la intersección de los seis módulos perimetrales con el módulo central permitía acumulación de agua, por lo que se propone que las siete superficies sean tangentes a una superficie esférica, que permitiera el desalajo del agua. La propuesta se basa en la geometría de una geodésica icosaédrica de frecuencia 16.

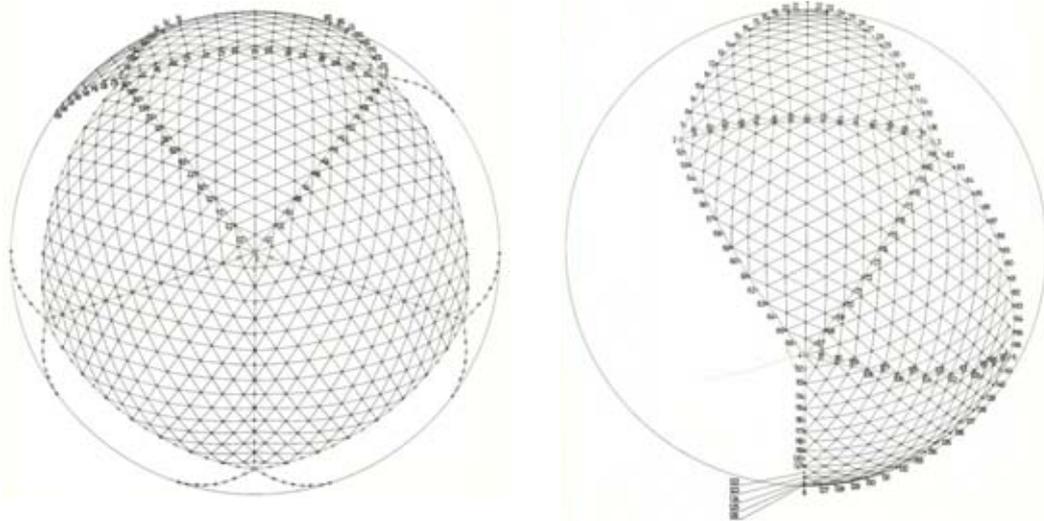


Fig. Nº 86 Esfera Geodésica icosaédrica de frecuencia 16.

Su principio es la proyección de un icosaedro inscrito en una esfera. Cada lado circular de los 20 triángulos esféricos, se divide en 16 partes iguales. Por cada división se hace pasar un círculo máximo, o sea un círculo que toca la superficie de la esfera y pasa por el centro de la misma. De esta manera,

cada triángulo esférico queda dividido en tres direcciones alineadas a cada uno de sus lados, por círculos máximos que hacemos pasar por las dieciséis divisiones. El resultado es que cada triángulo del icosaedro proyectado en la esfera, queda dividido en 165 triángulos completos y 48 medios triángulos. La idea intentaba dividir a la esfera en triángulos iguales, sin embargo esto no ocurrió. Se obtienen triángulos cuyas dimensiones son muy semejantes de tal manera que se pueden agrupar en cuatro tamaños. Las pequeñas diferencias se resuelven con un nudo capaz de absorber estas diferencias, lo cual facilita notablemente su construcción. Dentro de esta nueva división, podemos hacer un arreglo de siete hexágonos que nos permiten configurar la geometría esférica necesaria.

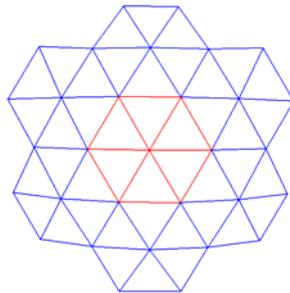


Fig. Nº 87 Arreglo con triángulos esférico de la sección de geodésica que podemos utilizar.

Estos hexágonos son la base de construcción que se tomaron para dar la curvatura necesaria a la superficie, y así poder evitar la acumulación de agua en la superficie.

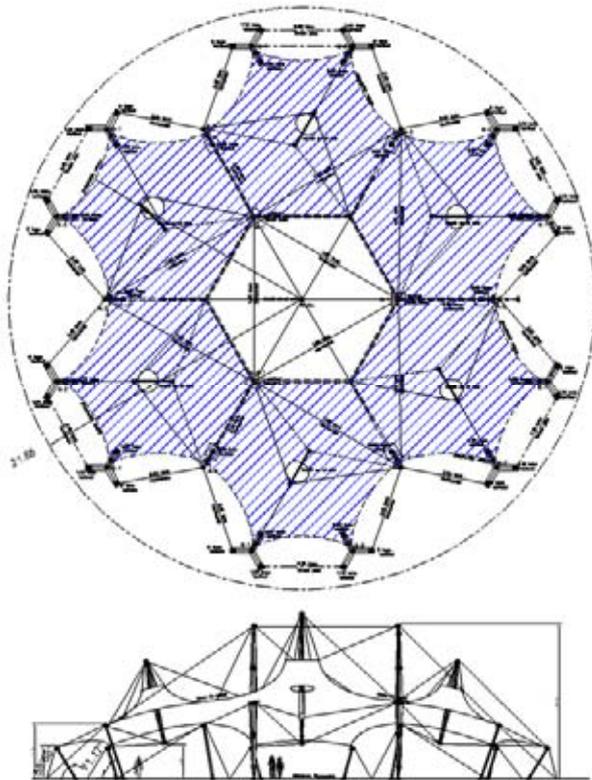


Fig. Nº 88 Propuesta geométrica y estructural final.

Fabricación de la estructura:

La estructura se fabricó en un taller metalmeccánico con la capacidad suficiente para poder mover piezas de un peso relativamente importante. Estas piezas, por su peso, no se podían manipular sin un equipo como grúas y polipastos. Todos los cortes en placa fueron hechos con un pantógrafo de control numérico, los barrenos fueron hechos con punzonadora y las soldaduras fueron hechas por soldadores calificados, para garantizar la seguridad de la cubierta. Se realizaron planos de taller a detalle de cada una de las piezas para obtener un resultado de alta calidad, y se hicieron varias visitas de inspección al taller para que durante el armado de las piezas se autorizara su soldadura y también poder despejar cualquier duda durante la construcción de todas las piezas. Se hizo un despiece tal que permitiera transportar los elementos en una dimensión máxima de 12 mts. Una vez terminado el trabajo de armado y soldado, cada pieza fue sometida a una limpieza química y mecánica antes de aplicar una capa de primer anticorrosivo y el acabado final, con dos capas de esmalte acrílico de Dupont. Cada pieza pre armada y terminada, fue forrada con plástico con burbujas para protegerlas durante su transporte del taller, a su destino.

Construcción del manto:

La construcción de este manto se hizo en un taller con la experiencia y el equipo necesario, y como requisito indispensable, una pista adecuada para una manipulación y confección del manto en un medio limpio. El tipo de lona que se eligió, fue una lona nacional de alta calidad marca Forto-Flex de 900 grs/m² con black out. Se previó desde un principio que el material fuera de un mismo lote para garantizar su calidad y homogeneidad. La unión de plantillas se hizo por termo fusión, que es el procedimiento más comercial y utilizado en México.

