



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA Y URBANISMO

ESPECIALIZACIÓN EN CUBIERTAS LIGERAS

FACULTAD DE ARQUITECTURA

**CUBIERTA EN EL PARQUE
"AZCATL PAQUI"**

Valoración y reconsideración sobre una propuesta

José Luis Cabrera Lelo de Larrea

2010



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.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA Y URBANISMO

ESPECIALIZACIÓN EN CUBIERTAS LIGERAS

FACULTAD DE ARQUITECTURA

CUBIERTA EN EL PARQUE

"AZCATL PAQUI"

Valoración y reconsideración sobre una propuesta

Tesis que para obtener el grado de Especialista en Cubiertas Ligeras presenta:

José Luis Cabrera Lelo de Larrea

2010

Director de Tesina:

Dr. Agustín Hernández Hernández

Sinodales:

Dr. Juan Ignacio del Cueto Ruiz-Funes

Arq. Juan Antonio Tonda Magallón

Arq. ECL. Marcos Javier Ontiveros Hernández

Ing. Francisco Javier Rojas López

Con gran cariño y un enorme agradecimiento, primeramente, a Martha, mi amada compañera.

A Mariana y Sofía, mis hijas, que paciente o resignadamente me acompañaron y toleraron durante el proceso de realizar estos estudios de especialización.

A José Luis Y Maruca que me impulsaron y apoyaron para continuar adelante.

Para **AIEI Estructuras Ligeras, S.A. de C.V.** mi compromiso de ver reflejado en su crecimiento lo que hasta ahora he asimilado, junto con lo que espero poder seguir aprendiendo.

Por último, quisiera también agradecer a mis maestros por la dedicación, experiencia y generosidad con que impartieron sus clases, a las que he tenido la inmensa fortuna de haber asistido.

1 CONTENIDO

Índice

1 CONTENIDO

Índice	5
Cartografía general de la propuesta	8
Mapa de conjunto	8
Mapa sobre la propuesta realizada	8
Mapa sobre la propuesta alterna	9

2 PRESENTACIÓN

Objetivos	10
Fundamentación	11

3 PROPUESTA REALIZADA: **Biomorfismo**

Antecedentes	12
El enfoque naturalista de Gaudí	12
Breve alusión al zoomorfismo contemporáneo	15
El Biomorfismo como símbolo	23
Desarrollo de la propuesta	25
Descripción del proyecto	25
Ejecución de la obra	31
Crítica a la propuesta	35

4 PROPUESTA ALTERNA: Un nuevo inicio

De las estructuras 37

Estructuras de cascarón.....	37
"Form Finding" según Heinz Isler	39
Consideraciones prácticas en el diseño de cascarones.....	49
Estructuras de malla reticular	52
Antecedentes (historia y desarrollo)	52
Mallas reticulares Sinclásticas.....	55
Generación de la malla a partir de una superficie existente	63
Curvas geodésicas en las estructuras de malla reticular	64
Métodos de optimización estructural.....	67
Barras y nodos	70

De las particularidades de los materiales 72

Fundamentos	72
Materiales a utilizar	75
Acero	75
Membrana.....	77

Aplicaciones a un nuevo proyecto 79

Datos geométricos	80
Propuesta 1.....	80
Propuesta 2.....	86
Propuesta 3.....	94

Análisis estructural 102

Elementos considerados para el análisis estructural.....	102
Precisiones sobre los análisis realizados	105

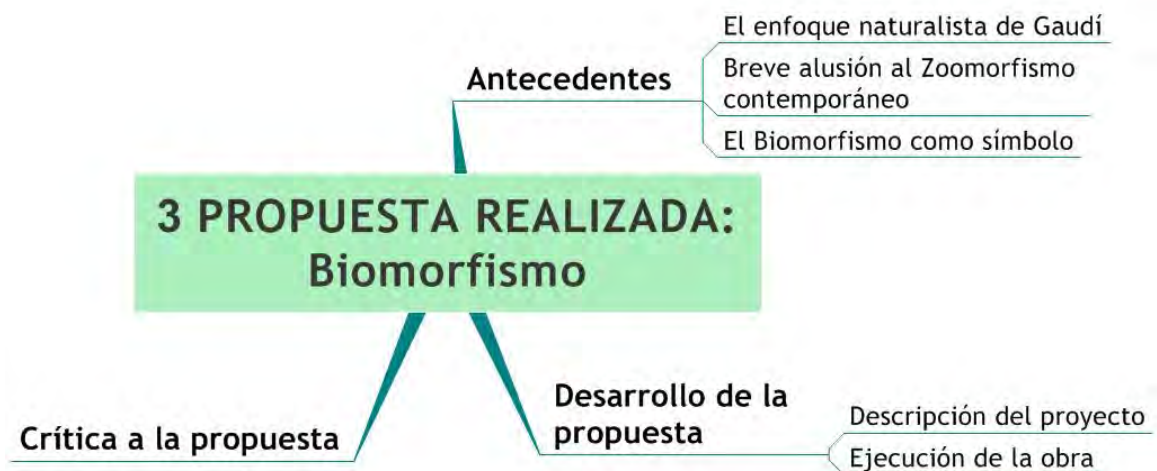
Determinación del peso propio de las propuestas	107
Propuesta 1.....	107
Propuesta 2.....	108
Propuesta 3.....	109
Resultados sobre los análisis de las propuestas.....	110
Propuesta 1.....	110
Propuesta 2.....	116
Propuesta 3.....	122
Comparativo resultante a partir de los análisis realizados	128
Diseño de los elementos de conexión	130
5 COMENTARIOS FINALES	
Una apreciación personal	137
6 FUENTES DE INFORMACIÓN	
Bibliografía	139
Ensayos	141
Recursos en internet	141

Cartografía general de la propuesta

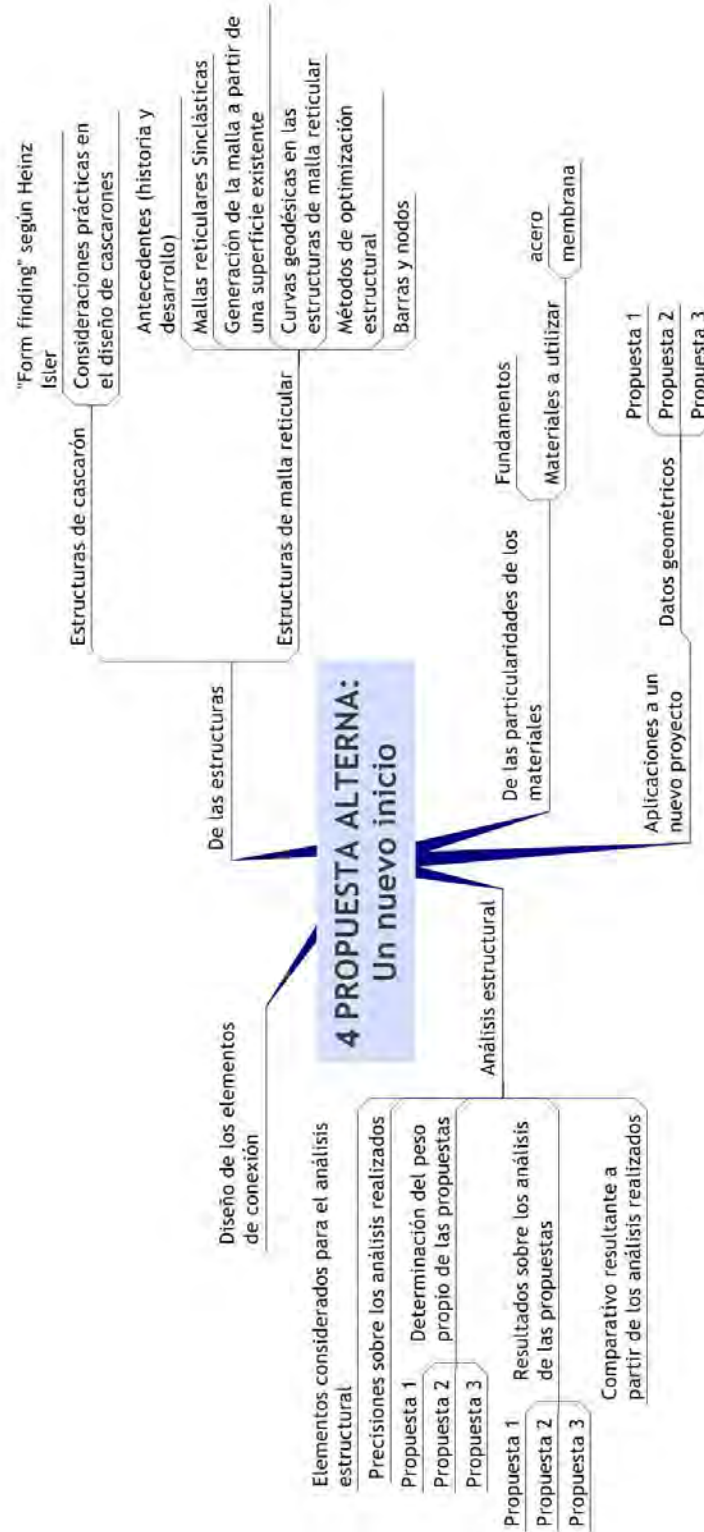
Mapa de conjunto



Mapa sobre la propuesta realizada



Mapa sobre la propuesta alterna



2 PRESENTACIÓN

Objetivos

El presente trabajo, realizado dentro del tema de las estructuras ligeras, se origina a partir de un proyecto ya realizado en su totalidad, caracterizado por una cierta complejidad y llevado a cabo antes de iniciar los estudios de especialización.

Para resguardar un teatro al aire libre, dentro de un parque en la delegación Azcapotzalco, D.F, se solicitó proyectar y construir algún tipo de cubierta que adicionalmente brindará un sello particular a la imagen del parque en cuestión.

Es decir, por medio de un creativo manejo de ciertas formas estructurales, se pretendía explorar la posibilidad de presentar la solución obtenida como un elemento determinante, con un proceder hasta cierto punto autónomo y responsable a su vez del carácter de la propuesta arquitectónica final dada.

En el desarrollo específico de este trabajo se plantea, como una primera etapa, la presentación de las consideraciones hechas que llevaron a la obtención de dicho resultado. Aunado a la presentación del mismo marco teórico que dio sostén a la solución estructural que se empleó.

Asimismo, sobre el plano de un análisis retroactivo, se pretende hacer una crítica que, más allá del aspecto conceptual y estético que fuera rector, se centre en las deficiencias estructurales existentes, que de alguna manera fueron responsables directos de algunos de los problemas generados (mismos que de cierta forma serán referenciados) en la ejecución de dicha obra.

A partir de la crítica elaborada, sería objetivo último el efectuar una o más bien unas nuevas propuestas, virtualmente alternas, de lo que pudo haber sido (enfocándose estrictamente en su eficiencia estructural). Esto con la deliberada intención de exponer el conocimiento que durante los estudios realizados en la especialización habrían de adquirirse.

Fundamentación

Sobre lo mencionado anteriormente, se deriva que la principal fundamentación de toda crítica que sea en realidad constructiva es la de exponer las deficiencias que, dentro de una propuesta determinada, por situaciones cualesquiera, se hayan generado. Esto con la finalidad de iniciar una retroalimentación que permita poner especial atención en dichos defectos para cuando vuelva a generarse un determinado problema, de condiciones más o menos similares, se cuente con recursos que permitan al final conseguir mejores resultados (es por lo tanto, la crítica razonada, una forma correcta y conveniente de poder aprender de nuestros propios errores).

De esto, en la última etapa del trabajo, surge la idea de generar y analizar 3 propuestas nuevas ligeramente diferentes que se centran, cada una de ellas, en alcanzar una determinada eficiencia estructural.

Asimismo, al tener 3 propuestas con determinados puntos en similitud y otros en diferencia, se permite a su vez comparar cuál de estas propuestas es más eficiente con respecto a las otras dos. De donde habría de surgir algunas observaciones que pudieran llegar a tomarse en cuenta para futuros diseños (es al menos la intención de este trabajo).

3 PROPUESTA REALIZADA: Biomorfismo

Antecedentes

"If there is a better answer to a problem, then nature has probably already found it."

Aristotle¹

El enfoque naturalista de Gaudí

*"Parafraseando a Letamendi -"El médico que sólo medicina sabe ni medicina sabe"- podría decirse que el racionalista que sólo es racionalista, no es ni siquiera racionalista."*²

Según Juan Antonio Ramírez, en la biografía elaborada sobre Antoni Gaudí³, Uno de los principales méritos consignados al gran arquitecto catalán fue la de saber separarse, tanto de la tendencia generalizada a la imitación de estilos antiguos y exóticos, como a la del tácito compromiso de establecer relaciones entre un cierto tipo de lenguaje y los aspectos funcionales que habrían de caracterizar a un edificio cualquiera. Conforme a esto, en aquella época, era relativamente frecuente ver la utilización de ojivas góticas en la proposición de iglesias y de ciertas formas árabes para lugares de esparcimiento.

¹ Aldersey – Williams, Hugh, Zoomorphic, Pág. 31, Laurence King Publishing, United Kingdom, 2003

² Rafael Llopis en el prólogo de: Lovecraft, H.P. Los mitos de Cthulhu, Traducción: Francisco Torres Oliver y Rafael Llopis, Pág. 28, Alianza editorial, España, 2002 (5ª reimpresión)

³ Para una breve reseña sobre Antoni Gaudí, puede consultarse la siguiente dirección electrónica: http://en.wikipedia.org/wiki/Antoni_Gaud%C3%AD

Gaudí se vio más bien influenciado por muchas de las ideas que en su momento profesaba Viollet Le Duc⁴ respecto a una cierta concepción o interpretación racionalista del estilo gótico enfocado principalmente en su lógica constructiva. Sin embargo, aunque la ascendencia de Le Duc fue importante, Gaudí supo separarse para buscar su propio camino.

Esto puede apreciarse en el deseo de mantenerse atenido a la utilización de ciertos materiales como la mampostería y el ladrillo. Además de acudir al estudio de la naturaleza en busca de material de inspiración. No únicamente para la elaboración de ciertos elementos ornamentales, como muchos arquitectos modernistas hicieron, sino que recurrió a buscar y tratar de comprender ciertos componentes de la lógica estructural que dentro de la naturaleza podrían encontrarse.

"...la arquitectura debía cimentarse en el estudio directo de la naturaleza, madre originaria de todas las cosas y, para él (Gaudí), testimonio incontaminado de la obra de Dios."⁵

Así, por ejemplo, sobre el arco catenario⁶, la utilización en la arquitectura por parte de Gaudí no se derivó del conocimiento matemático que de este se disponía sino de la observación natural, Según Ramírez, del modo como las abejas construyen sus panales.

⁴ Para mayor información sobre Eugène Emmanuel Viollet le Duc, consultar la siguiente dirección electrónica: http://en.wikipedia.org/wiki/Eug%C3%A8ne_Viollet-le-Duc

⁵ Ramírez, Juan Antonio, Gaudí, Pág. 10, Grupo Anaya, S.A. España, 1992 (1ª edición)

⁶ La palabra catenaria viene derivada del latín "catena" que literalmente significa cadena. dicha curva es también conocida como "Alysoide" o "funicular". En 1691, Leibniz, Christiaan Huygens y Johann Bernoulli presentaron la ecuación que le describía como respuesta a un reto ofrecido por Jakob Bernoulli. Huygens utilizó por primera vez el término catenaria en una carta dirigida a Leibniz en 1690 y David Gregory escribió un tratado sobre la catenaria titulado: "Propiedades de la catenaria" en 1690. Si bien la aplicación de este tipo de curva, en la construcción de arcos era ampliamente conocida, fue Robert Hooke quien hizo el contemporáneo redescubrimiento al "descubrirla" en la reconstrucción de la catedral de St. Paul. Asimismo, Euler probó, en 1744, que la rotación sobre el eje X de una curva catenaria genera una superficie de mínima área; "el catenaroide". Información obtenida de la siguiente dirección electrónica: <http://www.absoluteastronomy.com/topics/Catenary>.

"Un pequeño grupo de obreras, encadenadas por las patas, forman un arco en el aire que es rellenado luego con celdillas hexagonales."⁷



Tratado de apicultura



Palacio Güell⁸



La Sagrada familia

La hipótesis sobre inspiración natural en vez del simple conocimiento matemático de este tipo de curvas es reforzado por la mención hecha (según Ramírez, nuevamente) sobre el único artículo publicado por el hermano mayor de Gaudí (un médico que prematuramente murió en 1876) sobre el estudio de las abejas.

Asimismo, se acentúa el tiempo que el arquitecto catalán vivió en el campo durante su infancia y la relación que posteriormente pudo sostener con Don Enrique de Mercader- Belloch (el introductor en España de la colmena Layens y de los principios de la apicultura moderna).

Otro ejemplo interesante por mencionar es el de los pilares interiores de la iglesia de la sagrada familia, donde se imitó la concepción estructural del funcionamiento de un árbol. Cuyas ramas, de

⁷ Ramírez, Juan Antonio, Gaudí, Pág. 12, Grupo Anaya, S.A. España, 1992 (1ª edición)

⁸ Imágenes tomadas de Ramírez, Juan Antonio, Gaudí, Pág. 12 y 13, Grupo Anaya, S.A. España, 1992 (1ª edición)

menores dimensiones, se generan a partir de un robusto tronco que se encuentra fuertemente anclado al suelo.

Breve alusión al zoomorfismo contemporáneo

La llamada arquitectura zoomórfica ha dependiendo, en gran parte, de realizar comparaciones, principalmente, de orden visual, entre el aspecto de ciertos animales y el resultado obtenido en el contexto arquitectónico a través de la transferencia y abstracción de estos.

Uno de los caminos de las pretendidas imitaciones, sobre el estudio de las formas animales, es el que proporciona la precisa definición de un cierto entorno ideológico. Así por ejemplo, puede hablarse de las ideologías que manifiestan la preocupación existente sobre el deterioro y urgente necesidad de conservación del medio ambiente. Donde esta preocupación se expone al adoptarse un cierto lenguaje que pudiera ser apreciado por los devotos de la naturaleza.

Sin embargo, dentro de estos mismos entornos, pueden llegar a presentarse ciertas distorsiones o excesos que incluso consideren el aspecto de un edificio cualquiera, por el simple hecho de asemejar a un organismo natural o incluso de contar con un aspecto de suave apariencia general, como una propuesta ambientalmente responsable. Posición que se mantenga sobre otros edificios de aspecto más convencional (lo cual sin duda habla de una conciencia o deseo de conciencia sobre la afectación presente a nuestro entorno natural).

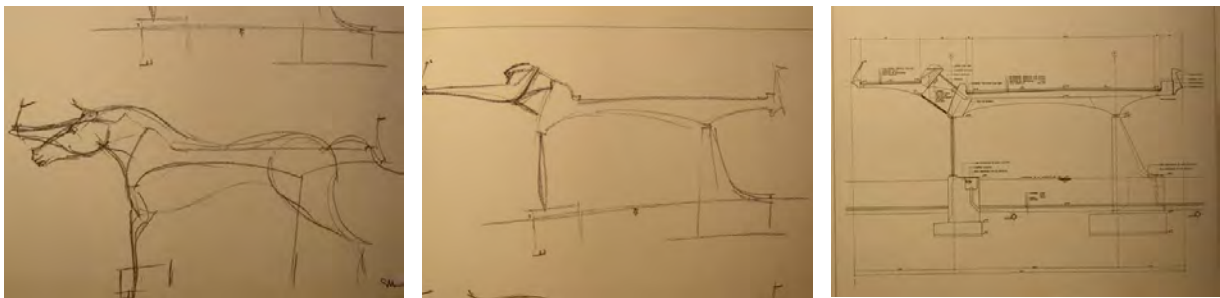
Una segunda condición a tomarse en cuenta es el de los avances técnicos (la disposición de ordenadores) que han permitido al diseñador la posibilidad de explorar determinadas formas que anteriormente no hubiera siquiera considerado.⁹ Esto, desde luego, favorece a su vez al

⁹ Un ejemplo interesante por considerar es el que puede encontrarse en el trabajo del Arq. Greg Lynn. Consultar la siguiente dirección: <http://www.glform.com/> Asimismo, consultar lo correspondiente el término "Blob architecture", sugerido por el Arq. Lynn, en la siguiente dirección electrónica: <http://en.wikipedia.org/wiki/Blobitecture>

desarrollo de la llamada arquitectura "orgánica" con sus típicas formas sinuosas -ameboideas.¹⁰

Respecto al posible re-acercamiento a las formas naturales, es también importante mencionar la implementación de materiales nuevos con características diferentes que ofrecen nuevas posibilidades tanto de expresión como de construcción. Todas estas nuevas circunstancias han detonado una cierta profusión en la generación de audaces formas que suelen ir incluso más allá de la conocida arquitectura orgánica para caer en una especie de barroquismo.

Específicamente, sobre las formas animales, suelen ser éstas consideradas como recursos en la sugerencia de cuestiones simbólicas, hablando desde el punto de vista formal. De igual manera, como fuente de inspiración para el estudio propio de la manera como en sí trabajan. Es decir, cuando se trata de analizar la efectividad de sus funciones, como puede ser el caso de las estructuras, según se ve sugerido en la obra de Gaudí.



Bosquejos de Santiago Calatrava para el diseño de un puente 1986 - 1988

Si bien existe una larga tradición en cuanto a la representación de formas naturales dentro de las diversas manifestaciones de la cultura humana; Es básicamente desde los finales del siglo XX cuando el

¹⁰ Para ser precisos, actualmente la denominación "orgánica" ha perdido su original sentido para ser utilizada, como una etiqueta a todo aquel proyecto que parezca caracterizarse por el pronunciado empleo de curvas. Para mayor información sobre arquitectura orgánica, consultar: http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_architecture

desarrollo tecnológico alcanzado ha permitido una emulación más completa o precisa de determinadas formas biológicas. De igual manera, a partir del conocimiento generado por las diversas ciencias biológicas, se ha vislumbrado y en algunos casos comenzado a trabajar o realizar aplicaciones directas que van más allá de la simple expresión de un estilo¹¹.

Así por ejemplo tenemos la propuesta realizada por Viollet Le Duc y Gottfried Semper sobre el trabajo del naturalista francés Georges Cuvier para intentar adaptar, de éste último, sus tipologías sobre estudios anatómicos de distintas especies animales a tipologías para la clasificación de edificios. Posteriormente, Louis Sullivan y la escuela de Chicago planteaban la analogía existente entre la estructura interna del edificio como esqueleto y el recubrimiento posterior como un tipo de piel.

En varios casos, dentro del movimiento High Tech puede verse el manejo independiente e indistinto en el orden que se da a la estructura y al revestimiento. Exponiendo en **muchos casos el “esqueleto” por afuera** y el revestimiento o piel por dentro.



Renzo Piano. Pompidou Center, 1971



Foster Associates. Renault Center, 1982



Richard Rogers, Lloyd's, 1979

¹¹ Para una obtener idea sobre el estudio comparativo entre elementos de la naturaleza y la propuesta de nuevas tecnologías con implementaciones en áreas adicionales a la arquitectura, consultar el sitio web del *Centro Biomimético de la Universidad de Reading*, en el Reino Unido: <http://www.rdg.ac.uk/biomim/home.htm>.

La arquitectura biomórfica ha tenido también su lado gracioso al presentar obras cuya representación de formas animales ha sido completamente literal. Una forma demasiado obvia por llamar la atención sobre el propósito de la construcción. Tal es el caso de la tienda **para venta de patos y huevos de pato "The big duck"** o el restaurante en forma de pescado de Frank Gehry en Japón.



" The big duck" Flanders, New York, 1931



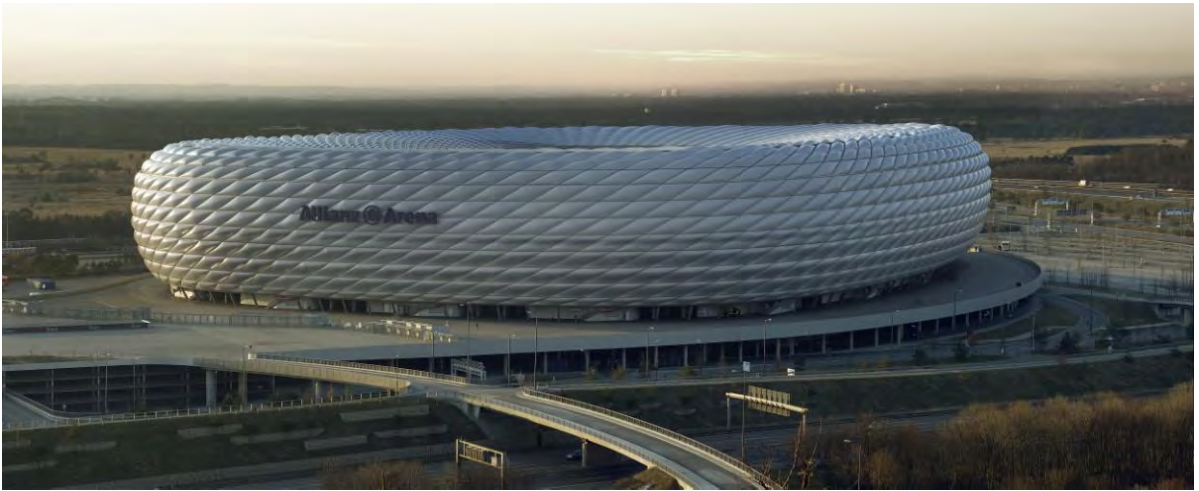
Frank Gehry, Fish dance restaurant,
1986

El movimiento modernista, por su parte, se declaró alterando la conexión, en ese momento presente, entre lo que sería la cultura y la natura. Marcando una separación que se vería expresada en dos polos opuestos. Por un lado se tendría lo referente al organismo vivo y por otro a la máquina.

Asimismo, la arquitectura se habría manifestado igualmente dividida con directrices marcadas como la obra arquitectónica-máquina y la obra arquitectónica de analogías orgánicas. Divisiones que estarían buscando planos distintos de renegociación.



Nicholas Grimshaw, Proyecto Edén, 1996 – 2001



Herzog & de Meuron, Allianz Arena, 2005



PTW Architects, Centro Acuático de Beijing, 2007



Herzog & de Meuron, Beijing National Stadium, 2008

Sobre el mismo tenor, gracias al conocimiento adquirido sobre formas y funciones biológicas, podría considerarse que, hoy en día, se permitiría una aplicación más precisa, como incorporación, a lo que constituiría la metáfora arquitectónica. Una especie de forma **“maquínica” de entender y dar respuesta a los procesos requeridos del mismo edificio que ha de proyectarse.** Con lo cual, según opinión de Hugh Aldersey en su libro **“Zoomorphic”** el resurgimiento de una arquitectura biomórfica, más que algún tipo de reacción sobre la ideología modernista, fungiría como una natural y lógica continuación-evolución de ésta.

Es decir, según esto, los significados biomórficos ahora considerados en la arquitectura no tendrían el carácter de ser simples inspiradores de metáforas formales sino más bien como alusivos a procesos biológicos que pueden ser reinterpretados y reconsiderados por la arquitectura misma.

La metáfora podría en este caso ser entendida como la consecuencia de la búsqueda y planteamientos de posibles parecidos **entre “cosas” que resultan ser distintas.**

Cualquier ciencia, no solamente las biológicas, proporcionan una fuente de inspiración a la arquitectura. De la misma manera que, por **ejemplo, el Deconstructivismo se alimenta de la filosofía lingüística, “Las Vegas-ismo” de Venturi de la cultura popular o el propio pasado de la arquitectura en el Post-Modernismo clásico.**

Adrian Forty¹², por su parte, comenta que si bien es frecuente ver que muchas de las metáforas existentes en el léxico arquitectónico provienen de la ciencia, no es razón suficiente para considerar que han de tener éstas, por principio, una completa validez.

Asimismo, debería considerarse que si la arquitectura va a trabajar para la construcción de metáforas de inspiración científica; específicamente de orden biológico, ha de ser natural contemplar un acercamiento a este tipo de ciencias. De tal manera que el objetivo biomórfico pueda en realidad ser alcanzado.

¹² Para una breve reseña de la trayectoria del profesor Adrian Forty, consultar la siguiente dirección electrónica: http://www.bartlett.ucl.ac.uk/people/A_forty_adrian.htm

Por otro lado, la finalidad en la adaptación de metáforas de origen o inspiración biológica, bien podrían ser contempladas desde diferentes enfoques. Aquí, particularmente se consideró desde el punto de vista formal por la adopción de criterios o propósitos simbólicos. Pero de igual manera se piensa la necesidad de observar la implementación de posibles cualidades biológicas para que el biomorfismo logrado sea más completo.

Sobre la alusión de cualidades biológicas, puede entenderse que, en todo ser vivo, las características propias de sus componentes han evolucionado para servir a una determinada función. Como metáfora, se habla de una especie de funcionalismo ideal que es producido por la misma naturaleza.

Una participación importante a su vez por mencionar es la del biólogo escocés D'Arcy Thompson¹³. Quien a través de su obra: "*On Growth and Form*" (1917) expuso por primera vez la relación existente entre la forma de los seres vivos y las bases biológicas y matemáticas que aparentemente habrían de sustentarlos.

Thompson argumenta que toda forma constituye en realidad un diagrama de fuerzas. Sobrevalora los procesos evolutivos como determinantes fundamentales de las formas y estructuras de todo organismo vivo, subestimando en parte el papel desempeñado, de manera aislada, de las leyes físicas y mecánicas.

Thompson explora también el grado de similitud o diferencia presente entre el aspecto formal, dentro de un mismo género, de determinados animales a través de ciertas pero sencillas alteraciones matemáticas (conocido como análisis morfométrico).

¹³ Para una breve reseña del trabajo de D'Arcy Thompson, consultar la siguiente dirección electrónica: http://en.wikipedia.org/wiki/D'Arcy_Wentworth_Thompson

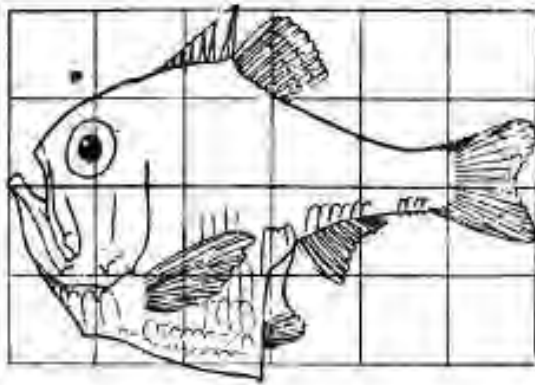


Fig. 517. *Argyropelecus Olfersi.*

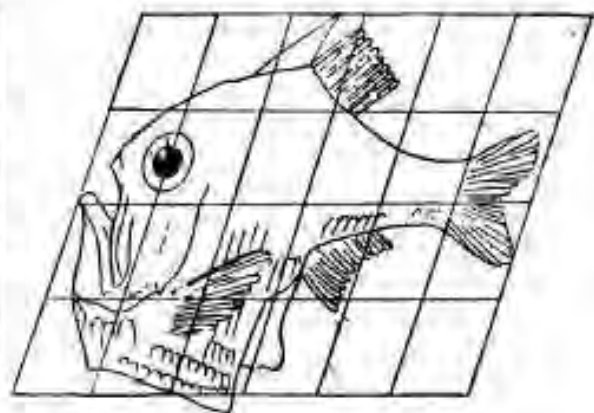


Fig. 518. *Sternoptyx diaphana.*

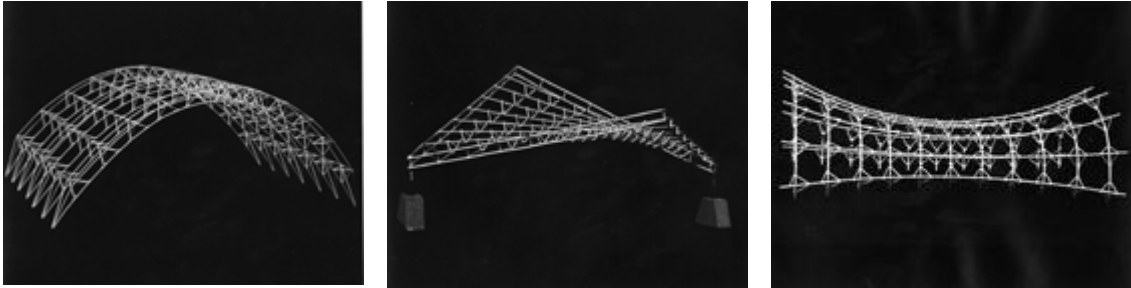
Análisis morfométrico sobre dos especies distintas de un pez

Dentro de la arquitectura biomórfica, podría considerarse como de una mayor calidad a aquella que se muestre como una especie de equivalente, dentro de una totalidad, de un modelo orgánico. Es relativamente frecuente el ver que en muchas obras se presentan tan solo detalles, a veces aislados, que muestran parecidos con ciertos elementos orgánicos. Por otro lado, tampoco sería lo ideal el mostrarse completamente idénticos, sea también en una parte o en su totalidad, a **un modelo vivo (como puede apreciarse en "The big duck" o en el mismo restaurante de mariscos obra de Gehry).**

Lo demasiado obvio suele carecer de interés. En todo caso, lo preferible sería siempre la búsqueda de equivalencias. Lo cual puede traducirse como alusiones y no simples copias. Las alusiones ofrecen adicionalmente la posibilidad de realizar distintas lecturas

Como pequeño paréntesis, sobre el planteamiento de equivalencias, puede tomarse como un particular ejemplo el trabajo desarrollado por Robert le Ricolais (1894 - 1977), también conocido como **"El padre de las estructuras espaciales"**, quien principalmente promovía la exploración y utilización de estructuras de inspiración zoológica dentro de la arquitectura.

*"Si en lugar de trabajar con elementos sólidos pensamos en los huecos llegaremos a la verdad.... El arte de la estructura es cómo y dónde colocar los huecos."*¹⁴



Imágenes diversas sobre el trabajo de Robert le Ricolais¹⁵

El Biomorfismo como símbolo

Los simbolismos atribuidos a las distintas manifestaciones de la naturaleza, en diversas épocas y por diferentes culturas, han permitido la transmisión directa de ideas y valores colectivos. La arquitectura ha sabido aprovechar esto y emplearlo frecuentemente como recurso en el proceso de diseño. De hecho, en un sentido estricto, toda obra arquitectónica es un símbolo. Un símbolo de poder, de status, de bienestar y de progreso cultural entre otras cosas. De los valores dominantes de la sociedad que le produce.

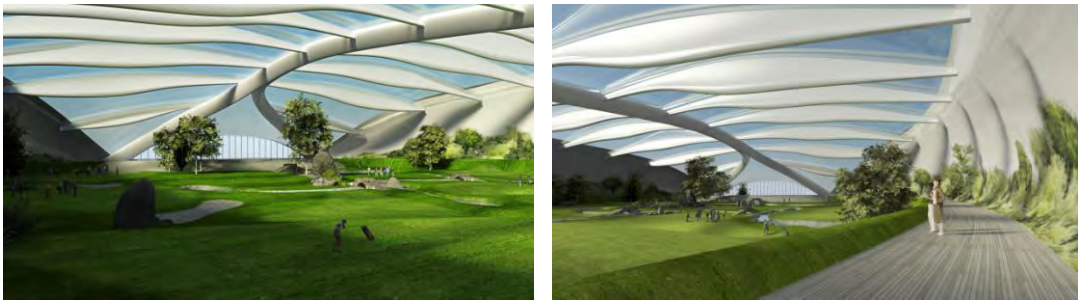
Retomando la idea de los simbolismos basados en formas naturales, desde pasadas culturas primitivas (sobre todo en sus aspectos religiosos) hasta sociedades actuales, han seguido siendo estos vigentes como significantes. Sea a partir de un nivel personal como expresión de un solo arquitecto o como una simple representación cívica.

¹⁴ Frase pronunciada por Robert Le Ricolais según Miguel Seguí, Candela -Pérez Piñero, un diálogo imaginal, Pág. 146, Editorial Rueda S L España, 1972

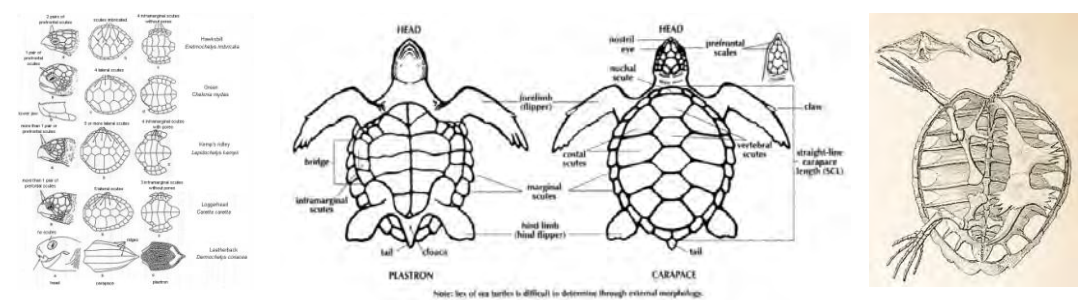
¹⁵ imágenes tomadas de: <http://www.upenn.edu/almanac/v42/n19/ricolais.html>



Florence and William Tsui House, California, USA, 1993 - 1995¹⁶



Imágenes diversas del proyecto de Indoor Golf Arena de Zwarts & Jansma architects¹⁷



Varietades de especies

Vista anterior y posterior

Estructura ósea

¹⁶ imagen tomada de la siguiente dirección electrónica: <http://www.tdrinc.com/home.html>

¹⁷Ejemplo de un diseño arquitectónico que pareciera ser tomado, hipotéticamente, a partir de la estructura ósea, de la columna vertebral, de algún animal como pudiera ser el caso, tan solo por mencionar, de una tortuga o una ballena. Para mayor información sobre este proyecto, así como sobre la firma de estos arquitectos holandeses, consultar la siguiente dirección: <http://www.zwarts.jansma.nl/>



Imágenes diversas de la estructura ósea de una tortuga

Desarrollo de la propuesta

Descripción del proyecto

Los conceptos expresados en el marco teórico pretendían verse reflejados sobre la concepción de una propuesta para una estructura que cubriera un área destinada a un teatro al aire libre dentro de la rehabilitación del parque de San Miguel Amantla, de nombre: **"Azcatl Paqui"** (*hormigas felices*) en la delegación de Azcapotzalco, D.F. Cuyo acceso se da en el cruce entre la Av. Santa Lucía y Calzada de la Naranja, enfrente de la refinería.



Imágenes aéreas donde se aprecia el predio que habría de rehabilitarse como parque.



Trabajos de rehabilitación

Para la realización de la propuesta, primeramente, se exploró la implementación de una estructura de tipo biomórfica sobre los valores simbólicos que con su aspecto formal pudiera lograrse. Esto partiendo del hecho de que la palabra “*Azcapotzalco*” proviene del Náhuatl **Azcalli**= hormiga; **Potzulli**= hormiguero y **co**= lugar. Donde literalmente se entendería como el lugar de las hormigas.



Así, como puede apreciarse, el logotipo de la delegación hace referencia más o menos explícita a este hecho.¹⁸

Un hormiguero, como tal, constituye un tipo de estructura que se da sobre nivel de terreno firme. Generalmente se ve como un montículo cuya geometría puede ser reducida a un tipo de cono truncado, cuyo punto máximo puede ser o no concéntrico a su base. La variedad existente, en cuanto a morfologías de hormigueros se refiere, resulta ser en verdad vasta.

¹⁸ Para mayor información sobre la delegación, consultar la siguiente dirección electrónica: <http://www.azcapotzalco.gob.mx/>



Imágenes de hormigueros diversos

Para la elaboración formal de la propuesta, se tomó como un inicio la idea del cono truncado con su eje inclinado. En primer lugar se tiene un talud de pasto de planta circular que se ha de levantar sobre terreno firme a una altura aproximada de 3.50 m. En su interior se alojarían las gradas y el escenario del teatro. A partir de esta altura, se desplantaría la estructura propuesta, la cual cuenta con un diámetro de 41.50 m y una altura máxima de 18.50 m sobre nivel de terreno firme. El acceso al foro se da sobre aberturas hechas al área de gradas. Existe una franja de separación entre el talud de pasto y la cubierta de la estructura misma. Esta separación se da en todo el perímetro del nuevo "hormiguero".



Imágenes diversas presentadas de la propuesta conceptual para la cubierta del teatro al aire libre

La propuesta conceptual fue de inicio aceptada, por lo que la siguiente etapa se centró en desarrollar una solución estructural que diera soporte al símbolo de la forma.

Recurriendo nuevamente a un planteamiento de tipo biomórfico, se estudiaron algunas estructuras naturales adicionales que pudieran tomarse como punto de referencia. De hecho se estudiaron en un inicio dos posibles opciones:

- El entramado ofrecido en la configuración de una tela de araña.
- La figura de una concha marina.



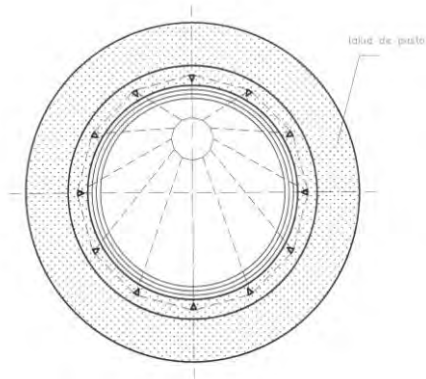
Conchas marinas



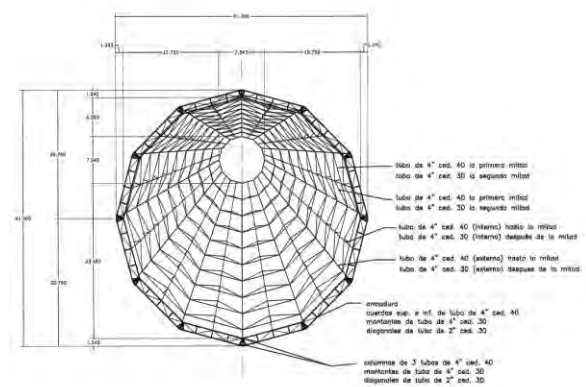
Imagen de una tela de araña

En esta primera propuesta, como a continuación puede apreciarse, la conformación de la cubierta asemeja, en planta, el entramado correspondiente a la estructura de una tela de araña. Sin embargo, los elemento principales que convergen al centro, no se encuentran todos, como en la misma tela de araña, sobre un mismo plano. De hecho, algunos de estos elementos van sobre un plano superior y otros, en forma alternada, van sobre un plano inferior, por lo que los elementos que les unen se ven obligados a subir y a bajar en un constante zigzag. Una especie de semejanza con los dientes de sierra de las conchas marinas. La intención de esto, fue principalmente dada para proporcionarle a la estructura un cierto peralte que le ayudara a tomar las flexiones originadas por la longitud de los claros a superar (el claro

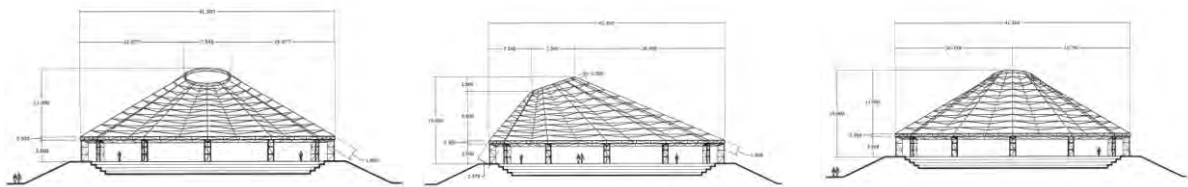
máximo es de 28.60 m y el mínimo de 11.36 m). Así como favorecer la relación que podría establecerse con las secciones y cédulas del material a emplear, consiguiendo así, una supuesta reducción en tales componentes, que en este caso se habla de tubo mecánico con costura en acero A-36.