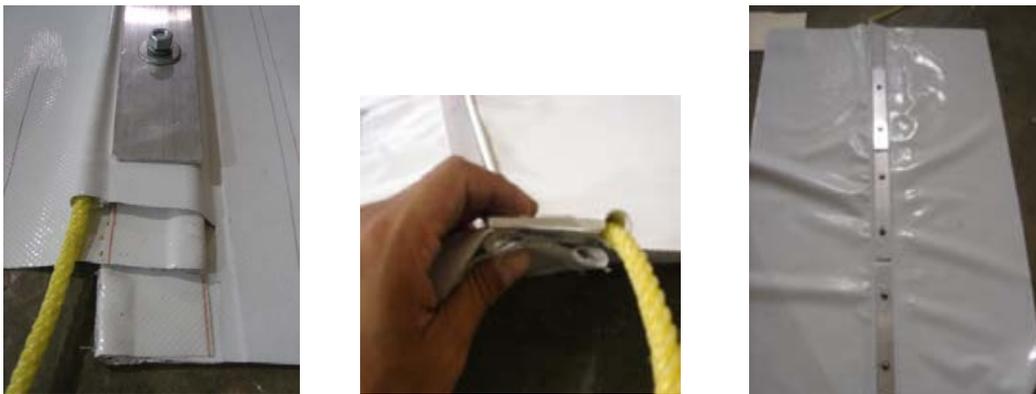


Figs. Nº 89, 90, 91, 92, 93 y 94 Procedimiento de Corte y termo soldado del manto.

En la parte superior del manto se dejó un óculo con un diámetro de 2.50 m. Este elemento se propone, para evitar concentraciones de esfuerzos en el capitel, de esta manera repartimos el esfuerzo máximo del manto en el perímetro del óculo.

Tanto en la parte superior como la inferior, el manto quedó rematado con un refuerzo en el perímetro, el cual consiste en una faja de nylon que queda cosida a una tira de lona de la misma calidad del manto y esta tira queda termo soldada a los perímetros del manto. A lo largo de este refuerzo, se colocan ojillos de cobre para evitar la corrosión (Ver Fig. N° 77).

Estos ojillos permiten la conexión entre el manto y el anillo superior del capitel y también la conexión del manto a los cables de relinga en su base. En las puntas donde convergen dos cables de relinga, se colocaron unas placas de anclaje con los accesorios necesarios para conectar el manto y los cables de relinga a los mástiles de la zona de contrarresto, y alrededor de estas placas se reforzó el manto con dos anillos de lona, uno de 50 cms de diámetro y el otro de 70cms, ya que ese es el otro lugar de concentración de esfuerzos. Para poder instalar el manto, se dejó abierta una costura de las plantillas y este se cerró con una junta mecánica, rematando la lona con un cable de nylon de ¾" para evitar su deslizamiento (Ver Fig. N° 95, 96 y 97). Los dos bordes de la logarítmica quedaron traslapados y conectados mecánicamente con placas de aluminio discontinuas y con los bordes redondeados para evitar dañar la lona con el tiempo. Estas placas se perforan @ 20cms. y se atornillan, fijando el traslape de los dos mantos, con tornillos de ½" galvanizados.



Figs. N° 95, 96 y 97 Detalle de junta mecánica entre dos unidades.

Los mantos se construyeron en unidades de dos logarítmicas cada uno, para poder manejar el tamaño del manto con comodidad durante su montaje. Se usó la misma junta para conectar el arreglo de las tres piezas de dos unidades cada una.

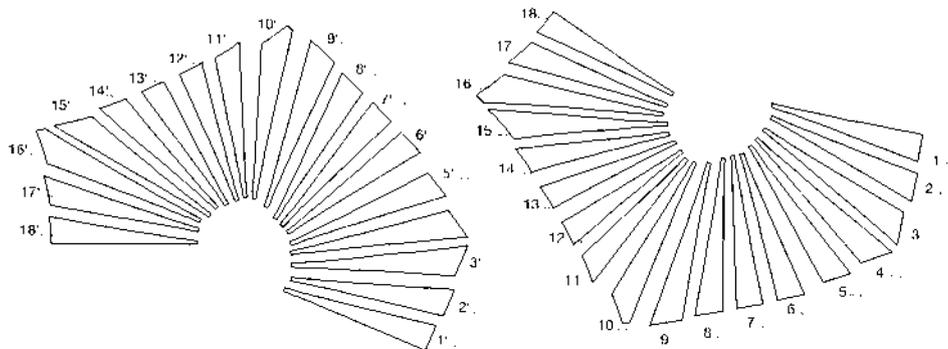
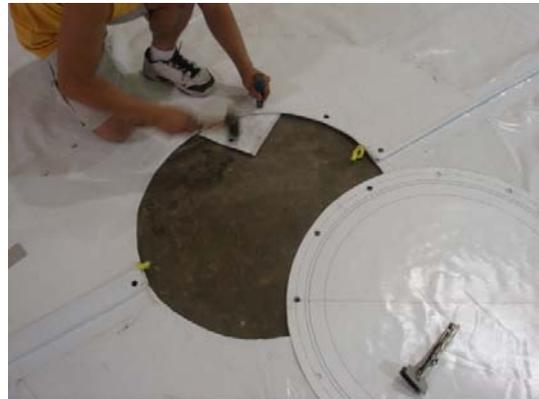


Fig. N° 98 Plantillas de una unidad logarítmica.

Las placas de conexión son muy semejantes a los de la figura 78, y debe dejarse una preparación precisa desde el momento de la confección de la lona. Estas preparaciones deben tener la misma forma que las placas de conexión.



Figs. Nº 99, 100, 101 y 102 . Las placas de conexión con el manto, deben coincidir.

Montaje de la velaria

El montaje esta velaria requirió de una planeación detallada:

Envoltura dey etiquetado de las lonas para poder manejarlas en campo con mucha facilidad.

Armado y etiquetado de cada uno de los cables.

Planeación en el orden de envío de todos los insumos.

Selección de los equipos de construcción, de izaje y de acceso en altura.

Selección cuidadosa del personal:

Montadores de estructura y soldadores

Montadores de lona.

Pintores.

Coordinación entre plan de montaje y tiempos autorizados por la empresa para trabajar, descargas de equipo y material y maniobras riesgosas.
Selección de equipo de seguridad y herramienta.

La Selección de personal es un proceso delicado y detallado. Se debe seleccionar personal con habilidades y experiencia en la especialidad. A veces en el tipo de trabajo como el montaje de lonas, existe poca experiencia, por lo que se debe instruir y capacitar al personal, estableciendo un buen canal de comunicación y haciendo una descripción detallada del trabajo que van a realizar. El responsable debe tener imaginadas varias posibilidades de maniobra para el montaje y comentarla con los maestros encargados de las cuadrillas y con los trabajadores. De estas pláticas se reúne la experiencia de todos los integrantes que pueden emitir una opinión, a fin de mejorar la estrategia y seguridad del montaje. Debe de cuidarse en detalle la seguridad de las maniobras, los tiempos programados y familiarizarse con los operadores y sus equipos de montaje. En este caso se rentó una grúa de 12 ton de capacidad y un elevador con canastilla para el personal. Debe tomarse en cuenta el peso del equipo y cerciorarse que el piso por donde van a circular tenga la capacidad de carga adecuada para no destruirlo.



Figs. Nº 103 y 104 Grúa” Manitex” de 12 tons y elevador de canastilla “Genie”.

La elección correcta de estos equipos determina el éxito de la operación de montaje. La comunicación con el operador de la grúa es fundamental para tener un claro entendimiento en cada uno de los movimientos. Deberá existir una persona que conozca a fondo el proyecto y su proceso de construcción, para poder dar e interpretar la información necesaria durante toda la construcción. El montaje comenzó por la erección de los mástiles principales, habiendo dejado previamente los cimientos adecuados y las placas de anclaje.



Figs. Nº 105 y 106 Posicionamiento de los mástiles principales y de contrarresto.

Para estabilizar estos mástiles, se requiere de un sistema de cables que prevea la estabilidad y ajuste de su verticalidad. Para el montaje de los mástiles se previó un anclaje articulado, que facilitó su maniobra, y para los cables de contrarresto, se propuso un anillo rígido que permitió la entrada de los cables en cualquier dirección.



Figs. Nº 107, 108, 109, 110 y 111 Detalles de Anclajes de mástiles y cables.

El sistema de mástiles configuran una estructura tensegrity el cual está integrado por tres mástiles principales de 12 mts, siete mastiles que quedan flotando en el aire con la ayuda del sistema de cables y 18 mástiles pequeños de contrarresto, que nos ayudan a desviar la dirección de los cables de contrarresto y poderlos anclar en los lugares adecuados dentro del área asignada al proyecto.(ver Fig.Nº 88). Una vez montados los mastiles y el sistema de cables, se procede a su alineación, tensión y plomeo. Teniendo el sistema rígido y en equilibrio, se procedió a montar los mantos de la velaria.



Figs. Nº 112, 113 y 114 Montaje del manto.

Otro aspecto a considerar fue el orden de montaje de los elementos, ya que el espacio de construcción era reducido, y elegir una mala estrategia en el orden de montaje, pudo haber conducido a encerrar los equipos pesados con la misma estructura de la velaria y traducirse en trabajos adicionales de desmontaje, y montaje, encareciendo la operación de manera importante. Haber previsto un buen empaque de los mantos permite un manejo mas agil y rápido en su montaje. Debe cuidarse en extremo la limpieza dela superficie donde se trabaja, ya que este descuido se traduce en un trabajo agotador de limpieza , una vez elevado el manto, por lo que se recomienda cubrir el piso con una capa de polietileno u otro material que evite el contacto del manto con el piso. Los cables deben forrarse previamente con polietileno, ya que este cuidado también evitará manchar el manto con la grasa propia del cable, aunque se hayan limpiado previamente.



Figs. Nº 115 y 116 Limpieza y montaje del manto. Cables forrados para evitar suciedad.

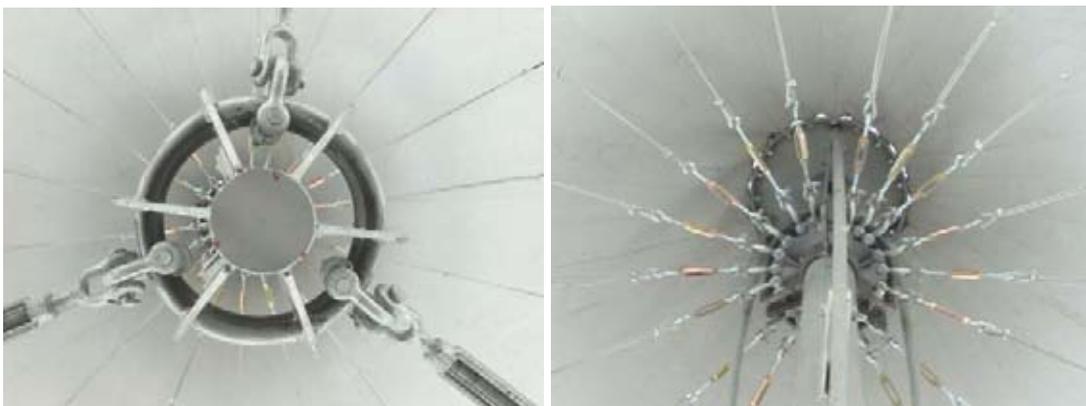
Las juntas de los mantos son un concepto muy importante a diseñar desde el principio del proyecto. Un diseño cuidadoso de estas juntas se traduce en un comportamiento homogéneo del manto, evitando arrugas y deformaciones en los perfiles de la velaria. Por otra parte, pensar las juntas con la

mayor facilidad para su instalación, ya que en sí, el montaje del manto es una actividad compleja. (ver Fig. Nº 95, 96, y 97).



Figs. Nº 117, 118 y 119 Junta mecánica con placas de aluminio y tornillería.

El manto central fue el último en montarse, pero sin haber cerrado la última costura de las tres piezas de dos unidades cada una. Esta pieza se planteó que fuera desmontable, y por esa razón, se puso un anillo de tracción en el centro de los seis módulos perimetrales. La idea era poder abrir y cerrar la velaria en las diferentes estaciones. Esta idea complicó muchísimo el diseño del manto, ya que no pudo ser un manto continuo entre los siete módulos. En el mástil central, se tuvo que proponer un sistema de cables que permitiera tensar el módulo central y dar la mayor continuidad posible con el otro manto. El resultado fue un arreglo de cables que desde el punto de vista formal resultó muy atractivo y práctico.



Figs. Nº 120 y 121 Arreglo de cables en mastil central.



Figs. N° 122 y 123 Arreglo de cables en módulo central.

A la terminación del montaje, viene una etapa de ajustes en toda la estructura, la cual es posible hacer en la medida que se hayan dejado recursos para realizar esta actividad. Tener elementos de tracción, como templadores, tornillos sinfines y extremos ajustables en un lado de los cables de carga y contrarresto, facilitan este trabajo de ajuste. Es en esta etapa donde se termina de plomear algún elemento que haya quedado ligeramente desalineado y se pueden eliminar pequeñas arrugas que hayan quedado durante el proceso de montaje. La diferencia de tener esta opción, puede ser la presentación final de una velaria con mucha calidad, o tener que aceptar algunas arrugas que sin estos elementos, sería muy difícil poderlas eliminar. Otro trabajo final serán los retoques de pintura, mismos que son inevitables en todo este proceso.

Por último, queda un tema a tratar; el mantenimiento inicial y el mantenimiento programado. El primero, se debe realizar con una diferencia de la terminación de la obra en no más de 30 días calendario. Este primer mantenimiento, muy importante, no debe olvidarse, ya que todos los materiales nuevos, principalmente cables y manto de lona, tienen un periodo de acomodamiento. Los cables, al estar trabajando en tracción, van a sufrir un reajuste de los alambres que lo conforman. Esto se traduce en un ligero alargamiento y adelgazamiento del cable, lo que puede poner en riesgo la estabilidad de la estructura, ya que al adelgazarse estos cables, pueden aflojarse los pernos que dan sujeción a las terminales ajustables, ocasionar un deslizamiento en la unión y perder su agarre mecánico, al grado de producir un colapso parcial en la estructura. Este ligero alargamiento en los cables, puede aflojar la estructura y permitir concentraciones de esfuerzos en todos sus elementos, al recibir ráfagas instantáneas de viento acelerado. Este fenómeno, aunado al primero, pone en riesgo la integridad de la velaria, y es solo cuestión de tiempo para que éste se presente. Esta situación se evita con mucha facilidad, regresando en ese primer periodo de 30 días de haber terminado la obra, para revisar y apretar los pernos y grilletes que se hayan podido aflojar.