Planta del teatro al aire libre con ubicación de columnas y proyección de la estructura



Planta de la estructura

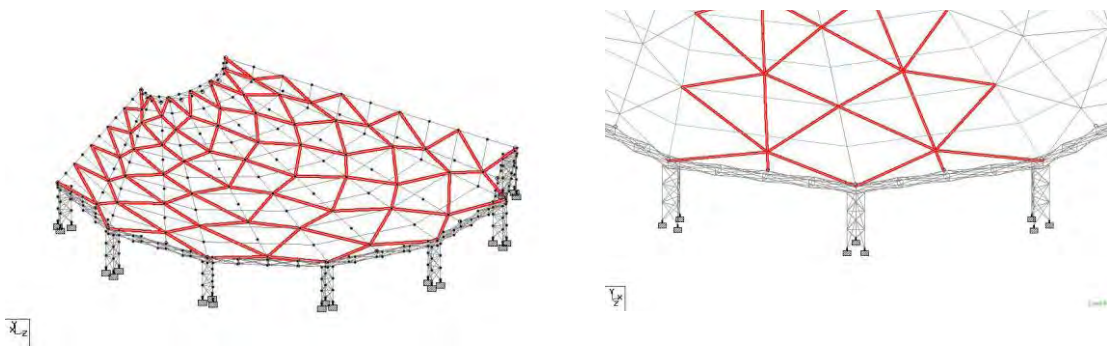


Alzado frontal

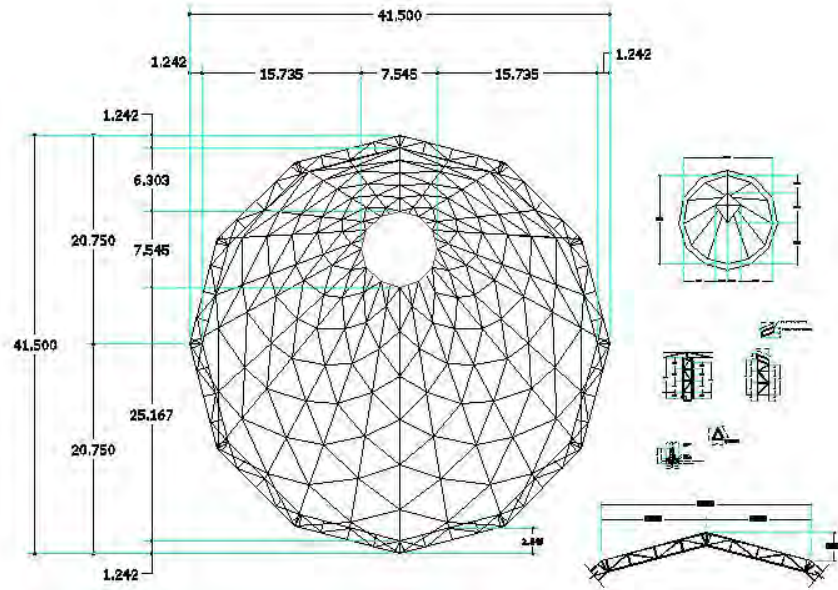
Alzado lateral

Alzado posterior

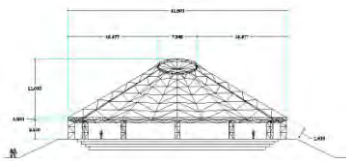
Al mandarse la propuesta presentada para su revisión estructural; el calculista sugirió la posibilidad de cambiar la posición y trabajo de los elementos que se muestran como montantes y que son paralelos entre sí por elementos que funcionaran en forma diagonal. De ahí surgió la nueva configuración, quedando como a continuación se muestra.



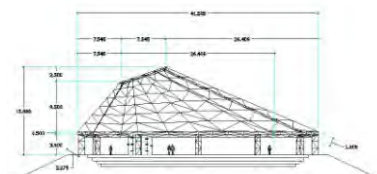
Modelo analizado en STAAD



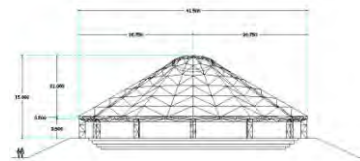
Planta de la estructura



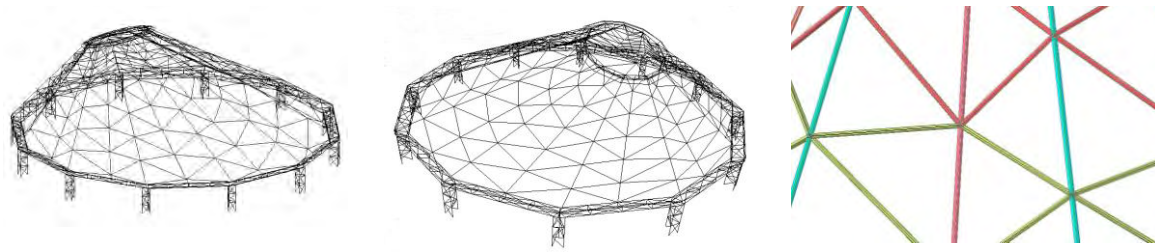
Alzado frontal



Alzado lateral



Alzado posterior



Vistas diversas del tridimensional

conexiones directas entre barras

Ejecución de la obra

A continuación se muestran algunas imágenes que reflejan el proceso de construcción de la cubierta hasta la conclusión de la obra misma con un aspecto final similar al ofrecido en la primera propuesta conceptual presentada.



Imágenes del proceso de excavación y configuración del área para el teatro al aire libre



Inicio de los trabajos para cimentación

Especialización en Cubiertas Ligeras



Colocación de las columnas sobre los armados de los dados



Nivelación y plomeo de las columnas antes del colado



Cimentación terminada



Inicio de montaje de la trabe perimetral



Terminación de montaje de la trabe perimetral



Colocación del anillo de compresión (corona)



Colocación de los largueros principales



Colocación de las diagonales



Retiro de los puntales y pintura de la estructura



Construcción de las gradas y taludes



Transportación de la membrana a la obra



Colocación de la membrana sobre la estructura



Ajustes sobre la colocación de la membrana



Terminación de la cubierta

Crítica a la misma

La crítica a realizarse habría de ser breve y contundente; la estructura terminada cumple con las funciones para las que fue diseñada. Asimismo, cubre con las expectativas formales y por tanto simbólicas que en un principio se plantearon. Como consecuencia, el cliente quedó satisfecho.

Sin embargo, el costo real alcanzado superó lo originalmente pensado ya que las secciones del material inicialmente propuesto aumentaron considerablemente. De igual manera sucedió con la cantidad de piezas a emplear, por lo que se incrementó la complejidad de la obra. Hecho que repercutió también en los tiempos que se habían fijado para su construcción.

La cubierta para el teatro al aire libre que en un principio se había sugerido como una estructura ligera, terminó por no serlo. Por consiguiente, no resultó ser tan buen negocio para el contratista.

Consideramos que si desde un principio hubiéramos tenido conocimiento de lo sucedido y hubiéramos tomado las precauciones necesarias, el presupuesto presentado se hubiera incrementado en al menos un 30%. Sobre esta base, especulamos que difícilmente habría sido aceptado y lo más probable es que no hubiéramos hecho la obra en cuestión.

De esto se deriva el hecho de plantearse la posibilidad de buscar alguna otra manera de proponer o diseñar cubiertas que tengan un trabajo estructural más eficiente y puedan en realidad ser consideradas como ligeras.

Asimismo, es necesario enfatizar la sencillez que debe mostrar para su realización. El sistema puede mostrar toda la complejidad que se desee. Pero limitado tan solo en la etapa de diseño. Para su ejecución debería ser fácilmente entendida y de igual manera construida. Mientras más compleja se muestre, será más costosa, tomará más tiempo su elaboración y habrá mayores posibilidades de mostrar errores en su fabricación.

En ningún momento deberíamos olvidar las condiciones de la realidad de nuestra cultura y nuestro país. El cliente, quienquiera que sea, jamás ha de desear pagar demasiado por una obra. La mano de obra con la que contamos estará plagada de buenas intenciones pero no es del todo especializada. Los materiales y herramientas empleadas deberían de ser sencillas de adquirir y manejar. Todo esto en beneficio de las obras a generar, del cliente que nos ha de contratar y de nosotros mismos que como contratistas en eso pretendemos trabajar.

Tratando de parafrasear R. Buckminster Fuller; solamente la eficiencia alcanzada tanto en la utilización de la energía como de los recursos disponibles durante la ejecución de nuestros diseños y la concretización de nuestros proyectos, nos permitirá lograr un mundo que en verdad trabaje para todos.

4 PROPUESTA ALTERNA: Un nuevo inicio De las estructuras

"La profesión de la ingeniería estructural se ha caracterizado por una cierta pericia en el modelado de materiales que no entiende, para generar formas que en realidad no puede analizar. Formas que han de soportar esfuerzos que no puede calcular. Todo esto hecho de tal manera que el resto de la sociedad no ha llegado a sospechar"¹⁹

Afortunadamente, lo anteriormente referido, ha cambiado un poco desde que se cuentan con nuevas tecnologías que ofrecen la posibilidad de simular y analizar los posibles comportamientos sufridos por estructuras de las más diversas naturalezas y de las más serias complejidades.

Sin embargo, cabe mencionar que si bien ahora es posible experimentar con ciertas ideas que antes eran inimaginables, de las cuales surgen proyectos que también ahora pueden ser viables llega el momento de decidir; no la factibilidad de su realización sino la conveniencia de la misma.

Estructuras de Cascarón

Sobre el apartado de conclusiones generadas en el análisis de la obra de Félix Candela realizado por María Garlock y David P. Billington en el libro: *Félix Candela: Engineer, Builder, Structural artist.*" Es por

¹⁹ Frase referida por Horst Berger en el ensayo: "From prehistoric stickdomes to state of the art gridshells", Structure magazine, noviembre 2007 Para mayor información, consultar la siguiente dirección: <http://www.structuremag.org/> Asimismo, consultar el sitio web de Horst Berger en: http://www.horstberger.com/web.me.com_horstberger2/Welcome.html

demás interesante resaltar la idea de que las estructuras de cascarón en concreto armado (y en términos generales para cualquier otro tipo de cascarones), que en determinado momento se pensaba debería ser su diseño un producto directo de determinados acercamientos matemáticos, parecía ser al final contradictorio con el trabajo desarrollado por Candela y otros personajes igualmente ilustres como Heinz Isler, Pier Luigi Nervi y Anton Tedesko.

El comité del instituto americano del concreto sugería que el diseño de cascarones de concreto debería ser posible solo después de largos años de estudios matemáticos y detalladas investigaciones científicas sobre muchos otros cascarones ya construidos. En retrospectiva, el libro sugiere que las condiciones establecidas como prerequisites para el diseño de los cascarones de concreto, fue en gran medida la razón por la que los ingenieros americanos no se sintieran del todo interesados en el diseño de tales estructuras. Esto por la complejidad y supuesta necesidad de vastos conocimientos matemáticos.²⁰

Aparentemente, el mismo medio (académico) americano que en un principio pudiera fomentar la realización de investigaciones sobre este sistema estructural fue al final el responsable de su limitación y consecuentemente extinción.

Una aseveración que personalmente me parece demasiado superficial y un tanto presuntuosa. Ya que si bien, el instituto americano del concreto es una institución reguladora (que por lo mismo influye), no es la única ni la más importante. Yo atribuiría más dicha extinción a una

²⁰ **"The idea that thin shell concrete structures "stem directly from a mathematical approach" is contradicted by Candela's career and, indeed, by the careers of Isler, Nervi, and even Tedesko himself. The direct order from the committee is that one can design shells only "after long years of mathematical study and detailed scientific investigation of many, many shells." It's clear in retrospect that this strong statement of the prerequisite for designing thin shells was in large measure the reason why America structural engineers gave up designing such structures. They become discouraged by the complexity and apparent necessity for so much mathematics in the design."**

Garlock and Billington, Félix Candela, Engineer, Builder, Structural artist, Pág. 173, Princeton University Art Museum, Yale University Press, Singapore, 2008

cuestión socio-económica pues aunque en Estado Unidos el material a emplear no resulta ser de un precio tan alto; la mano de obra, que sí es especializada, implica un costo por demás considerable. Aunado a los procesos constructivos requeridos (cimbras) que también eran costosos

Así por ejemplo, en el caso de México, la desaparición en la utilización de las estructuras de cascarón, según Fernando López Carmona entre otros, se dio en parte por el incremento de la mano de obra que durante el gobierno de Díaz Ordaz se dio. Esto junto a la cantidad de madera que para la realización de la cimbra se empleaba y que a partir de cierto momento no pudo ser ya ignorada.²¹

“Form Finding” según Heinz Isler

En 1960, ante el primer congreso de: *“International Association for Shell Structures”* Heinz Isler presentó un ensayo de 25 hojas intitulado *“New Shapes for Shells”* donde cabe destacar la descripción hecha de 3 posibles procedimientos empleados para la obtención de formas nuevas de estructuras de cascarón.

El primero de estos procedimientos se basa sobre el moldeado libre, a partir del conocimiento del ángulo de reposo de ciertos materiales sueltos, como es el caso de la tierra misma, para generar formas base en la producción de cascarones. Un buen ejemplo de este procedimiento parece ser el encontrado en la obra de Félix Candela para sus paraguas invertidos utilizados como elementos de cimentación.

²¹ *“Evolución de los cascarones de concreto armado en México, Fernando López Carmona/ Xavier Guzmán Urbiola”* Del Cueto, Juan Ignacio (editor y compilador), *Aquella primavera creadora...* Cascarones de concreto armado en México, Pág. 33, México, 2008 (1ª edición)



Paraguas invertidos en cimentación

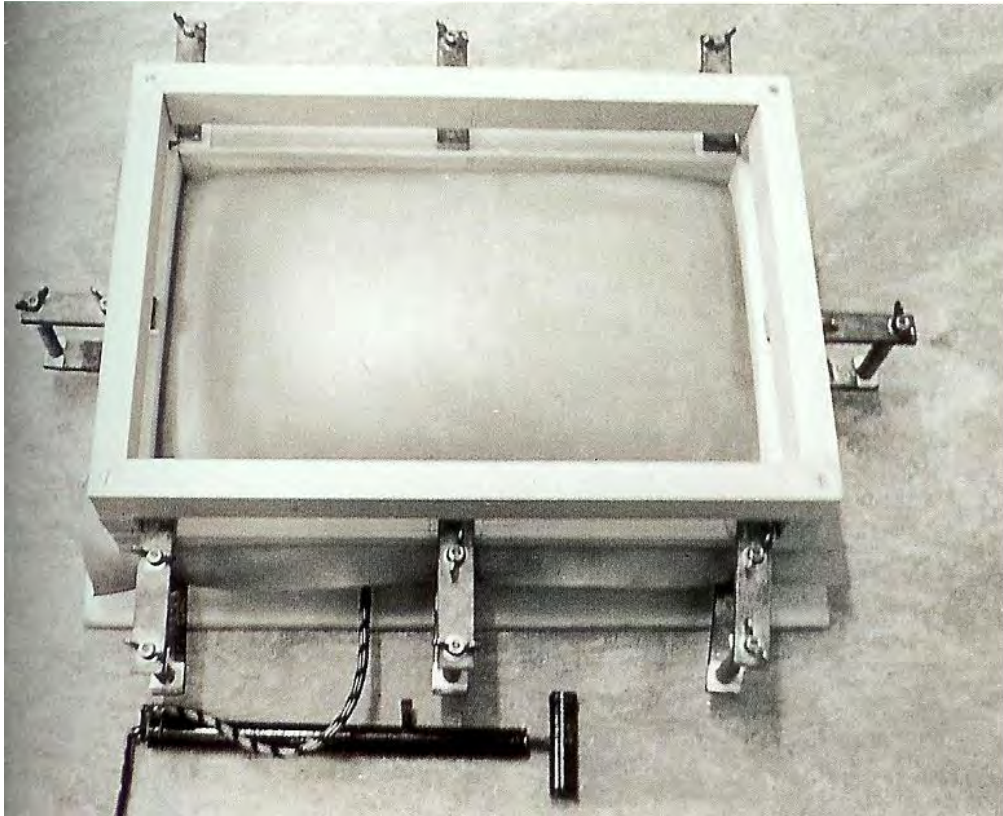


Procedimiento para la construcción del paraguas invertido



El segundo procedimiento sugería el estudio de la forma de una membrana inflada (como elemento neumático) ya que al encontrarse bajo los efectos de presión, esta estaría trabajando en total tracción. Al

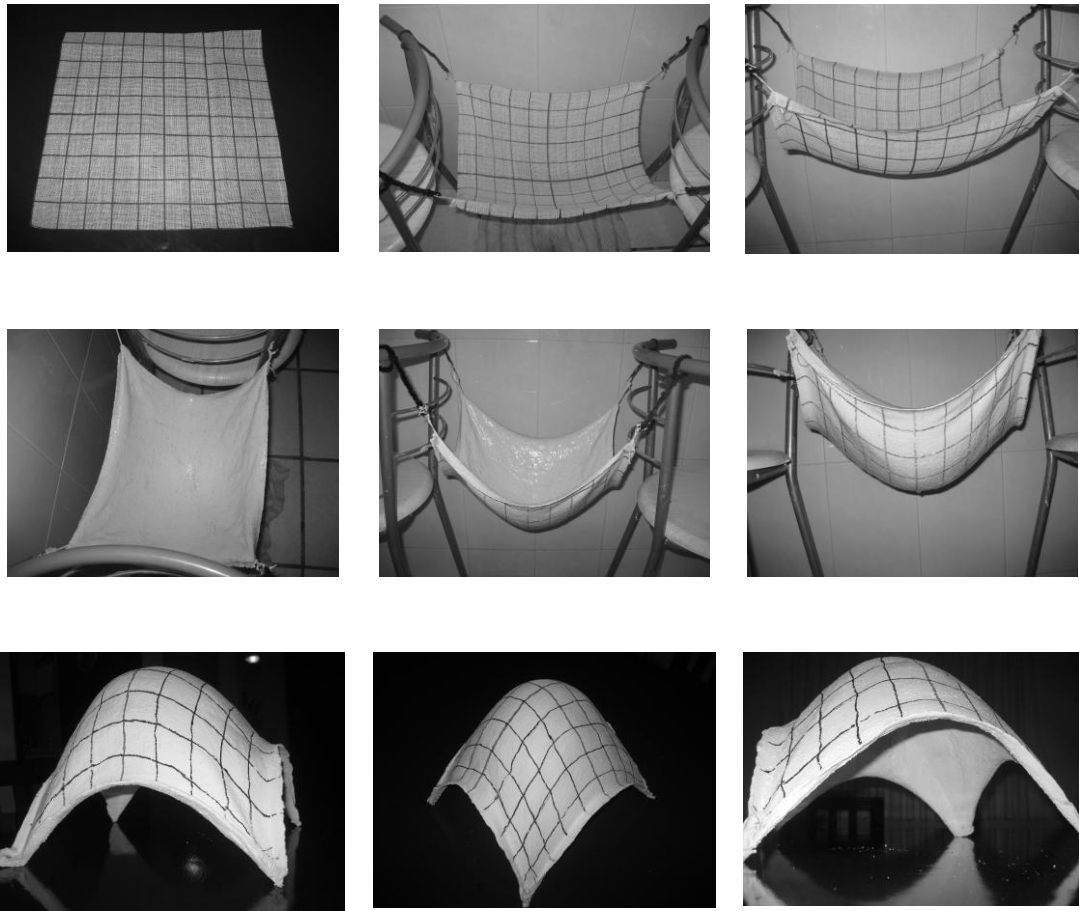
mantenerse dicha forma y retirar la presión, automáticamente empezaría a trabajar a compresión.



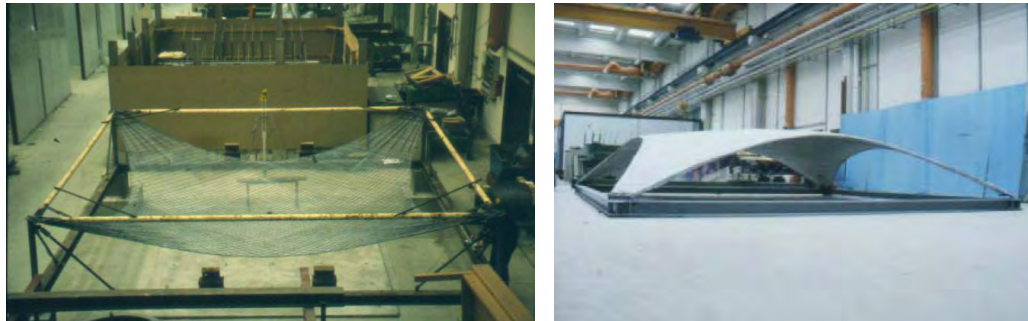
Sobre un bastidor, donde la membrana estaría fija, se ha de inyectar el aire requerido que generaría la presión necesaria para dar forma al "casarón"

El tercer procedimiento consiste en suspender algún tipo de tela y analizar la forma que se origina por la acción de su propio peso; una carga uniformemente repartida. De la misma manera que se presentaría el arco funicular sobre una cadena colgada.²²

²² David P. Billington, en su libro: "The art of structural design, A swiss legacy" compara la percepción y utilización de este procedimiento, en la concepción de estructuras de casarón, con la originalidad y eficiencia que en su momento manifestó Robert Maillart para la creación de sus puentes en la década de 1930 (Salginatobel, Schwandbach y Vessy).



Imágenes diversas de un experimento hecho en casa²³



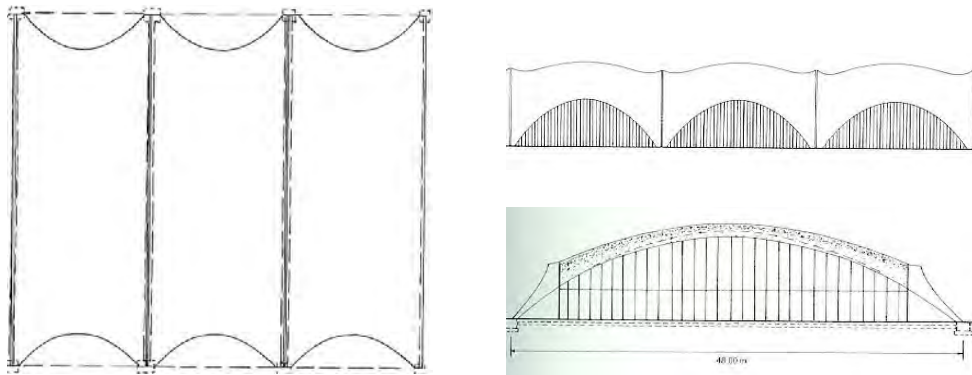
Imágenes de experimentos hechos en laboratorio²⁴

²³Sobre estas circunstancias, en realidad no se está creando la forma del cascarón de una manera matemáticamente preestablecida. Simplemente se está dejando que pueda emerger bajo las condiciones naturales de su propio peso. El estudio de estos modelos ayuda considerablemente, por tanto, al entendimiento de formas naturalmente "estructurales".



Imágenes de dos cascarones realizados por Isler sobre el concepto de la tela colgada²⁵

El conjunto de cascarones realizados por Isler para las canchas de tenis de Heimberg están igualmente basados sobre este tercer procedimiento en la generación de su forma. Sobre dicho proyecto puede notarse que las curvaturas de los extremos son más pronunciadas que las del centro. De igual manera, se aprecian los cambios de curvatura en los extremos. Lo que constituye una manera plástica de brindar refuerzos adicionales a los bordes.



Planta y alzados de los cascarones para cubrir unas canchas de tenis en Heimberg, 1979

²⁴ **Imágenes tomadas del breve ensayo: "Form Finding of Shells with Numerical Hanging Models" realizado por el Prof. Dr.-Ing. habil. M. Bischoff del Institut für Baustatik und Baudynamik de la Universidad de Stuttgart.**

²⁵ La imagen de la izquierda corresponde al teatro al aire libre Grötzingen cerca de Stuttgart, mientras que la imagen de la derecha es de Wyss garden center, Solothurn, Suiza.

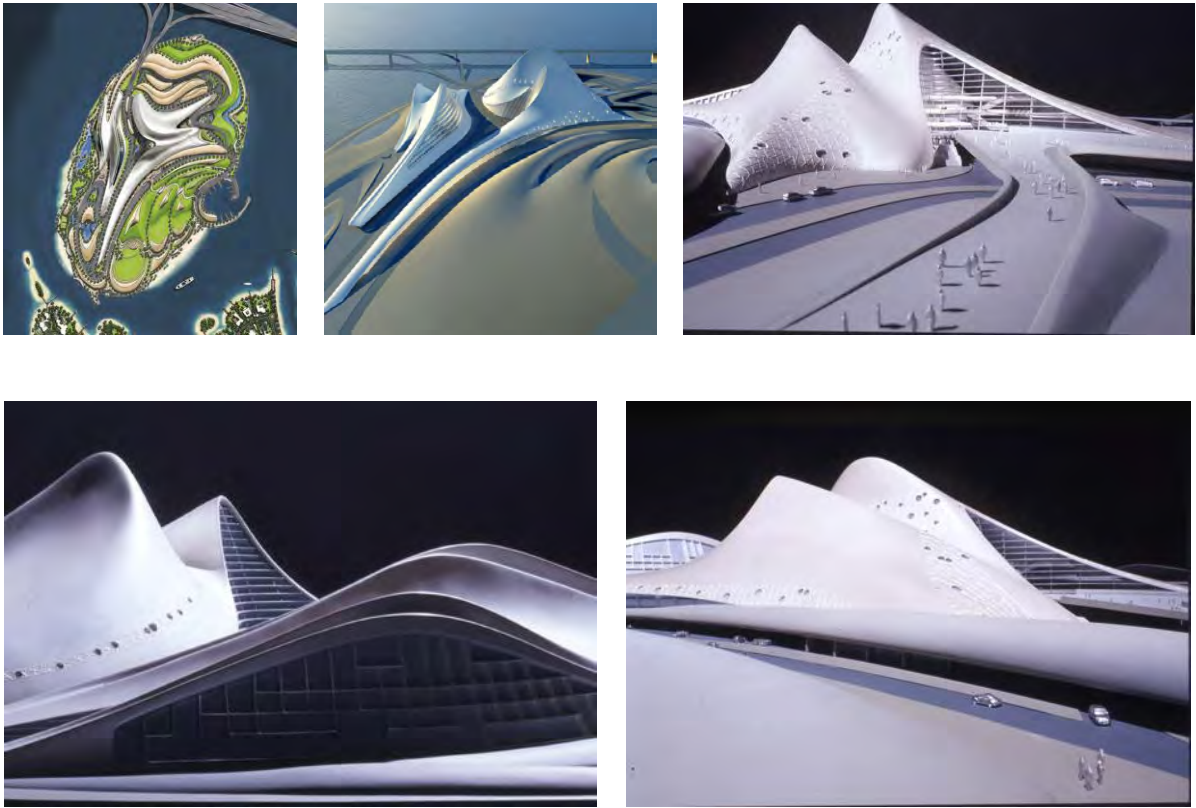
Estas nuevas formas provienen de modelos simples que son el resultado a su vez de condiciones de un desarrollo no geométrico, pero que sin embargo podrían ser de económica construcción.

Asimismo, durante dicho congreso, Eduardo Torroja manifestó su inquietud por el uso de este tipo de superficies por gente carente de experiencia como diseñadores estructurales que se vieran tan solo impulsados por el estímulo visual que estos medios pudieran sugerir y que hasta ese momento no habían sido aún probadas en modelos a una escala real, bajo circunstancias reales.

Isler, por su parte, hizo notar que una educación técnica formal en matemáticas y geometría no era del todo indispensable para el estudio de estas nuevas formas. Lo que sería en verdad requerido, serían los instrumentos y procedimientos adecuados para medir las condiciones de la superficie y después poder dibujarla.

Cabe mencionar que la preocupación manifestada por Torroja, en aquel entonces, resulta ser absolutamente válida pues es cierto que muchos arquitectos e ingenieros, bajo la sombra de la audacia que representa o supone cierto tipo de formas, aparentemente libres, aunado a las posibilidades actuales que las ya mencionadas nuevas tecnologías informáticas ofrecen, elaboran proyectos que por un desconocimiento o indisciplina estructural caen en enormes complicaciones tanto para su análisis como para su construcción (de ahí el cuestionamiento sobre la verdadera conveniencia de su realización).

Es decir, exploraciones formales que podrían ubicarse dentro de una **hipotética clasificación de "superficies No-estructurales, o mejor dicho, Anti-estructurales"**. Pues sus concepciones no obedecen a mayores criterios que los de un simple deseo de innovación u originalidad plástica. Consecuentemente, al pasarse por alto los desempeños reales que como estructuras deberán afrontar, se tienen proyectos que resultan ser poco económicos, como el que a continuación se muestra.



Imágenes diversas del proyecto de la ópera de Dubái²⁶

Otro caso interesante por mencionar, dentro del específico entorno de los cascarones en concreto armado es el de los proyectados por el arquitecto Roger Taillibert para el complejo de Chamonix entre 1970 y 1975. Si bien la forma parece ser bastante simple, su concepción, como estructura, fue deficiente requiriendo al final la implementación de masivos elementos de borde que tomaran las

²⁶ Proyecto realizado por Zaha Hadid para albergar la ópera y centro cultural de Dubái. Este complejo de edificios, de forma similar a la de una duna, se encuentra ubicado en una isla perteneciente al distrito de siete perlas. El aspecto resulta ser, sin duda, innovador y dinámico. Sin embargo, existe la cuestión sobre la eficiencia de su comportamiento estructural pues hasta donde tengo entendido no fue este uno de los temas iniciales que se contemplaron durante la etapa de proyecto. Más bien me inclinaría, considerando la trayectoria profesional de Zaha Hadid, a otro tipo de detonantes conceptuales que después requieren ser materializados al costo que sea.

distintas fuerzas que por consecuencia del diseño de la mencionada forma se presentaron.²⁷



Richard Bozon Sports Center



Biblioteca Chamonix-Mont-Blanc²⁸

²⁷ Si bien el proyecto original fue de Roger Taillibert, Heinz Isler trabajó en la revisión y modificación estructural requerida.

²⁸ Imágenes tomadas de: <http://fr.structurae.de/persons/data/index.cfm?id=d000295>

Por otro lado, está el ejemplo del proyecto del edificio de oficinas de la compañía Sicli en Génova; el cual consiste en un cascarón de concreto armado pre-esforzado que cubre un área aproximada de 1,100 m², con un espesor promedio de 9 cm y bordes libres (sin considerar las variaciones de las curvaturas que se presentan en los extremos). Es este, un cascarón producto de los experimentos realizados con plexiglás en el mismo laboratorio de Isler.



Edificio de oficinas de la compañía Sicli en Génova, Suiza 1969- 1970²⁹

Concentrándose más en los esfuerzos de flexión que en los de tensión, Isler evaluó algunos de los diferentes cascarones que ha construido. Esto es debido a la convicción de que la magnitud de la presencia de dichos esfuerzos son indicadores directos de la rigidez obtenida, donde la rigidez, a su vez, es sinónimo de seguridad.

²⁹ Como puede apreciarse, el cascarón no presenta elementos perimetrales de refuerzo; en su lugar cuenta con una contra-curvatura o curvatura inversa en los extremos que, sin incrementar el espesor del cascarón, le brinda la rigidez necesaria.

Sobre el siguiente esquema presentado, fue este dividido en cuatro cuadrantes, donde cada de estos cuadrantes está dedicado a un procedimiento específico sobre el que se conceptualizó un cascarón que cumple con esas características (ejemplos que de hecho son mencionados).

Así pues, tenemos el cuadrante dedicado a las formas derivadas de geometrías regulares, formas derivadas del método de flujo³⁰, formas obtenidas por el recurso de la tela colgada, que se ha ya comentado, y otros procedimientos como el de las estructuras neumáticas con ciertos elementos que rigidicen los bordes.

La reglamentación Suiza determina una relación mínima de 1/300 como flecha máxima para flexión permitida respecto al claro que se está cubriendo. En este caso, todos los cascarones estudiados se encuentran dentro de dicho mínimo requerido. Sin embargo, hay algunos que manifiestan una mayor rigidez sobre otros.

La situación de la tela colgada presentó los mejores resultados, mientras que el método de flujo ofreció los resultados más desfavorables.

Asimismo, las flexiones consideradas son desde luego aquellas determinadas a temprana edad del cascarón. Las cuales se verían, sin ser objeto de mucha atención, posiblemente incrementadas al paso del tiempo (circunstancia que no queda del todo precisada) por la fatiga natural del material.

³⁰ Este procedimiento, sugerido posteriormente por Isler, se basa más en la apreciación de cuestiones formales que de verdaderos desempeños estructurales. Y se llama así por la observación hecha sobre el comportamiento de un líquido cualquiera (preferentemente de cierta viscosidad) que fluye dentro de un contenedor, como es el caso, a manera de representación, de los termómetros de Mercurio (en los extremos del contenedor, por efectos de fricción, el líquido fluye de manera más lenta mientras que en el centro lo hará de una manera más rápida). El edificio del Jardín botánico Bürgi en Camorino es un buen ejemplo del resultado obtenido sobre este procedimiento. Para ver algunas imágenes de este edificio, así como obtener información adicional, consultar la siguiente dirección electrónica: <http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0000298>

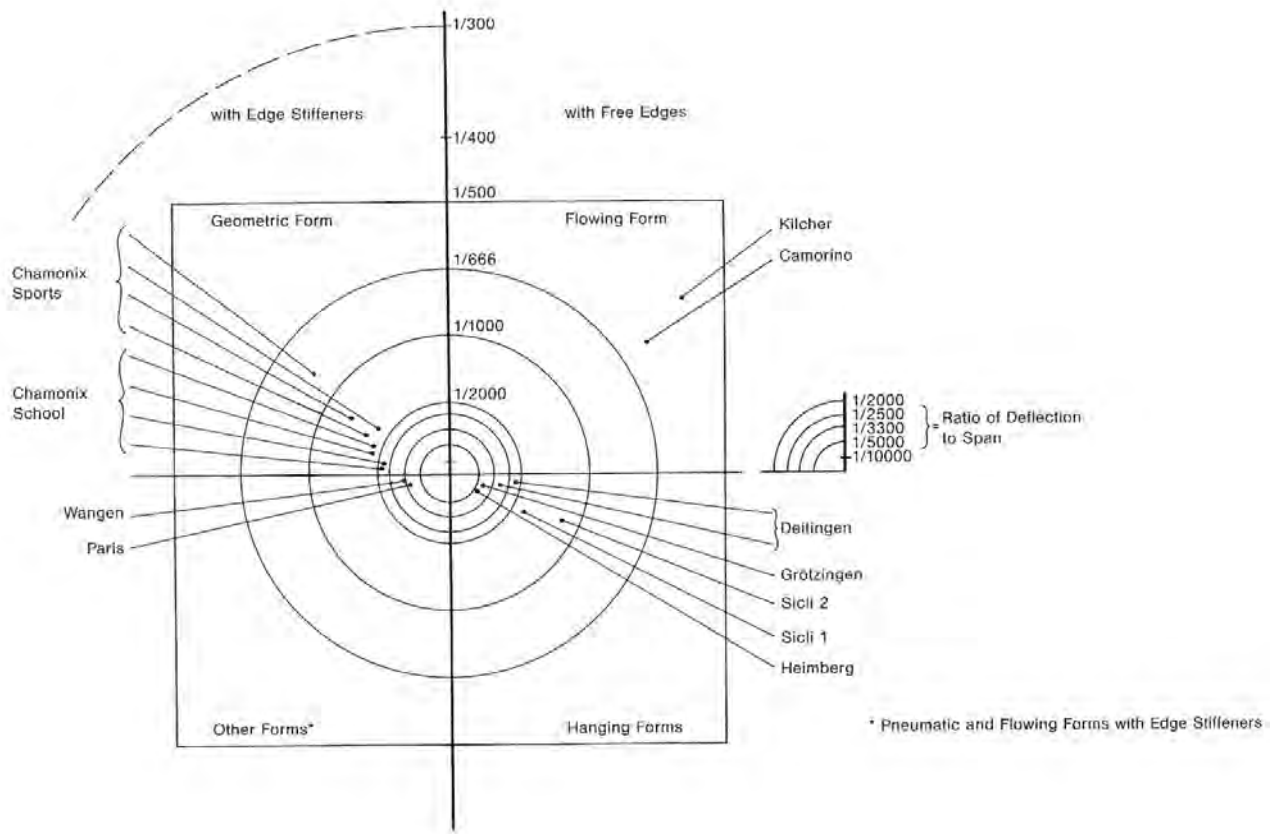


Diagrama donde se presentan los desempeños estructurales de ciertas obras realizadas por Isler³¹

Consideraciones prácticas en el diseño de cascarones

Investigando en lo referente al desarrollo de las estructuras de cascarón en concreto armado, encontré algunos conceptos de diseño, por parte de Milo S. Ketchum (Editor de *"Structural Engineering Practice - Analysis, Design, Management"*) que me parecieron interesantes de presentar, debido al pragmático enfoque que les caracteriza, mismos que a continuación se ofrecen.

³¹ Imagen tomada de David P. Billington, en su libro: "The art of structural design, A swiss legacy" Pág. 152

“Conceptos (y *consejos*) básicos sobre las estructuras de cascarón”

Por Milo S. Ketchum³²

- Si una imagen dice más que mil palabras, entonces un modelo ya construido valdría más que mil cálculos.
- Resultan ser unos pocos los sistemas estructurales básicos para vigas y losas, pero para estructuras de cascarón, existen cientos, y cada uno requiere un enfoque de diseño único.
- Si el diseño de un cascarón requiere atención, los elementos de soporte requerirán todavía más atención.

³² “Some basic concepts for shell structures” By Milo S. Ketchum; según la siguiente dirección electrónica. <http://www.ketchum.org/-milo/index.html>

- If a picture is worth a 1000 words, then a simple model is worth 1000 calculations.
- There are only a few basic structural systems for post and beam structures, but for shell structures, there are thousands, each requiring a unique approach to design.
- The supports for a shell are more important than the shell.
- Shell structures can usually be understood as a set of beams, arches and catenaries and can be analyzed by that approach.
- For any shell structure, there will be a simple method of analysis that can be used to check the more precise analysis.
- Stiffest path concepts are useful in understanding shell structures.
- Support the edges of shells if they are already supported visually by masonry walls or window walls.
- Do not throw away all you structural intuition when you design shell structures.
- For ordinary structures, an adequate preliminary design should be within 10 percent Shell structures can be estimated to within 5 percent because the only usual unknown is the amount of reinforcing.
- Shell structures can carry relatively large point loads.
- If you rush into computer calculations without a thorough study of the structure with several possible arrangements, then you may not get the best structure.
- Shell structures get their strength by shape and not by high strength of materials Do not push stresses to their limit.
- In case of doubt, reinforce. Shell structures are very complex and carry forces by many paths.
- Shell structures, because of their complexity and unfamiliarity require a large lead time for developing the design.

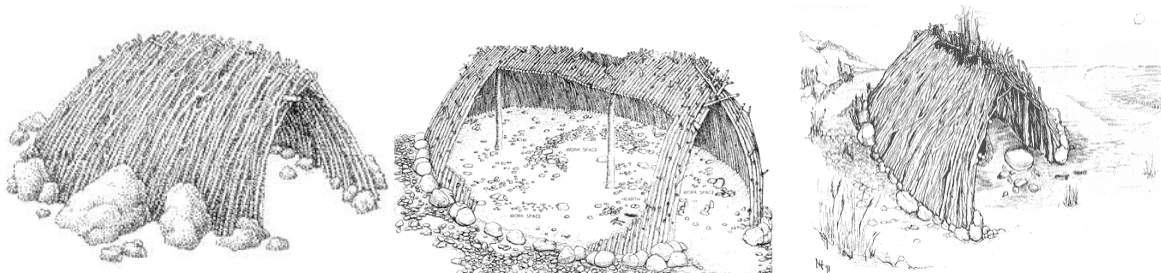
- Las estructuras de cascarón pueden ser entendidas como sistemas de vigas, arcos y funiculares; pudiendo por tanto ser analizados bajo esos enfoques.
- Por cada estructura de cascarón, existirá un sencillo método de análisis que podrá ser utilizado para reforzar otros análisis más precisos.
- Los conceptos relacionados a la obtención de rigidez pueden ser útiles en el entendimiento de las estructuras de cascarón.
- Es conveniente dar soporte a los bordes de un cascarón si es que están ya recibiendo un soporte visual por ventanales o muros ciegos.
- Cuando se ha de diseñar estructuras de cascarón, habría que considerar también la participación de nuestra lógica estructural.
- Para estructuras convencionales, un adecuado diseño preliminar se da sobre parámetros de más-menos un 10%. Para las estructuras de cascarón, este puede ser estimado con un 5% de variación ya que lo que faltaría precisar sería la cantidad de refuerzos finales requeridos.
- Las estructuras de cascarón pueden transmitir cargas uniformes relativamente altas.
- Si se apresura a realizar los cálculos correspondientes a un cascarón, sin haberse estudiado minuciosamente las posibles opciones de diseño que pueden ofrecerse, tal vez no se consiga obtener la propuesta más conveniente.
- Las estructuras de cascarón obtienen su resistencia por forma y no por los materiales empleados. Habría que tener cuidado de no sobrevalorar o sobrepasar los límites de sus capacidades, llevando los esfuerzos al máximo.
- En caso de duda, habría que reforzar. Las estructuras de cascarón son muy complejas y pueden transmitir cargas por diferentes vías.
- En las estructuras de cascarón, por el desconocimiento que de estas se tenga y por la condición de su propia complejidad, han de exigir largos lapsos de tiempo en el desarrollo de su diseño.

Estructuras de malla reticular

Antecedentes (historia y desarrollo).

La más temprana evidencia de una construcción realizada expofeso para servir como vivienda se data de aproximadamente 400,000 años; en la época inicial del paleolítico o edad de piedra.³³ En un sitio arqueológico denominado "Terra Amata" en la costa sur de Francia, cerca de la ciudad de Niza; descubierto, y primeramente excavado, por Henry D. Lumley (1966)³⁴.

Los vestigios del tipo de construcciones encontradas, constituyen una serie de chozas o cabañas elaboradas a partir de la acumulación de innumerables varas o ramas recolectadas, que de forma simple, se empotraron en el suelo y que se entrelazaron para conseguir la solidez necesaria. Son este tipo de chozas lo que podría considerarse como los primeros antecedentes de las estructuras reticulares.