El mantenimiento programado, permitirá mantener a la velaria en óptimas condiciones de seguridad e imagen. Aquí habrá que cuidar la tensión de los cables a través de todos los elementos de tensión que se dejaron previstos durante el proyecto, así como la tensión del manto, revisando que no haya algún desperfecto de fábrica en las costuras o que haya aparecido alguna arruga y poder eliminarla. El otro aspecto que hay que cuidar, es la limpieza y la aplicación de protectores de rayos UV. Un

manto sucio tendrá una vida más corta que la predicha por el fabricante, y eliminará la garantía que se haya otorgado de fábrica.



Fig. N° 124 Imagen de la velaria terminada



Fig. N° 125, 126, 127 y 128 Imagen de la velaria terminada

5.1.1.1.2 Sombrillas en Área de Fast Food en Parques Polanco

Este proyecto plantea un área sombreada con base en un arreglo de siete sombrillas con mantos de logarítmicas de revolución de gran tamaño, cuatro de 12mts y 3 de 10mts de diámetro. El área se destinó para crear una terraza para comida rápida dentro del conjunto habitacional y comercial, sobre una cubierta de lo que será una tienda de autoservicio. Esta cubierta, es una losa reticular con casetones de 60 x 60, apoyada en un sistema de marcos en dos direcciones, con capiteles en el área de columnas. La ubicación del sitio está en un lugar donde el viento puede entorilarse y acelerar su velocidad, por lo que la primera pregunta que surgió fue si la losa tenía la capacidad de carga necesaria para tomar la carga estática y los momentos producidos por efectos del viento.

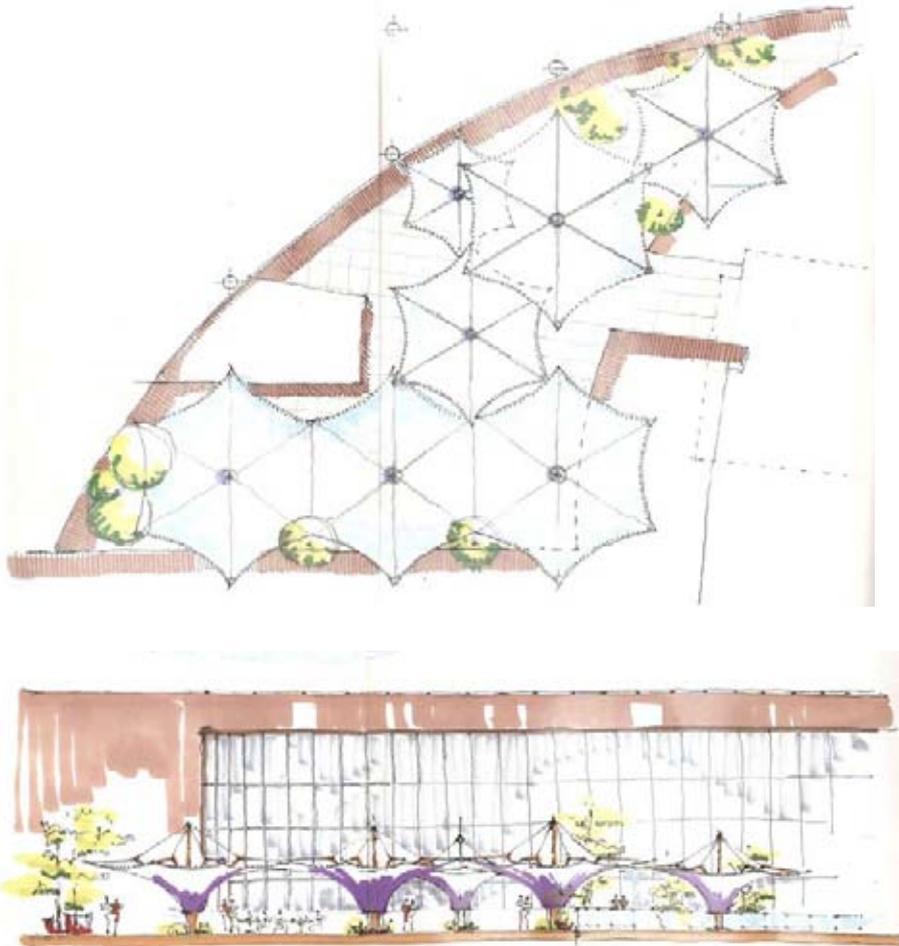


Fig. Nº 129 Anteproyecto de arreglo de sombrillas

La primera propuesta de apoyo, sobrepasó las especificaciones de resistencia en una revisión hecha por el bufete de cálculo del conjunto, ya que el momento de torsión que ejercía la sombrilla con su manto en la losa, era muy alto. La propuesta final, contempló un aumento del área tributaria de la sombrilla en el apoyo, haciendo una placa de apoyo más grande y separando los pernos de anclaje a la losa, aumentando su brazo de palanca. Esta propuesta fue aceptada con buenos ojos e hizo posible llevar a cabo el proyecto, sobre la losa.

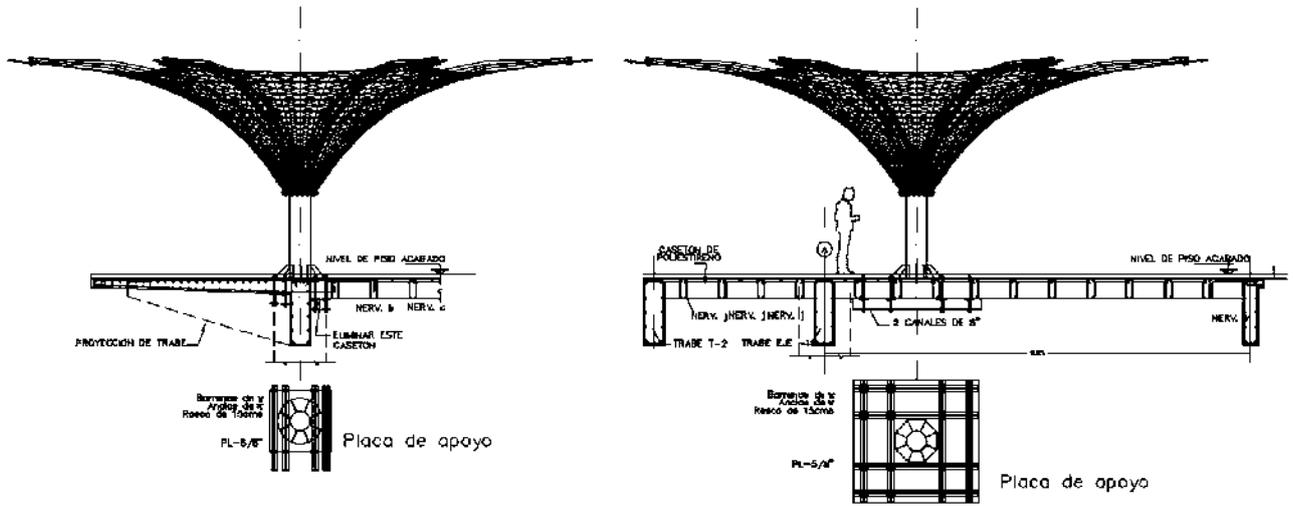


Fig. Nº 130 Dos casos de apoyo de sombrillas en losa reticular.