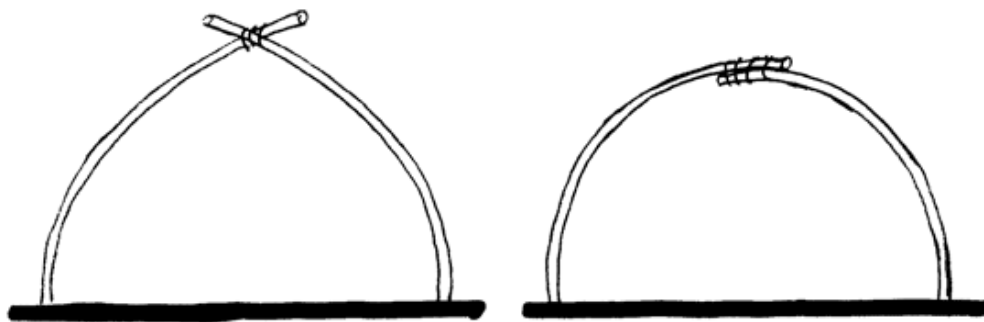
Representación del tipo de chozas supuestamente existentes en la región de: "Terra Amata"

³³ Los arqueólogos subdividen el paleolítico en bajo (la etapa más temprana), paleolítico medio y alto (la última etapa) dicha clasificación se basa principalmente en la presencia o ausencia de ciertos artefactos fabricados en piedra. El paleolítico bajo data de aproximadamente 2.5 millones de años hasta 200,000 años en donde se incluyen los registros más antiguos de la fabricación de herramientas. Así como ciertas pruebas de la evolución del "Homo" desde sus orígenes en África hasta su propagación por Eurasia. Dos específicos tipos de manufactura de herramientas caracterizan el paleolítico bajo: el Oldowan y el Acheulean. Información obtenida de la siguiente dirección electrónica: http://encarta.msn.com/encyclopedia_761555928_2/Stone_Age.html#p18

³⁴ Para mayor información, consultar el sitio en internet del museo de "Terra amata" en la siguiente dirección: <http://www.musee-terra-amata.org/>

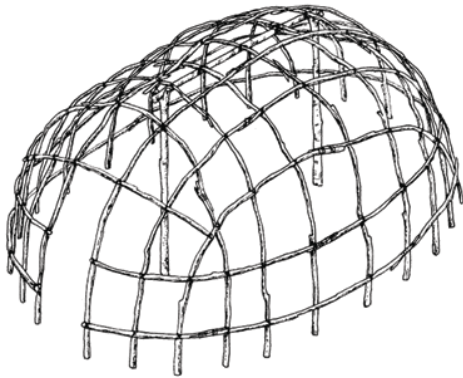


Asimismo, en diversas partes de África, Asia y América, se han encontrado ejemplos posteriores de estructuras realizadas de forma similar; ramas o troncos delgados que son clavados en el suelo, manteniendo una cierta cercanía entre ellos hasta formar una especie de planta oval, estas ramas se doblarían y se amarrarían entre sí para formar arcos a lo largo y ancho de la construcción. De igual manera, interviene un elemento central (marco rígido) con el que han de integrarse para conseguir un trabajo estructural más conveniente. Aparecen anillos horizontales que son agregados para unificar a su vez el trabajo de los arcos recién formados.



Formación de los arcos a partir del amarre de dos elementos independientes

Sobre la estructura recién formada, podría ya colocarse el elemento final de recubrimiento (en muchos casos se consideraba un material igualmente ligero como paja, hojarasca, musgo o incluso la piel de algún animal). Adicionalmente, podía darse el caso de encontrar, anexo al perímetro de la estructura, algunos pesados objetos, como rocas, para ayudar a tomar las componentes horizontales de las fuerzas que sobre su superficie fluirían y que antes de disiparse en el terreno pudieran ocasionar daños a la base de esta.



Aspecto final de la estructura



Estructura realizada en Nigeria, 1910

El peso aproximado de la estructura sola es de 5 kg/m^2 , con una capacidad de carga de varias veces su propio peso. Mucho del éxito de este tipo de cubiertas estaba basado no solamente en su eficiencia estructural y en la simplicidad de su construcción, sino también en la calidad espacial que generaba, donde los muros y el techo estaban integrados en un plano de forma continua, generando, a fin de cuentas, una superficie mínima, con un máximo rendimiento espacial.³⁵

³⁵ Datos tomados del ensayo: "From prehistoric stickdomes to the state of the art gridshells", Horst Berger, Structure magazine, 2007

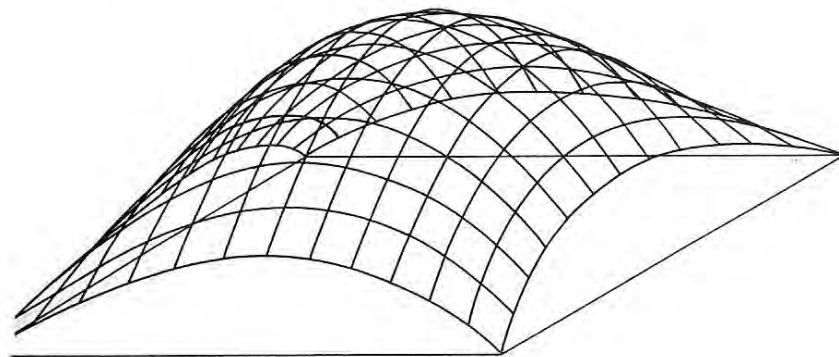
Mallas reticulares Sinclásticas

"Con las cúpulas reticulares se logran espacios internos extraordinariamente limpios y diáfanos; no existen problemas de anclaje ni de empujes; son formas absolutamente autónomas, y su instalación que no precisa de andamiaje, puede llegar a ser fundamentalmente rápida."³⁶

La malla reticular sinclástica es un tipo de estructura formada por una malla con una doble curvatura, en el mismo sentido, realizada con elementos lineales continuos, en los que las cargas se transmiten a lo largo de dos ejes mediante mecanismos de empuje.

Los elementos lineales han de ser resistentes a flexión (la cual siempre se encuentra presente) frente a las cargas secundarias, igual que en el caso del arco funicular independiente.

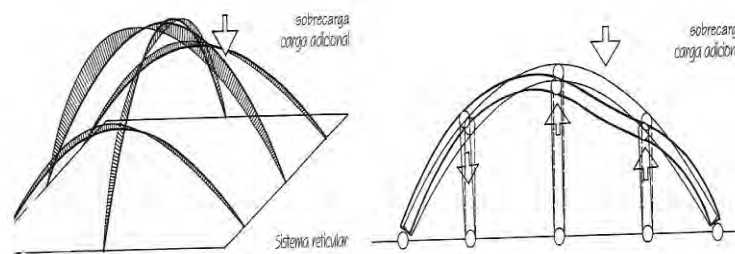
La forma global de la estructura queda determinada no sólo por la curvatura del arco, sino por los ángulos de la malla. Por consiguiente, para mantener la forma de la estructura se ha de garantizar que los ángulos de esta sean fijos, un trabajo esencial que recae sobre los nodos de la malla, los cuales a la fin han de asegurar su integridad.



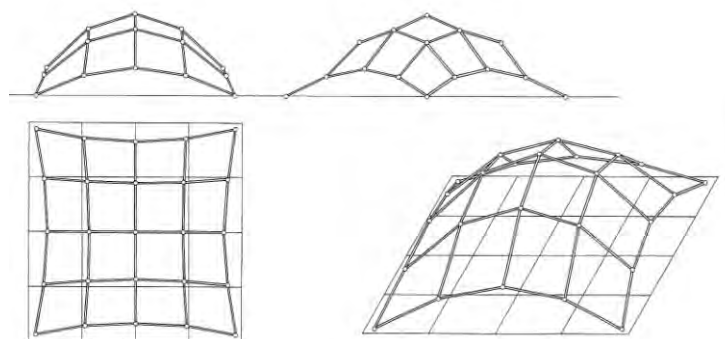
³⁶ Frase de Emilio Pérez Piñero citada por Seguí, Miguel, Candela -Pérez Piñero, un dialogo imaginal, pág. 144, Editorial Rueda S L España, 1972

Si bien el sistema se basa sobre la transmisión tridimensional de cargas, por el cruce de arcos funiculares (mallas), los esfuerzos y empujes horizontales que reciben los arcos que conforman la malla reticular son inversamente proporcionales a la altura (contraflecha) obtenida.

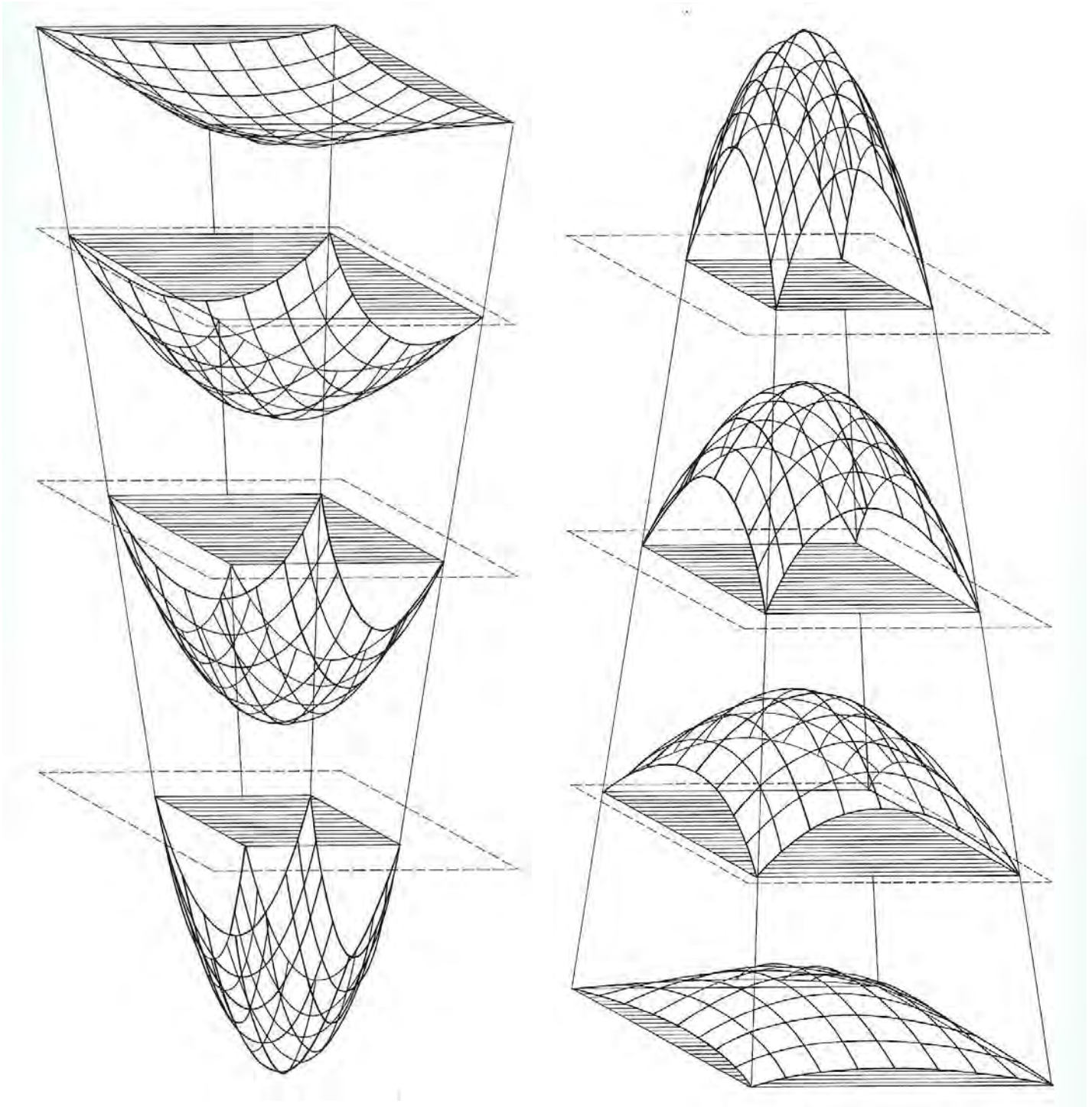
Debido a la formación de la malla, donde los nodos generados son uniones rígidas, los arcos que no soportan cargas también participan en el mecanismo de resistencia frente a las deformaciones, siendo este el resultado de: la flexión del eje del arco, la torsión de la sección del arco y el desplazamiento del ángulo de intersección de la retícula.



Para una estructura que se encuentra en condiciones de apoyo; A partir de una malla reticular que se presenta con una geometría plana inicial, puede generarse una superficie funicular a través de la deformación de los elementos lineales (internodales) y del desplazamiento de sus nodos, de modo análogo a como se ofrecería en una malla suspendida.



Desplazamiento de los nodos de la malla de la estructura



Evolución de las superficies en malla reticular a partir de las superficies suspendidas

En términos generales, una estructura en malla reticular como la mencionada, describe a una estructura con la forma y fortaleza de un cascarón con doble curvatura. Pero recordando que en vez de ser una superficie sólida constituye una retícula, pudiendo por tanto librar grandes claros con poco material. Material que puede ser tan diverso como el acero, aluminio, madera, bambú, e incluso materiales nuevos como los generados a partir de fibras de vidrio.

Sobre el proceso constructivo ya comentado³⁷, el cual se distingue por la generación de una malla reticular apoyada sobre una superficie plana, conformada a su vez por un material que cuente con una cierta flexibilidad y que permita por tanto ser manipulada y deformada elásticamente hasta alcanzar la forma final deseada para posteriormente ser esta rigidizada, se presenta, a manera de ejemplo, la construcción experimental, en sus diferentes etapas, de una estructura diseñada por un grupo de alumnos del "College of Architecture, Design, and Construction (CADC), Auburn University"

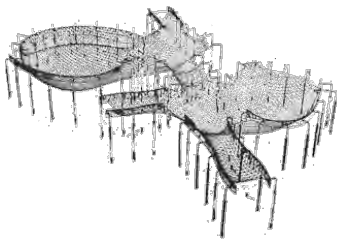


³⁷ El presente apartado hace referencia al artículo realizado por C. Douthe, O. Baverel y J.F. Caron de nombre: "Form- finding of a grid shell in composite materials" aceptado para su publicación el 5 de marzo de 2006 como material de la "International association for Shell and spatial structures (IASS)"

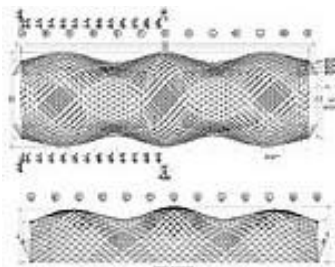


Etapas diversas sobre la construcción experimental de una malla reticular en madera³⁸

Asimismo, es interesante mencionar otros tres ejemplos de estructuras en malla reticular, de cierta importancia, que llegaron a ser construidas siguiendo este procedimiento:



The Mannheim Budesgartenshau (Frei Otto, 1975)



The Weald and Downland Museum (Happold, 2002)

³⁸ Imágenes tomadas de la siguiente dirección: <http://www.cadc.auburn.edu/soa/rural-studio/thinnings/?p=83>



Japanese pavilion for the Hanover exhibition (Shigeru Ban, 2000)

Las estructuras de los dos primeros ejemplos mencionados, se realizaron con barras de madera mientras que en la tercera se emplearon tubos de cartón reforzados localmente con arcos de madera.

En la búsqueda, tanto de una estabilidad estructural como de una formalidad estética, en cuanto a las mallas reticulares se refiere; es necesario evaluar desde un principio los esfuerzos que interviene y las distribuciones correspondientes en los diversos elementos que habrían de actuar, los cuales sufrirían distintos desplazamientos que adicionalmente se reflejarían en modelos de fuerzas no lineales.

La malla reticular empleada en el proyecto de Frei Otto (Mannheim, 1975) fue concebida sobre el estudio realizado a un modelo de cable suspendido sujeto a los esfuerzos de su propio peso. Este procedimiento fue un primer acercamiento a la forma correcta de una estructura en malla reticular, pues como el reverso de tal modelo estudiado, se encuentra no sólo sujeta a esfuerzos de compresión. Desde un estado inicial se presentan, de forma combinada, esfuerzos de flexión, compresión y tracción.

Los problemas de convergencia de las barras (nodos) así como los altos niveles de desplazamientos y rotación en los mismos han obligado a buscar métodos más efectivos de enfrentar las dificultades referentes, a la forma y modelado de las mallas reticulares. Sobre esto, se han propuesto algunos métodos de acercamiento que han tenido una cierta difusión; tal es el caso del método de elementos finitos y del método de relajación dinámica.

El método de elementos finitos está ya bastante difundido. Mientras que el método de relajación dinámica se explica, básicamente, en el trazo, paso por paso, en pequeños incrementos de tiempo, del movimiento de cada nodo de una malla reticular (considerados todos ellos a su vez como aislados pero sujetos al intercambio de situaciones generadas para el mantenimiento del sistema, entre la energía cinética y la energía elástica que busca ser en lo posible la mínima). Situación que se presenta constante hasta la obtención de un nivel de elasticidad.

En este procedimiento, teóricamente, las oscilaciones de la estructura empiezan a partir de una geometría plana y se mantiene **constante y "libre" hasta que el máximo de energía cinética es alcanzado**. La estructura es frenada y las velocidades son igualadas a cero. La estructura vuelve a oscilar nuevamente libre hasta el siguiente punto de máxima energía cinética alcanzada. Como anteriormente, las velocidades son igualadas a cero. Esta situación se presenta de continuo hasta que todos los modos de vibración posibles sean disipados.

La malla inicial está conformada por largas y continuas vigas que se encuentran dispuestas en dos principales direcciones con espacios regulares entre ellas. Estas vigas siguen el modelo Euler-Bernoulli³⁹ y su comportamiento es lineal-elástico. Las vigas en una dirección están sujetas con las vigas en la otra dirección. No se consideran esfuerzos de flexión inducidos por dichas conexiones.

Así que, como refuerzo a lo anteriormente comentado, para empezar con la realización del cálculo se parte de una arbitraria geometría. En este estado inicial, el sistema es inestable y se moverá bajo la acción de las tensiones internas y las cargas externas, las tensiones internas son en un principio calculadas usando tan solo las tensiones libres propias del estado en que se encuentra la estructura. Para describir el movimiento que la estructura va experimentando, la posición de cada uno de los nodos es registrada (el nodo va de la posición X_1 a X_2 , como se ha ya mencionado, en incrementos de tiempo Δt).

³⁹ Para mayor información sobre la teoría Euler-Bernoulli para solución de vigas, consultar la siguiente dirección: http://en.wikipedia.org/wiki/Euler-Bernoulli_beam_equation

Los puntos de conexión, por su parte, constituyen zonas de interacción entre vigas; con características tales (consecuencias de dichas intersecciones) que pueden inducir excentricidades dentro del elemento nodo. Si esas excentricidades actúan como imperfecciones geométricas, ha de esperarse una cierta disminución en la resistencia de la estructura. Como sea, en esos primeros cálculos, las excentricidades entre los ejes de las vigas llegan a ser ignorados y se asume que los nodos de conexión han de tener la misma posición espacial.

De acuerdo al método expuesto, el cálculo de las fuerzas internas va asociado a la geometría vigente en ese momento por cada viga en separado. Y el total de fuerzas aplicadas a cada nodo es la suma de las fuerzas internas que hacia estos se dirijan (cálculo estático). Inicialmente, en la misma posición espacial, los nodos de varias vigas estarán sujetos a fuerzas idénticas en cada momento y por lo tanto permanecerán en la misma posición espacial.

Con la intención de acelerar la velocidad de convergencia, de tal manera que el sistema evolucione rápidamente hasta alcanzar la posición de equilibrio, es posible llegar a considerar tanto un aumento en los incrementos de tiempo como un decremento en la ficticia masa nodal. Sin embargo, cuando los incrementos de tiempo exceden ciertos valores límite o la disminución de la masa resulta ser demasiada; las inestabilidades numéricas aparecen.

Si resulta contraproducente, por un lado, aumentar la magnitud de los incrementos de tiempo contemplados; estos pueden ser por otro lado reducidos, en cuanto a la cantidad requerida, al tomar como inicio o punto de partida una forma geométrica que no se encuentre tan alejada del mismo punto de equilibrio geométrico.

Generación de la malla a partir de una superficie existente

Es importante recordar, primeramente, que una de las principales características geométricas de una malla reticular es la de mantener en todo momento una distancia internodal idéntica.

Asimismo, el proceso de formación de una estructura surge en la realidad a partir de la aplicación de ciertos esfuerzos (tracción, compresión, torsión, etc.) a cada uno de los elementos compositivos; por lo que se piensa que en parte la capacidad máxima de las secciones y del material empleado es lo que habría de determinar los claros o dimensiones de los espacios por cubrir. Un exceso en la concentración de los esfuerzos en ciertos elementos de una estructura podría llevarla al punto de falla.

Para una estructura en malla reticular, se tiene que uno de los principales objetivos por alcanzar es el de buscar que la propuesta en la generación de la retícula de la malla, sea la más conveniente para los esfuerzos que en ubicación, dirección y magnitud pudieran presentarse.

Muchas de las particularidades de dichos esfuerzos se derivan a su vez de los diferentes ángulos que se dan sobre la superficie de la cubierta que se pretende reticular. Dichos esfuerzos, con tales particularidades, han de ser por lo tanto tomados en cuenta durante el proceso de análisis de la estructura.

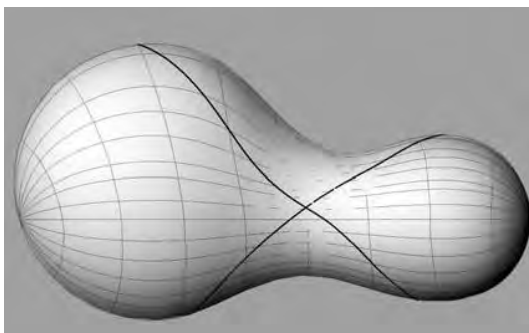
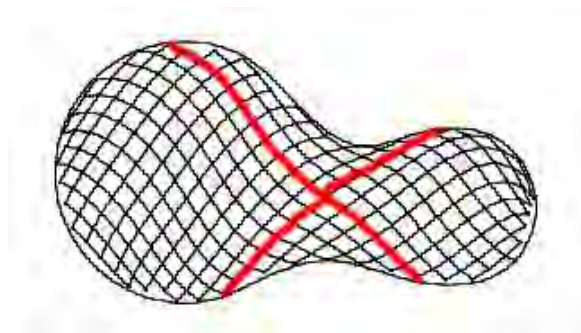
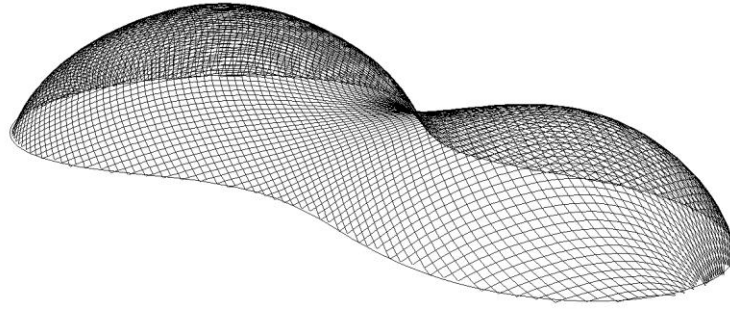


Imagen sobre una superficie cualquiera ya existente



Propuesta de la retícula sobre dicha superficie



Tridimensional de la malla reticular con la forma de la superficie inicial



Modelo tridimensional de la malla reticular sobre la superficie existente.⁴⁰

Curvas geodésicas en las estructuras de malla reticular.



⁴⁰ Imágenes tomadas del ensayo: "A design tool for timber gridshells", M.H. Toussaint, May 2007, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology

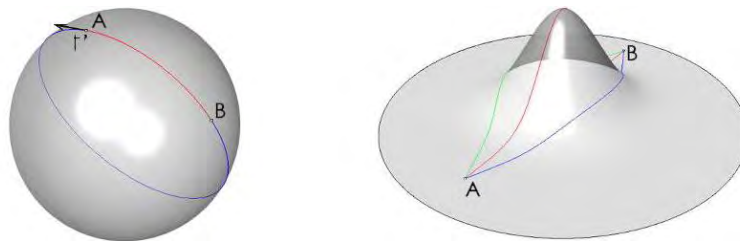
Carlo Deregibus y Mario Sassone, del politécnico de Turín, Italia sugieren que la implementación de curvas geodésicas para la formación de una estructura en malla reticular permite obtener, entre otras ventajas, ahorros considerables en la cantidad de material que para su construcción se requeriría. Y es que las curvas geodésicas representan las distancias mínimas o más directas para la conformación de una retícula que se ajuste a una superficie curva determinada con anterioridad.

Conceptualmente, es algo similar a tensar una cuerda sobre una superficie cualquiera. Dicha cuerda deberá mantenerse siempre en tensión y la senda que sobre esta se trace será una geodésica.

Una segunda definición podría ser la siguiente: Partiendo supuestamente de un preciso punto y escogiendo una cierta dirección, la curva geodésica se puede trazar asegurándose de permanecer siempre recta sobre esa dirección.

Es decir, sobre una superficie cualquiera, una curva geodésica es aquella que representa el trayecto que recorrería una línea donde jamás experimentaría una desviación, sea a la derecha o a la izquierda. De igual manera, la velocidad en relación con la distancia, como trayectoria en una sola dirección, es directa. Las geodésicas pueden ser innumerables como direcciones a seguir.

Entre ambas definiciones, pueden existir ciertas contradicciones, de tal manera que se haga dudar sobre la veracidad de cada una de estas como de la posible complementariedad que pudieran tener.



Sobre estos dos ejemplos tenemos que, en el primer caso, sobre una superficie esférica podemos ubicar dos puntos cualquiera; A y B cuya conexión representa un segmento de una sola curva geodésica.

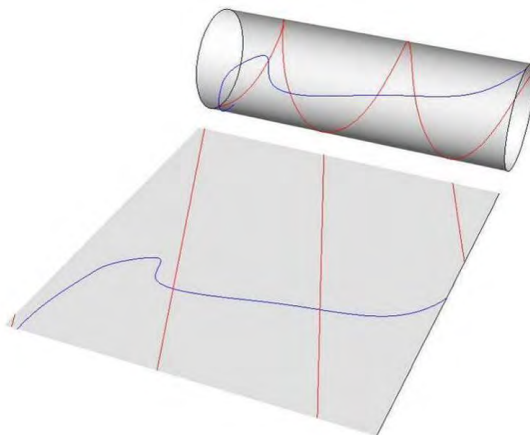
Mientras que en la segunda superficie encontramos que, primeramente, la conexión más directa entre los puntos A y B es la línea roja, la cual a su vez marca un eje de simetría. Sin embargo, dicha línea roja no representa la distancia más corta entre los dos puntos. Esta es más bien dada por el trazo de la línea azul. La línea verde, por su parte, sería una opción viable si se contemplarán múltiples resultados en el trazo de la distancia más corta, ya que prácticamente es igual a la línea azul.

Para una tercera definición, la curvatura geodésica puede entenderse como la expresión mínima de la curvatura de una superficie (concepto frecuente de utilizar en lo referente a la búsqueda de una superficie mínima en el proceso llamado "form finding").

Si "Y" es una curvatura geodésica sobre una superficie "X" y "A" es un punto en "Y". La curvatura de "Y" en "A" es la mínima posible entre todas las posibles curvas que pasen por "A" teniendo la misma línea tangente de "Y" en "A".

Las curvas geodésicas son propiedades intrínsecas de una superficie. Entendiéndose en este caso como intrínseco a la propiedad matemática de la superficie que no depende de cómo esta se ubique en el espacio ni de las pequeñas deformaciones que llega a experimentar.

Según esto, las curvas geodésicas se mantendrían independientes de las alteraciones que llegara a sufrir una superficie cualquiera. Así por ejemplo; un cilindro podría ser desdoblado hasta formar un plano y la curvatura geodésica determinada para el cilindro será también geodésica en el nuevo plano formado.



La línea roja representa una serie de curvas geodésicas en forma de hélice que al ser desdoblado el cilindro en un plano, se aprecian como rectas paralelas unas a otras.

Retomando el llamado "form finding" y su paragón con la determinación de las curvaturas geodésicas, tenemos que en dicho proceso se busca que, para la formación de la superficie una vez especificados sus límites perimetrales, se encuentren las curvas que transitan de un límite al otro de una forma natural, óptima y mínima que aseguren una configuración estable según condiciones comunes.

Asimismo, el ensayo mencionado asegura que a partir de las curvas geodésicas, por ser las curvas mínimas óptimas, podrían, bajo ciertas circunstancias, verse beneficiadas con un trabajo estructural más reducido. Es esto parcialmente correcto. Sin embargo, habría también que comentar que, al ser mínimas, tienen un trabajo más alejado al de un arco y más cercano al de una viga horizontal con las desventajas que esto podría implicar.

Para la obtención en el trazo de curvas geodésicas, se sugiere la implementación de un algoritmo numérico que, a través del uso de algún software matemático agilice, por medio de diversas iteraciones, la **ubicación de los puntos intermedios entre el punto "A" y el punto "B"** previamente especificados.

Métodos de optimización estructural

En muchos casos, la misma búsqueda en la optimización, principalmente de materiales y desempeños estructurales, han determinado las formas finales que algunos tipos de construcciones actuales han alcanzado. Esto es, en gran parte, a través de una especie de combinación entre conocimientos tradicionales de ingeniería, conocimientos en programación y ciertos programas computacionales comerciales, que se ha conseguido desarrollar aplicaciones ya

individuales que ejecuten precisos y complejos algoritmos⁴¹ durante los procesos de diseño para la conveniencia de sus estructuras.

Es decir, la optimización en sí constituye una cierta técnica que pretende determinar o alcanzar la eficiencia máxima de un sistema estructural. Existen diversos métodos de optimización que se centran en igual número de elementos o conceptos a optimizar, como puede ser la **búsqueda de un enfoque topológico, la definición de una forma (“form finding”), la determinación de las principales trayectorias de tensiones,** evoluciones en las optimizaciones estructurales, etc.

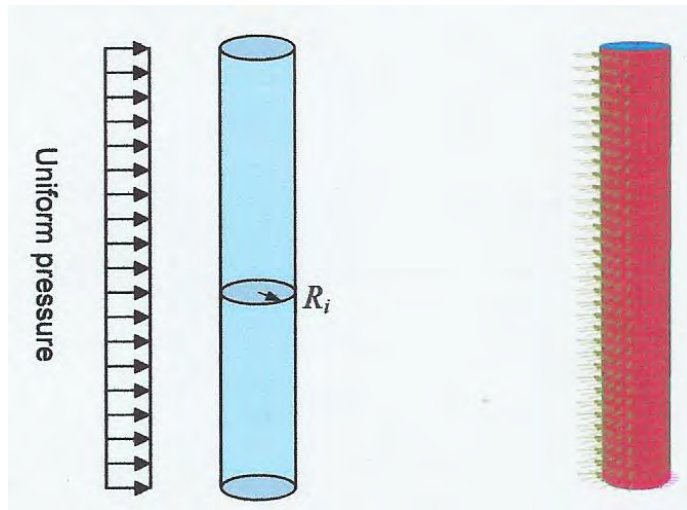
Sobre el desarrollo de nuevos algoritmos que son implementados como aplicaciones dentro de las interfaces de los mencionados programas comerciales, recientemente se han incorporados los llamados algoritmos genéticos como recursos más sofisticados para incrementar la **efectividad de los “scripts”** que de forma independiente se han llevado a cabo. Ampliando el rango de posibles soluciones a un problema estructural.

Algunos miembros de la firma “Skidmore, Owings & Merrill”⁴² presentan un ensayo sobre la aplicación de ciertas técnicas de optimización en el diseño específico de edificios de grandes alturas. Los cuales suelen verse afectados principalmente por el efecto del viento. Y es que las estructuras altas requieren contar con una rigidez lateral que limite las deflexiones y aceleraciones posibles que el viento provoque para ubicarlas en valores que sean aceptables.

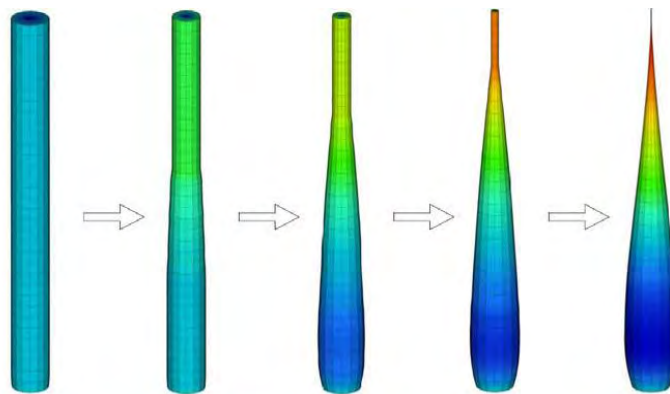
Así por ejemplo, sobre un edificio de directriz circular con una altura y un volumen constante sometido a una fuerza perimetral constante, la firma SOM realizó un análisis basado en el método de elementos finitos restringiendo la carga de viento, considerada como uniforme, a los entrepisos que funcionan a su vez como diafragmas.

⁴¹Un algoritmo es una serie de pasos organizados que describe el proceso que se debe seguir, para dar solución a un problema específico.

⁴²Para mayor información sobre “Skidmore, Owing & Merrill”, consultar la siguiente dirección: http://www.som.com/content.cfm/www_home



La optimización de los parámetros y restricciones seleccionadas fue dada en base a la altura deseada del edificio, el volumen completo de este y el radio de la base, pudiendo alterar el diámetro en los puntos subsecuentes siempre y cuando se mantuviera constante el volumen general. Al ir cambiando la forma del edificio van también alterándose las posibles áreas que se encontrarían sujetas al viento. En este caso la firma SOM se apoyó en la utilización del software: Altair Hyperworks⁴³



⁴³ Para mayor información sobre este software, consultar la dirección electrónica: <http://www.altairhyperworks.com/Default.aspx>

La reducción del diámetro conforme se va incrementando la altura ofrece una menor área sujeta a efecto de viento. Asimismo, se aumentó el diámetro en la parte más próxima a la base (existía una restricción en cuanto a mantener el diámetro original en la misma base) con lo que amplía el momento de inercia para tomar los momentos que se generarán.



Modelo tridimensional del resultado final sobre el aspecto del edificio "optimizado".

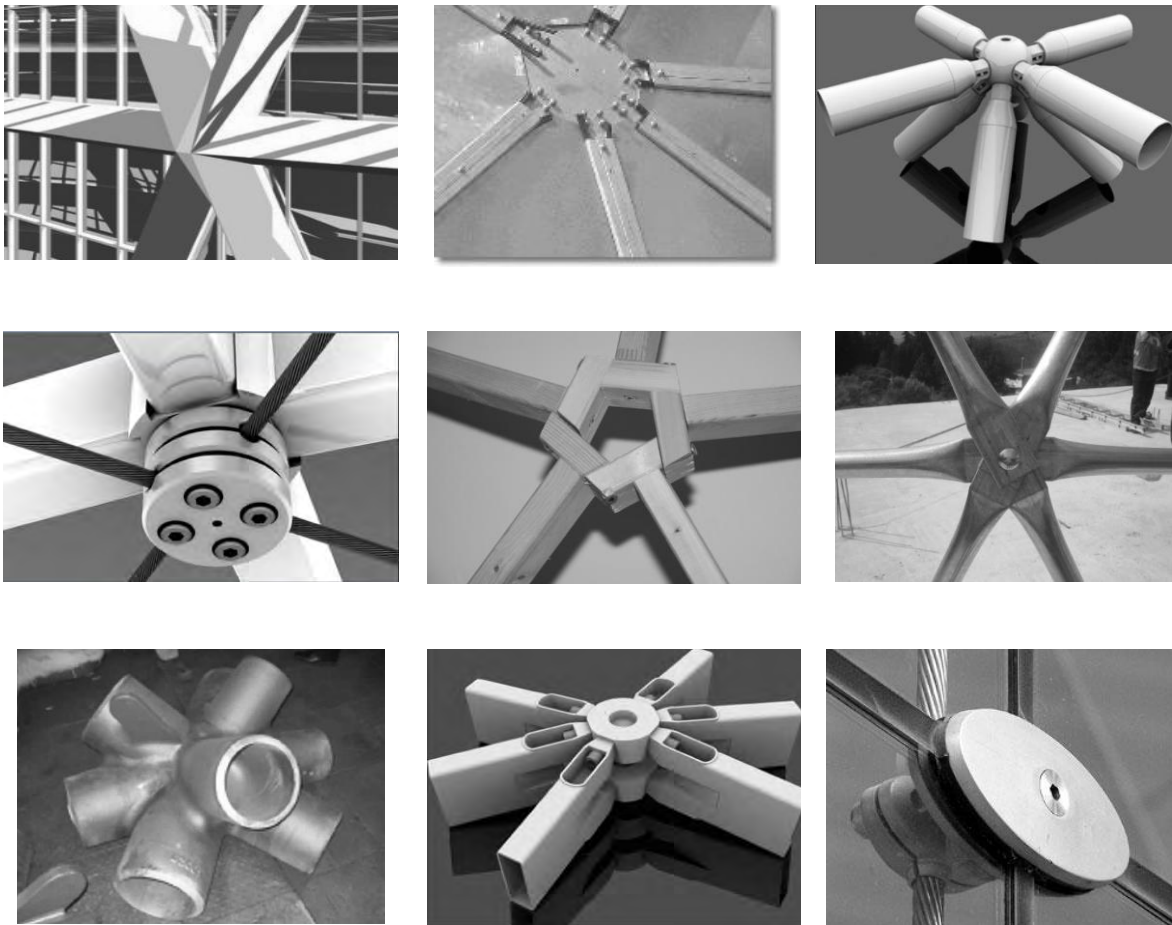
Barras y nodos

En las barras y nodos que componen un sistema de malla reticular, las distintas fuerzas que llegan recibir son descompuestas en diferentes direcciones generándose así un sistema donde algunos de sus elementos trabajan a tracción y otros a compresión, equilibrándose a su vez mediante las correspondientes reacciones.

La eficacia del sistema se basa por tanto en el comportamiento en conjunto de los elementos que le componen teniendo una particular relevancia, como ya previamente se había comentado, lo que ha de

constituir la solución de los nodos. Para esto, es importante considerar el número de elementos o barras que están conectando y que dependen del sistema estructural específico sobre el que se está trabajando. En el caso de una estructura geodésica un nodo cualquiera pueden llegar a conectar 5 ó 6 barras, una cuestión diferente a lo que sería una estructura en malla de una o dos capas o de una tridilosa.

Asimismo, es de tomarse en cuenta las propiedades o particularidades del material que se ha de emplear, el grado de sofisticación tecnológica con el que puede contarse y la intención formal del diseñador para la determinación final de la dimensión y aspecto último del nodo.



Ejemplos diversos para la solución de nodos.

Investigando otras posibles soluciones para nodos en superficies de doble curvatura; encontré una que me pareció particularmente interesante y que consiste en una junta doble con un eje central que permite la rotación necesaria según los ángulos necesarios que la misma retícula indique. En el sentido perpendicular o sobre el eje vertical de dicho nodo no presenta alguna otra articulación. En este caso se manifiestan ciertos esfuerzos sobre las barras que si bien de inicio no serían convenientes, y que consisten principalmente en esfuerzos de torsión, las propiedades únicas del material (tubos redondos dentro de una composición plástica) permitirían absorberlas sin grandes complicaciones. Adicionalmente, la estructura que presenta el nodo mencionado es de condición experimental y en pequeña escala.



Junta doble



Vista interior de la estructura⁴⁴



Vista exterior de una estructura semejante con este tipo de nodos

De las particularidades de los materiales

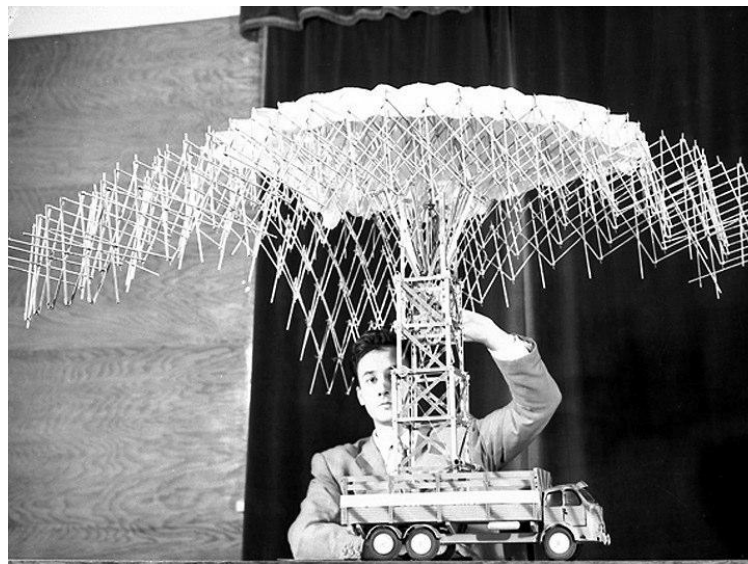
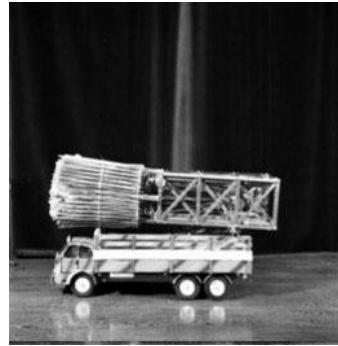
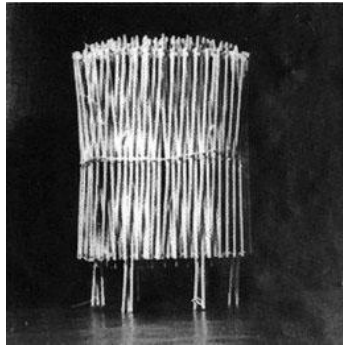
Fundamentos

En toda construcción; el conocimiento y la elección de los diversos posibles materiales que habrían de emplearse para su realización resulta ser algo de enorme importancia, ya que es precisamente a partir de la

⁴⁴ El nodo y la estructura mencionada son las presentadas en el ensayo de C. Douthe, O. Baverel y J.F. Caron de nombre: "*Form- finding of a grid shell in composite materials*" ya anteriormente comentado.

designación de estos como se llegará a determinar la viabilidad de una propuesta específica; una posible solución a un problema determinado.

En el desarrollo de la obra de Pérez Piñero⁴⁵ se hace patente la importancia que juegan las propiedades definidas de los materiales a emplear. Simplemente habría que haberse imaginado que opciones hubiera tenido en cuanto al desarrollo de sus estructuras desplegables si en vez de utilizar acero, se hubiera inclinado por un material como el concreto.