El diseño de las sombrillas representó un reto interesante, ya que el área a cubrir por unidad era importante. El presupuesto fue fijado y limitado desde un principio, teniendo que ofrecer una propuesta formalmente interesante y económica. En el desarrollo de esta estructura se fueron eliminando poco a poco todos los elementos que podían generar un sobrecosto, pero debía plantearse un procedimiento constructivo que fuera muy rápido en la construcción y su montaje.

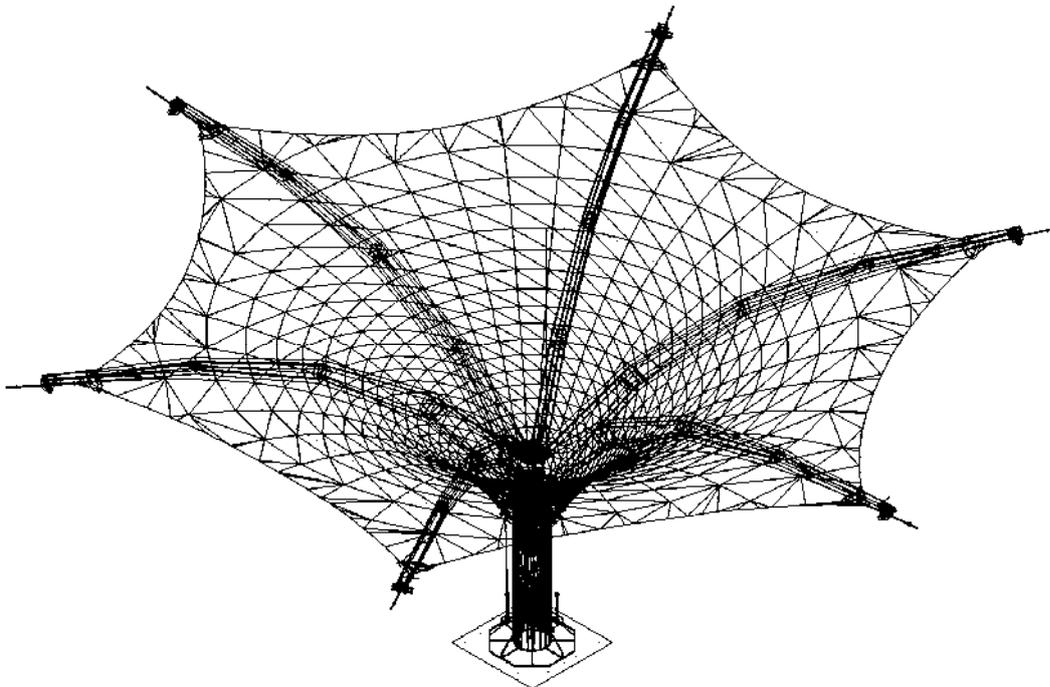


Fig. Nº 131 Imagen tridimensional de la sombrilla.

El acceso a la zona era bastante accesible para cuatro de las sombrillas, pero había tres que resultaban poco accesibles. Esta condición determinó la posición de las sombrillas grandes cerca del acceso de la grúa y las tres pequeñas en el lugar más retirado. Se evaluó el costo beneficio de rentar una grúa de brazo largo y mucha capacidad de carga por un día y otra mucho más pequeña para terminar el montaje, contra el costo de montar las sombrillas con más mano de obra y equipo especial para realizar las maniobras necesarias. Resultó que en tiempo y costo, la opción de las grúas fue económicamente más rentable, por lo que el recurso que hubo que cuidar para lograr un montaje sencillo y rápido fue el diseño del método constructivo. El planteamiento resultó muy sencillo:

Proponer un capitel con un sistema de rótulas donde, con atravesar dos pernos, se pudiera fijar cada uno de los seis brazos de soporte del manto. En un extremo, cada brazo tendría los accesorios necesarios para fijar y tensar el manto con sus cables de relinga, y en el otro extremo el manto estaría conectado a un anillo de acero, dejando previamente una serie de ojillos en el manto para anclarlo con grilletes. Se conectaron ocho cables de acero de $\varnothing \frac{1}{4}$ " con templadores desde el anillo inferior del manto, a la base de la columna, los que permitieron tensar en el sentido vertical al manto.

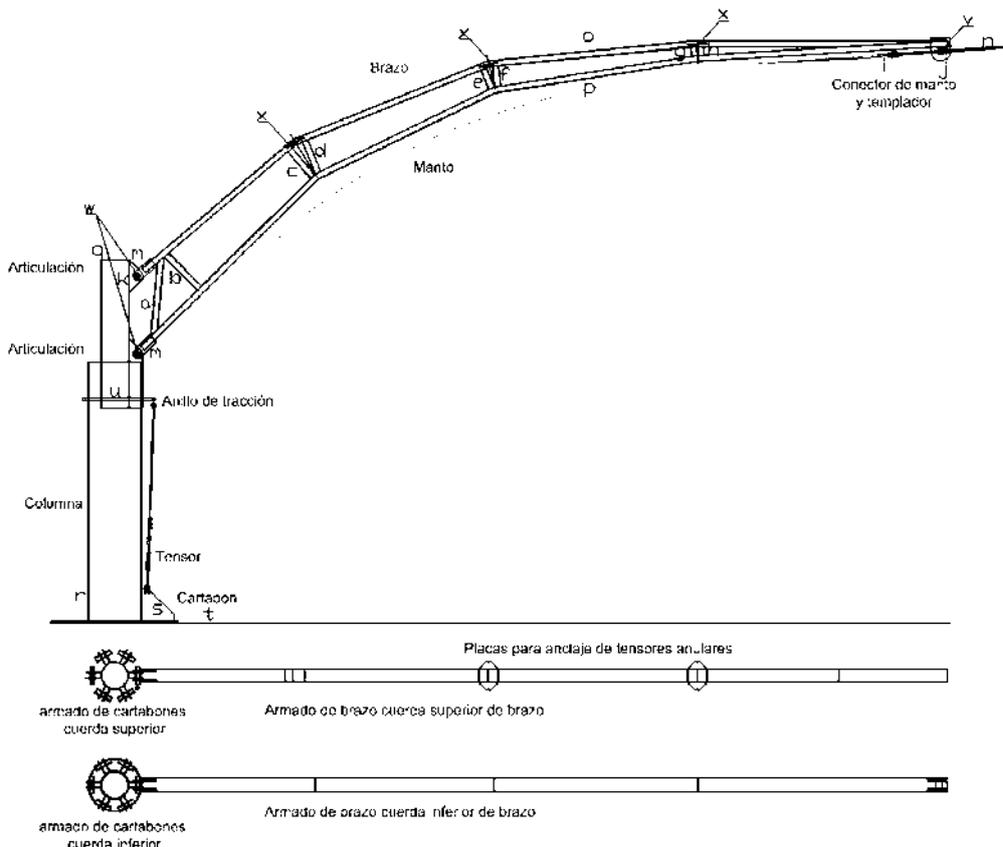


Fig. Nº 132 Despiece en planta y sección de la estructura.