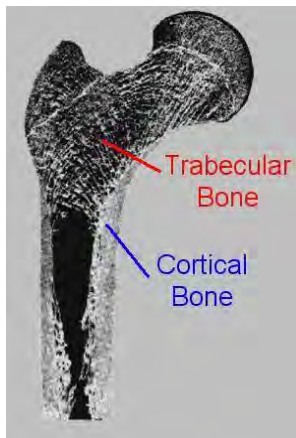
Teatro ambulante, 1er premio UIA, Londres 1961

⁴⁵ Par mayor información sobre la vida y obra de Emilio Pérez Piñero, consultar la siguiente dirección electrónica: <http://emilioperezpinero.com/>

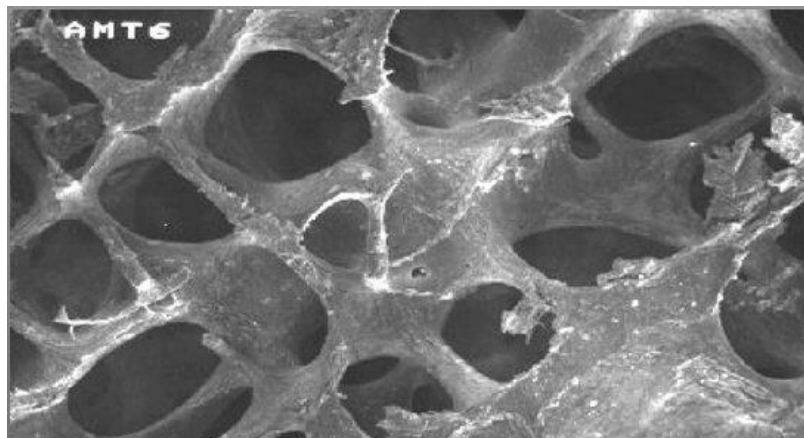
A fin de cuentas, cada geometría trabajada llegará a encontrar en ciertos materiales importantes aliados o adversarios para su adecuada solución. De nada sirve sugerir una geometría que someta a los elementos que le materializan esfuerzos que nos serán capaces de soportar.

El mismo Pérez Piñero señala que la canalización de los esfuerzos a los que una estructura está sometida ha de exigir un vehículo sobre el cual pueda desplazarse y este no ha de ser otro que el de la misma materia. En el caso de una estructura en retícula. Esta ha de aparecer como un esqueleto de la forma o de la superficie en general. Cada elemento internodal es una condensación de masa en las líneas de fuerzas y los huecos han de ser la supresión de la misma en estado inerte.⁴⁶

Así por ejemplo, en la estructura interna de un hueso seccionado puede apreciarse como la materia, en su masa y por sus particulares propiedades, se ubica y dimensiona a partir de las sollicitaciones que se presentan y la manera como esta tiene de responder.



Sección Long. de un fémur humano



Estructura Trabecular de la vertebra de una mujer de 36 años de edad

⁴⁶Con otras palabras; Las cargas externas son transmitidas por fuerzas internas que actúan a lo largo de los ejes de los elementos, como se presenta en el trabajo de una armadura tradicional.

Property	Age (years)						
	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 60	60 - 70	70 - 80
Ultimate strength (MPa)							
Tension	114	123	120	112	93	86	86
Compression	-	167	167	161	155	145	-
Bending	151	173	173	162	154	139	139
Torsion	-	57	57	52	52	49	49
Ultimate strain (%)							
Tension	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3
Compression	-	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	-
Torsion	-	2.8	2.8	2.5	2.5	2.7	2.7

Propiedades mecánicas de la sección cortical de un fémur humano a partir de diferentes edades.⁴⁷

Materiales a utilizar

Acero

En cuanto a la composición general de la malla reticular, se ha propuesto como material base el acero comercial A-36. En tablas proporcionadas por el proveedor⁴⁸, pueden verse las especificaciones generales de las secciones señaladas que han de ser sugeridas para la determinación inicial de los pesos propios de las diversas propuestas que serán revisadas.

El caso, tanto de la solera como de la placa de acero señalada, hace referencia a la composición tanto del nodo tipo proyectado como de las terminaciones de las barras para su conexión.

⁴⁷ Imágenes tomadas de la siguiente dirección electrónica: http://www.feppd.org/ICB-Dent/campus/biomechanics_in_dentistry/ldv_data/mech/basic_bone.htm

⁴⁸ Para mayor información sobre el proveedor, consultar la siguiente dirección electrónica: <http://www.ferrebarniedo.com.mx/>

Diámetro		Diám. Ext.		Espesor de pared			Cédula	Lb/pie	kg/m
Nominal	Pulg.	mm	Frac.	Milésimas	mm				
6"	6 5/8"	168.3	3/16"	0.188"	4.78	40	12.92	19.35	
			7/32"	0.219"	5.60	40	14.98	22.47	
			1/4"	0.250"	6.35	40	17.02	25.55	
			9/32"	0.280"	7.10	40	18.97	28.22	
			3/8"	0.375"	9.50	40	24.99	37.20	
8"	8 5/8"	219.1	3/16"	0.188"	4.78	10	16.94	25.37	
			7/32"	0.219"	5.60	20	19.66	29.48	
			1/4"	0.250"	6.35	20	22.36	33.57	
			5/16"	0.312"	7.90	30	27.70	41.14	
			3/8"	0.375"	9.50	40	33.04	49.10	
10"	10 3/4"	273.1	1/2"	0.500"	12.70	80	43.99	65.47	
			3/16"	0.188"	4.78	10	21.21	31.76	
			7/32"	0.219"	5.60	10	24.63	36.94	
			1/4"	0.250"	6.35	20	28.04	42.09	
			3/8"	0.375"	9.50	40	34.24	51.03	

Tubo de 6" (0.282")= **28.22 kg/m**

CEDULA 30 ESTRUCTURAL

CEDULA 30	CALIBRE	KILOS
1/2	14	5.65
3/4	14	7.17
1	13	10.82
1	14	9.06
1 1/4	12	15.95
1 1/4	13	13.78
1 1/2	12	18.40
1 1/2	13	15.82
2	12	23.11
2 1/2	11	32.01
3	11	39.19
4	11	50.67

Tubo de 3" (Ced. 30)= 39.19kg por cada tramo de 6m. El peso correspondiente es de 6.53kg/m. Según Ferrebarniedo **6.71 kg/m**

PESOS POR PLACA EN KILOGRAMOS													
Espeor	Pulgadas	2"	1 1/2"	1 1/4"	1"	7/8"	3/4"	5/8"	1/2"	3/8"	5/16"	1/4"	3/16"
	Milímetros	50.8	38.1	31.8	25.4	22.2	19.1	15.9	12.7	9.5	7.9	6.4	4.8
	kg. por m2	398.78	299.08	249.63	199.39	174.27	149.94	124.82	99.70	74.58	62.01	50.24	37.68
Medidas													
Pies	Metros												
3 x 8	0.914 x 2.44	889	667	557	445	389	334	278	222	167	139	112	84
3 x 10	0.914 x 3.05	1,112	834	696	556	486	418	348	278	208	173	140	104
3 x 20	0.914 x 6.10	2,223	1,667	1,392	1,112	972	836	696	556	416	346	280	210
4 x 8	1.22 x 2.44	1,187	890	743	594	519	446	372	297	222	185	150	112
4 x 10	1.22 x 3.05	1,484	1,113	929	742	648	558	464	371	278	231	187	140
4 x 20	1.22 x 6.10	2,968	2,226	1,858	1,484	1,297	1,116	929	742	555	461	373	280
5 x 20	1.52 x 6.10	3,697	2,773	2,315	1,849	1,616	1,390	1,157	924	694	578	466	349
6 x 20	1.83 x 6.10	4,452	3,339	2,787	2,226	1,945	1,674	1,393	1,113	833	694	561	420
8 x 20	2.44 x 6.10	5,935	4,452	3,715	2,968	2,594	2,232	1,858	1,484	1,110	923	748	552

Tipos de aceros que manejamos:

SAE 1010	ASTM A-36	A-283-C	A-285-C	H50	A-572-50	A-515-70	A-516-70
----------	-----------	---------	---------	-----	----------	----------	----------

Placa de 3/8"= **74.58kg/m²**

SOLERA						33
Pulgadas	mm.	kg/m	Pulgadas	mm.	kg/m	
1/2	12.7	0.92	2	50.8	5.80	
5/8	15.9	0.79	2 1/2	63.5	4.75	
3/4	19.1	0.68	3	76.2	5.68	
1	25.4	0.63	3 1/2	89.1	7.59	
1 1/4	31.7	0.79	4	101.6	9.83	
1 1/2	38.1	0.95	4 1/2	114.3	11.91	
2	50.8	1.27	5	127.0	15.40	
2 1/2	63.5	1.59	6	152.4	19.35	
3	76.2	1.90	8	203.2	25.40	
1/2	12.7	0.47	1 1/2	38.1	3.80	
5/8	15.9	0.59	2	50.8	5.06	
3/4	19.1	0.71	2 1/2	63.5	6.78	
1	25.4	0.95	1/2 k	12.7 k	76.2	
1 1/2	38.1	1.18	4	101.6	10.13	
2	50.8	1.42	5	127.0	12.65	
2 1/2	63.5	1.77	6	152.4	15.19	
3	76.2	2.05	8	203.2	20.58	
1/2	12.7	0.83	1 1/2	38.1	4.74	
3/4	19.1	0.95	2	50.8	6.33	
1	25.4	1.27	2 1/2	63.5	7.91	
1 1/4	31.7	1.52	5/8 k	15.9 k	76.2	
1 1/2	38.1	1.90	4	101.6	12.65	
1 3/4	44.4	2.28	5	127.0	15.92	
2	50.8	2.94	6	152.4	18.99	
2 1/2	63.5	3.76	8	203.2	25.23	
3	76.2	4.79	1 1/2	38.1	5.70	
4	101.6	5.06	2	50.8	7.59	
5	127.0	6.33	2 1/2	63.5	9.89	
6	152.4	7.60				

Solera de 5" x 3/8"= **9.49kg/m**

Membrana

Para cubrir las estructuras de acero propuestas se ha optado por una membrana plástica en poliéster y PVC. La cual, pese a tener ciertas propiedades que le permiten trabajar de forma independiente, se encontrará en estado pasivo.


Asimismo, la decisión de emplearla como elemento de recubrimiento se basa, primeramente, en el aspecto de enorme ligereza que con su empleo sigue manteniendo el conjunto de la estructura. El paso de luz natural es conveniente pues el modelo de membrana elegido (Ferrari 702s) no resulta ser completamente opaca ni es totalmente traslúcida.

Adicionalmente, se considera que la estructura de acero, por condiciones normales inherentes a su propia ligereza, presentará ciertos movimientos que, si bien se encuentran en los límites de lo permisible, generarían problemas en su acoplamiento con otros materiales utilizados para su recubrimiento que presentarán una mayor rigidez como podría ser el caso de placas de cristal templado (adicionalmente al peso que esto representaría).

Así por ejemplo, al paso de los años, por esta inconstancia o desigualdad en la aproximación de sus capacidades máximas de desplazamientos permitidos, y por condiciones tan normales como posibles dilataciones derivadas de las variaciones de temperatura, se llegaría a generar problemas de filtración de agua a través de las juntas de las placas de cristal.

En el caso de la membrana⁴⁹, ésta puede tomar fácilmente esos potenciales incrementos en la dimensión de la estructura, así como en los probables desplazamientos generados por efectos de sismos, empujes y succiones de viento, etc. Ya que de entrada, al estar en estado pasivo, no llevará un preesfuerzo mayor al mínimo necesario para sacar las arrugas y ofrecer un aspecto terso, de unidad con la estructura de acero.

⁴⁹ Para mayor información, sobre el proveedor de la membrana, consultar la siguiente dirección electrónica: <http://www.ferrari-textiles.com/>

Spécifications techniques	Technical specifications	Precontraint® 702 Formule S	Normes Norms
Fil	Yarn	PES HT 1100 Dtex	TERSUISSE 
Masse totale	Total mass	750g/sqm 22 oz/sqyd	NF EN ISO 2286:2
Largeur	Width	180 cm	(-1mm/+1mm)
Résistance traction (chaîne/trame)	Tensile strength (warp/weft)	300/280 daN/5 cm 323/310 Lbs	NF EN ISO 1421 FTMS 191 A Method 5102
Résistance déchirure (chaîne/trame)	Tear strength (warp/weft)	30/28 daN 40/30 Lbs	DIN 53.363 ASTM D 5733-95 Trapezoid
Adhérence	Adhesion	10 daN/5 cm	NF EN ISO 2411
Reaction au feu	Flame retardancy	B1/DIN 4102 NFPA 701 - UNE 23727 90 - SN 1988 98 BS 7837 - CSFM - SIS 650082 NFP 92.503	
Traitement de surface	Surface Treatment	FORMULE S : Alliage PVDF CALIBRÉ / CALIBRATED PVDF alloy	

Les données de la fiche technique ci-dessus sont des valeurs moyennes avec une tolérance de +/- 5%. / The technical data here above are average values with a +/- 5% tolerance.

Aplicaciones a un nuevo proyecto

"Una estructura bien proyectada casi no necesita calcularse."

F. CANDELA

En 1968, Emilio Pérez Piñero publica un interesante ensayo⁵⁰ donde expone lo que considera debería ser la manera más conveniente de abordar el diseño de una estructura, para este caso, de una estructura reticular. De dicho ensayo, se extrajo el siguiente fragmento:

"En la concepción, proyecto y ejecución de una estructura reticular aparecen las siguientes fases:

- *Determinación de la forma general del conjunto.*
- *Determinación de la retícula, disposición y longitud de las barras, Esto puede llamarse "cálculo geométrico" de la estructura.*
- *Cálculo mecánico y dimensionamiento de las barras.*
- *Resolución constructiva de la conexión de las distintas barras.*
- *Formación efectiva de la estructura en su emplazamiento con el montaje de sus elementos."*

Cada una de estas cinco fases puede tomar una importancia preponderante, según los casos, quedando las restantes aparentemente en un plano secundario; pero siempre es preciso cuidar muy concienzudamente cada una de ellas."

Así, siguiendo estos consejos, se procedió al desarrollo de las tres propuestas que a continuación se presentan.

⁵⁰ El ensayo referenciado se publicó en la revista "Arquitectura" de 1968, n° 112

Datos geométricos

Propuesta 1

La consideración de una nueva propuesta, debido al énfasis hecho sobre la necesidad de enfocarse, como un alternativo concepto rector del proyecto, en la eficiencia de su trabajo estructural, invariablemente me orilla a pensar no en una sola propuesta a revisar sino en varias propuestas (específicamente 3 propuestas) que por un lado mantengan determinadas condiciones de manera constante; como puede ser la altura máxima alcanzada, las dimensiones longitudinales y transversales, el material de conformación de la estructura, el material de recubrimiento empleado, etc. Y por otro lado, la opción de jugar con ciertas alteraciones que funcionen como variables medibles; como la separación de la retícula y algunas modificaciones en la forma general de la superficie.

A partir de esto, se pretende llevar a cabo precisas comparaciones sobre el comportamiento estructural entre los diferentes modelos, mostrando así los beneficios o carencias generadas que reportaron por el simple hecho de haber producido tales cambios.

Sobre un primer prototipo a estudiar, y como punto de partida, se ha pensado en la conveniencia de un modelo que se base en una figura o superficie geométrica regular, fácilmente reconocible. Este prototipo inicial se define como un catenaróide abierto en su perímetro, de tal manera que la vista en planta sea un cuadrado de 40.00 x 40.00m. Su superficie, en general, queda definida por la siguiente ecuación:

$$Z = (C_1 * (\cosh(X_1/C_1) - 1)) + (C_2 * (\cosh(X_2/C_2) - 1))$$

Adicionalmente, se ha contemplado agregarle en los bordes algún tipo de refuerzo que ayude a tomar los empujes laterales, que sobre el último arco de catenaria se presenten. En este modelo, el refuerzo o "alerón" es de pequeñas dimensiones y será uno de los elementos que podrá ir variando según la manipulación general que de la superficie en los otros dos modelos se haga.

Cálculo general de la propuesta 1**Catenaroide**

Lado corto (inicio)	40.000
Lado largo (inicio)	40.000
Lado corto total (con alerones)	41.000
Lado largo total (con alerones)	41.000
H. máx del domo inicial	15.000
H. máx del domo resultante	14.700

Factor de proporción	0.1875
Corte por nuevo plano horizontal sobre NPT original	0.300 ¹
Increment. por canalón en alerón corto	0.500
Flecha arco perim. Corto	7.200 ²
Flecha arco perim. Largo	7.200
Flecha arco central corto	7.500
Flecha arco central largo	7.500
Long. 1/2 arco central corto	21.766
Distancia inicial propuesta para revisión entre arcos	4.000
Núm. De claros o divisiones	5.000
Núm. De piezas	4.000 ³
Distancia final real entre los arcos	4.353

1/2 Arco perimetral proyección en alzado**Valores originales**

f= y=	7.500
x=	20.000
P=	27.833
Long. Máx =	21.766
Ang. ° Tang base	38.026

1/2 Arco interior tipo (c1)**Valores originales**

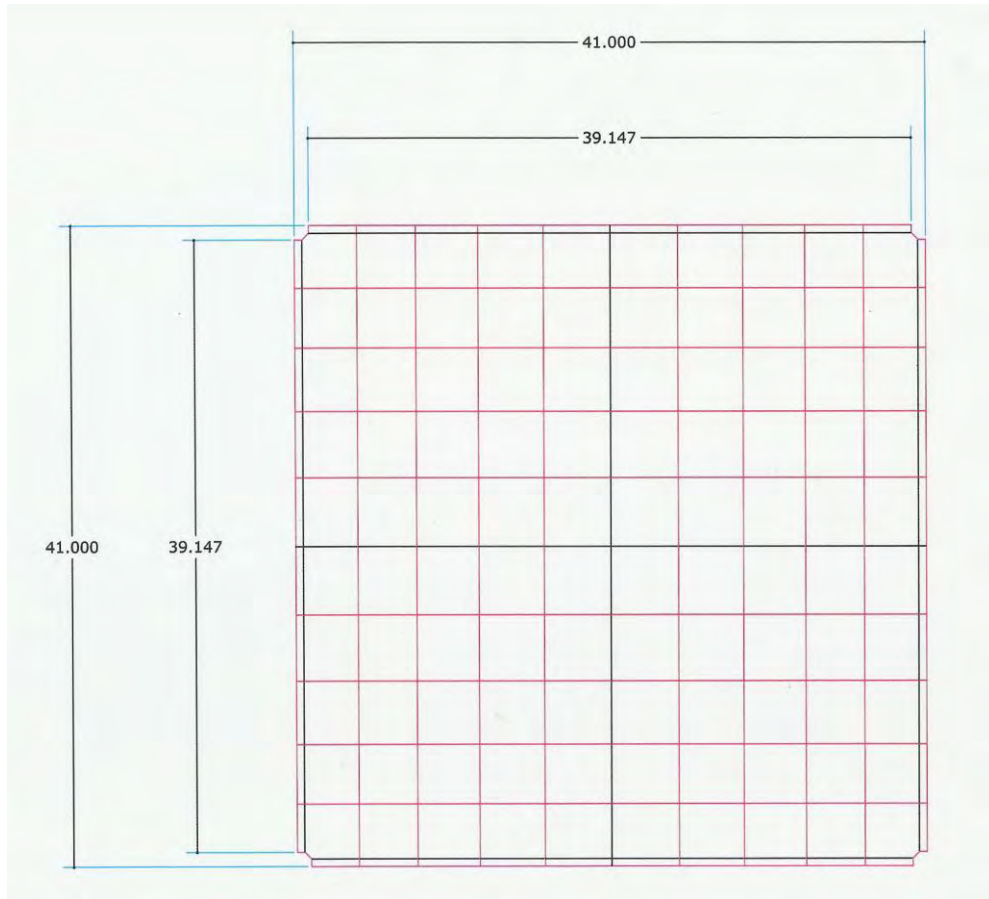
f= y=	7.500
x=	20.000
P=	27.833
Long. Máx =	21.766
Ang. ° Tang base	38.026

Notas:

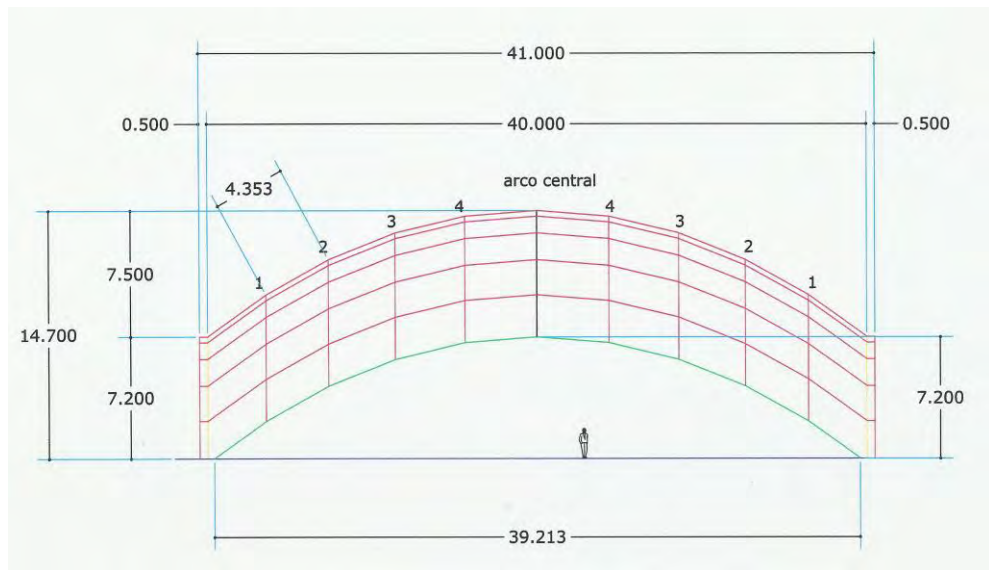
¹Para evitar la terminación en punta de la estructura, se generó un plano de corte a 0.30m del suelo que secciona el arco perimetral original. De ahí la diferencia de flechas y longitudes finales entre los arcos perimetrales y el arco interior tipo (flechas de 7.20 y 7.50 respectivamente). Asimismo la nueva altura máxima de 14.70 sobre el nuevo plano NPT queda como definitivo y será constante para las otras dos propuestas

² Si bien se indican como arcos perimetrales largos y cortos; los valores son iguales por ser la estructura cuadrada

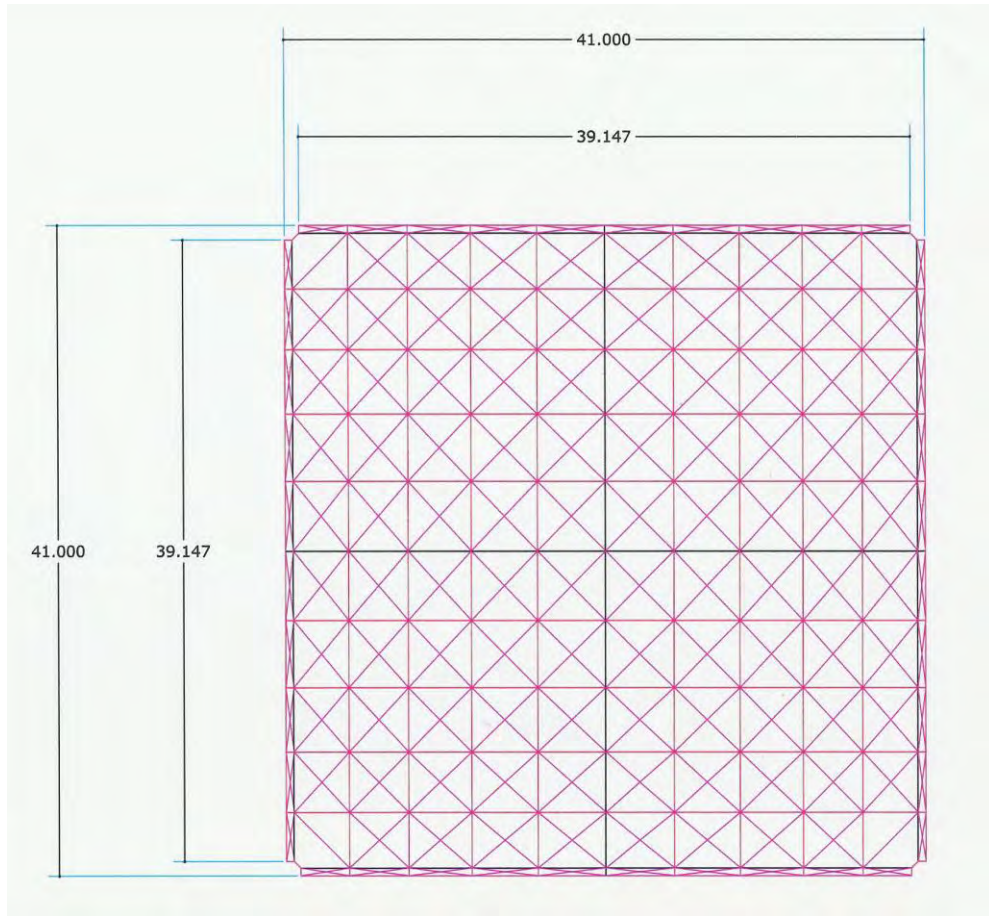
³Número de arcos transversales existentes según la división hecha en medio arco longitudinal (ver esquema en alzado)



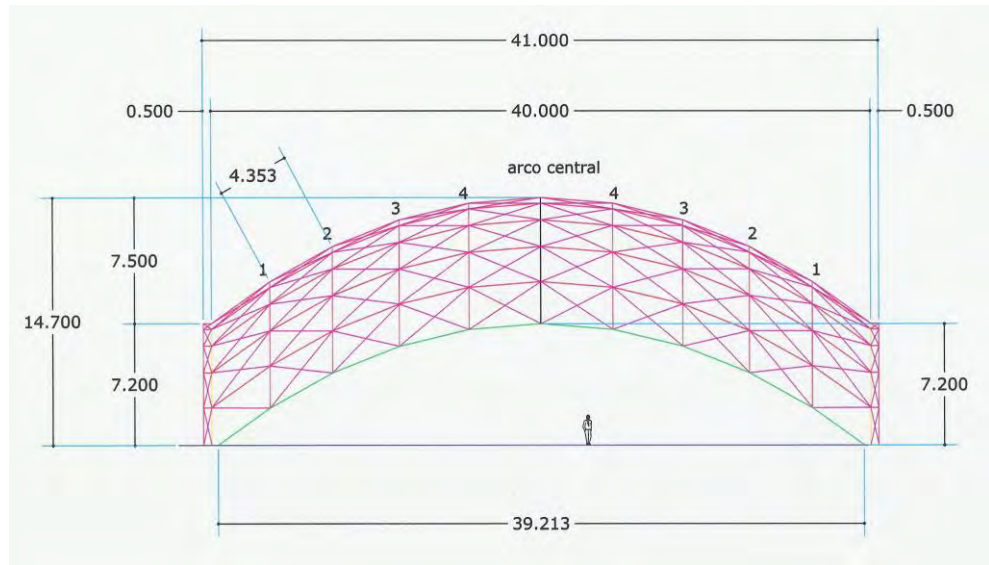
Planta, elementos primarios



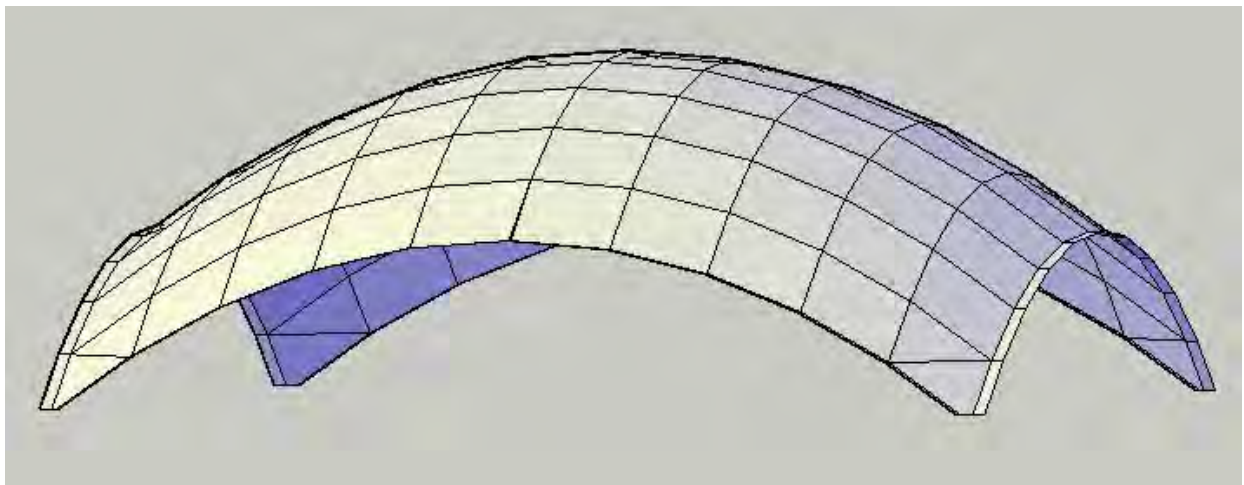
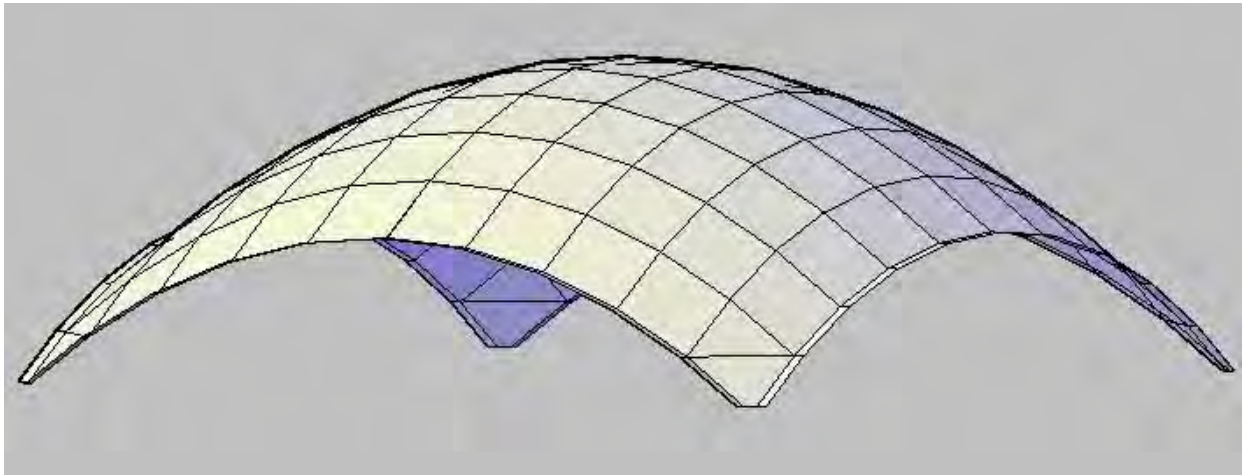
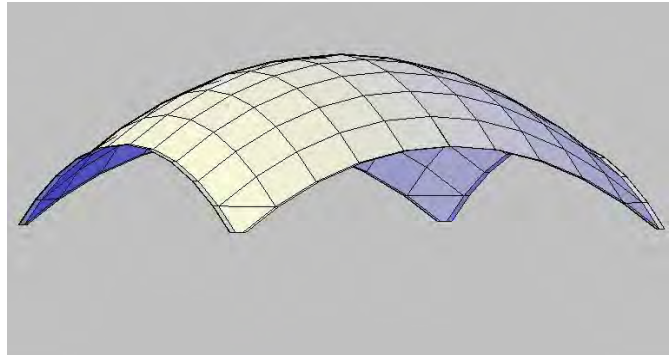
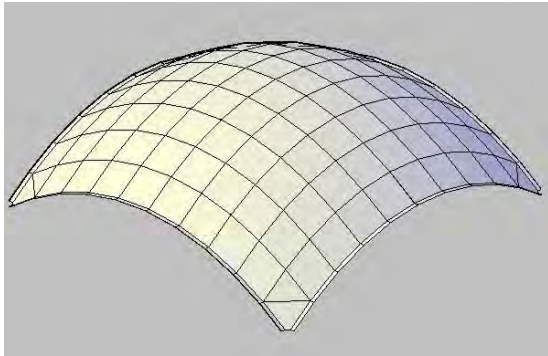
Alzado, elementos primarios

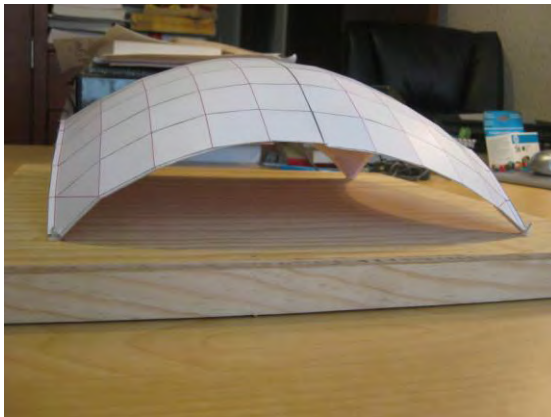
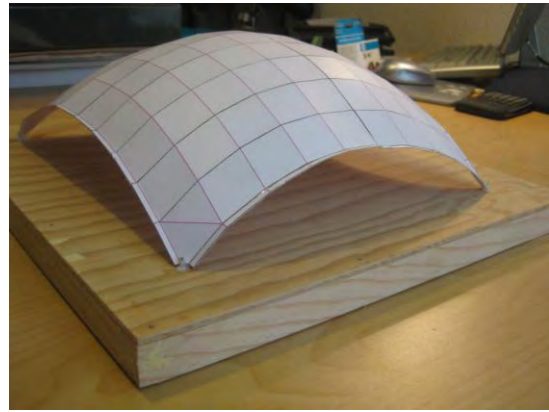
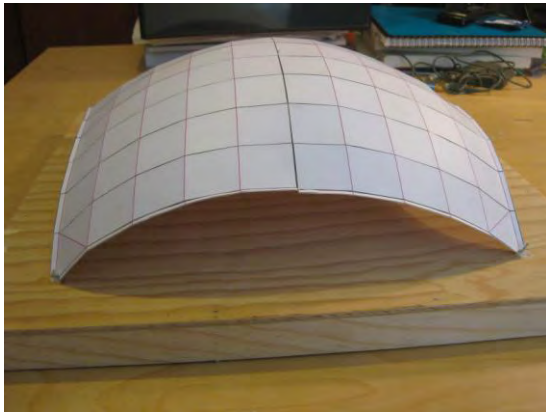
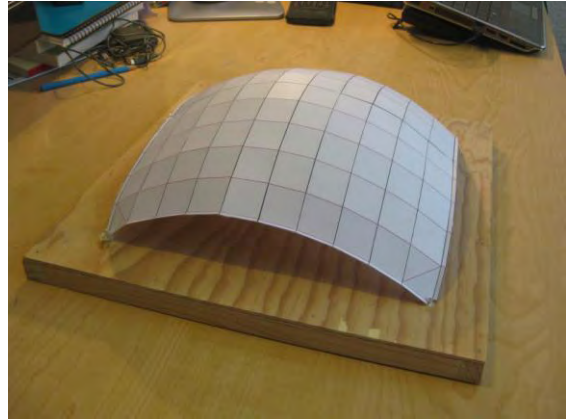
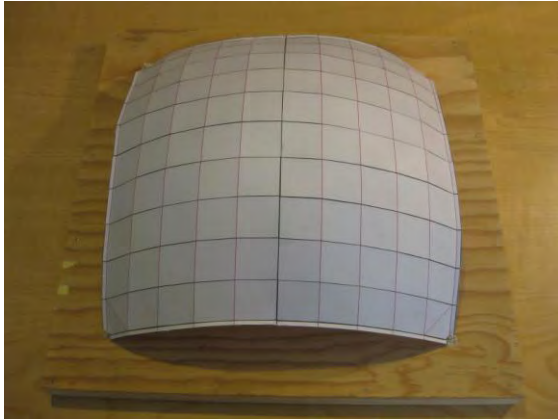


Planta, elementos primarios y secundarios

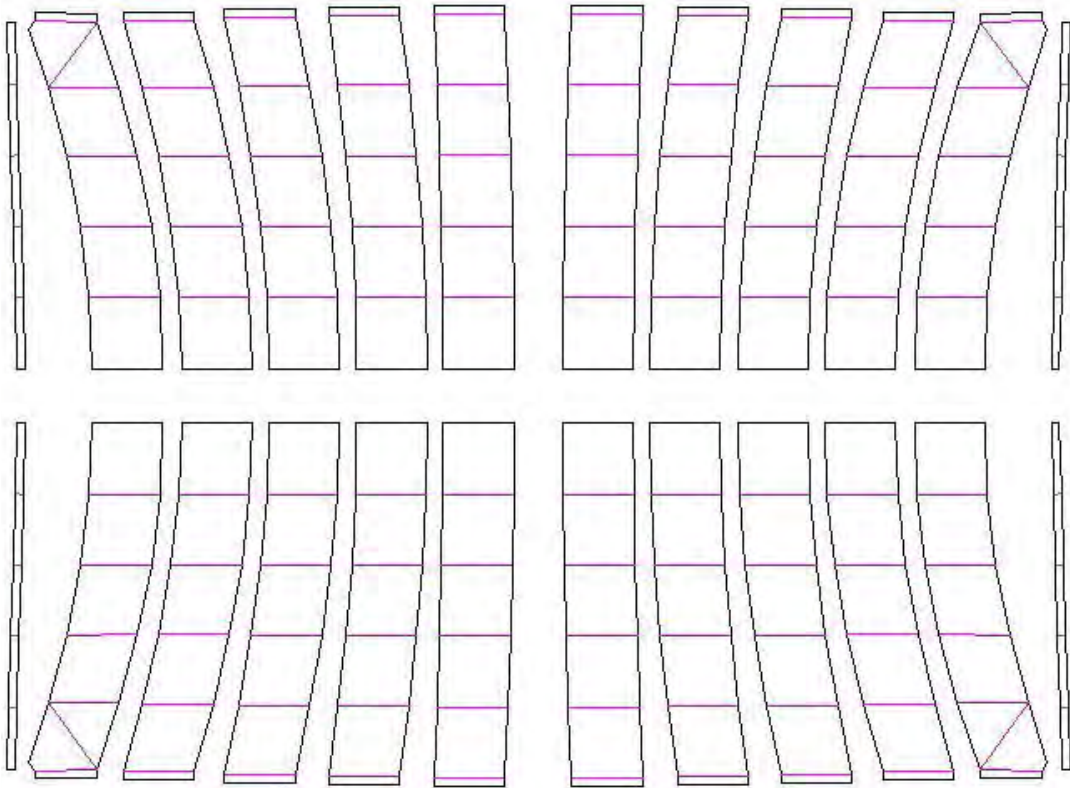


Alzado, elementos primarios y secundarios





Imágenes sobre vistas diversas de la maqueta de trabajo



Patrones de corte para la conformación de la cubierta de membrana de la propuesta 1

Propuesta 2

Esta propuesta, a partir de la revisión y derivación del catenaroide abierto en sus perímetros, se caracteriza por contar con un primer arco catenario en su perímetro cuya flecha se determinó sobre un factor o porcentaje de su longitud. Dicho factor es a su vez la mitad del factor tomado para la determinación de la flecha del arco central (para el caso de la flecha mencionada en el arco perimetral, no hace alusión a su flecha verdadera, pues habrá que ver que este arco se encuentra inclinado hacia adentro del área a cubrir sino a la flecha equivalente en su proyección vertical).

En otras palabras, si el factor por el que fue calculado la flecha del **arco central fue de "1" por la longitud** del claro que está cubriendo, para el arco perimetral, la flecha obtenida en su proyección vertical fue de su **longitud por un factor "0.5"**.

En cuanto a las catenarias intermedias entre el arco central y el arco perimetral, cuentan a su vez con diferentes flechas que van de la f_1 (flecha arco perimetral) a la $f_{\text{máx.}}$ (flecha arco central). Para este caso, la ecuación final que define su superficie es la siguiente:

$$Z = (C_1 * (\text{Cosh}(X_1/C_1) - 1)) + (C_{aux} * (\text{Cosh}(X_{aux}/C_{aux}) - 1))$$

Si bien la ecuación original del catenaroide pareciera mantenerse en condiciones muy semejantes, el segundo término corresponde a lo que hemos dado en llamar arco auxiliar o de soporte, el término por sí solo produce un valor Z_{aux} . Es decir:

$$Z_{aux} = C_{aux} * (\text{Cosh}(X_{aux}/C_{aux}) - 1); \text{ donde a su vez}$$

$$Z_{aux} = (Z_2 + Z_{\text{máx.}}) - Z_1$$

Lo que estas dos ecuaciones representan, es bastante sencillo y básicamente señalan la manera como se irían obteniendo los valores cambiantes que definen a cada una de las catenarias intermedias. Valores como la flecha y la longitud; el valor de "C" se obtiene de igual manera por iteraciones a partir de estos dos valores mencionados y sirve para ser aplicado en otras ecuaciones que ayuden a obtener datos adicionales de tales catenarias intermedias. Datos como la longitud real del arco ($\text{Long} = C * \text{Senoh}(X/C)$), ángulos tangenciales al punto de base de cada arco ($(\text{grados}) \text{Atan Senoh}(X/C)$) y separación real existente sobre la longitud de arco de las catenarias intermedias para la construcción de la retícula).

Asimismo, como podrá apreciarse, la inclinación del arco perimetral permite obtener una longitud mayor de los alerones, los cuales alcanzan su longitud máxima al centro del arco donde la inclinación es mayor.

Cálculo general de la propuesta 2

Lado corto (inicio)	40.000
Lado largo (inicio)	40.000
Lado corto total (con alerones)	40.400
Lado largo total (con alerones)	40.400
H. máx del domo	14.700
Factor de proporción	0.250
H. para desplante sobre NPT	0.000
Remetimiento por alerón corto	0.400
Remetimiento por alerón largo	0.400
Increment. por canalón en alerón corto	0.200
Increment. por canalón en alerón largo	0.200
Long. Perim. Lado corto recortado	39.200
Long. Perim. Lado largo recortado	39.200
Long. Central lado corto	34.120
Long. Central lado largo	34.120
Flecha arco perim. corto (Proy. Planta)	2.940
Flecha arco perim. largo (Proy. Planta)	2.940
Flecha arco perim. corto (Proy. alzado)	4.900
Flecha arco perim. Largo (Proy. alzado)	4.900
Flecha arco central corto	9.800
Flecha arco central largo	9.800
Long. 1/2 arco central corto	20.366
Distancia al 1er arco	1.000
Distancia aprox. Entre los demás arcos	4.000
Núm. Del resto de divisiones	4.000
Núm. Del resto de piezas	3.000
Distancia final entre los demás arcos	4.842

1/2 Arco perimetral proyección en planta

Valores	
f= y=	2.940
x=	19.600
P=	65.818
Long Máx=	19.891
Ang. ° Tang base	16.816

1/2 Arco a2

Valores	
f= y=	8.194
x=	17.696
P=	20.344
Long. Máx =	20.014
Ang. ° Tang base	44.531

1/2 Arco perimetral proyección en alzado

Valores	
f= y=	4.900
x=	19.600
P=	39.990
Long. Máx =	20.394
Ang. ° Tang base	27.021

1/2 Arco a3

Valores	
f= y=	6.413
x=	18.353
P=	27.270
Long. Máx =	19.770
Ang. ° Tang base	35.942

1/2 Arco central

Valores	
f= y=	9.800
x=	17.060
P=	16.262
Long. Máx =	20.366
Ang. ° Tang base	51.393

1/2 Arco a4

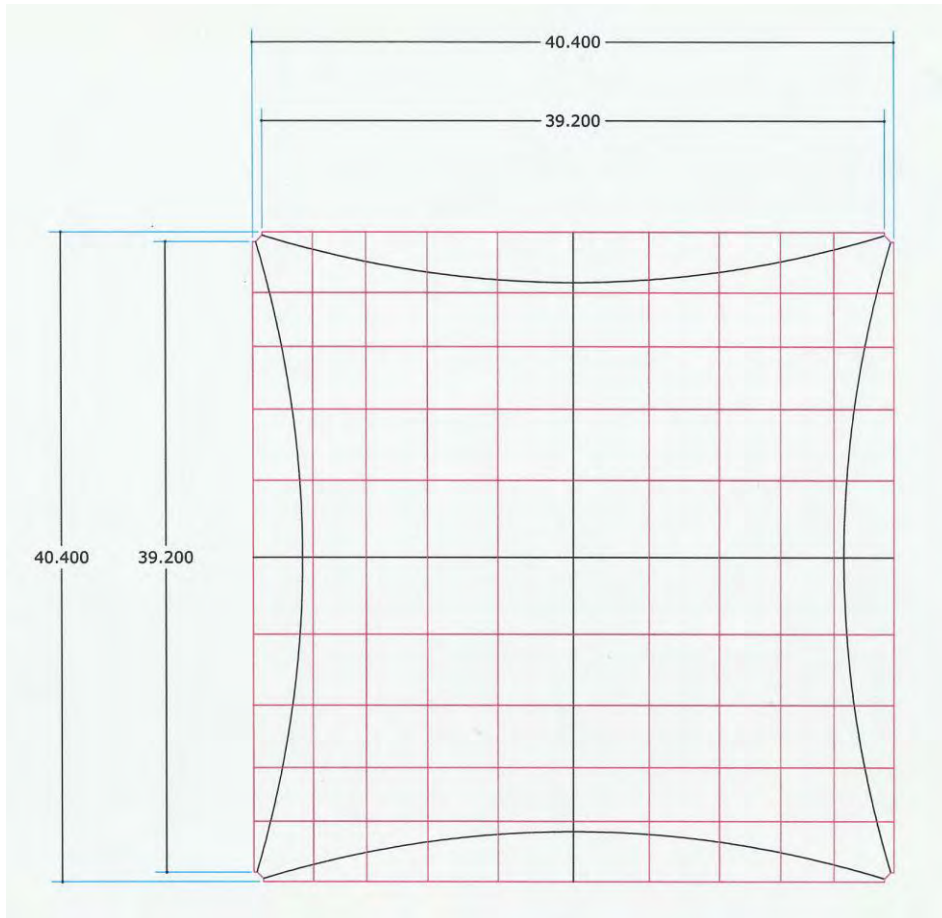
Valores	
f= y=	4.195
x=	19.113
P=	44.223
Long. Máx =	19.713
Ang. ° Tang base	24.026

1/2 Arco a1

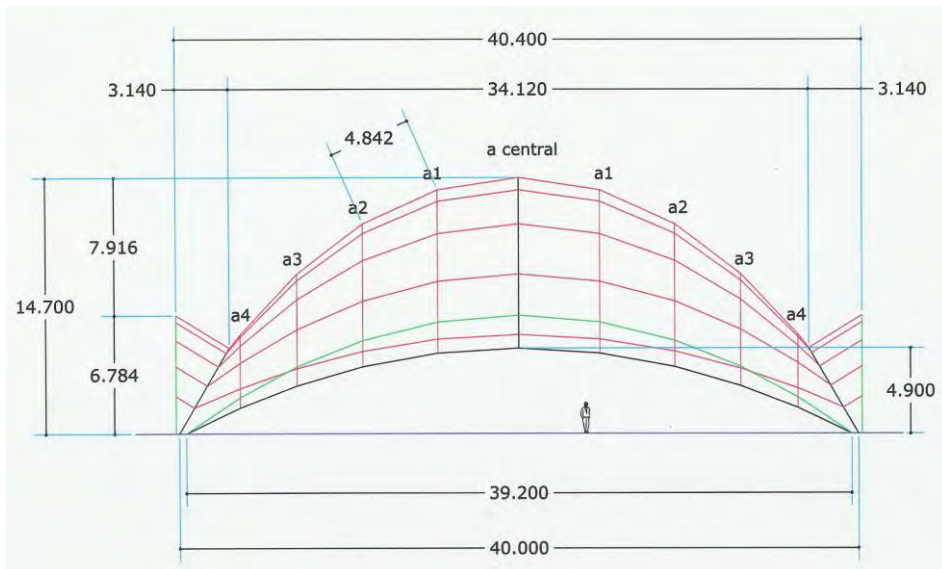
Valores	
f= y=	9.379
x=	17.231
P=	17.198
Long. Máx =	20.263
Ang. ° Tang base	49.678

1/2 Arco de canalón

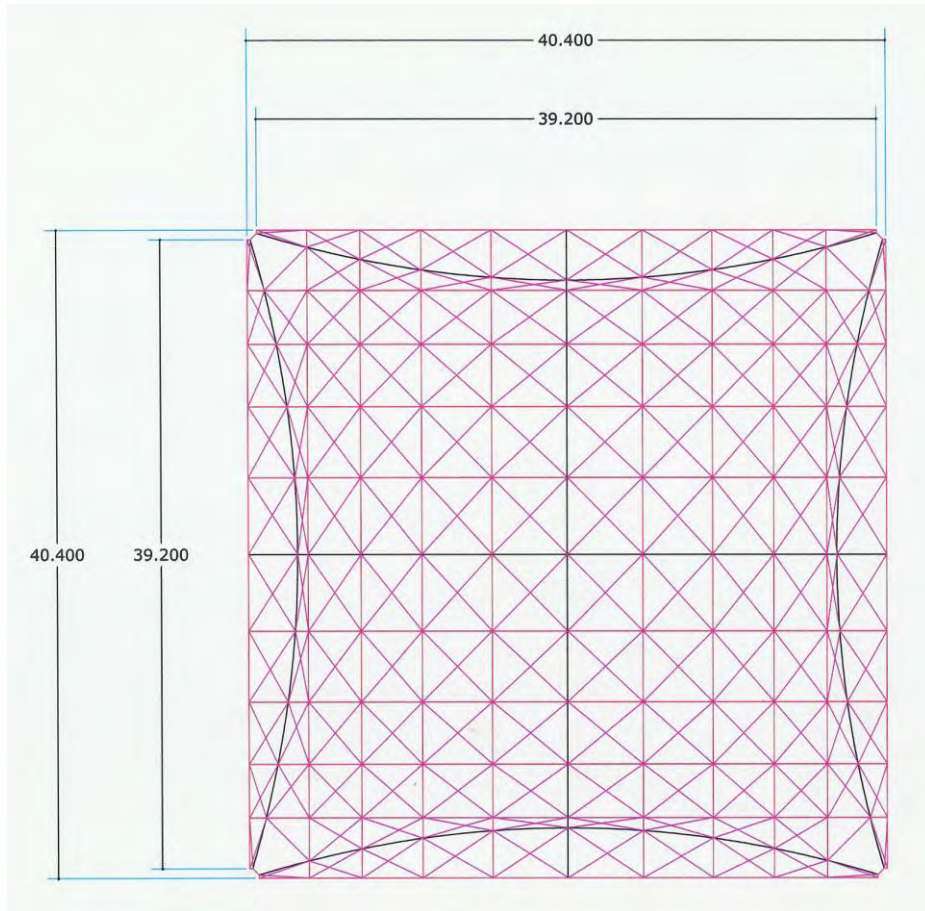
Valores	
f= y=	6.784
x=	19.600
P=	29.379
Long. Máx =	21.087
Ang. ° Tang base	35.669



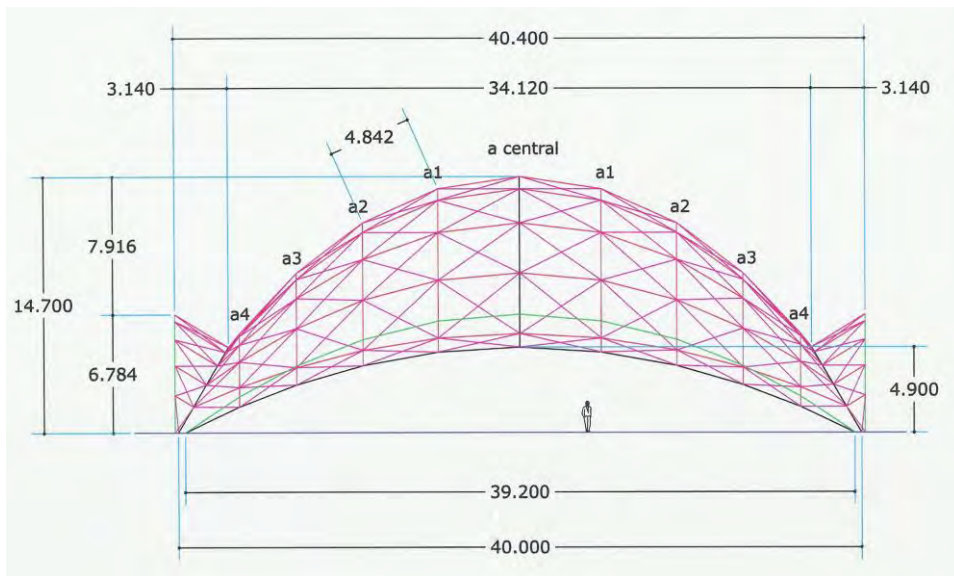
Planta, elementos primarios



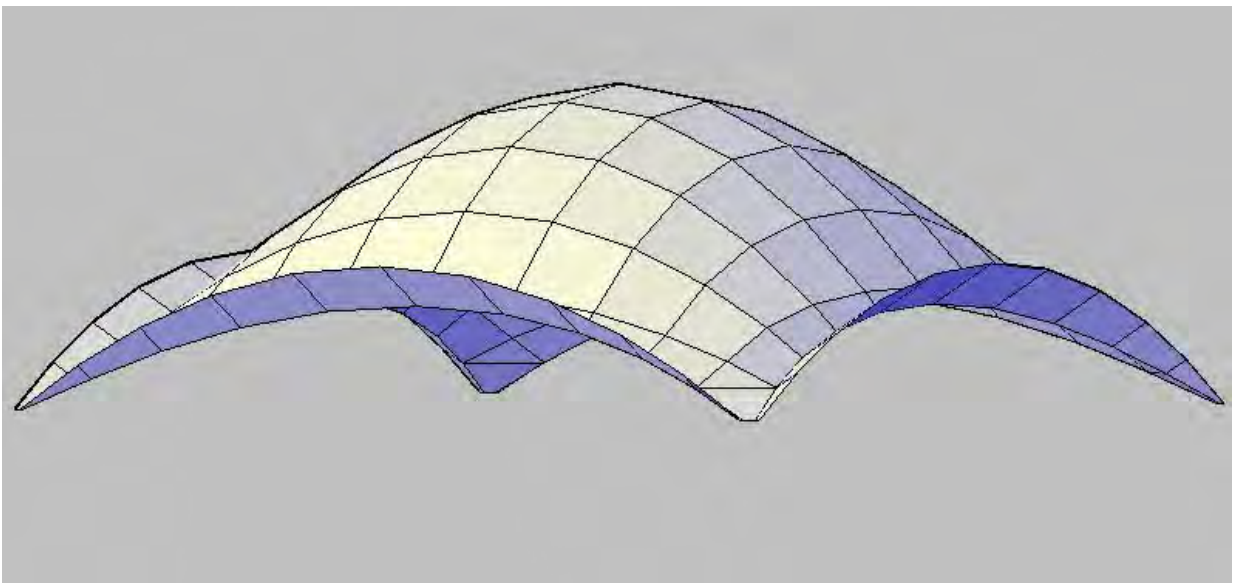
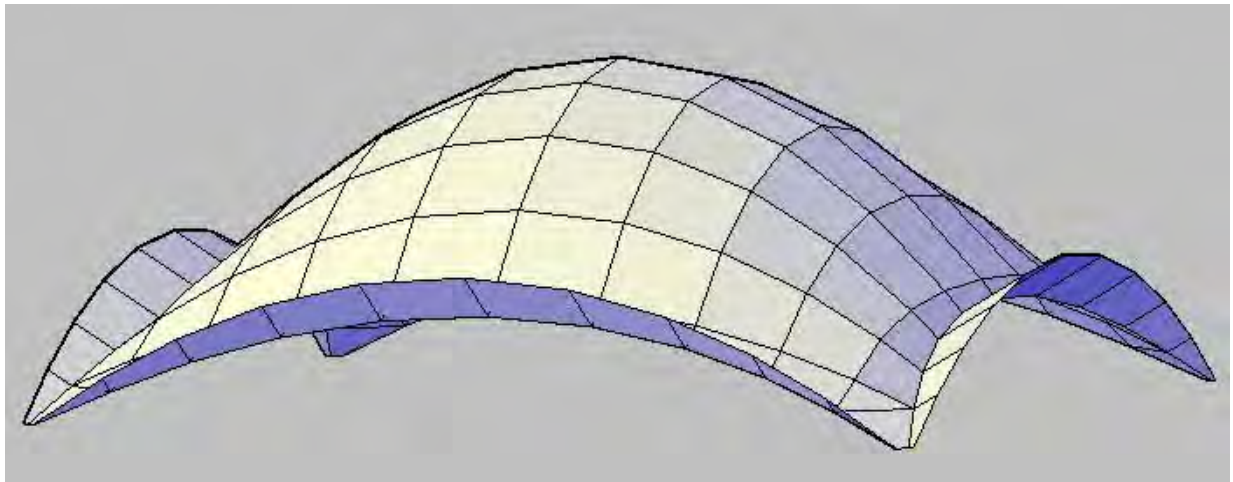
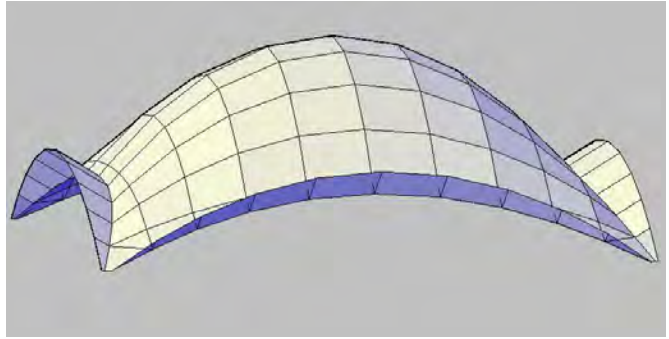
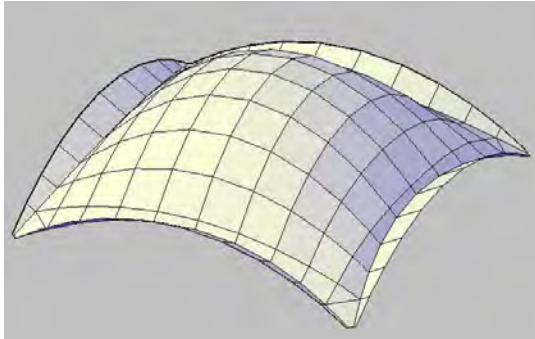
Alzado, elementos primarios

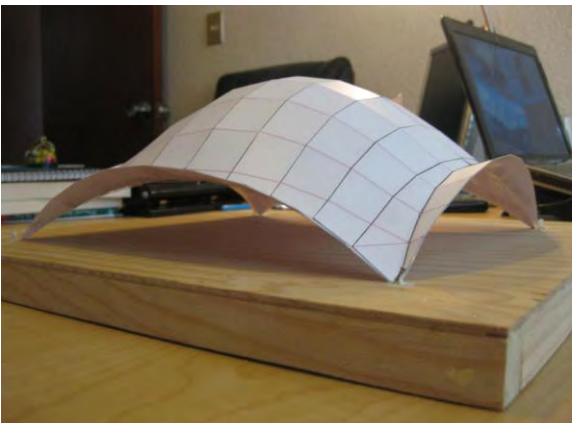
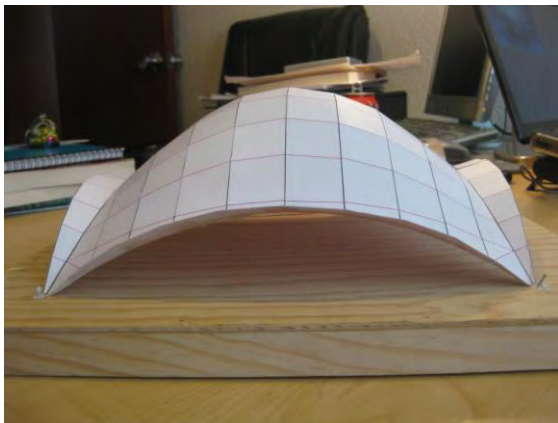
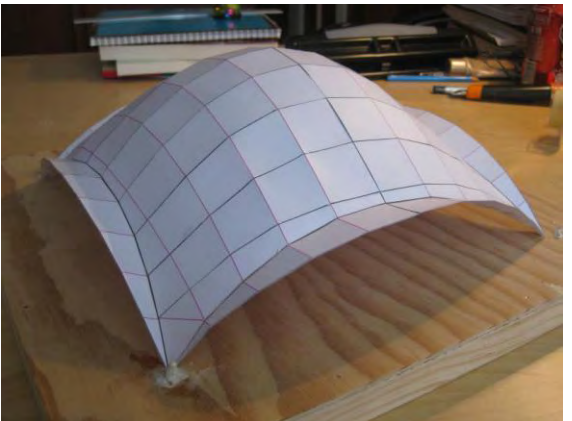
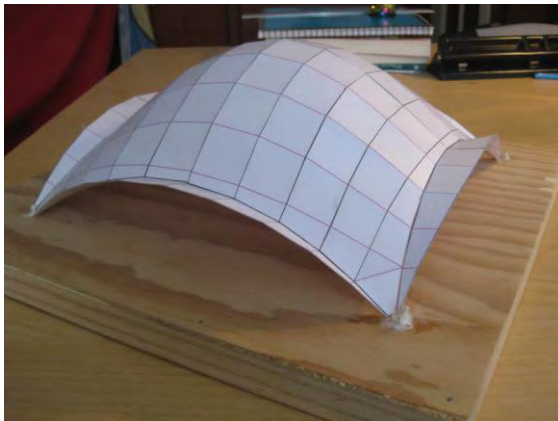
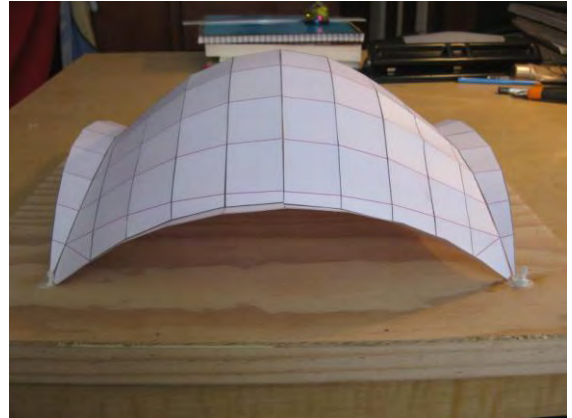
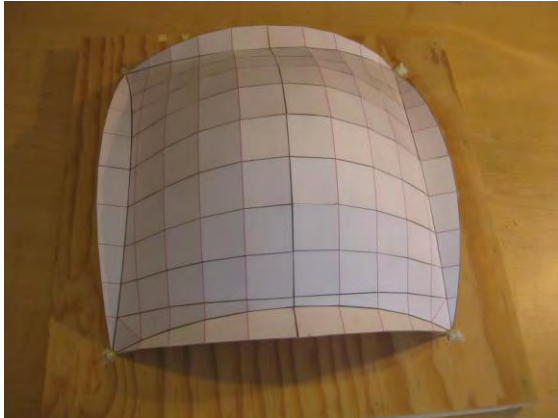


Planta, elementos primarios y secundarios

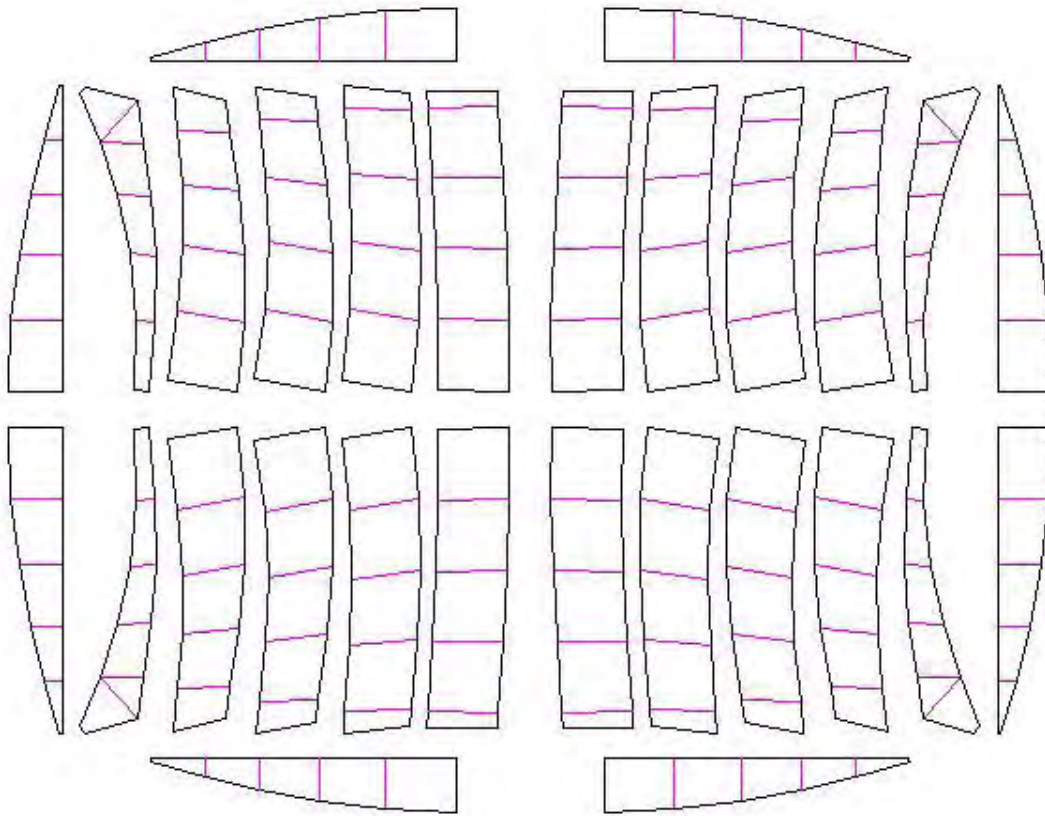


Alzado, elementos primarios y secundarios





Imágenes sobre vistas diversas de la maqueta de trabajo



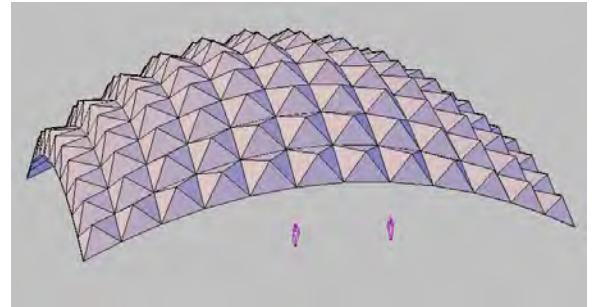
Patrones de corte para la conformación de la cubierta de membrana de la propuesta 2

Como un breve paréntesis, vislumbrando una cierta línea de fuga, bien podría mencionarse que a partir del entramado base presentado, existiría la posibilidad de cubrir los cuadros generados de diversas maneras. Así por ejemplo, con algunos elementos adicionales y otros eliminados (aleros) se presenta un modelo que pareciera semejante a los realizados por Félix Candela en asociación con Emilio Pérez Piñero, como es el caso del proyecto para el velódromo de Anoeta en 1972 ó sobre el mismo palacio de los deportes realizado por Félix Candela (a partir del consejo de Pérez Piñero) en 1968.⁵¹

⁵¹ Cabe recalcar que la similitud se basa únicamente en la opción de presentar elementos adicionales sobre el entramado base, no en la conformación del entramado ni en el tipo de elementos adicionales.



Palacio de los deportes



Modelo mencionado

Propuesta 3

Para la tercera propuesta presentada, adicionalmente se integraron algunas ideas generadas a partir de los experimentos realizados en base a las suposiciones de Heinz Isler que fueron ya expuestas en una sección anterior. Las reinterpretaciones de tales ideas son dadas para conseguir a su vez adecuarlas o acoplarlas con las ideas que se venían ya manejando.

De ésta pretendida combinación de conceptos se llega a determinar los nuevos (y antiguos) preceptos o guías para configurar el último modelo expuesto (cabe mencionar que varios de estos preceptos, aunque en su momento no fueron del todo indicados, también fueron incluidos para el diseño de la propuesta 1 y sobretodo en la propuesta 2). Quedando todo resumido de la siguiente manera:

1. Todas las curvas presentadas para la conformación del tercer modelo son igualmente catenarias.
2. Los arcos catenarios que conforman el modelo son de flechas "Y" y proyecciones horizontales "X" variables, siendo las de los extremos las que cuentan con los valores más altos para ir

decreciendo conforme se acercan al centro del modelo en ambos sentidos.⁵²

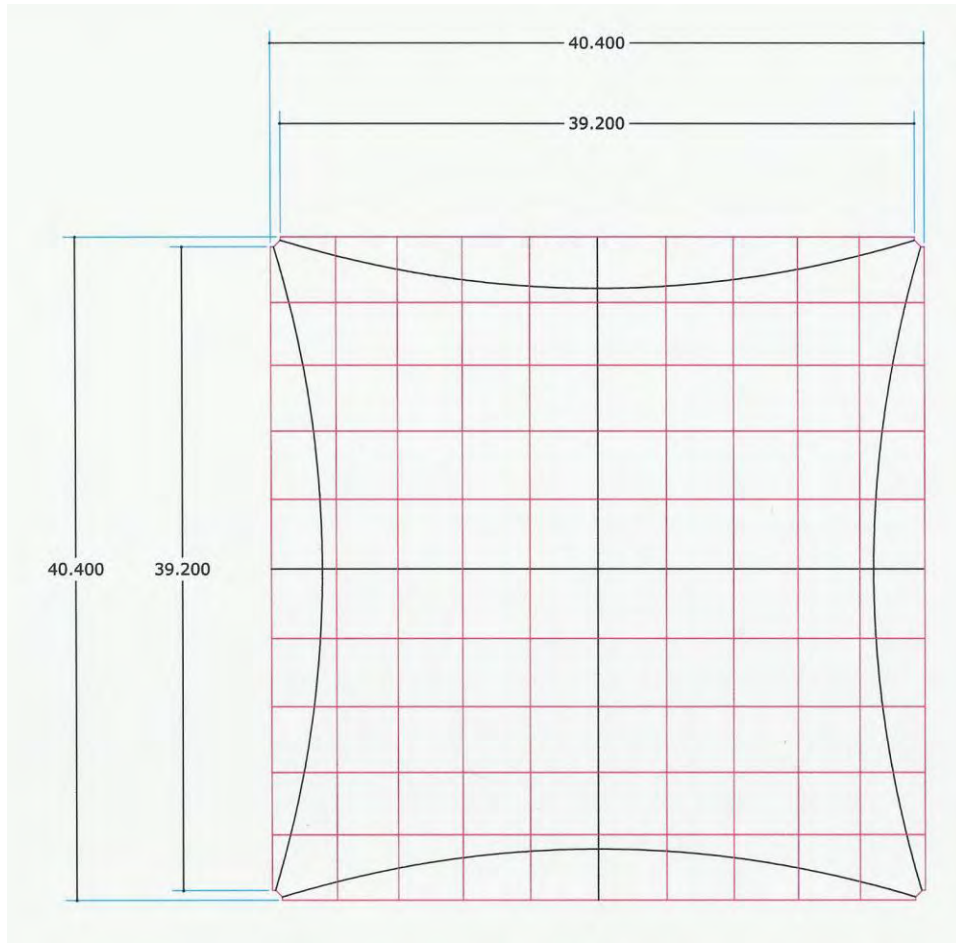
3. Tanto las flechas máximas (perímetros) como las mínimas (centros) son obtenidas aplicando constantes o factores de proporción, previamente establecidos, a los claros que libran (Factor de proporción=1 en los arcos perimetrales y para el arco central el factor de proporción= 0.5 sobre la longitud en planta de la estructura presentada). Los arcos intermedios a estos límites funcionan como elementos compensatorios o de transición para **pasar de una flecha " $f_{máx}$ " a una flecha " f_1 " de una longitud " $X_{máx}$ " a una longitud " X_1 "** (ya en el caso de la propuesta 2 se puntualizó la manera de obtener tales valores).
4. Todos los arcos, salvo los perimetrales, se mantienen sobre un plano "XZ" y "YZ" según sea el sentido que se trate. Por lo que pueden considerarse como perpendiculares al plano "XY" (suelo).
5. La inclinación de los arcos perimetrales se obtienen sobre la aplicación de la misma constante o factor de proporción previamente establecida.
6. El ángulo de inclinación de los alerones es 90° con respecto al plano de inclinación de los arcos perimetrales (de igual manera se utilizó para la propuesta 1 y 2, aunque esta indicación en los apartados correspondientes hayan sido omitida).
7. **El modelo presenta ejes de simetría sobre los planos "XZ" y "YZ"** (igual que en la propuesta 1 y 2).
8. Las separaciones de los arcos que conforman la retícula del modelo, salvo la distancia del primer arco a la perimetral, es

⁵² Similar a lo mencionado para el proyecto de las canchas de tenis de Heimberg, realizado por Isler en 1979.

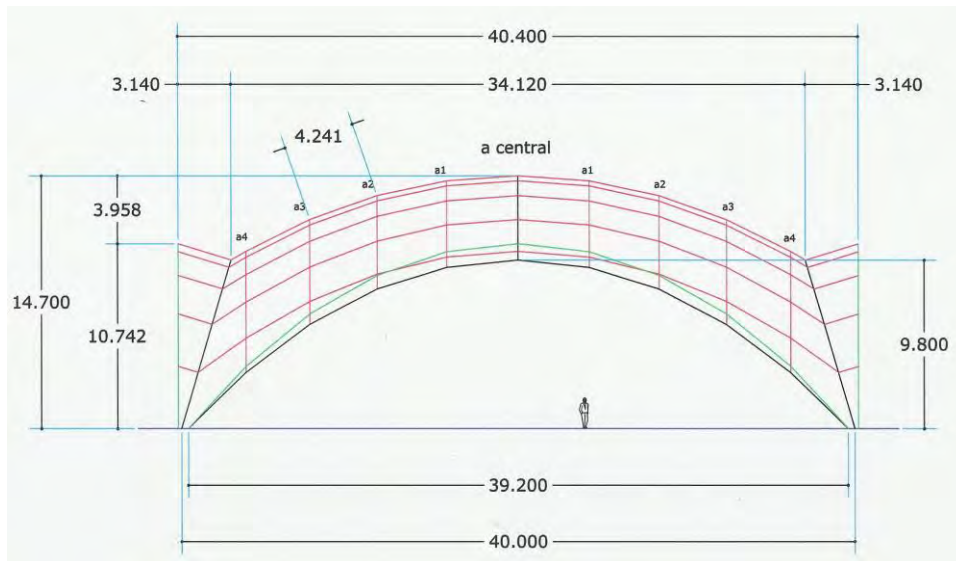
constante y fue obtenida al dividirse en parte iguales la longitud real del arco central (el cálculo de dicha longitud se obtuvo a partir de la siguiente ecuación ($Long = C * \text{Senoh} (X/C)$)).

9. La distancia del primer arco al arco perimetral, para este caso, es de 1m. el valor asignado es relativamente arbitrario. Sin embargo, se determinó suponiendo que, debido a que las cargas se irían transmitiendo a lo largo de los arcos e irían incrementándose conforme se acercarán a sus términos, sería necesario contar con un mayor volumen de acero en las áreas de los extremos. Esto se consigue al tener una mayor cercanía entre dichos arcos (de igual manera se aplicó para el diseño de la retícula de la propuesta 2).
10. Parte de la rigidez de la estructura, como la confiabilidad de un comportamiento estructural homogéneo se obtiene por la inclusión de elementos secundarios que funcionen precisamente como rigidizadores en cada uno de los cuadros que forman la retícula (adicionalmente da soporte al material con que son recubiertas, en este caso; membrana).
11. Sobre los experimentos realizados por Isler, sobre superficies⁵³ similares (haciendo referencia al experimento de la tela colgada bajo su propio peso) se identificó la necesidad de plantear ciertos elementos que proporcionen rigidez en los extremos o bordes perimetrales de tales y esto puede lograrse por la adición de elementos curvos que se conectan, con un ángulo determinado, al cascarón principal y que por tanto no pueden ser considerados como una parte integral a la superficie total. Función que se presume puedan desarrollar los alerones, desde la primera propuesta, ya mostrados.

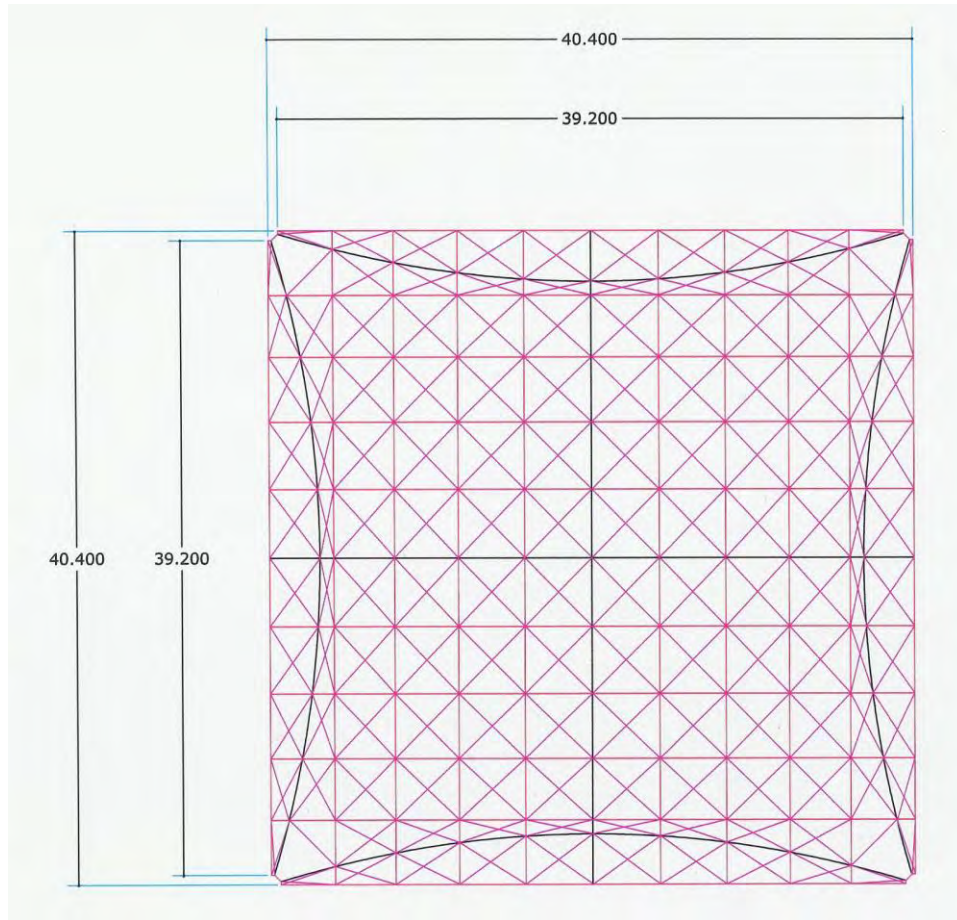
⁵³ El caso del cascarón de Wyss Garden Center en Solothurn, construido en 1962; constituye esta una superficie originada por la traslación de semejantes curvas en los dos sentidos.



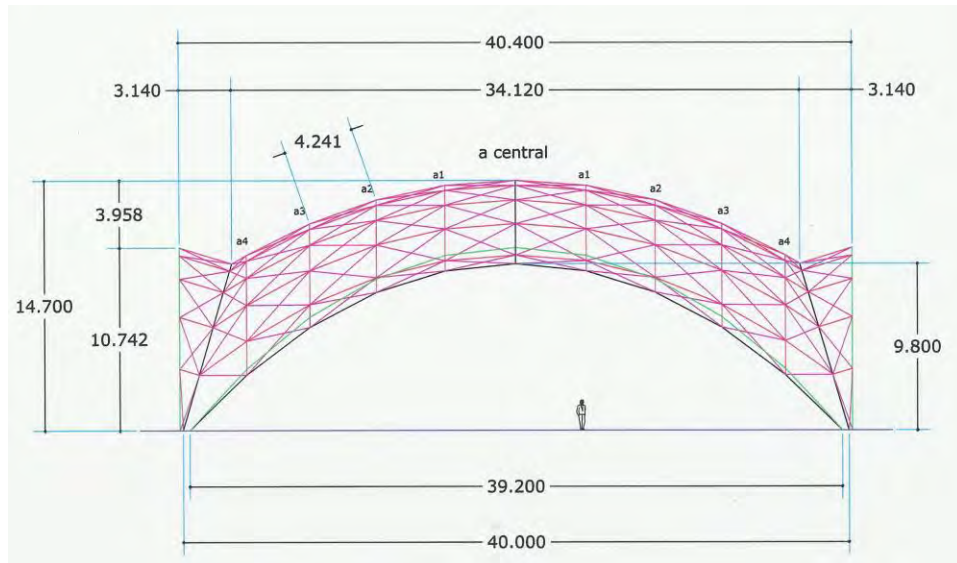
Planta, elementos primarios



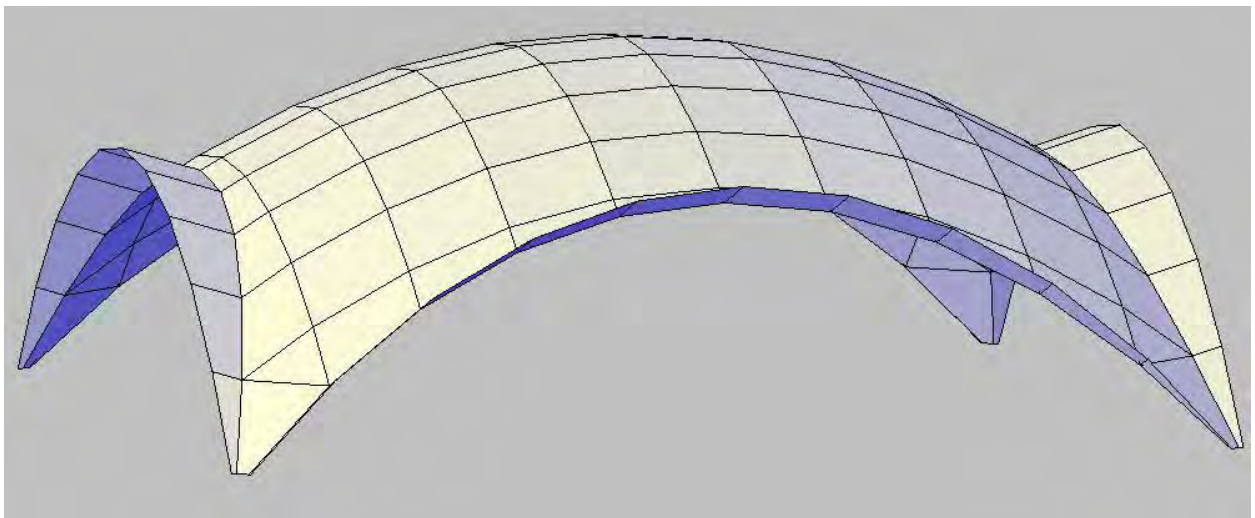
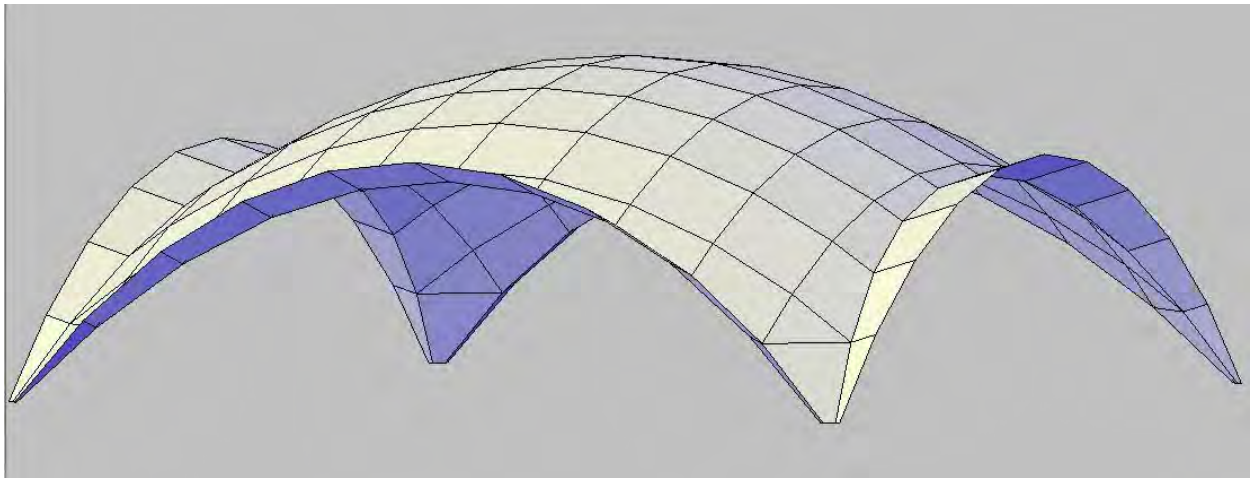
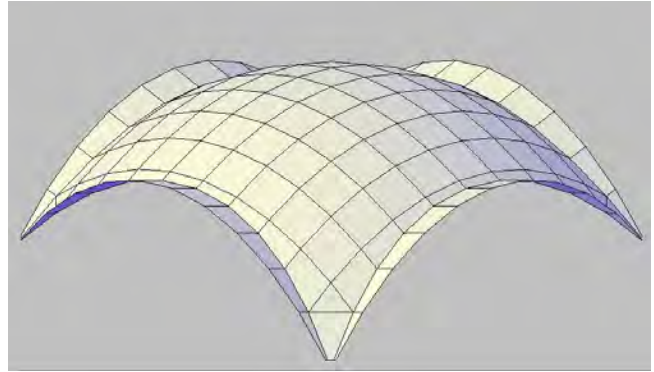
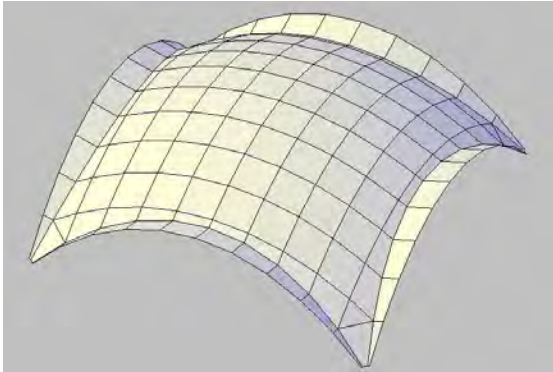
Alzado, elementos primarios

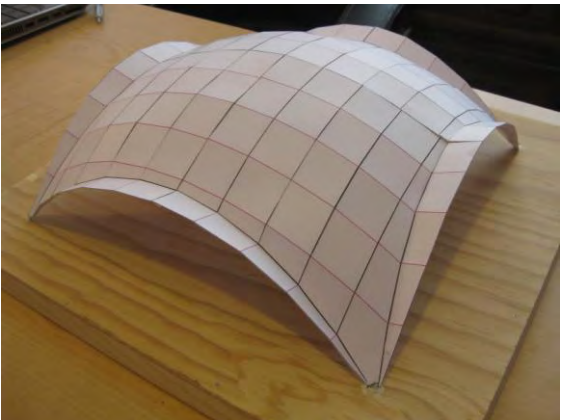
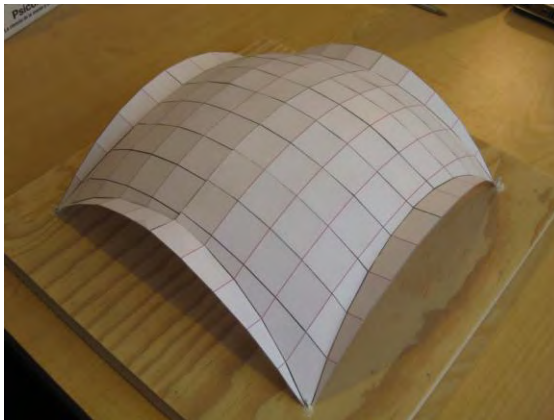
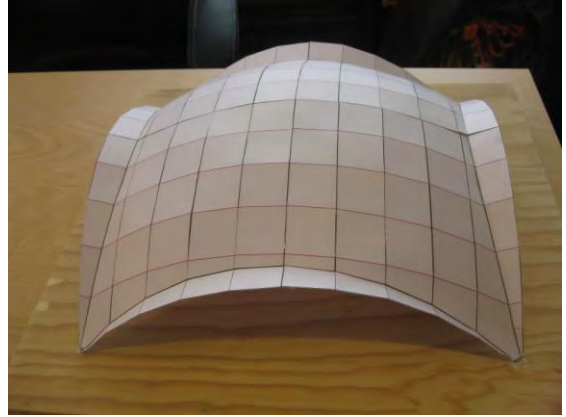


Planta, elementos primarios y secundarios

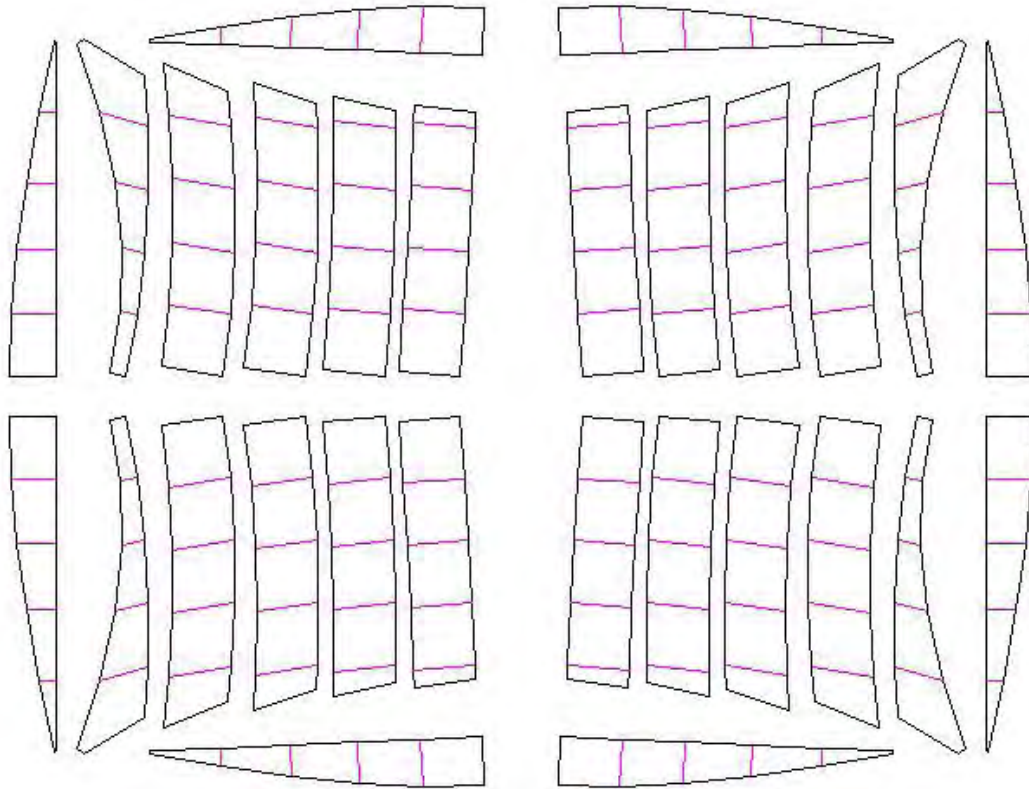


Alzado, elementos primarios y secundarios





Imágenes sobre vistas diversas de la maqueta de trabajo



Patrones de corte para la conformación de la cubierta de membrana de la propuesta 3

Análisis estructural

Elementos considerados para el análisis estructural

"Lo que necesitamos es una estructura, no un análisis."