Fabricación de la estructura:

El concepto de la fabricación de la estructura permitió una fabricación industrializada, el corte de todas las piezas se hizo con pantógrafo de control numérico, y para la fabricación de los brazos, se hicieron plantillas para hacer una producción en serie de los brazos. Los barrenos en las placas, fueron realizados con punzonadora, que es un procedimiento mucho más barato, y para el anclaje de las placas de conexión de la lona se usaron barras huecas.



Figs. Nº 133, 134, 135 y 136 Fabricación de estructura.

El armado y soldado fue realizado por paileros y soldadores calificados, que permitieron un trabajo rápido y de mucha calidad. Las soldaduras fueron inspeccionadas con el procedimiento de líquidos penetrantes, y una vez aprobadas las soldaduras, se procedió a una limpieza química y mecánica antes de aplicar una base anticorrosiva y el acabado de esmalte acrílico.

Montaje de la estructura:

La estrategia usada en este caso fue: Enviar primeramente un camión torton de 15 ton con las siete columnas, sus cartabones, capiteles ya armados, soldados y pintados. Estas columnas se subieron con una grúa pequeña al nivel de la losa de la terraza. Como el peso de cada columna andaba en 600Kgs., se manipularon con un dolly, que es una pequeña plataforma con ruedas que sirvió para ubicar cada columna a su posición final. Ya posicionadas y orientadas de manera correcta de acuerdo a proyecto, se procedió a soldar los cartabones y tubos de las columnas a las placas de anclaje previamente colocadas por la propietaria. Este trabajo de soldadura se realizó en tres días calendario. Mientras se hizo el segundo envío de estructura con los brazos y juegos de cables y tensores. Se coordinó la llegada del tráiler con la renta de la grúa de 90 ton, equipo que se eligió por el alcance que tenía desde el punto de acceso más cercano, hasta la sombrilla más alejada (43.00 m).



Figs. Nº 137 y 138 Elevación y estibado de brazos.

Una vez posicionada la grúa, se comenzó a estibar los brazos en paquetes, previamente etiquetados. Con la elección de estos recursos de montaje, las maniobras de colocación de brazos resultaron muy sencillas y rápidas. Con un montador, dos ayudantes y un jefe de señalización para dirigir la operación de la grúa pudo hacerse el trabajo de montaje, sin contratiempos.



Figs. Nº 139 y 140 Montaje de brazos y sus articulaciones.

El total de la estructura se montó en dos días, uno con la grúa de 90 ton, y otro con una grúa de 12 ton. Cabe aclarar que antes de montar los brazos de las sombrillas, se posicionaron cada uno de los mantos dentro de la columna, ya que de otra manera se tendría que haber planeado dejar una costura sin realizar y cerrarla con una junta mecánica (Ver Figs. N° 95, 96 y 97). Esto hubiera incrementado el tiempo de montaje y su costo.



Figs. N° 141 y 142 Posicionamiento de mantos de lona antes de montar brazos.

Montaje de manto.

El montaje y tensado del manto, resultó también ser una maniobra muy sencilla. Una vez montados los brazos con sus accesorios para anclar el manto a la estructuras, se protegió el piso con polietileno, para evitar ensuciar el manto, ya que éste llega limpio.



Figs. N° 143 a 148 Desdoblado y armado de accesorios de conexión al manto.

Nótese que el manto llega doblado de tal manera que su manejo se simplifica notablemente (Ver Figs. 141 y 142). Se procede a desdoblar el manto en el piso, y se conectan los cables de relinga y las placas de conexión al manto. Se colocan unos cables de nylon a las placas que quedan atornilladas a las puntas metálicas del manto para poder posicionar el manto en la punta de los brazos. Esta es la maniobra que resulta más peligrosa, debido a que algunos brazos salen de la losa de apoyo. Quedan por montar el anillo de tracción y los tensores que permitirán el tensado vertical de la superficie. Este anillo de tracción se conecta al manto con un juego de grilletes que se arman aprovechando los ojillos del manto. A este anillo se conectan los cables y tensores que se anclarán en los cartabones soldados entre la columna de la sombrilla y la placa previamente anclada a la losa reticular. Una vez concluida esta maniobra, se comienza el tensado fino de la superficie, que nos permitirá eliminar todas las arrugas del manto, siempre y cuando la geometría definida para la confección del manto haya sido correcta.



Figs. Nº 149, 150 y 151 Tensado final del manto.



Fig. Nº 152 Sombrillas terminadas

5.2 Geometría de translación

5.2.1 Anticlásticas

5.2.1.1 Paraboloide Hiperbólico

5.2.1.1.1 Velaria Patio en preparatoria ITESM

Esta cubierta nace de la necesidad de sombrear el patio de la preparatoria en el ITESM. Campus Querétaro. Se necesitaba cubrir un área de aproximadamente 700 m^2 a 850 m^2 , que equivale al 50 % del total del patio. En este lugar, por su posición y orientación, siempre se crean corrientes de aire muy fuertes, lo que dio muchos dolores de cabeza, ya que en ese momento no contábamos con mediciones certeras de las velocidades de viento que ahí se generaban. La cubierta quedaría entre dos edificios, uno de planta baja más dos niveles y el otro con un nivel más alto y unos puentes de comunicación en tres niveles, que terminan de conformar el patio.

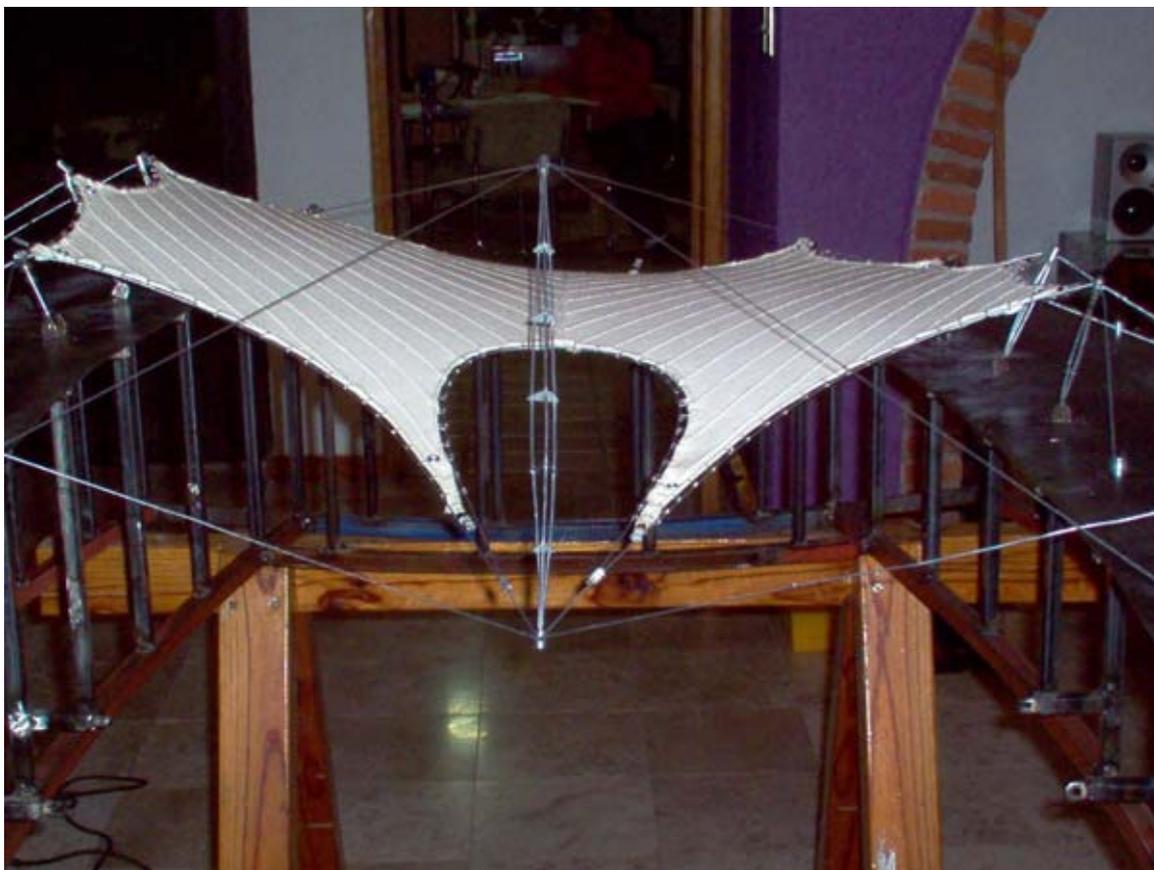


Fig. Nº 153 Modelo Velaria Patio prepa ITESM

La propuesta después de algunos ensayos llegó a una simplicidad notable: Un paraboloide hiperbólico, recortado creativamente por sus cables de relinga. La manera de anclarlo a los edificios, debía quedar lejos del alcance de los alumnos, por lo que se optó por apoyarlo a nivel de azoteas. Se eligieron los puntos donde, bajo la losa, se ubicaba la intersección de columnas y travesaños, colando una zapata a manera de capitel para garantizar un apoyo uniforme de los mástiles y cables de

contrarresto. Para tensar la superficie en el centro del patio, se propuso un mástil en forma de huso, volando en el espacio, quedando éste soportado por el manto y unos cables de contrarresto y posicionamiento. Este esquema creó una estructura tensegrity. La imagen final de esta cubierta semejaba un ave descendiendo al patio, y con esta idea se vendió el proyecto. La cubierta quedó soportada por diez mástiles pequeños apoyados en la azotea de los edificios y uno flotando en el centro del patio, coincidiendo uno de sus vértices con el centro de una fuente central existente.

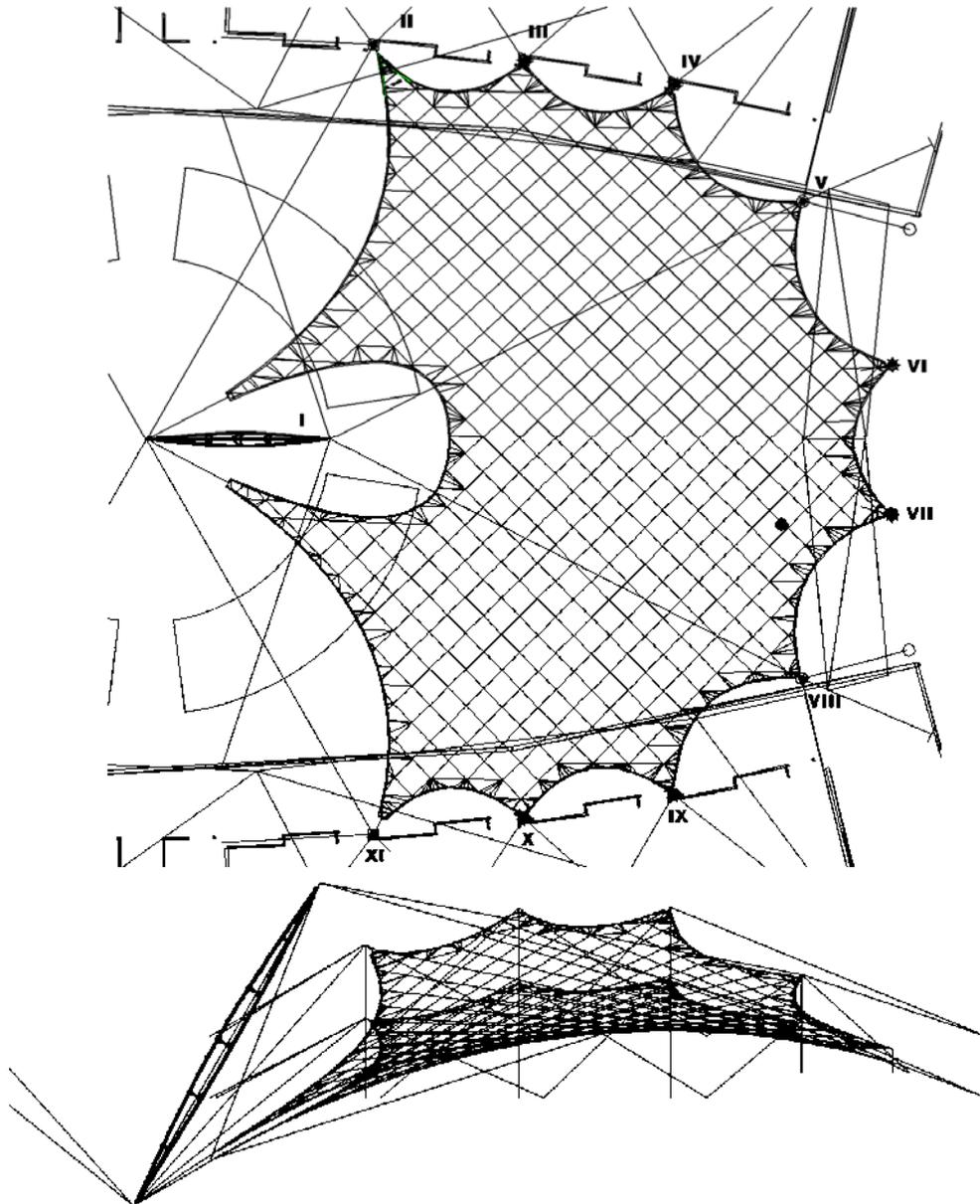


Fig. N° 154 Geometría Velaria Patio prepa ITESM

Para poder definir la geometría de la velaria, se mandó hacer un levantamiento topográfico de alta precisión, que nos diera la posición de las columnas y traveses de la estructura sobre la losa de azotea, para poder hacer los barrenos de anclaje entre losa y zapatas de los mástiles (ver Lam. N° 162), con la

mayor precisión posible. Esta información permitió definir la forma de la velaria con la posición de las parábolas de relinga y sus puntas. Se buscó que la curvatura del paraboloides fuera suficiente para no permitir el estancamiento del agua y que fuera similar en las dos direcciones. Para enmarcar la posición del mástil en el espacio, se trazó un óculo abierto en el extremo hacia el centro del patio. Este óculo, se trazó con la intersección de dos parábolas tangentes, de esta manera al tensar la lona no aparecieron arrugas en su perímetro.