H. CROSS

Si bien anteriormente se había ya comentado, vale la pena recordar que, primeramente, la cantidad de arcos empleados en la formación de las retículas de las tres propuestas presentadas es el mismo. Motivo por el cual, pese a evidenciarse pequeñas variaciones

(tanto en las longitudes de los arcos como piezas aisladas, como en las distancias inter-reticulares generadas en ambos sentidos) por las geometrías elegidas, se producen resultados muy similares en cuanto al análisis de sus pesos propios. Mismos que al final fueron redondeados a un cierto valor fijo y empleado en cada una de las propuestas estudiadas.

En otras palabras, el peso propio de cada una de las tres propuestas, pese a las diferencias geométricas existentes en cuanto al desarrollo de sus superficies y en el acomodo que se da a los arcos catenarios para la formación de la retícula como punto de partida para el análisis que habrá de realizarse, es el mismo. Esto según un intuitivo criterio sobre los diámetros y cedulas de las posibles secciones que pudieran ser adecuadas (pre- dimensionamiento inicial).

Una vez realizada ésta primera exploración sobre la posible composición de cada una de las estructuras propuestas y determinado un primer valor sobre su peso probable propio, se procedió a la determinación del grupo al que esta construcción, como prototipo, pudiera pertenecer.

Según la clasificación de construcciones referida en el **"Reglamento de construcciones para el Distrito Federal"** (RCDF) en su Art. 139; las cubiertas estudiadas pueden incluirse dentro del grupo B. Subgrupo B1. Sobre este artículo, dentro de lo más relevante, se hace mención a lo siguiente⁵⁴:

"Edificaciones que tengan locales de reunión que puedan alojar a más de 200 personas, templos, salas de espectáculos, así como....."

Asimismo, en la parte correspondiente a las **"Normas Técnicas complementarias"**, se establece, según el tipo de construcción referido, un factor de carga de 1.4 que se aplicará sobre las combinaciones que incluyan acciones permanentes y variables, como es el caso de la combinación formada por las cargas muertas y la carga viva (40kg/m²

⁵⁴ Habría que recordar que la cubierta original, motivo de toda esta revisión, fue realizada para cubrir un teatro al aire libre dentro de un parque.

como carga viva máxima y 20kg/m² para una carga viva reducida, ya que son cubiertas con una pendiente mayor de 5%) y un factor de carga de 1.1 para la combinación de cargas permanentes, variables y accidentales como es la combinación formada por las cargas muertas, carga viva reducida, presión y succión.

En este punto es importante mencionar que, para los análisis realizados, el factor de carga de 1.4 fue omitido. La razón principal de esto radica en que las consideraciones hechas a este respecto por el RCDF están basadas en el estudio de estructuras de forma convencional. No para estructuras ligeras de este tipo. Aunado a esto, se ha de recordar, el material empleado para cubrir la retícula (membrana en poliéster y PVC) debido a sus propiedades, funciona como una especie de dispositivo de seguridad. Un tipo de fusible que al verse incrementadas las solicitaciones de la estructura, puede llegar a rasgarse, liberando a la estructuras de trabajos adicionales. Y es que el tipo de membrana empleada, a diferencia del requerido para una velaria, tiene un desempeño mínimo. Se encuentra en un estado estructural pasivo. Únicamente se emplea para cubrir la estructura, por lo que no requiere contar con la capacidad de tomar los posibles esfuerzos de tracción que lleguen a presentarse. Su estado límite es por mucho inferior o menor al necesario para trabajar en una velaria.

En lo referente al diseño por viento; de las mismas "*Normas técnicas complementarias*" del RCDF, se obtuvieron los siguientes elementos con los que se revisaron (presión y succión) las diferentes estructuras propuestas.

CONCEPTO	VALOR	UNIDAD
VD= FTR F_αVR		
$F_{\alpha} = (z/10)^n$ si $10m < z < \delta$		
Tipo de terreno	R3	
n=	0.156	

$\delta=$	390.000	
donde z=	14.700	
$F\alpha=$	1.062	
VR=	36.000	m/s
FTR(T3 y R3)=	0.880	
VD=	33.642	m/s
CP=	-0.700	
$Pz= 0.048 * Cp * Vd^2$		
Pz=	-38.029	Kg/m²

Precisiones sobre los análisis realizados

El análisis estructural fue llevado a cabo sobre el planteamiento de escenarios diferentes. Esto en cuanto al comportamiento, por separado, de cada una de las estructuras propuestas, de la forma, secciones y propiedades del material (acero) que fueron primeramente contemplados, abriendo, adicionalmente, la opción de sugerencias para una posible optimización en cuanto a las diferentes secciones que en distintas partes pudieran ser más convenientes.

Estos escenarios, para las revisiones mencionadas, fueron los siguientes:

Escenario	CONCEPTO
1	Carga Muerta
2	Carga Viva Máxima
3	Carga Viva Reducida
4	Viento (presión)
5	Viento (succión)

6	Servicio (carga M. + carga V. Máx.)
7	Falla presión (carga M. + carga V. Red. + presión)
8	Falla succión (carga M. + succión)
9	Falla presión y succión (carga M. + presión + succión)
10	Falla final (carga M. + carga V. Red. + presión + succión)*F.C (1.1)

En cada caso se aplicaron, sobre cada uno de los nodos componentes de la retícula de la estructura en ese momento analizada, las partes proporcionales a las áreas tributarias correspondientes.

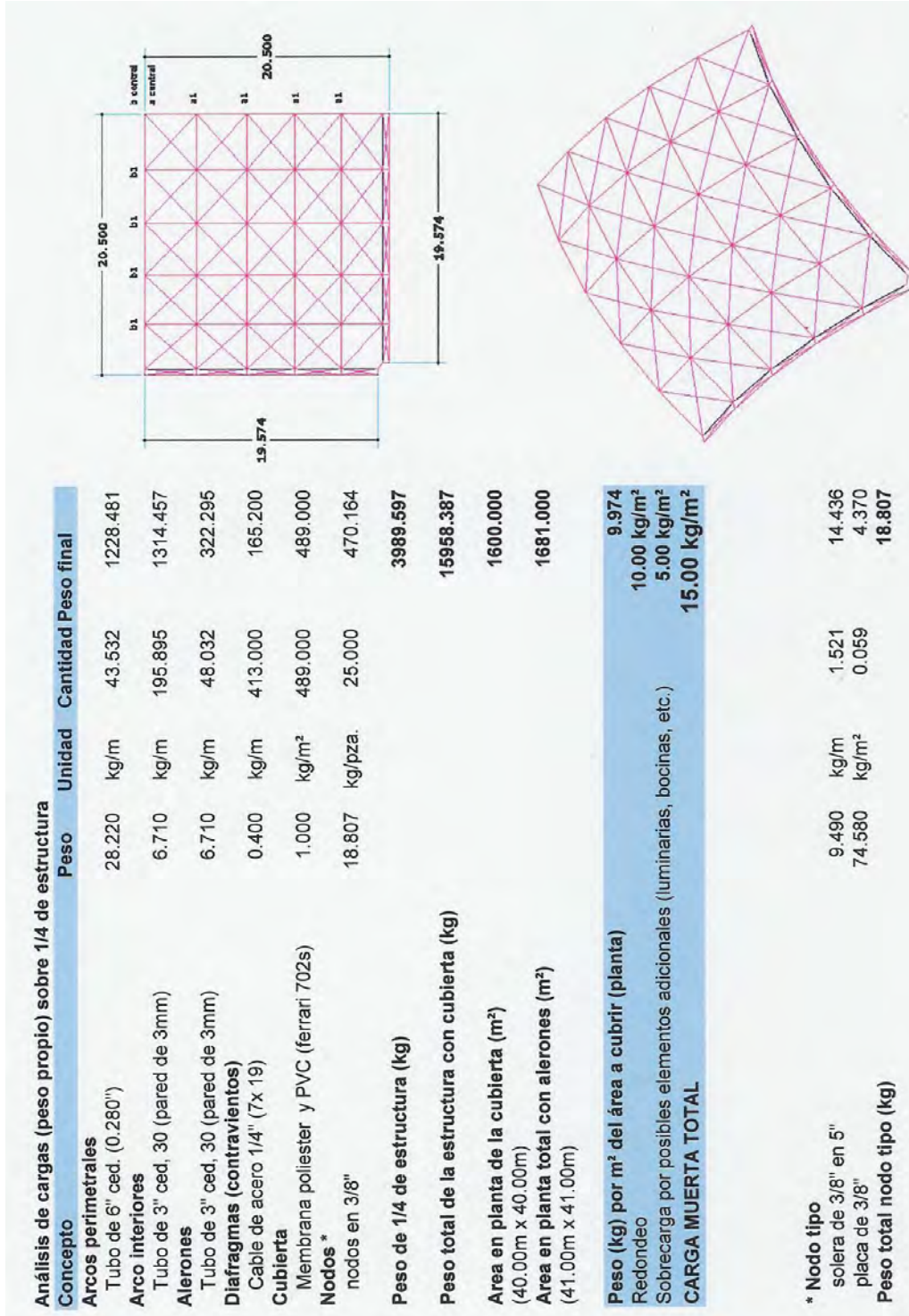
Para la ejecución de cada una de las corridas hechas, dentro del programa de cálculo STAAD 3, se solicitó adicionalmente las consideraciones pertinentes según las principales propiedades del material y de las secciones sugeridas. Propiedades tales como densidad, módulo de elasticidad y módulo de Poisson. Revisión en el código AISC, optimización sobre todos los elementos examinados, restricción a las piezas diagonales para un trabajo exclusivo a tracción y cuantificación del material optimizado. Las condiciones de apoyo se dieron en todo momento sobre un empotramiento en las cuatro esquinas.

Sobre los resultados que llegan a obtenerse, en cuanto al tipo y a la cantidad de material requerido para cada una de las estructuras analizadas, habría que comentar que en la realidad, tantas secciones propuestas resulta ser un inconveniente. No es sencillo pensar que sobre un solo arco existan 3 ó 4 tipos de tubos de diámetros y cédulas diferentes. Sobre un caso práctico, lo más probable es que se uniformice toda la construcción del arco a un solo tipo de tubo, con lo que se alteran los resultados primeros obtenidos.

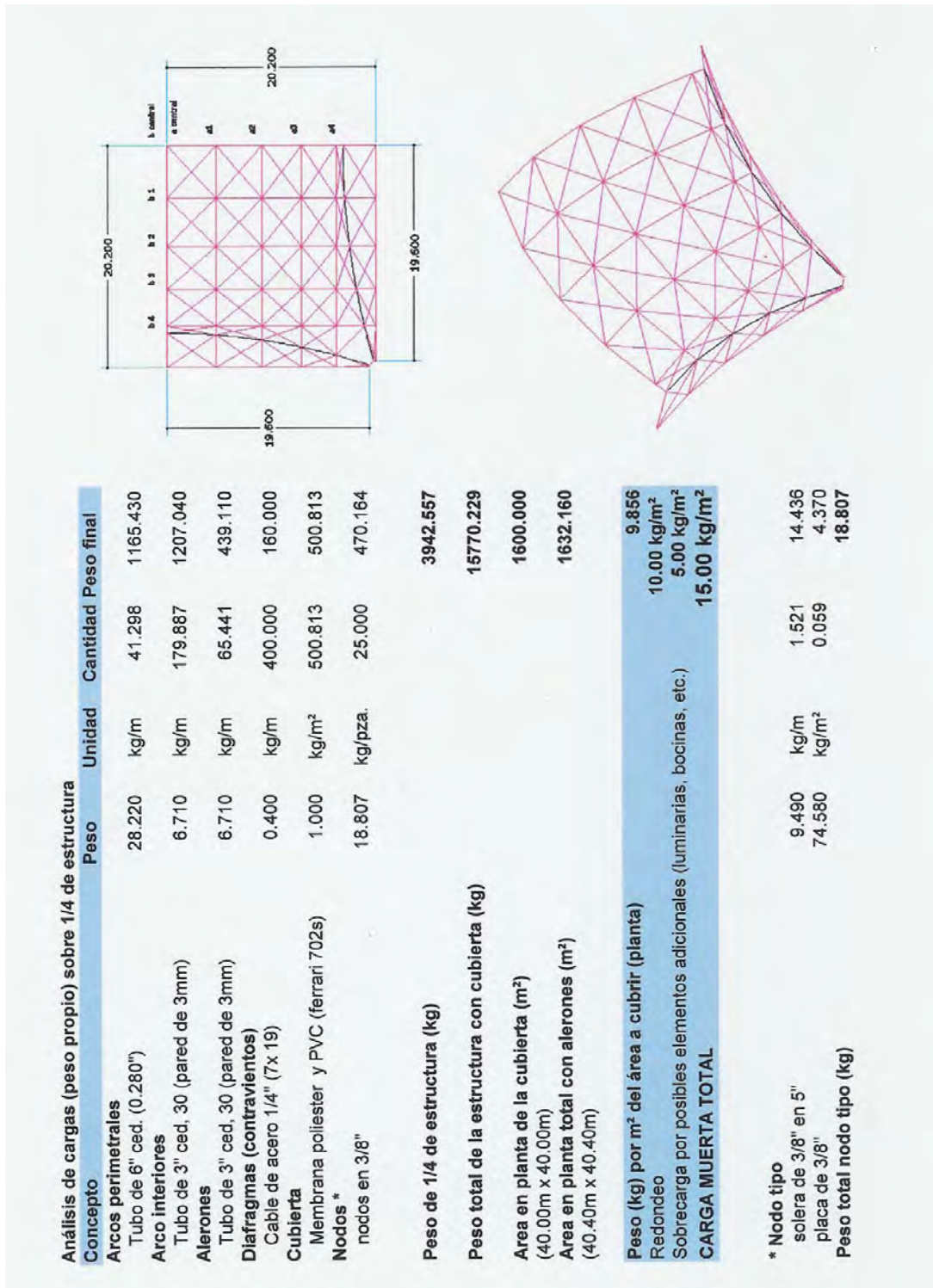
Sin embargo, para tener una apreciación más exacta del desempeño de cada una las tres estructuras analizadas, se tomaron estos valores tal cual como se han obtenido, con lo que la comparación deseada es factible. Independientemente que posteriormente se pudiera buscar la manera de racionalizar o uniformizar dichas secciones.

Determinación del peso propio de las propuestas

Propuesta 1



Propuesta 2



Análisis de cargas (peso propio) sobre 1/4 de estructura

Concepto	Peso	Unidad	Cantidad	Peso final
Arcoes perimetrales				
Tubo de 6" ced. (0.280")	28.220	kg/m	41.298	1165.430
Arco interiores				
Tubo de 3" ced, 30 (pared de 3mm)	6.710	kg/m	179.887	1207.040
Alerones				
Tubo de 3" ced, 30 (pared de 3mm)	6.710	kg/m	65.441	439.110
Diafragmas (contravientos)				
Cable de acero 1/4" (7x 19)	0.400	kg/m	400.000	160.000
Cubierta				
Membrana poliester y PVC (ferrari 702s)	1.000	kg/m ²	500.813	500.813
Nodos *				
nodos en 3/8"	18.807	kg/pza.	25.000	470.164

Peso de 1/4 de estructura (kg)

3942.557

Peso total de la estructura con cubierta (kg)

15770.229

Area en planta de la cubierta (m²)

1600.000

(40.00m x 40.00m)

Area en planta total con alerones (m²)

1632.160

(40.40m x 40.40m)

Peso (kg) por m² del área a cubrir (planta)

9.856

Redondeo

10.00 kg/m²

Sobrecarga por posibles elementos adicionales (luminarias, bocinas, etc.)

5.00 kg/m²

CARGA MUERTA TOTAL

15.00 kg/m²

*** Nodo tipo**

solera de 3/8" en 5"

1.521

14.436

placa de 3/8"

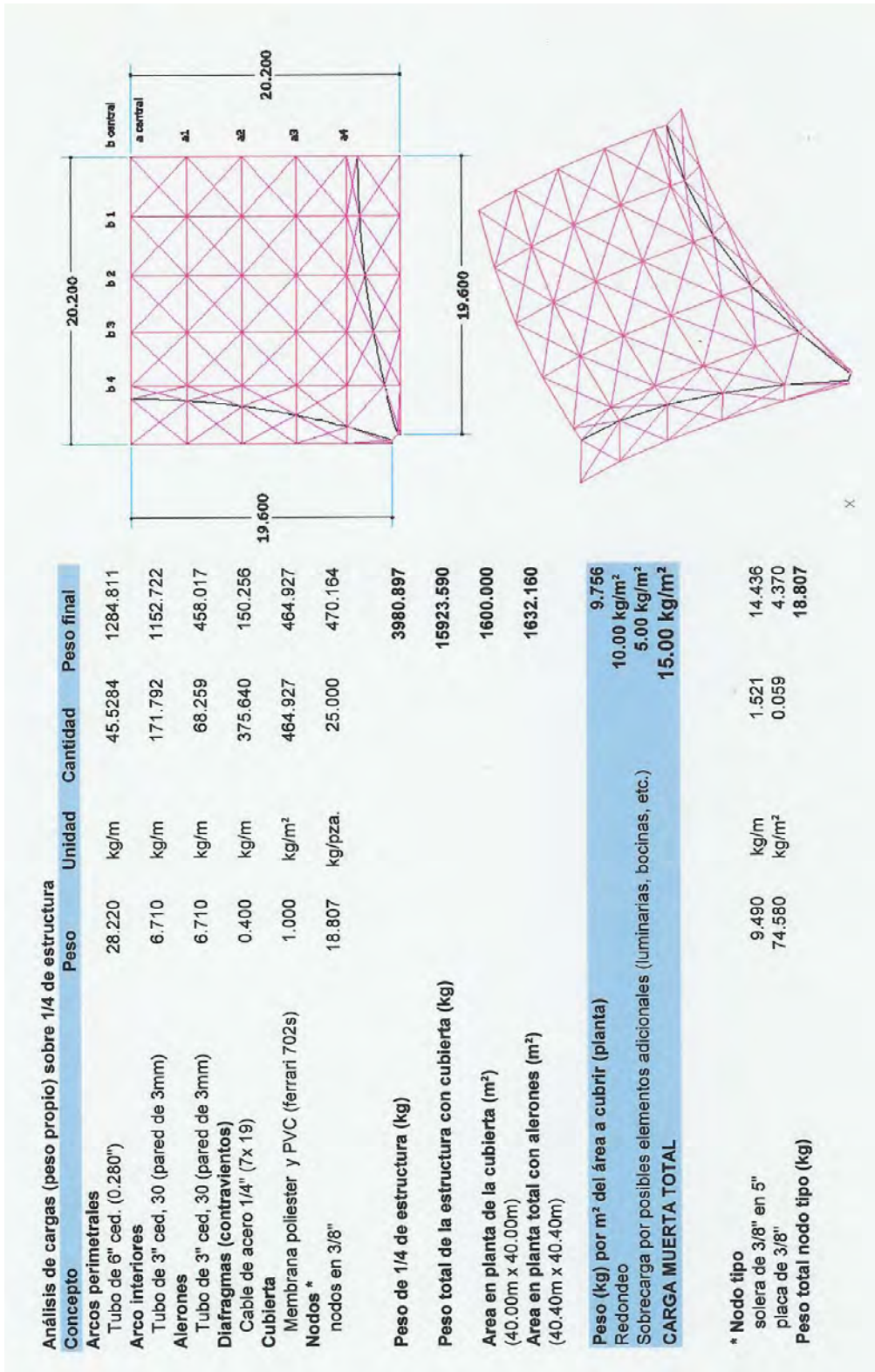
0.059

4.370

Peso total nodo tipo (kg)

18.807

Propuesta 3



Análisis de cargas (peso propio) sobre 1/4 de estructura

Concepto	Peso	Unidad	Cantidad	Peso final
Arcos perimetrales				
Tubo de 6" ced. (0.280")	28.220	kg/m	45.5284	1284.811
Arco interiores				
Tubo de 3" ced. 30 (pared de 3mm)	6.710	kg/m	171.792	1152.722
Alerones				
Tubo de 3" ced. 30 (pared de 3mm)	6.710	kg/m	68.259	458.017
Diafragmas (contravientos)				
Cable de acero 1/4" (7x 19)	0.400	kg/m	375.640	150.256
Cubierta				
Membrana poliester y PVC (ferrari 702s)	1.000	kg/m ²	464.927	464.927
Nodos *				
nodos en 3/8"	18.807	kg/pza.	25.000	470.164

Peso de 1/4 de estructura (kg)

3980.897

Peso total de la estructura con cubierta (kg)

15923.590

Area en planta de la cubierta (m²)

1600.000

(40.00m x 40.00m)

Area en planta total con alerones (m²)

1632.160

(40.40m x 40.40m)

Peso (kg) por m² del área a cubrir (planta)

9.756

Redondeo

10.00 kg/m²

Sobrecarga por posibles elementos adicionales (luminarias, bocinas, etc.)

5.00 kg/m²

CARGA MUERTA TOTAL

15.00 kg/m²

*** Nodo tipo**

solera de 3/8" en 5"

1.521

14.436

placa de 3/8"

kg/m

4.370

Peso total nodo tipo (kg)

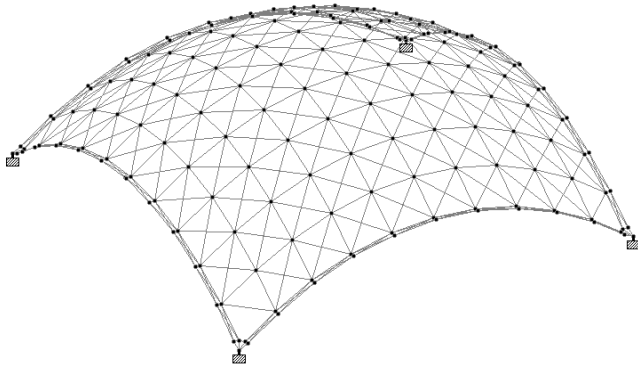
kg/m²

18.807

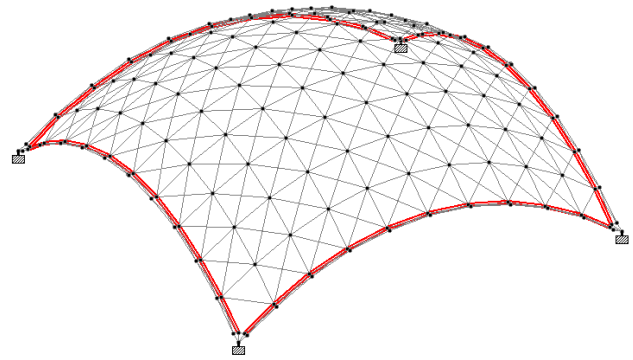
Resultados sobre los análisis de las propuestas

Propuesta 1

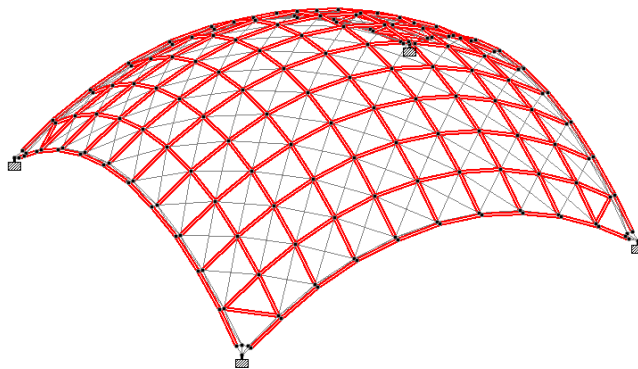
Presentación de las gráficas del modelo en función de las agrupaciones sugeridas según la jerarquización propuesta a partir del comportamiento estructural pensado (según tablas de análisis sobre el peso propio).



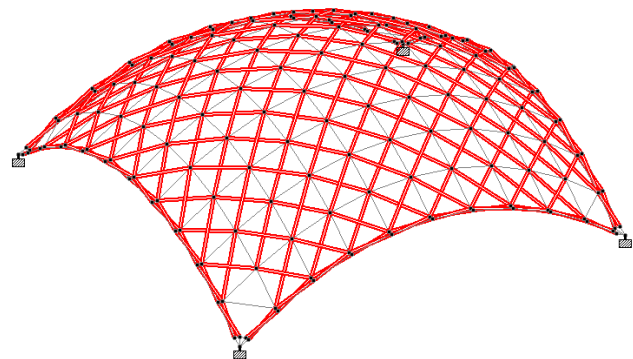
Modelo completo de la estructura a revisar



Distribución de arcos perimetrales, como elementos principales



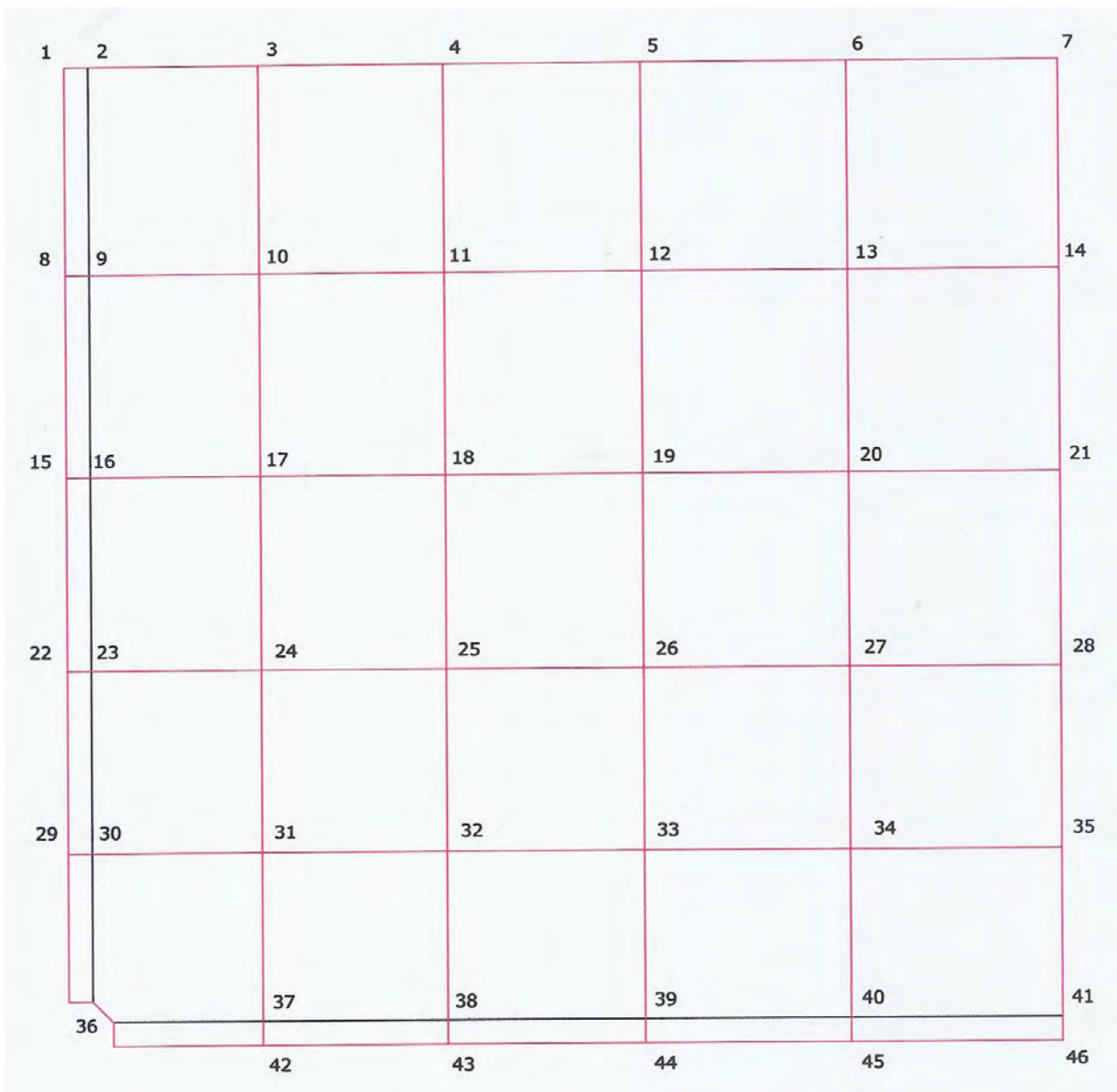
Distribución de arcos, como elementos en barras



Colocación de diagonales (trabajo exclusivo a tracción)

A continuación se presenta una vista en planta de un cuarto de la estructura donde se encuentran numerados los diferentes nodos que fueron analizados.

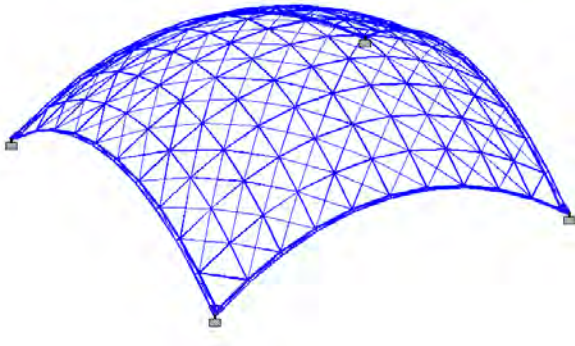
Asimismo, en las dos próximas tablas se ven referenciados los mismos nodos con los diferentes valores obtenidos según los escenarios base (sin combinaciones) anteriormente mencionados.



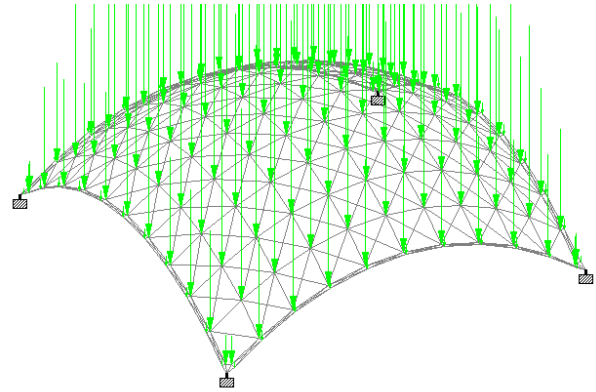
Mostrario de algunos de los valores obtenidosGrupo **B**Subgrupo **B1**Zona I **Azcapotzalco**Factor de carga considerado **1.1**

Nº Nodo	Área (m²) Trib.real x nodo	% Porcent. del área total	C. M. (ejeY)		C. V. (ejeY)		Servicio (ejeY) C.M.+ C.V.MAX.
			15 kg/m²	40 kg/m²	20 kg/m²		
1	1.094	0.185	16.410	43.760	21.880	60.170	
2	10.594	1.787	158.910	423.760	211.880	582.670	
3	19.024	3.209	285.360	760.960	380.480	1046.320	
4	19.046	3.213	285.690	761.840	380.920	1047.530	
5	19.044	3.212	285.660	761.760	380.880	1047.420	
6	19.109	3.223	286.635	764.360	382.180	1050.995	
7	19.175	3.235	287.625	767.000	383.500	1054.625	
8	1.091	0.184	16.365	43.640	21.820	60.005	
9	10.558	1.781	158.370	422.320	211.160	580.690	
10	18.957	3.198	284.355	758.280	379.140	1042.635	
11	18.979	3.202	284.685	759.160	379.580	1043.845	
12	18.979	3.202	284.685	759.160	379.580	1043.845	
13	19.044	3.212	285.660	761.760	380.880	1047.420	
14	19.109	3.223	286.635	764.360	382.180	1050.995	
15	1.087	0.183	16.305	43.480	21.740	59.785	
16	10.522	1.775	157.830	420.880	210.440	578.710	
17	18.894	3.187	283.410	755.760	377.880	1039.170	
18	18.915	3.191	283.725	756.600	378.300	1040.325	
19	18.913	3.190	283.695	756.520	378.260	1040.215	
20	18.979	3.202	284.685	759.160	379.580	1043.845	
21	19.044	3.212	285.660	761.760	380.880	1047.420	
22	1.087	0.183	16.305	43.480	21.740	59.785	
23	10.523	1.775	157.845	420.920	210.460	578.765	
24	18.892	3.187	283.380	755.680	377.840	1039.060	
25	18.915	3.191	283.725	756.600	378.300	1040.325	
26	18.915	3.191	283.725	756.600	378.300	1040.325	
27	18.979	3.202	284.685	759.160	379.580	1043.845	
28	19.046	3.213	285.690	761.840	380.920	1047.530	
29	1.022	0.172	15.330	40.880	20.440	56.210	
30	9.896	1.669	148.440	395.840	197.920	544.280	
31	18.813	3.174	282.195	752.520	376.260	1034.715	
32	18.835	3.177	282.525	753.400	376.700	1035.925	
33	18.835	3.177	282.525	753.400	376.700	1035.925	
34	18.900	3.188	283.500	756.000	378.000	1039.500	
35	18.965	3.199	284.475	758.600	379.300	1043.075	
36	7.126	1.202	106.890	285.040	142.520	391.930	
37	9.840	1.660	147.600	393.600	196.800	541.200	
38	10.463	1.765	156.945	418.520	209.260	575.465	
39	10.463	1.765	156.945	418.520	209.260	575.465	
40	10.499	1.771	157.485	419.960	209.980	577.445	
41	10.535	1.777	158.025	421.400	210.700	579.425	
42	1.022	0.172	15.330	40.880	20.440	56.210	
43	1.087	0.183	16.305	43.480	21.740	59.785	
44	1.087	0.183	16.305	43.480	21.740	59.785	
45	1.091	0.184	16.365	43.640	21.820	60.005	
46	1.094	0.185	16.410	43.760	21.880	60.170	

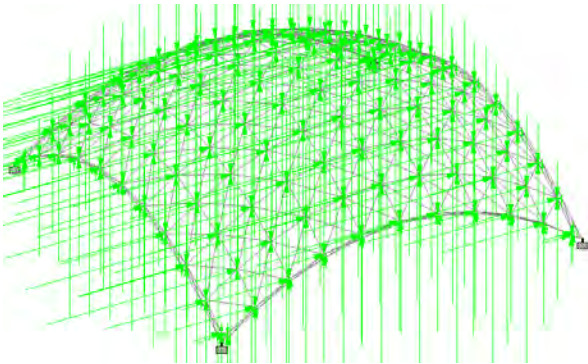
Nº Nodo	Área (m ²)	Presión (eje X)	Succión (eje Y)	Falla presión (eje X, Y)	Falla Succión (eje Y)
	Trib.real x nodo	40 kg/m ²	(-)40kg/m ²	C.M.+ C.V.RED.+ P	C.M.+ S
1	1.094	43.760	-43.760	82.050	-27.350
2	10.594	423.760	-423.760	794.550	-264.850
3	19.024	760.960	-760.960	1426.800	-475.600
4	19.046	761.840	-761.840	1428.450	-476.150
5	19.044	761.760	-761.760	1428.300	-476.100
6	19.109	764.360	-764.360	1433.175	-477.725
7	19.175	767.000	-767.000	1438.125	-479.375
8	1.091	43.640	-43.640	81.825	-27.275
9	10.558	422.320	-422.320	791.850	-263.950
10	18.957	758.280	-758.280	1421.775	-473.925
11	18.979	759.160	-759.160	1423.425	-474.475
12	18.979	759.160	-759.160	1423.425	-474.475
13	19.044	761.760	-761.760	1428.300	-476.100
14	19.109	764.360	-764.360	1433.175	-477.725
15	1.087	43.480	-43.480	81.525	-27.175
16	10.522	420.880	-420.880	789.150	-263.050
17	18.894	755.760	-755.760	1417.050	-472.350
18	18.915	756.600	-756.600	1418.625	-472.875
19	18.913	756.520	-756.520	1418.475	-472.825
20	18.979	759.160	-759.160	1423.425	-474.475
21	19.044	761.760	-761.760	1428.300	-476.100
22	1.087	43.480	-43.480	81.525	-27.175
23	10.523	420.920	-420.920	789.225	-263.075
24	18.892	755.680	-755.680	1416.900	-472.300
25	18.915	756.600	-756.600	1418.625	-472.875
26	18.915	756.600	-756.600	1418.625	-472.875
27	18.979	759.160	-759.160	1423.425	-474.475
28	19.046	761.840	-761.840	1428.450	-476.150
29	1.022	40.880	-40.880	76.650	-25.550
30	9.896	395.840	-395.840	742.200	-247.400
31	18.813	752.520	-752.520	1410.975	-470.325
32	18.835	753.400	-753.400	1412.625	-470.875
33	18.835	753.400	-753.400	1412.625	-470.875
34	18.900	756.000	-756.000	1417.500	-472.500
35	18.965	758.600	-758.600	1422.375	-474.125
36	7.126	285.040	-285.040	534.450	-178.150
37	9.840	393.600	-393.600	738.000	-246.000
38	10.463	418.520	-418.520	784.725	-261.575
39	10.463	418.520	-418.520	784.725	-261.575
40	10.499	419.960	-419.960	787.425	-262.475
41	10.535	421.400	-421.400	790.125	-263.375
42	1.022	40.880	-40.880	76.650	-25.550
43	1.087	43.480	-43.480	81.525	-27.175
44	1.087	43.480	-43.480	81.525	-27.175
45	1.091	43.640	-43.640	81.825	-27.275
46	1.094	43.760	-43.760	82.050	-27.350



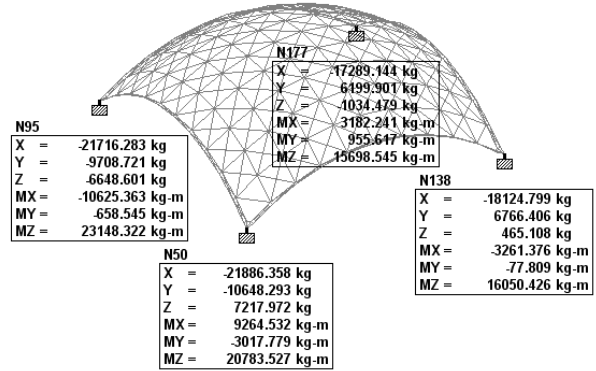
Modelo representado con elementos sólidos



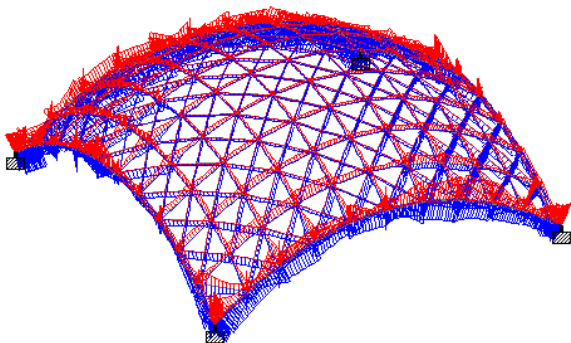
Distribución de cargas (servicio)



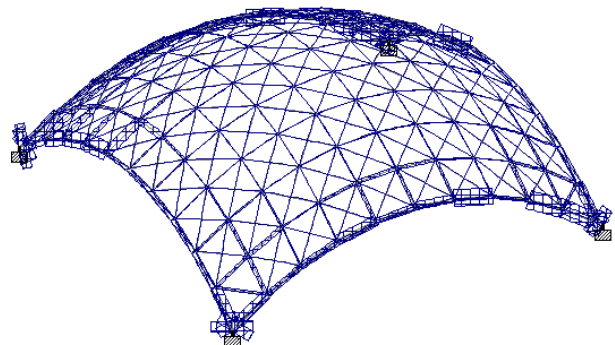
Combinación de cargas (servicio, presión y succión)



Gráfica de reacciones en los apoyos



Gráfica de esfuerzos (Beam stress)



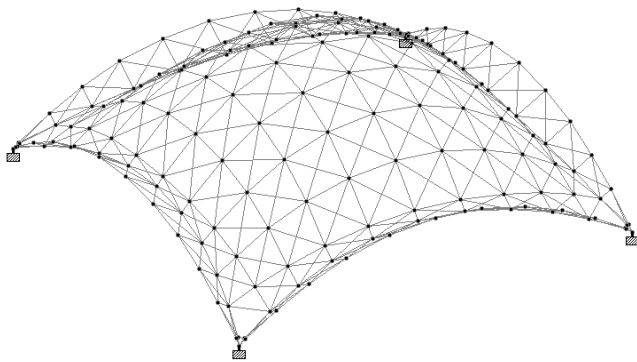
Gráfica de esfuerzo de torsión

Tabla resumen de la cuantificación del material requerido a partir de los resultados obtenidos sobre la optimización de secciones en función de las solicitaciones estructurales.