Materiales:

La lona utilizada, fue una fortotflex de 650 grs x m2 con una garantía de tres años por el fabricante. Esa era la lona nacional de mejor calidad en ese momento. Actualmente, se pueden conseguir lonas de mejor calidad y mayor duración, nacionales e importadas. Los mástiles se construyeron con tubos de acero A-53 y placa de acero A-36. La tornillería, los accesorios de conexión y los cables de relinga y contrarresto se especificaron en acero galvanizado por inmersión.

Todos los cortes en placa se hicieron con plasma, y los ojillos de aluminio y rondanas galvanizadas. Terminado el corte, armado y soldado, se hizo una limpieza química y mecánica antes de aplicar un primer anticorrosivo y una pintura de esmalte acrílico de acabado. El mástil principal es de 18 mts de longitud, por lo que tuvo que construirse en tres partes para poder transportarlo. La conexión de los elementos se hizo con juntas a base de tres bridas en cada sección. Los capiteles se resolvieron con un anillo de 1" de diámetro conectados al mástil a través de cuatro placas.



Fig. N° 155, 156, 157, 158 y 159 Fabricación de estructura

Esta solución fue poco eficiente, ya que los cables de montaje provisionales y los cables definitivos se presionaban de tal forma que era difícil retirar los cables de montaje, retrasando las maniobras.

Los herrajes del perímetro del manto también tuvieron problemas de diseño. La primera solución se hizo con soleras de acero intermitentes que conectaban el manto a los cables de relinga a través de otras soleras más pequeñas en forma de "U" y que estaban unidas por medio de tornillos.



Fig. N° 160 y 161 Sistema de anclaje de Cable de relinga al manto. Inicial y final

Esta solución parecía muy eficiente, pero estando la velaria ya en operación, el movimiento provocado por las corrientes de viento, fue deteriorando la lona que tenía contacto con las soleras de anclaje, acabando por desgarrarla. Esto obligó a cambiar todo el perímetro de la lona y el sistema de anclaje de los cables de relinga por un sistema de ojillos y grilletes que permitió un buen funcionamiento.

Montaje de los mástiles y del manto:

Esta maniobra fue muy interesante, ya que los mismos mástiles se ocuparon como brazos de apoyo de un sistema de poleas que permitieron levantar el manto de una sola pieza. El manto ya armado con sus anclajes y cables de relinga, pesaba 1200 kgs. Para esto se diseñó un sistema de aparejos de dos poleas y tres pasos de cable, y así bajar la carga a 1/3 de su peso real, compensándolo con un mayor recorrido de cable.



Fig. N° 162, 163 y 164 Sistema Montaje de la estructura

El izaje del manto se realizó por etapas, subiendo punta por punta de manera coordinada para ir igualando de manera uniforme las tensiones en la lona.



Fig. N° 165, 166 y 167 Montaje y tensado del manto.

Conclusiones:

El proyecto y construcción de nuevas formas arquitectónicas resulta siempre extremadamente seductor. La pregunta que surge es:

¿Cómo acercarnos a este mundo de ideas e imágenes?

¿De dónde surge la capacidad creatividad para proponer estas formas?

En mi experiencia personal, tengo la suerte de ser amigo y trabajar con mi maestro el Dr. Fernando López Carmona, que ha tenido la paciencia de compartir sus conocimientos e inquietudes en este campo.

Podría afirmar que, para que la creatividad se manifieste, debe haber una posesión previa del conocimiento y un entrenamiento en el área que se pretende crear. Estar absolutamente convencido de la veracidad y viabilidad de los conocimientos adquiridos. Contar con una formación analítica y deductiva sólida, para identificar los problemas que se presentan en cada caso. Tener un amplio conocimiento en el campo de la Geometría, de los materiales de construcción y de los fenómenos naturales a los que van a estar sujetas las estructuras que proponamos. Es indispensable conocer los medios de producción de los que se puede disponer en el lugar de trabajo y contar con el grupo humano adecuado para hacer posible las diversas actividades del proceso de creación y su realización. Pero ¿es esto suficiente para que surja la capacidad creativa?

Esta pregunta puede tener muchas respuestas válidas o no, pero para terminar esta exposición, voy a compartir parte de una charla de café que tuve con mi maestro, siendo yo todavía estudiante, donde él comentaba:

-“La inteligencia, entendida como capacidad de clasificar, ordenar y valorar es lo que permite reconocer la creatividad, por lo tanto, es el instrumento que el creativo usa para seleccionar, así, la inteligencia es prerequisite a la creatividad.

La capacidad de creación, a la luz de este razonamiento, es algo que puede desarrollarse, sumando al adiestramiento de la composición y la teoría de la composición, el desarrollo de la sensibilidad, entendiendo esto último como el adiestramiento de los sentidos y la inteligencia en reconocer los valores culturales de los objetos artísticos.”-

Bibliografía:

- Conferencias, Notas y Apuntes del Dr. Fernando López Carmona.
- Bill Addis., *Building: 3000 years of design, engineering and construction*, Phaidon
- Roland Conrad., *Frei Otto: Estructuras* Editorial Gustavo Gili S.A.
- Holgate Alan., *The Art of Structural Engineering* Edition Alex Menges.
- Schleich Jörg, Bergman Rudolf., *Leicht Weit, Light Structures* Prestel.
- Rasch Bodo., *Finding Form*, Edition Alex Menges.
- Eekhout Mick., *Architecture in Space Structures*, Uitgeverij 010 Publishers.
- Margarit J, Buxade C., *Las Mallas Espaciales en Arquitectura*, Editorial Gustavo Gili S.A.
- Pottmann Helmut, Asperl Andreas, Hofer Michael, Kilian Axel, *Architectural Geometry*, Bentley Institute Press.
- De la Torre Carbó Miguel., *Geometría Descriptiva*, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Faber Colin., *Las Estructuras de Candela*, Compañía Editorial Continental, S.A., México
- Davies Colin., *The work of Michael Hopkins and Partners*, Phaidon Press Inc.
- Berger Horst., *Light Structures- Structures of Light*, AuthorHouse.
- Brookes Alan J, Grech Chris., *The Building Envelope+ Connections* Architectural Press
- Olivetti Catia., *La Forma E I Materiali della Trazionea*, Francoangeli.
- Vandenberg Maritz., *Soft Canopies, Detail in Building*, Academy Editions.
- Luigi Nervi Pier., *Costruire Correttamente*, Hoepli Editore Milano.