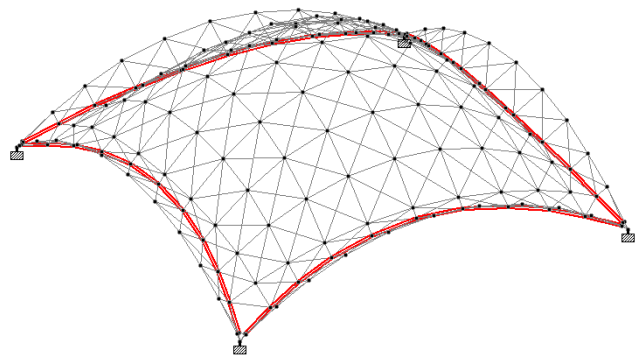
PROFILE	LENGTH(METE)	WEIGHT(KG)
ST PIPS60	95.03	2679.917
ST PIPS30	198.28	2234.597
ST PIPS35	244.50	3311.625
ST PIPS50	199.80	4341.940
ST PIPS80	115.86	4918.303
ST PIPS40	172.12	2757.386
ST PIPS100	76.92	4626.291
ST PIPS120	45.25	3338.554
ST PIPS25	859.23	7382.027
ST PIPS20	342.26	1850.796
ST PIPS15	263.62	1064.478
ST PIPS12	54.10	182.925
ST PIPS5	14.63	18.487
ST PIPX20	20.68	154.674
ST PIPX120	4.35	422.530
ST PIPS10	0.50	1.248
PRISMATIC STEEL	TOTAL	39285.781

Propuesta 2

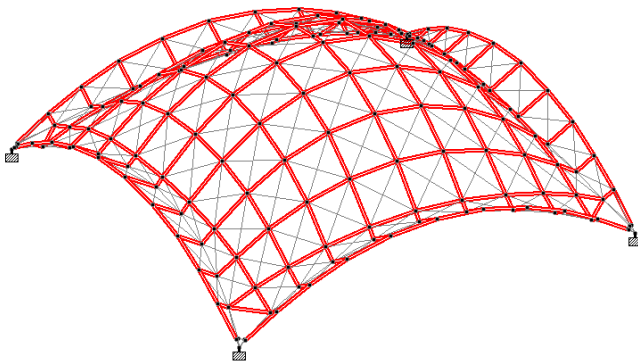
Presentación de las gráficas del modelo en función de las agrupaciones sugeridas según la jerarquización propuesta a partir del comportamiento estructural pensado (según tablas de análisis sobre el peso propio).



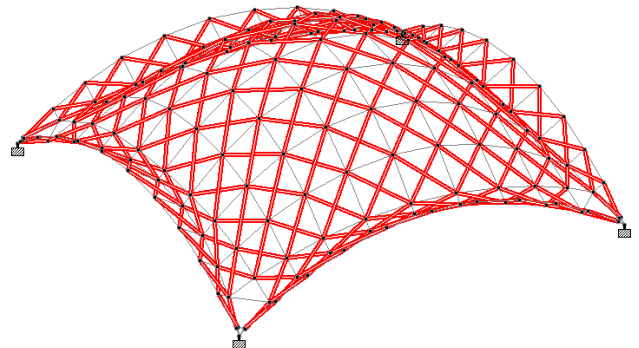
Modelo completo de la estructura a revisar



Distribución de arcos perimetrales, como elementos principales

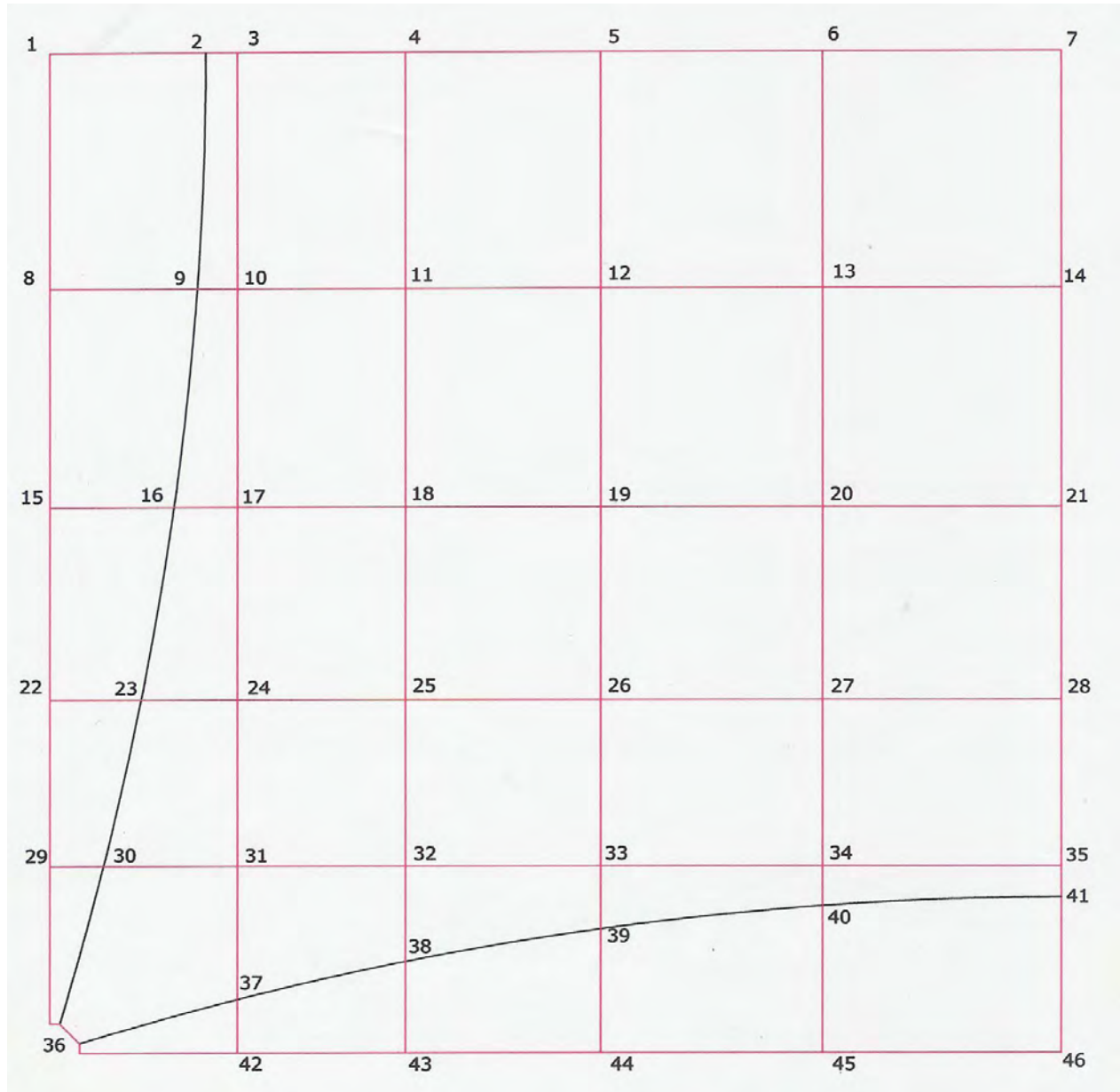


Distribución de arcos, como elementos en barras



Colocación de diagonales (trabajo exclusivo a tracción)

Vista en planta de un cuarto de la estructura propuesta con los diferentes nodos referenciados, donde pueden apreciarse las variaciones en las distancias inter-nodales derivadas de las alteraciones en la geometría básica de esta nueva superficie.

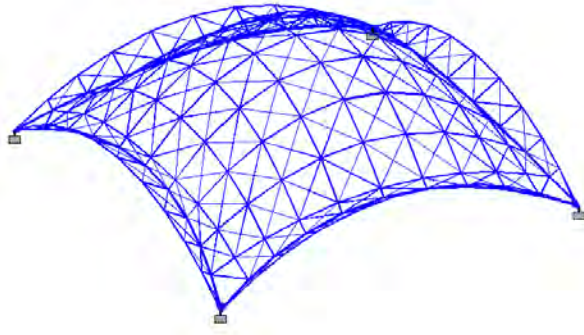


Muestreo de algunos de los valores obtenidos

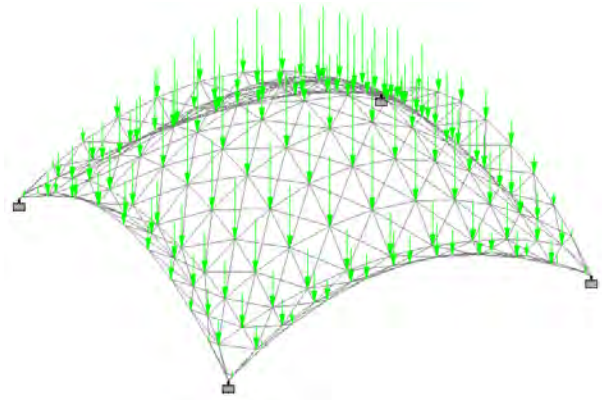
Grupo B
 Subgrupo B1
 Zona I Azcapotzalco
 Factor de carga considerado 1.1

N ^o Nodo	Área (m ²) Trib.real x nodo	% Porcent. del área total	C. M. (ejeY)		C. V. Máx (ejeY)		C. V. Red. (ejeY)		Servicio (ejeY)
			15 kg/m ²	40 kg/m ²	40 kg/m ²	20 kg/m ²	C.M.+ C.V.MAX.		
1	8.767	1.400	131.505	350.680	350.680	175.340	482.185		
2	11.151	1.781	167.265	446.040	446.040	223.020	613.305		
3	13.930	2.224	208.950	557.200	557.200	278.600	766.150		
4	23.147	3.696	347.205	925.880	925.880	462.940	1273.085		
5	23.210	3.706	348.150	928.400	928.400	464.200	1276.550		
6	23.259	3.714	348.885	930.360	930.360	465.180	1279.245		
7	23.270	3.716	349.050	930.800	930.800	465.400	1279.850		
8	8.072	1.289	121.080	322.880	322.880	161.440	443.960		
9	10.879	1.737	163.185	435.160	435.160	217.580	598.345		
10	13.575	2.168	203.625	543.000	543.000	271.500	746.625		
11	21.935	3.502	329.025	877.400	877.400	438.700	1206.425		
12	22.557	3.602	338.355	902.280	902.280	451.140	1240.635		
13	23.064	3.683	345.960	922.560	922.560	461.280	1268.520		
14	23.259	3.714	348.885	930.360	930.360	465.180	1279.245		
15	6.354	1.015	95.310	254.160	254.160	127.080	349.470		
16	10.036	1.603	150.540	401.440	401.440	200.720	551.980		
17	12.725	2.032	190.875	509.000	509.000	254.500	699.875		
18	19.266	3.076	288.990	770.640	770.640	385.320	1059.630		
19	21.088	3.367	316.320	843.520	843.520	421.760	1159.840		
20	22.607	3.610	339.105	904.280	904.280	452.140	1243.385		
21	23.215	3.707	348.225	928.600	928.600	464.300	1276.825		
22	4.283	0.684	64.245	171.320	171.320	85.660	235.565		
23	8.745	1.396	131.175	349.800	349.800	174.900	480.975		
24	11.898	1.900	178.470	475.920	475.920	237.960	654.390		
25	16.715	2.669	250.725	668.600	668.600	334.300	919.325		
26	19.630	3.134	294.450	785.200	785.200	392.600	1079.650		
27	22.138	3.535	332.070	885.520	885.520	442.760	1217.590		
28	23.167	3.699	347.505	926.680	926.680	463.340	1274.185		
29	2.402	0.384	36.030	96.080	96.080	48.040	132.110		
30	7.625	1.218	114.375	305.000	305.000	152.500	419.375		
31	10.672	1.704	160.080	426.880	426.880	213.440	586.960		
32	11.720	1.871	175.800	468.800	468.800	234.400	644.600		
33	12.651	2.020	189.765	506.040	506.040	253.020	695.805		
34	13.550	2.164	203.250	542.000	542.000	271.000	745.250		
35	13.948	2.227	209.220	557.920	557.920	278.960	767.140		
36	4.406	0.704	66.090	176.240	176.240	88.120	242.330		
37	7.625	1.218	114.375	305.000	305.000	152.500	419.375		
38	8.411	1.343	126.165	336.440	336.440	168.220	462.605		
39	9.604	1.534	144.060	384.160	384.160	192.080	528.220		
40	10.681	1.705	160.215	427.240	427.240	213.620	587.455		
41	11.151	1.781	167.265	446.040	446.040	223.020	613.305		
42	2.402	0.384	36.030	96.080	96.080	48.040	132.110		
43	4.284	0.684	64.260	171.360	171.360	85.680	235.620		
44	6.355	1.015	95.325	254.200	254.200	127.100	349.525		
45	8.072	1.289	121.080	322.880	322.880	161.440	443.960		
46	8.767	1.400	131.505	350.680	350.680	175.340	482.185		

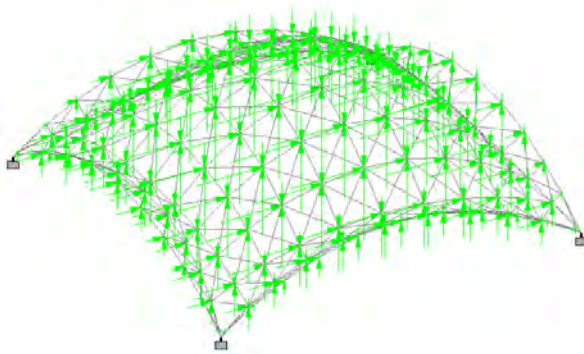
Nº Nodo	Área (m ²)	Presión (eje X)	Succión (eje Y)	Falla presión (eje X, Y)	Falla Succión (eje Y)
	Trib.real x nodo	40 kg/m ²	(-)40kg/m ²	C.M.+ C.V.RED.+ P	C.M.+ S
1	8.767	350.680	-350.680	657.525	-219.175
2	11.151	446.040	-446.040	836.325	-278.775
3	13.930	557.200	-557.200	1044.750	-348.250
4	23.147	925.880	-925.880	1736.025	-578.675
5	23.210	928.400	-928.400	1740.750	-580.250
6	23.259	930.360	-930.360	1744.425	-581.475
7	23.270	930.800	-930.800	1745.250	-581.750
8	8.072	322.880	-322.880	605.400	-201.800
9	10.879	435.160	-435.160	815.925	-271.975
10	13.575	543.000	-543.000	1018.125	-339.375
11	21.935	877.400	-877.400	1645.125	-548.375
12	22.557	902.280	-902.280	1691.775	-563.925
13	23.064	922.560	-922.560	1729.800	-576.600
14	23.259	930.360	-930.360	1744.425	-581.475
15	6.354	254.160	-254.160	476.550	-158.850
16	10.036	401.440	-401.440	752.700	-250.900
17	12.725	509.000	-509.000	954.375	-318.125
18	19.266	770.640	-770.640	1444.950	-481.650
19	21.088	843.520	-843.520	1581.600	-527.200
20	22.607	904.280	-904.280	1695.525	-565.175
21	23.215	928.600	-928.600	1741.125	-580.375
22	4.283	171.320	-171.320	321.225	-107.075
23	8.745	349.800	-349.800	655.875	-218.625
24	11.898	475.920	-475.920	892.350	-297.450
25	16.715	668.600	-668.600	1253.625	-417.875
26	19.630	785.200	-785.200	1472.250	-490.750
27	22.138	885.520	-885.520	1660.350	-553.450
28	23.167	926.680	-926.680	1737.525	-579.175
29	2.402	96.080	-96.080	180.150	-60.050
30	7.625	305.000	-305.000	571.875	-190.625
31	10.672	426.880	-426.880	800.400	-266.800
32	11.720	468.800	-468.800	879.000	-293.000
33	12.651	506.040	-506.040	948.825	-316.275
34	13.550	542.000	-542.000	1016.250	-338.750
35	13.948	557.920	-557.920	1046.100	-348.700
36	4.406	176.240	-176.240	330.450	-110.150
37	7.625	305.000	-305.000	571.875	-190.625
38	8.411	336.440	-336.440	630.825	-210.275
39	9.604	384.160	-384.160	720.300	-240.100
40	10.681	427.240	-427.240	801.075	-267.025
41	11.151	446.040	-446.040	836.325	-278.775
42	2.402	96.080	-96.080	180.150	-60.050
43	4.284	171.360	-171.360	321.300	-107.100
44	6.355	254.200	-254.200	476.625	-158.875
45	8.072	322.880	-322.880	605.400	-201.800
46	8.767	350.680	-350.680	657.525	-219.175



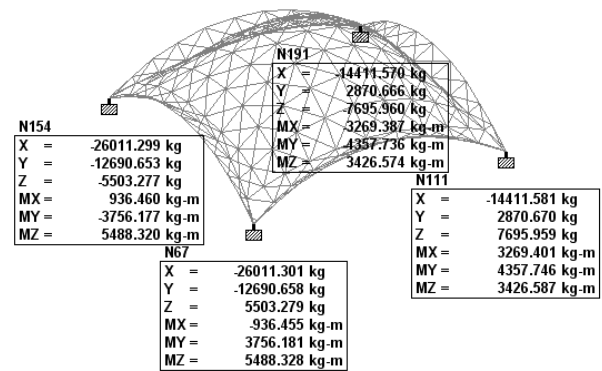
Modelo representado con elementos sólidos



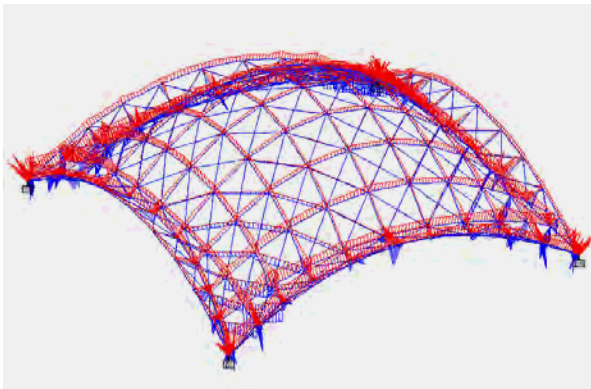
Distribución de cargas (servicio)



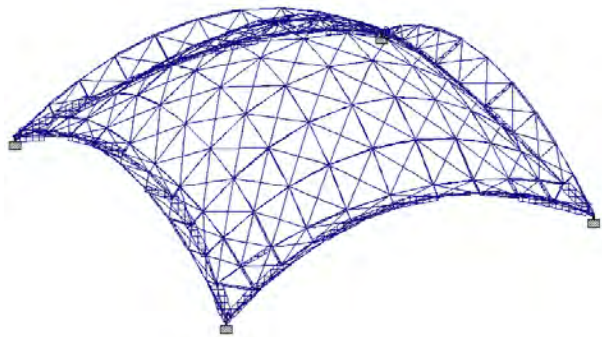
Combinación de cargas (servicio, presión y succión)



Gráfica de reacciones en los apoyos



Gráfica de esfuerzos (Beam stress)



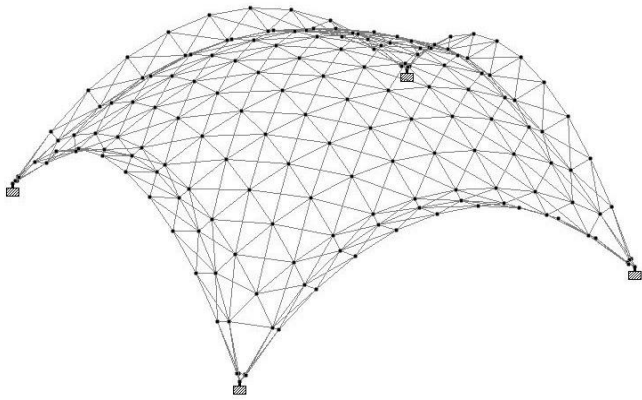
Gráfica de esfuerzo de torsión

Tabla resumen de la nueva cuantificación del material sugerido a partir de los resultados obtenidos sobre la optimización de secciones en función de los requerimientos estructurales adquiridos.

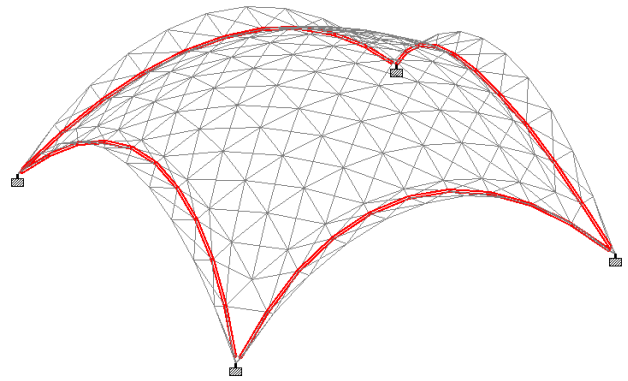
PROFILE	LENGTH(METE)	WEIGHT(KG)
ST PIPS40	191.87	3073.794
ST PIPS50	228.65	4968.954
ST PIPS30	304.32	3429.706
ST PIPS20	576.63	3118.145
ST PIPS25	691.45	5940.571
ST PIPS60	88.56	2497.355
ST PIPS80	61.99	2631.793
ST PIPX20	39.21	293.283
ST PIPS35	237.37	3214.969
ST PIPS15	107.13	432.589
ST PIPS12	146.52	495.398
ST PIPS100	8.79	528.774
PRISMATIC STEEL	TOTAL	30625.332

Propuesta 3

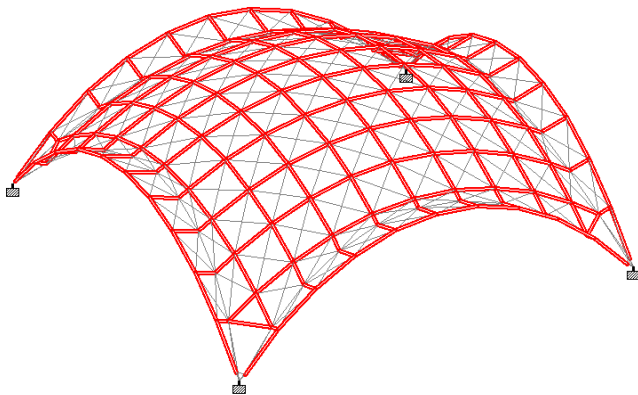
Presentación de las gráficas del modelo en función de las agrupaciones sugeridas según la jerarquización propuesta a partir del comportamiento estructural pensado (según tablas de análisis sobre el peso propio).



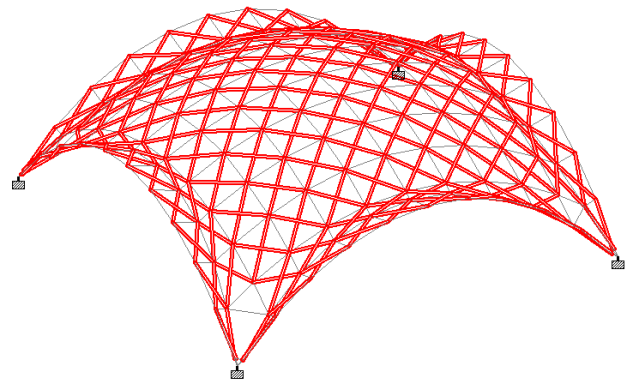
Modelo completo de la estructura a revisar



Distribución de arcos perimetrales, como elementos principales

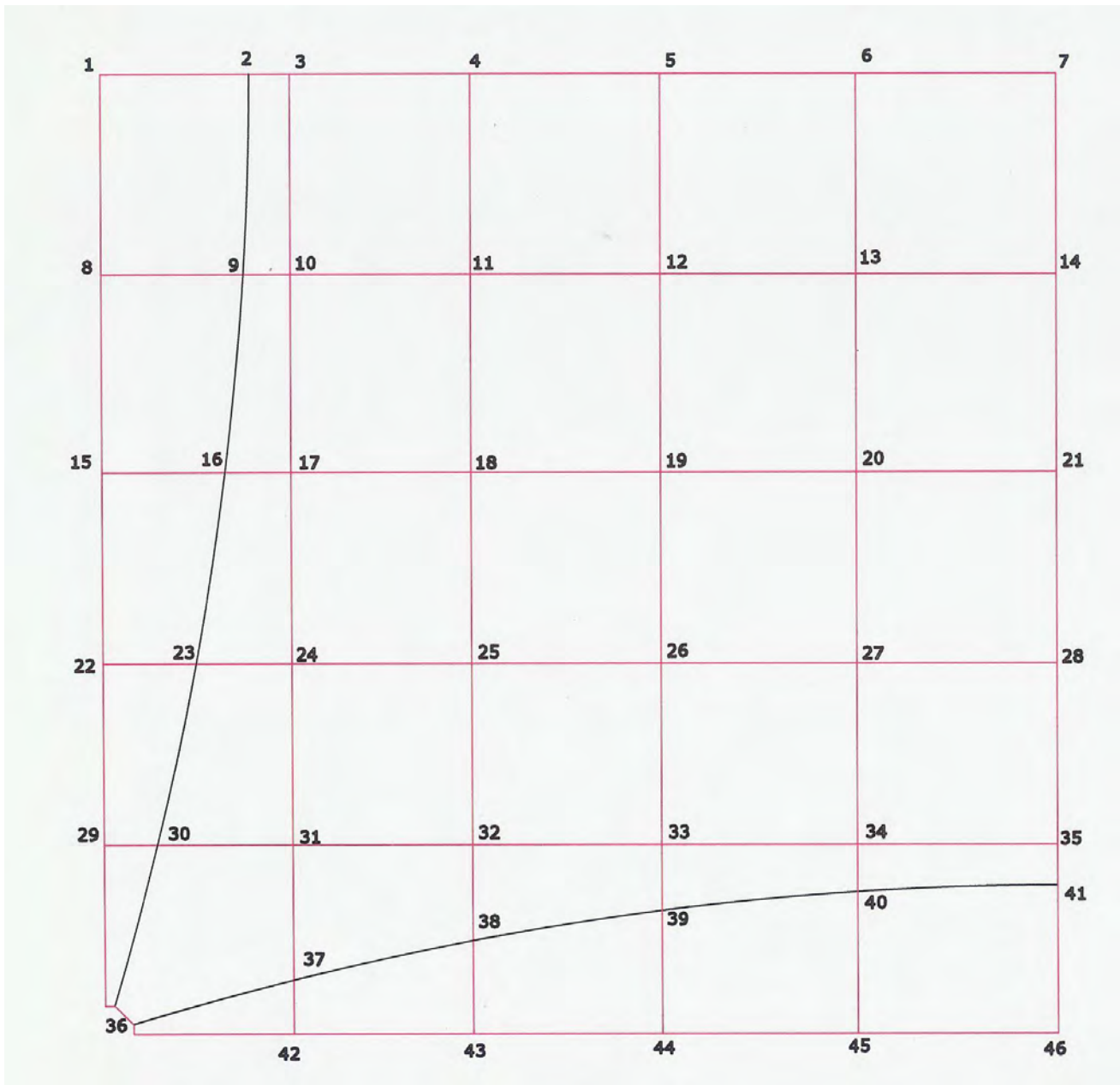


Distribución de arcos, como elementos en barras



Colocación de diagonales (trabajo exclusivo a tracción)

Vista en planta de una cuarto de la tercera propuesta a revisar. De igual manera se ven referenciado los diferentes nodos sobre los que se aplicaron las diferentes cargas según los escenarios base. Esto se dio según las áreas tributarias correspondientes a cada unos de tales nodos.



Muestrario de algunos de los valores obtenidos

Grupo

B

Subgrup

B1

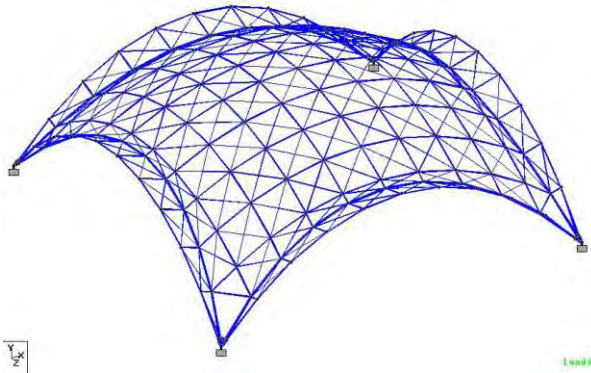
Zona I Azcapotzalco

Factor de carga considerado

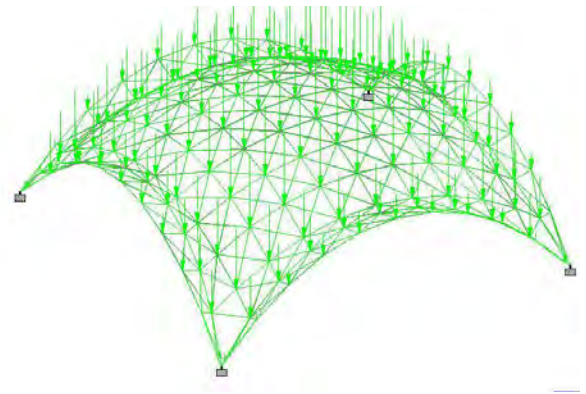
1.1

Nº Nodo	Área (m²)	% Porcent. del área total	C. M. (ejeY)		C. V. Máx (ejeY)		C. V. Red. (ejeY)		Servicio (ejeY) C.M.+ C.V.MAX.
	Trib.real x nodo		15 kg/m2	40 kg/m²	20 kg/m²	20 kg/m²			
1	5.585	1.115	83.772	223.392	111.696	307.163			
2	7.705	1.538	115.572	308.192	154.096	423.763			
3	9.720	1.941	145.797	388.792	194.396	534.588			
4	16.579	3.310	248.682	663.152	331.576	911.833			
5	16.575	3.310	248.622	662.992	331.496	911.613			
6	16.572	3.309	248.577	662.872	331.436	911.448			
7	16.573	3.309	248.592	662.912	331.456	911.503			
8	5.394	1.077	80.907	215.752	107.876	296.658			
9	7.860	1.569	117.897	314.392	157.196	432.288			
10	10.097	2.016	151.452	403.872	201.936	555.323			
11	16.635	3.322	249.522	665.392	332.696	914.913			
12	16.515	3.298	247.722	660.592	330.296	908.313			
13	16.586	3.312	248.787	663.432	331.716	912.218			
14	16.572	3.309	248.577	662.872	331.436	911.448			
15	4.771	0.953	71.562	190.832	95.416	262.393			
16	8.315	1.660	124.722	332.592	166.296	457.313			
17	11.230	2.242	168.447	449.192	224.596	617.638			
18	16.800	3.355	251.997	671.992	335.996	923.988			
19	16.615	3.318	249.222	664.592	332.296	913.813			
20	16.515	3.298	247.722	660.592	330.296	908.313			
21	16.575	3.310	248.622	662.992	331.496	911.613			
22	3.665	0.732	54.972	146.592	73.296	201.563			
23	9.075	1.812	136.122	362.992	181.496	499.113			
24	13.115	2.619	196.722	524.592	262.296	721.313			
25	17.049	3.404	255.732	681.952	340.976	937.683			
26	16.800	3.355	251.997	671.992	335.996	923.988			
27	16.635	3.322	249.522	665.392	332.696	914.913			
28	16.579	3.310	248.682	663.152	331.576	911.833			
29	1.642	0.328	24.627	65.672	32.836	90.298			
30	9.893	1.975	148.392	395.712	197.856	544.103			
31	13.899	2.775	208.482	555.952	277.976	764.433			
32	13.115	2.619	196.722	524.592	262.296	721.313			
33	11.230	2.242	168.447	449.192	224.596	617.638			
34	10.097	2.016	151.452	403.872	201.936	555.323			
35	9.720	1.941	145.797	388.792	194.396	534.588			
36	4.615	0.921	69.222	184.592	92.296	253.813			
37	9.893	1.975	148.392	395.712	197.856	544.103			
38	9.075	1.812	136.122	362.992	181.496	499.113			
39	8.315	1.660	124.722	332.592	166.296	457.313			
40	7.860	1.569	117.897	314.392	157.196	432.288			
41	7.705	1.538	115.572	308.192	154.096	423.763			
42	1.642	0.328	24.627	65.672	32.836	90.298			
43	3.665	0.732	54.972	146.592	73.296	201.563			
44	4.771	0.953	71.562	190.832	95.416	262.393			
45	5.394	1.077	80.907	215.752	107.876	296.658			
46	5.585	1.115	83.772	223.392	111.696	307.163			

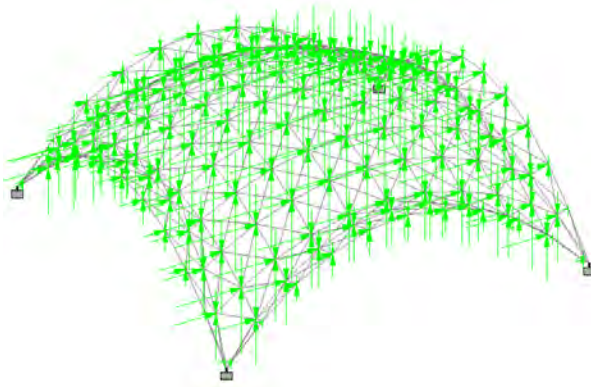
Nº Nodo	Área (m²)	Presión (eje X)	Succión (eje Y)	Falla presión (eje X, Y)	Falla Succión (eje Y)
	Trib.real x nodo	40 kg/m²	(-)/40kg/m²	C.M.+ C.V.RED.+ P	C.M.+ S
1	5.585	223.392	-223.392	418.859	-139.620
2	7.705	308.192	-308.192	577.859	-192.620
3	9.720	388.792	-388.792	728.984	-242.995
4	16.579	663.152	-663.152	1243.409	-414.470
5	16.575	662.992	-662.992	1243.109	-414.370
6	16.572	662.872	-662.872	1242.884	-414.295
7	16.573	662.912	-662.912	1242.959	-414.320
8	5.394	215.752	-215.752	404.534	-134.845
9	7.860	314.392	-314.392	589.484	-196.495
10	10.097	403.872	-403.872	757.259	-252.420
11	16.635	665.392	-665.392	1247.609	-415.870
12	16.515	660.592	-660.592	1238.609	-412.870
13	16.586	663.432	-663.432	1243.934	-414.645
14	16.572	662.872	-662.872	1242.884	-414.295
15	4.771	190.832	-190.832	357.809	-119.270
16	8.315	332.592	-332.592	623.609	-207.870
17	11.230	449.192	-449.192	842.234	-280.745
18	16.800	671.992	-671.992	1259.984	-419.995
19	16.615	664.592	-664.592	1246.109	-415.370
20	16.515	660.592	-660.592	1238.609	-412.870
21	16.575	662.992	-662.992	1243.109	-414.370
22	3.665	146.592	-146.592	274.859	-91.620
23	9.075	362.992	-362.992	680.609	-226.870
24	13.115	524.592	-524.592	983.609	-327.870
25	17.049	681.952	-681.952	1278.659	-426.220
26	16.800	671.992	-671.992	1259.984	-419.995
27	16.635	665.392	-665.392	1247.609	-415.870
28	16.579	663.152	-663.152	1243.409	-414.470
29	1.642	65.672	-65.672	123.134	-41.045
30	9.893	395.712	-395.712	741.959	-247.320
31	13.899	555.952	-555.952	1042.409	-347.470
32	13.115	524.592	-524.592	983.609	-327.870
33	11.230	449.192	-449.192	842.234	-280.745
34	10.097	403.872	-403.872	757.259	-252.420
35	9.720	388.792	-388.792	728.984	-242.995
36	4.615	184.592	-184.592	346.109	-115.370
37	9.893	395.712	-395.712	741.959	-247.320
38	9.075	362.992	-362.992	680.609	-226.870
39	8.315	332.592	-332.592	623.609	-207.870
40	7.860	314.392	-314.392	589.484	-196.495
41	7.705	308.192	-308.192	577.859	-192.620
42	1.642	65.672	-65.672	123.134	-41.045
43	3.665	146.592	-146.592	274.859	-91.620
44	4.771	190.832	-190.832	357.809	-119.270
45	5.394	215.752	-215.752	404.534	-134.845
46	5.585	223.392	-223.392	418.859	-139.620



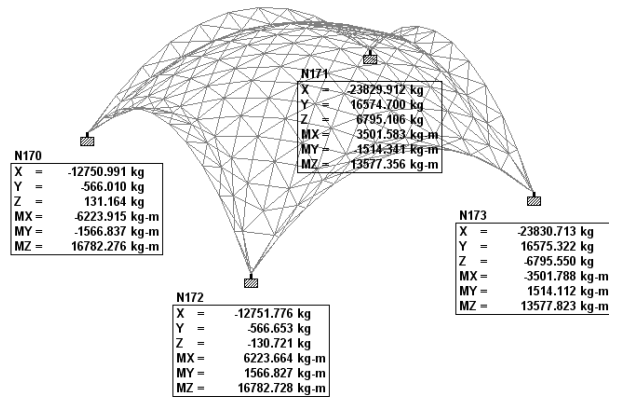
Modelo representado con elementos sólidos



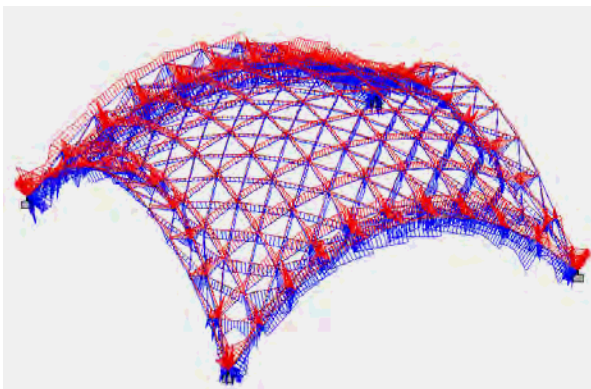
Distribución de cargas (servicio)



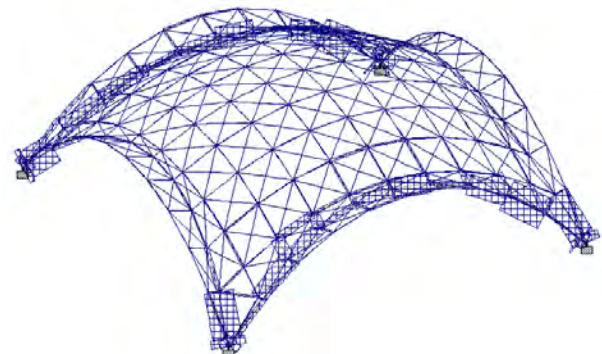
Combinación de cargas (servicio, presión y succión)



Gráfica de reacciones en los apoyos



Gráfica de esfuerzos (Beam stress)



Gráfica de esfuerzo de torsión

Tabla resumen de la cuantificación del material requerido a partir de los resultados obtenidos sobre la optimización de secciones en función de las solicitaciones estructurales.

PROFILE	LENGTH(METE)	WEIGHT(KG)
ST PIPS50	121.44	2638.965
ST PIPS60	69.36	1956.017
ST PIPS35	253.78	3437.281
ST PIPS80	123.98	5263.386
ST PIPS120	19.23	1418.739
ST PIPS30	353.50	3983.953
ST PIPS100	67.16	4038.850
ST PIPS40	100.19	1605.142
ST PIPS25	487.20	4185.760
ST PIPS20	876.79	4741.291
ST PIPS15	164.18	662.950
ST PIPX120	9.64	934.989
ST PIPX20	12.85	96.133
PRISMATIC STEEL	TOTAL	34963.453

Comparativo resultante a partir de los análisis realizados

Respecto a los tipos de secciones últimamente mencionadas, según la optimización del material realizado en función de los diferentes escenarios de comportamiento estructural analizados, para cada una de las tres propuestas presentadas, se obtuvo en cada caso un peso por m² resultante ligeramente mayor a los 15 kg/m² (respecto al área por cubrir en planta) indicados durante el primer análisis del peso propio sugerido. El cual se dio con las secciones y las cédulas del material consideradas en ese momento como posibles.

Se tiene que la forma de cada una de las propuestas estudiadas, finalmente influyó en la cantidad de material requerido para asegurar su integridad ante la combinación de los diferentes escenarios presentados. Esto es independientemente a las diferentes áreas generadas por el desarrollo de sus curvaturas.

De esto se desprende, en otras palabras, que específicamente la propuesta 2 requiere menos material (acero) en comparación con las propuestas 1 y 3 pese a contar con una mayor área por desarrollo con respecto a estas y que implicará a su vez, la necesidad de contar con una mayor cantidad de membrana para ser cubierta.




En la propuesta 2, al tener el arco central una flecha mayor, se tiene que en la transmisión de cargas hacia el arco perimetral, la componente horizontal (coceo) es menor con respecto a la componente horizontal del arco central de las propuestas 1 y particularmente de la propuesta 3. Esto se ve reflejado en las secciones del mismo arco perimetral y su alerón. Lo que se traduce como un incremento en material y por tanto en peso.

Por otro lado, una vez transmitidas las cargas a los arcos perimetrales, según la flecha de estos serán las componentes horizontales en los apoyos. La propuesta 3 cuenta con un arco perimetral de flecha considerable con respecto al de la propuesta 1 y 2, hecho que se ve reflejado en los valores menores obtenidos.

Con respecto a la propuesta 1; la cual se encontró al final como la propuesta menos eficiente, tuvo fuertes problemas en los arcos perimetrales para tomar las componentes horizontales. Esto representó una mayor demanda de material (de un tubo en 6" sugerido para el arco perimetral y tubo de 3" para el arco en alerón, pasó a tubo de 12" y 5" respectivamente) lo que se traduce al final también en peso.

En el caso de las propuestas 2 y 3; se vieron afectadas positivamente, primeramente, por la inclinación de dichos arcos perimetrales que, sin llegar dicha inclinación a ser tangencial al arco central, si ayudó considerablemente. Adicionalmente, por dicha inclinación, la longitud de los alerones fue mayor (en la propuesta 1 el alerón tiene una longitud constante de 0.50m, en las propuestas 2 y 3 cuentan estas con una longitud variable, siendo la menor de 0.50m para llegar hasta un máximo de 3.50m).

TABLA RESUMEN

CONCEPTO	 Propuesta 1	 Propuesta 2	 Propuesta 3
Área en planta (m ²)	1600.00	1600.00	1600.00
Área en desarrollo (m ²)	1956.00	2005.00	1860.00
Material requerido (kg)	39,285.781	30,625.332	34,963.453
Peso result (kg/m ² en planta)	24.553	19.140	21.852
Peso result (kg/m ² en desarr)	20.084	15.274	18.797
Fuerzas Lat. Máx. en apoyos	21,716.283	26,011.299	12,751.776
Posición según eficiencia	3	1	2

Diseño de los elementos de conexión

Sobre la propuesta de las estructuras que se están revisando, hemos de mencionar que se llevó a cabo, como parte integral del mismo trabajo, el diseño de lo que pretendía ser un nodo tipo que pudiera emplearse indistintamente a lo largo del desarrollo de la superficie de la misma estructura (en cualquiera de las 3 propuestas).

Los primeros esquemas que a continuación se ofrecen, se basan sobre una solución preliminar que incluía la necesidad rigurosa, como premisa inicial de diseño, de manejar ángulos de 90° en las proyecciones tangenciales a cada nodo en la conformación de la malla o retícula.

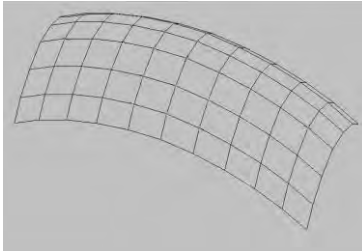
La solución funcionó parcialmente ya que después de analizar diferentes tipos de superficies entre las que se incluían; sección de esfera, sección de toroide (parte externa), catenaroide, variante de catenaroide por la implementación de arcos catenarios de flechas y claros variables (como es el caso de la propuesta 2 y 3) y bóvedas de cañón corrido de directriz circular, catenaria, parabólica, etc. Se encontró que dichos ángulos de 90° (4 ángulos que deberían converger en un solo nodo) únicamente podían manejarse en superficies de una sola curvatura.

Para las superficies de doble curvatura, sean Sinclásticas o Anticlasticas, solo se encuentra (forzando desde luego la formación de la retícula), en el mejor de los casos, 2 ángulos de 90° ; donde se entiende que hace referencia a 3 barras que llegan según lo solicitado y la cuarta barra con un ligera variante compensatoria que inhabilita a la solución encontrada como la adecuada.

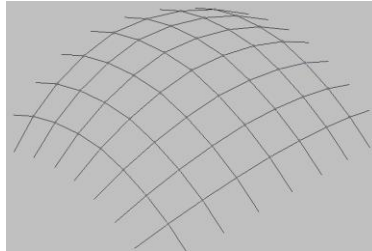
Si bien dichos ángulos de 90° medidos en el plano situado a partir de las proyecciones tangenciales a cada nodo de la retícula se ven afectados al desplazarse a su posición real; esto se ve resuelto por unas articulaciones que brindan libre movimiento a cada una de las barras participantes para su conveniente acomodo.

Una vez encontrado, en este sentido, el ángulo requerido para las barras que llegarán a dicho nodo, se cuenta con una segunda

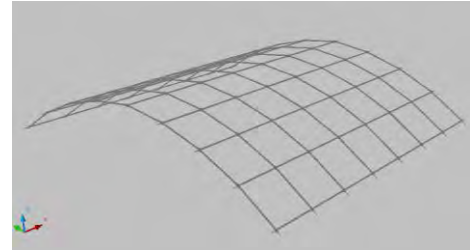
perforación, de menor tamaño, en la que se ha de colocar un segundo tornillo, con lo que dicha articulación quedaría trabada.



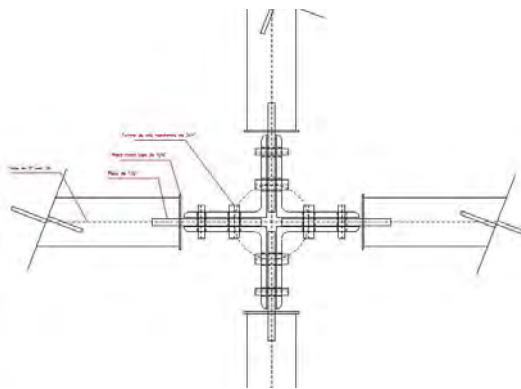
Sección de toroide (exterior)



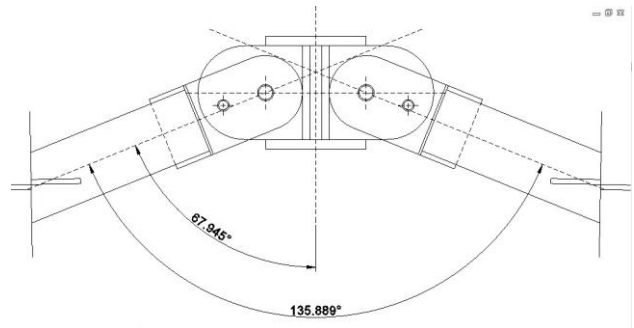
Sección de esfera



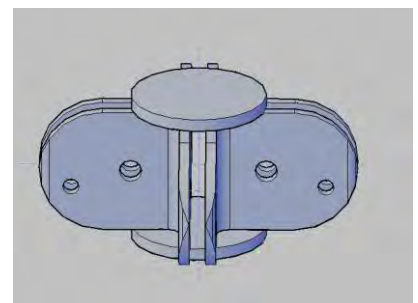
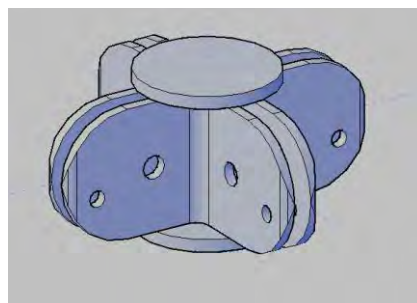
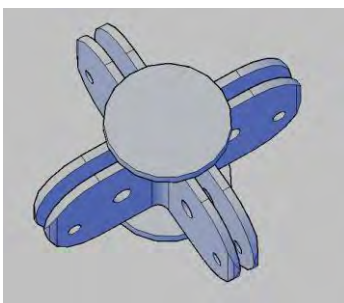
Bóveda circular de cañón corrido



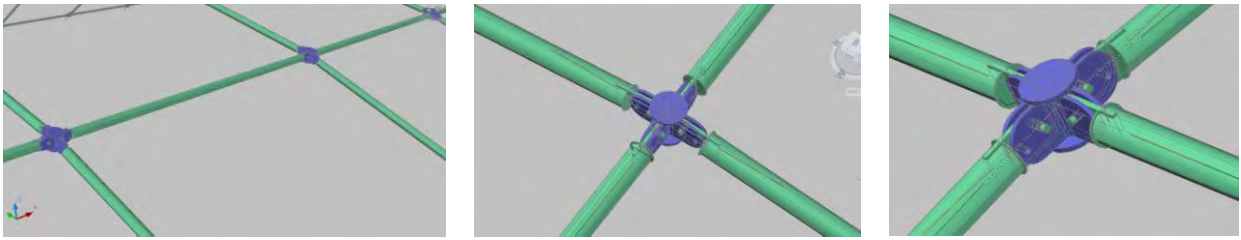
Planta del nodo y las cuatro barras convergiendo con los ángulos en 90° mencionados



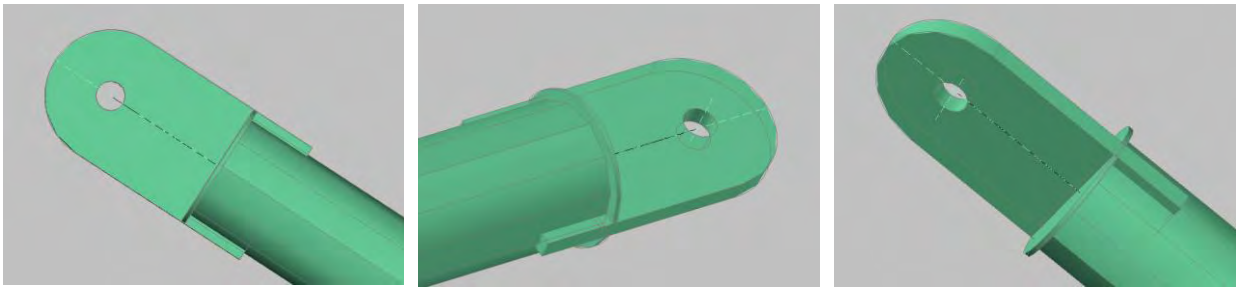
Alzado del nodo y los ángulos máximos permitidos en vertical



Diferentes vistas del tridimensional del nodo tipo, en su primera versión



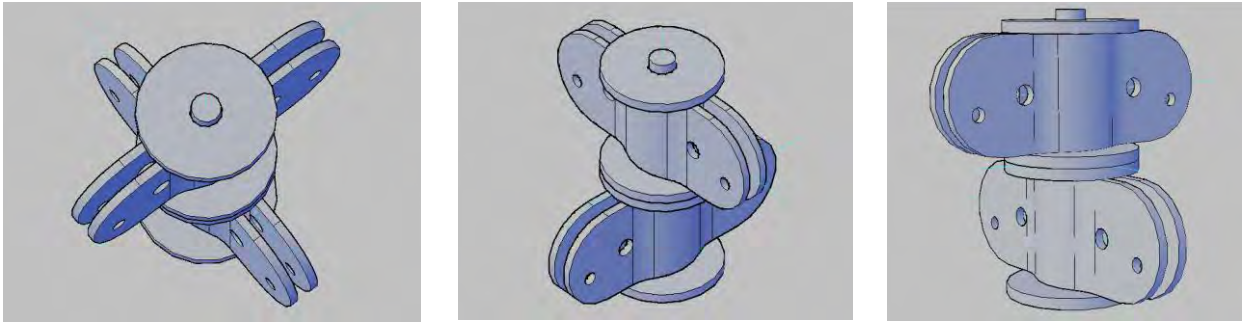
Diferentes vistas del nodo y su conexión con las barras



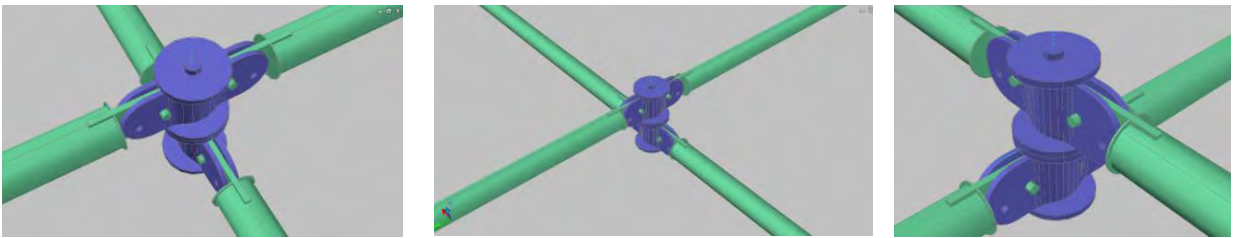
Diversas vistas de la terminación de una barra para su conexión con el nodo

Sobre la primera versión del nodo diseñado, más el concepto de un eje vertical que permita una articulación perpendicular a las ya existentes, para tomar los ángulos diversos de las barra que conforman la retícula, surge lo que sería la segunda versión. Un nodo que pretende funcionar libremente en el resto de las superficies de doble curvatura. En este caso se trata la conexión de barras como si fuera de doble capa. Es decir, el nodo cuenta con dos niveles para la recepción de las barras, por lo que unas de estas se conectarán abajo y otras arriba⁵⁵. La terminación de las barras para llegar al nodo se mantiene sin cambio.

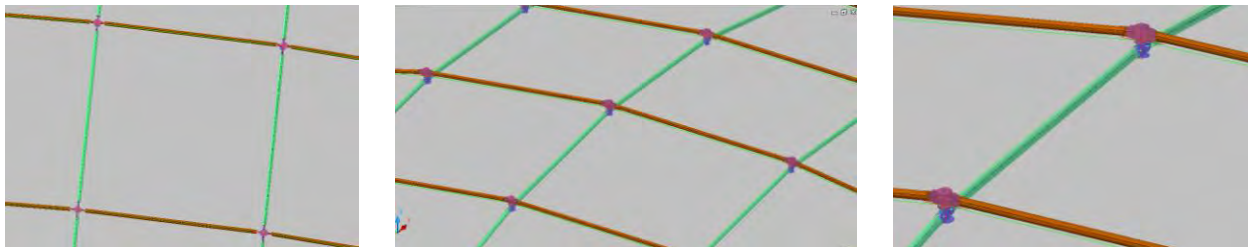
⁵⁵ Idea similar a la de la estructura reticular cuyos nodos son agarraderas dobles y que fue mostrado en un apartado anterior dentro de este mismo trabajo.



Diferentes vistas del tridimensional del nodo tipo, en su segunda versión

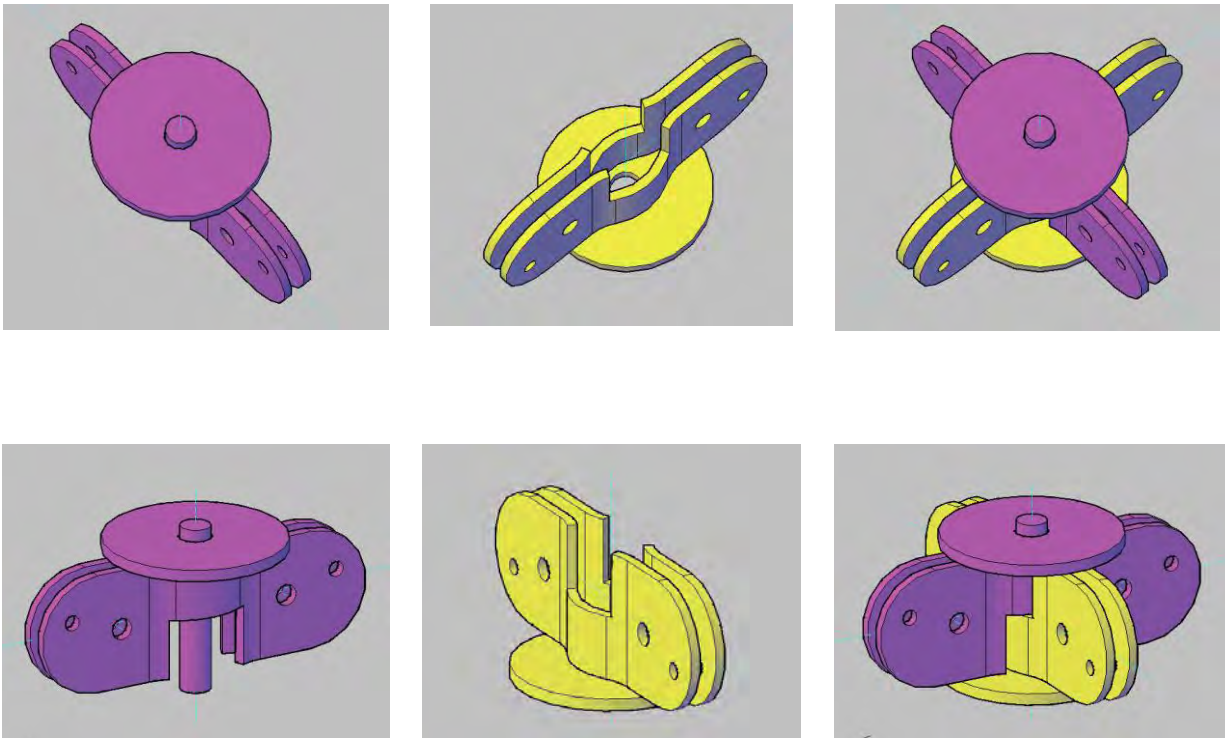


Vistas diversas generales sobre el detalle de conexión entre barras y nodo

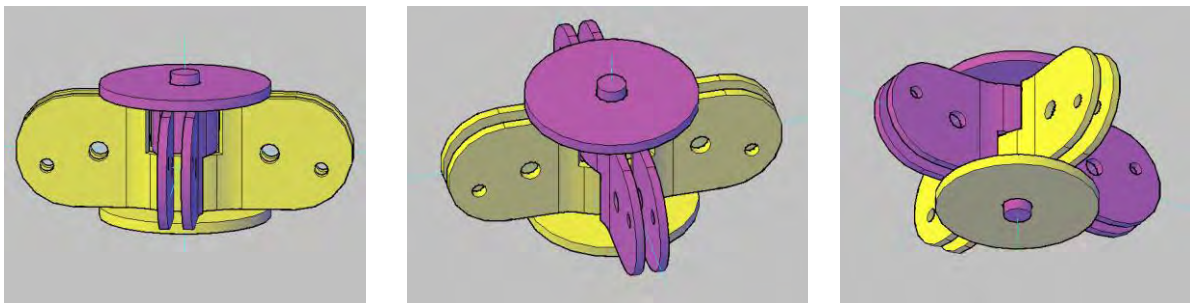


Vista parcial de la composición de barras y nodos sobre la estructura propuesta

En esta segunda propuesta, habría que criticar lo aparatoso que pudiera parecer la conexión y la falta de limpieza que tendría al final el aspecto general del modelo de la estructura; motivo por el cual se buscó sugerir una tercera propuesta que se apegara más al primer nodo con las ventajas del segundo. Es decir, conexiones entre barras al mismo nivel pero con el eje vertical que permitiera, en caso de requerirlo, tomar el ángulo entre barras que fuera solicitado en el plano tangencial, a un determinado punto, sobre la superficie de la estructura.



Diferentes vistas de las partes componentes del nodo tipo, en su tercera versión

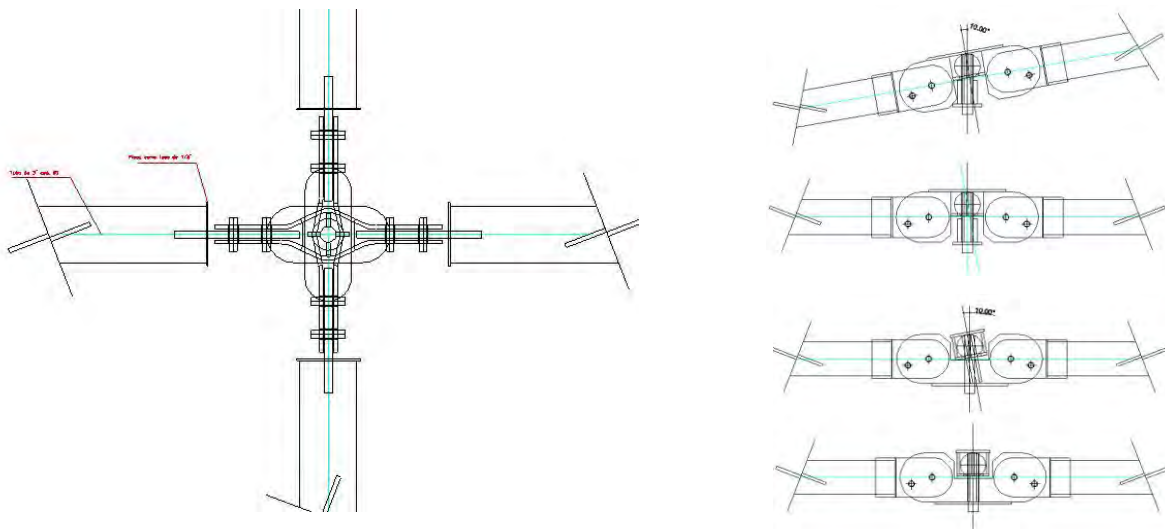


Modelo tridimensional del nodo tipo ya armado

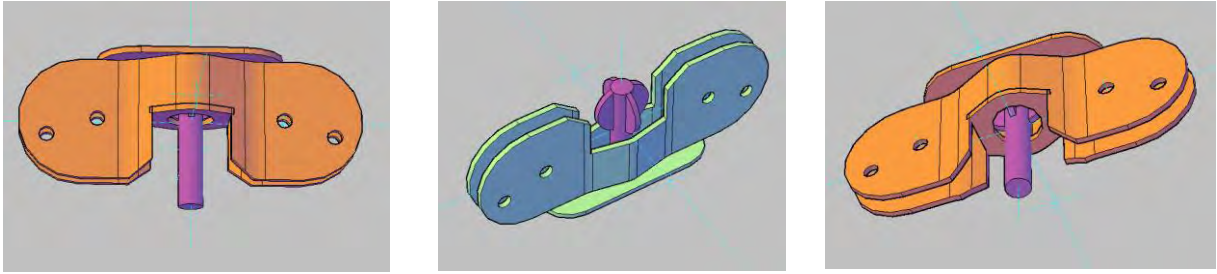
Si bien con esta tercera propuesta se ha solucionado lo que desde un inicio se buscaba; al ser probado sobre un modelo tridimensional completo, reiterando que su eje vertical debe ser perpendicular al plano tangencial de la superficie y que permite generar los diversos ángulos que sobre dicha superficie se solicitan (plano XY); se ha llegado a

detectar una pequeña desviación sobre las proyecciones de dichos ángulos en el plano YZ de los mismos ángulos (esta condición se presenta al ser, desde un principio, también alineado sobre el plano ZX) que equivalen al punto de llegada y salida de los elementos que sobre este plano se conectan. Dichas desviaciones, estando en obra y bajo un sentido pragmático, sin mucho problema podrían ser absorbidas forzando un poco los elementos que conectan. Esto es particularmente válido si se considera la relación existente entre la longitud de tales piezas (4.24m) y la dimensión de la desviación máxima requerida (0.015m) para embonar perfectamente.

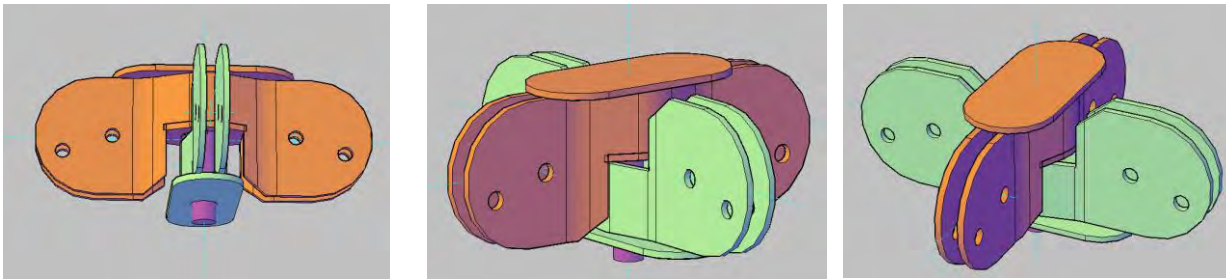
Sin embargo, la intención última es tratar de no dejar la solución a los demás si uno mismo puede evitar ciertos problemas. De ahí que surge la versión final del nodo. Donde el eje vertical ha sido sustituido por una rótula que brinda una mayor libertad de movimiento sobre los planos que así lo demanden. Lo cual es equivalente a una cierta libertad de movimiento, de manera indistinta, sobre ejes X, Y y Z



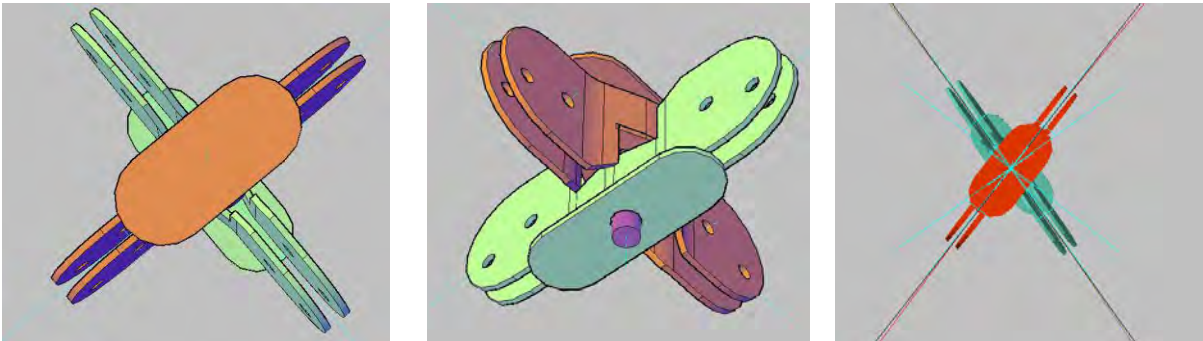
Planta y alzados del nodo indicando algunas de la inclinaciones obtenidas por la implementación de la rótula



Vistas de la parte superior e inferior del nodo junto con la rótula



Diferentes vistas del nodo armado en su cuarta versión



Vistas adicionales del nodo, incluyendo aquella donde se encuentra colocado en el punto que le corresponde sobre los ejes de la retícula de la estructura

5 COMENTARIOS FINALES

Una apreciación personal

Gracias a la versatilidad o libertad relativa de manejo en los sistemas reticulares, pueden estos ser empleados bajo conceptos de diseño estructural convencionales apoyados en su funcionamiento como sistemas de barras y nodos, en cubiertas planas o ligeramente inclinadas. Lo verdaderamente interesante es cuando se exploran bajo la forma de otros sistemas que se apoyan en una conveniente geometría. Tal es el caso de los cascarones, los cuales, independientemente del tipo de curva que se emplee como generatriz; la cantidad de material empleado es menor al utilizado en los mencionados sistemas convencionales.

En el caso de los cascarones, al ser estos manejados en un elemento tal como es el acero se logra resolver primeramente el problema de la cimbra que en su momento, perjudicó gravemente la difusión y construcción continua que los mismos cascarones de concreto tenían. Se eliminan las áreas de material que, con la formación de la misma retícula, pueden considerarse sin un trabajo estructural definido, con lo que se consigue un ahorro adicional. Ofreciendo la posibilidad de emplear otros objetos distintos para su recubrimiento como es el caso del cristal, policarbonato, membranas, láminas de titanio, cobre, etc.

Bien podría decirse que, bajo estas breves consideraciones, los sistemas de doble curvatura en retícula resultan ser de gran eficiencia. Aunado a que actualmente, con los recursos tecnológicos con que pueden contarse, las concepciones de diseño se han expandido bajo distintas vertientes para explorar opciones de espacios, en ocasiones topológicamente tortuosos, pero a fin de cuentas de gran originalidad; los sistemas de retícula parecen ser los ideales para tratar de darles soporte.

Asimismo, personalmente me parece revelador que uno de los sistemas de cálculo actuales con más difusión: **"análisis por elementos**

finitos” (FEA) se base en la descomposición de cualquier superficie en una retícula que posteriormente puede analizar.

Sobre estas consideraciones de formas, se puede entender que los sistemas de retícula funcionan igualmente bien para definir una superficie previamente generada como para que a partir del juego que con esta se tenga se llegué a crear otra superficie.

Muchos son los nuevos proyectos que se van gestando y construyendo a partir del entendimiento y la aplicación de las bondades del sistema, por lo que creo que pudiera llegar a establecerse como el sistema estructural más importante de esta primera parte del siglo XXI.

6 FUENTES DE INFORMACIÓN

Bibliografía

- Aldersey Williams, Hugh, **Zoomorphic**, Laurence King Publishing, United Kingdom, 2003
- Asensio, Francisco (editor) **High-Tech para High-Tech**, Atrium internacional de México, México, 2001
- Arnal Simón, Luis y Betancourt Suárez, Max. **Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal**, Edit. Trillas, México, 2008
- Baldwin, J. **Bucky Works**, Buckminster Fuller's ideas for today, John Wiley & Sons, Inc. USA, 1996
- Billington, David. P. **The art of structural design, A Swiss legacy**, Princeton University Art Museum, EUA, 2003
- Broto, Carles, **Cubiertas: innovación y diseño**, Editorial Links, España, 2009
- Cabrera Lelo de Larrea, José Luis, **Espacios Oníricos, La construcción de realidades alternas?**, Tesis de doctorado, CIEP, Fac. Arquitectura, UNAM, 2008
- Charleson, Andrew W. **Structure as Architecture**, Edit. Architectural Press (Elsevier), USA, 2006 (reimpresión) (2005, 1ª edición)
- Chilton, John, **Heinz Isler, the engineer's contribution to contemporary architecture**, Thomas Telford Publishing, UK, 2000 (1ª edición)
- De Anda Alanís, Enrique X. **Candela**, Editorial Taschen, Alemania, 2008
- Del Cueto, Juan Ignacio (editor y compilador), **Aquella primavera creadora.... Cascarones de concreto armado en México**, México, 2008 (1ª edición)
- Engel, Heino, **Sistemas de estructuras**, Traducción: Jordi Siguan y Rafael Ayuso, Edit. Gustavo Gili, España, 2001

- Forster, Kurt W. Y Dal Co, Francesco, **Frank O. Gehry**, The complete works, The Monacelli press, USA, 1998
- Garlock and Billington, **Felix Candela, Engineer, Builder, Structural artist**, Princeton University Art Museum, Yale University Press, Singapore, 2008
- IMCA, **Manual de Construcción en Acero**, diseño por esfuerzos permisibles, Edit. Limusa, México, 2008 (4ª edición)
- Jencks, Charles, **Architecture Today** Harry N. Abrams, New York, 1988
- López Morales, Francisco Javier, **Arquitectura Vernácula en México**, Edit. Trillas, México, 1993 (3ª edición)
- Lovecraft, H.P. **Los mitos de Cthulhu**, Traducción: Francisco Torres Oliver y Rafael Llopis, Alianza editorial, España, 2002 (5ª reimpresión)
- Meli Piralla, Roberto, **Diseño Estructural**, Edit. Limusa, México, 2008 (2ª edición)
- Oliva Salinas, Juan Gerardo, **Estudio sobre la construcción de cascarones reticulados**, División de estudios de posgrado, Facultad de Arquitectura, UNAM, México, 1989 (1ª edición)
- Pflüger, Alf. **Estática elemental de las cascaras**, Traducción: Renate Leisse de Mertig y Mario H. Gradowczyk, Edit. Eudeba, Argentina, 1965 (2ª edición)
- Picon, Antoine (direction), **L' art de l' ingénieur**, Éditions du Centre Georges Pompidou, Paris, 1997
- Ramírez, Juan Antonio, **Gaudí**, Grupo Anaya, S.A. España, 1992 (1ª edición)
- Seguí, Miguel, **Candela-Pérez Piñero, un dialogo imaginal** Editorial Rueda S L, España, 1972
- Senosiain, Javier, **Arquitectura orgánica**, AM Editores, S.A de C.V. China, 2008 (1ª edición)
- Tonda, Juan Antonio, **Cascarones de concreto**, UAM, Coordinación de Extensión Universitaria, México, 1987

- Tonda, Juan Antonio, **Félix Candela**, Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, México, 2000, (1ª edición)

Ensayos

- **The structural engineering of the downland gridshell**, Richard Harris Ollie Kelly (Buro Happold)
- **Building for a future winter**, Oliver Lowenstein
- **Shape optimization of shell and spatial structure for specified stress distribution**, Hiroshi Ohmori and Kenji Yamamoto
- **Multi objective optimization of free-form grid structures**, Pete Winslow
- **Form finding of a gridshell in composite materials**, C. Douthe, O. Baverel and J.F. Caron (IASS 2006)
- **Past and future of gridshell structures**, Céline Paoli
- **A design tool for timber gridshells**, M.H. Toussaint
- **A design tool for timber gridshells (2)**, M.H. Toussaint
- **Subdivision techniques for optimization of free form structures**, P. Winslow, S. Pellegrino, S. B. Sharma
- **From prehistoric stickdomes to the state of the art gridshells**, Horst Berger

Recursos en internet

<http://www.aiei.com.mx>

Sitio Web de **A I E I estructuras ligeras, S.A. de C.V.** Empresa dedicada al diseño y construcción de cubiertas ligeras, principalmente de tipo Sinclásticas. Se presentan diversos proyectos y obras realizadas. Así como algunos proyectos especiales que hasta la fecha nos han solicitado.

<http://www.fantasismo.com.mx>

Sitio web que sugiere una seria reconsideración de **la fantasía** como recurso en la generación de conceptos de diseño y de **lo fantástico** como medio de expresión. Este sitio web es producto de mis estudios realizados dentro del programa de Doctorado en arquitectura (UNAM).

http://en.wikipedia.org/wiki/Eug%C3%A8ne_Viollet-le-Duc

Sitio web de "Wikipedia, The free encyclopedia". La página en cuestión está dedicada a **Eugène Emmanuel Viollet le Duc**, Arquitecto y teórico francés que alcanzó gran notoriedad, en parte, por la restauración hecha a edificios medievales. De igual manera, fue figura importante en el resurgimiento del gótico en Francia.

Se ofrece una breve reseña de su vida y sus principales ideas. Una relación de los principales trabajos realizados, hipervínculos recomendados, etc.

http://en.wikipedia.org/wiki/Antoni_Gaud%C3%AD

Sitio web de "Wikipedia, The free encyclopedia". La página en cuestión está dedicada a **Antoni Gaudí**, arquitecto catalán de estilo único. Aunque en un inicio se le llegó a asociar con el Art Nouveau. Se ofrece una biografía bastante corta sobre Gaudí. Sin embargo, se tocan algunos puntos interesantes; como las referencias a las influencias principales que tuvo y que ayudaron a forjar su peculiar estilo.

<http://www.rdg.ac.uk/biomim/home.htm>

Sitio web del **Centro Biomimético de la Universidad de Reading** (Centre for Biomimetics at the University of Reading) en el Reino Unido. El principal objetivo que esta institución persigue es el de desarrollar diferentes artefactos apoyados en la investigación de la naturaleza.

<http://www.arquitecturaorganica.com/inicio.html>

Sitio Web de "Arquitectura Orgánica", elaborado por **Javier Senosiain**. El sitio funciona más bien como una especie de Curriculum Vitae sobre el trabajo desarrollado por este arquitecto. Muestra bastantes imágenes sobre sus obras, pero es poco claro en cuanto a la determinación de ideas, razones o filosofía que rige la concepción de sus proyectos.

http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_architecture

Sitio web de "Wikipedia, The free encyclopedia". La página en cuestión está dedicada a la llamada **arquitectura orgánica**. Se hace referencia a los principios básicos sobre los cuales, ideológicamente, se planteó. Asimismo, se presenta lo mencionado específicamente en 1939 por Frank Lloyd Wright.

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

Sitio web del arquitecto **Greg Lynn**, quien se ha distinguido por ser en un inicio impulsor de **lo que se ha dado en llamar "Blob architecture"** que consiste en la búsqueda y experimentación con formas complejas a través del uso, principalmente, de nuevas tecnologías; tanto para su diseño como para su construcción en disciplinas tales como la arquitectura y el diseño industrial. El sitio web se presenta de una forma principalmente visual a través de un amplio uso de videos.

<http://www.macniteroi.com.br/>

Sitio web del **Museo de arte contemporáneo de Niterói**; obra del arquitecto Oscar Niemeyer. Se ofrece información relativa a la arquitectura propia del museo así como, exposiciones realizadas, cursos impartidos, acervos con que cuenta, etc.

<http://www.bartlett.ucl.ac.uk/research/architecture/profiles/Forty.htm>

Sitio web de "The Bartlett" facultad de arquitectura de la UCL (University College London). La página en cuestión está dedicada al profesor **Adrian Forty**, docente de dicha universidad. Se ofrecen datos generales sobre la trayectoria de este investigador.

<http://www.ptw.com.au/>

Sitio web de la firma **PTW Architects** (Peddle Thorp & Walker) arquitectos australianos con presencia internacional, a través de sus distintas oficinas en Shanghái, Beijing, Dubái, etc. Responsables de proyectos tales como el de la Palmera de Jumeirah en Dubái y el Centro Nacional Olímpico (cubo de agua) en Beijing. El sitio brinda información general de la firma así como diversos proyectos realizados: arquitectónicos como urbanísticos.

http://en.wikipedia.org/wiki/D'Arcy_Wentworth_Thompson

Sitio web de "Wikipedia, The free encyclopedia". La página en cuestión está dedicada a **D'Arcy Thompson**, biólogo escocés que se distinguió por los trabajos realizados respecto a los procesos evolutivos como los responsables fundamentales de la forma y estructura de los seres vivos.

<http://www.ruiz-geli.com/>

Sitio web del arquitecto **Enric Ruiz Geli**, quien se ha caracterizado por la exploración de nuevas formas así como en la utilización de materiales de reciente demanda. Como es el caso del la membrana de ETFE. El sitio incluye un resumen de su trayectoria, trabajos realizados y proyectos en proceso de desarrollo.

<http://www.upenn.edu/almanac/v42/n19/ricolais.html>

Página web dedicada a **Robert le Ricolais** personaje multifacético que destacó dentro del ámbito de las estructuras, especialmente de las llamadas estructuras espaciales, (de hecho se le ha llegado a considerar como el padre de las estructuras espaciales). Tuvo una formación como matemático y físico pero incursionó en entornos diversos como el de la pintura y la poesía. La pagina en cuestión hace referencia a una exposición de nombre "*Visions & Paradox*" que fue promovida por un antiguo alumno suyo, el ahora profesor Peter Mc Cleary.

<http://www.tdrinc.com/home.html>

Sitio web del arquitecto **Eugene Tsui** donde expone, entre diferentes datos respecto a su trayectoria en distintos ámbitos, ciertos conceptos interesantes en lo relacionado al Biomorfismo. Asimismo, diversas imágenes (de no muy buena calidad) de algunas obras arquitectónicas que reflejan dichos conceptos.

<http://www.zwarts.jansma.nl/>

Sitio web de la firma **Zwarts & Jansma architects** arquitectos holandeses con ciertos proyectos de interés. El sitio resulta ser un poco austero en cuanto a proporcionar información sobre la firma. Sin embargo, ofrece imágenes de buena calidad sobre algunos de sus proyectos y obras.

<http://www.azcapotzalco.gob.mx/>

Sitio web de la **Delegación Azcapotzalco** donde se presentan diversos eventos realizados con respecto al trabajo desarrollado por las autoridades en beneficio de la comunidad, ofrece la posibilidad de tramitar ciertos servicios vía "online". Directorio de los componentes de la autoridad delegacional, planos delegacionales, etc.

<http://www.koolbamboo.com/index.htm>

Sitio web de "**Kool Bamboo**" empresa norteamericana dedicada a la comercialización del bambú. Sea como material tratado para ser utilizado en el construcción como ya empleado dentro del diseño y fabricación de mobiliario. La información proporcionada es muy vasta y abarca sobre diferentes tópicos relacionados al mismo bambú.

<http://www.kennethsnelson.net/icons/scul.htm>

Sitio web de **Kenneth Snelson**, escultor norteamericano conocido principalmente por sus trabajos realizados sobre estructuras en "tensegrity" de diversos tamaños y con distintas formas, siendo estas de variada complejidad. El sitio ofrece una breve biografía, relación de exposiciones montadas, patentes tramitadas, artículos publicados o que sobre él se ha publicado, etc.

<http://www.iass-structures.org/>

Sitio web de la **IASS** (The international Association for Shell and Spatial Structures) fundada por Eduardo Torroja en 1959, tiene como objetivo principal el impulsar el desarrollo y transmisión del conocimiento generado, en cuanto a diseño, análisis y técnicas de construcción se refiere, sobre estructuras ligeras.

<http://www.mero-tsk.de/index.php?id=14&L=1>

Sitio web de **MERO-TSK International GmbH & Co**. Compañía alemana, fundada por el Dr. -Ing. Max Mengerlinghausen en 1949, dedicada al diseño y construcción de estructuras, principalmente espaciales, a partir del sistema de barras y nodos que han desarrollado. Adicionalmente a la información propia del quehacer de la compañía, se cuenta con una sección de "downloads" con ciertos ensayos de interés que están accesible bajo formato PDF.

<http://www.novumstructures.com/novum/>

Sitio web de **Novum Structures LLC** antigua filial de MERO en Estados Unidos, hasta que se independizó en 2004 para ser relanzada en 2006 con este nuevo nombre. En principio, se maneja con un sistema similar al empleado por MERO aunado a las adecuaciones o modificaciones que como parte de su evolución han ido teniendo.

<http://www.structuremag.org/>

Sitio web de **STRUCTURE Magazine**. Revista, para este caso, en versión electrónica que tiene por objetivo principal la difusión de conocimientos que permitan incrementar la calidad, productividad y confiabilidad dentro del ámbito del análisis estructural. Cuenta con diversas secciones que resulta conveniente revisar.

<http://en.structurae.de/persons/data/index.cfm?id=d000017>

Sitio web de **Structurae**, portal dedicado a la difusión de reconocidos trabajos dentro del entorno de la ingeniería estructural. La página en cuestión está dedicada a **Heinz Isler**, Ingeniero suizo que destacó por el estudio y construcción de cascarones en concreto armado, principalmente bajo modelos no geométricos pero si con un comportamiento naturalmente estructural.

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

Sitio web del **grupo Ferrari**. Fabricante de textiles para diversos usos entre los que sobresalen los referentes al entorno arquitectónico. **A partir del sitio "home" se desprenden otros sitios que se enfocan en el uso particular que, a dichos textiles, se les pretende dar. Se destaca la sección de "downloads" donde se ofrecen fichas técnicas de sus productos de consumo más frecuentes.**

<http://www.ferrebarniedo.com.mx/>

Sitio web de **Ferrebarniedo**; proveedor de distintos tipos de perfiles en acero para la construcción. Cabe destacar la sección correspondiente a productos, donde se encuentra un catalogo con las especificaciones más comunes de los perfiles manejados, los cuales suelen encontrar pequeñas variaciones con los presentados en el manual IMCA.

<http://www.musee-terra-amata.org/>

Sitio web del museo de paleontología humana de **"Terra Amata"** donde pueden encontrarse diversas secciones que explican los distintos recursos de difusión con que cuenta el museo.