

La eficiencia estructural como búsqueda de lo óptimo

Estudio de ejemplos

Mauro García

Índice

Introducción.....	5
¿Qué es optimizar?	6
Objetivos de la optimización.....	7
La optimización en la práctica	8
Pabellón de Portugal en la Expo Lisboa.....	9
Optimización de la lámina de la plaza cubierta	14
Restaurante los Manantiales en Xochimilco.....	23
¿Cómo se optimiza un cascarón de hormigón?.....	27
Pabellón de Japón en la Expo Hannover	37
La optimización en los entramados de barras.....	42
Un cuarto ejemplo.....	51
Conclusiones.....	59
Bibliografía	66

Introducción

Reducir los costos de las construcciones siempre ha sido un objetivo que se ha querido lograr desde hace mucho tiempo. Sin embargo la mayoría de las veces por las cuales una construcción no resulta económica se debe a una incorrecta elección del material, o a una forma incorrecta de hacer trabajar dicho material, a errores de diseño o de proyecto, en fin diversos factores que inciden irremediablemente en el costo total de una construcción.

Teniendo en cuenta que dentro de ese costo, la mayor parte corresponde a la parte estructural del edificio,¹ todos los factores mencionados también se aplican a la estructura. Y es allí donde entra en juego la optimización de estructuras.

Se puede llegar a la optimización a través de una o varias técnicas constructivas, algunas ya conocidas pero que no fueron explotadas en todas sus posibilidades y otras que han surgido en los últimos tiempos con la aparición de nuevos materiales y el desarrollo de nuevas formas de construir.

¹ El costo de la estructura puede llegar a representar hasta un 70 % del costo total, según lo comentado en: <http://www.arqhys.com/noticias/2009/09/fundamentos-del-diseno-optimo-de.html>

¿Qué es optimizar?

Primero hay que comenzar definiendo lo que significa el término optimizar para tratar de entender de que se trata. Consultando el Diccionario de la Real Academia Española encontramos que optimizar es “*buscar la mejor manera de realizar una actividad*” mientras que si buscamos el término optimización lo define como la “*acción y efecto de optimizar*”.

Ahora bien llevando las definiciones al tema en estudio la pregunta que surge es ¿Cuál es la mejor manera de realizar una estructura?

Como las definiciones no echan luz sobre el tema es necesario introducir una definición más precisa como por ejemplo “*un problema de optimización trata entonces de tomar una decisión óptima para maximizar (ganancias, velocidad, eficiencia, etc.) o minimizar (costos, tiempo, riesgos, error, etc.) un criterio determinado*”.² La definición introduce dos palabras clave, una de ellas es criterios que son los que deberemos tener definidos ante un problema de optimización, lo que implica tomar decisiones, en nuestro caso es la búsqueda de la eficiencia a través de la técnica reduciendo la utilización de materiales, mano de obra, tiempo, llevando estos criterios al objetivo final que es bajar el costo.

² http://es.wikipedia.org/wiki/Optimizaci%C3%B3n_%28matem%C3%A1tica%29

La segunda palabra clave es la eficiencia que es definida por la Real Academia como la “*capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un efecto determinado*”.

Con esta definición y las otras vistas anteriormente se puede llegar a una definición de optimización aplicada al tema en estudio. La mejor manera de realizar una estructura pasa por tomar decisiones sobre la capacidad de disponer de los materiales para que trabajen de forma eficiente, reduciendo el empleo de los mismos, tiempo de construcción, recursos, obteniendo como beneficio la reducción de costos.

Objetivos de la optimización

Una vez definido optimización hay que plantear que es lo que se pretende lograr con ella y que cosas debemos tener presentes para lograrla.

Se entiende como objetivo principal a partir de lo dicho en las definiciones es la reducción del costo de las construcciones y solo es posible llevarlo a cabo si se impone el objetivo de la optimización desde las etapas de proyecto.

Es importante establecer en esta etapa que tipo de recursos o materiales se pretenden reducir como por ejemplo transporte, mano de obra, montaje, armaduras, hormigón, lograr un peso mínimo, etc., sin descuidar las condiciones de resistencia, deformación, tecnologías de fabricación.

Sin duda que la optimización no se puede hacer sin satisfacer las normas de cálculo, sin descuidar su durabilidad y seguridad debiendo ser la mejor solución posible dentro de todas las que se nos presentan a lo largo del proceso.

Los criterios que fueron antes explicitados, dependerá de cada estructura cuales se toman pudiendo ser uno o dos o todos, pero lo que si se debe dejar en claro es que la elección de estos debe llevar a una estructura que sea posible construirla porque de nada sirve llegar a una solución que se pretende óptima si no se puede construir.

La optimización en la práctica

Ahora parece interesante saber cuales son aquellas técnicas que posibilitan la optimización. Técnicas hay muchas y sería muy difícil abarcarlas a todas por eso en el trabajo se van a ver una serie de ejemplos en las que se han aplicado algunas de ellas. Se analizarán para cada uno el programa, condiciones, solución estructural adoptada y métodos que hicieron posible llegar a una estructura óptima.

Los ejemplos serán los siguientes:

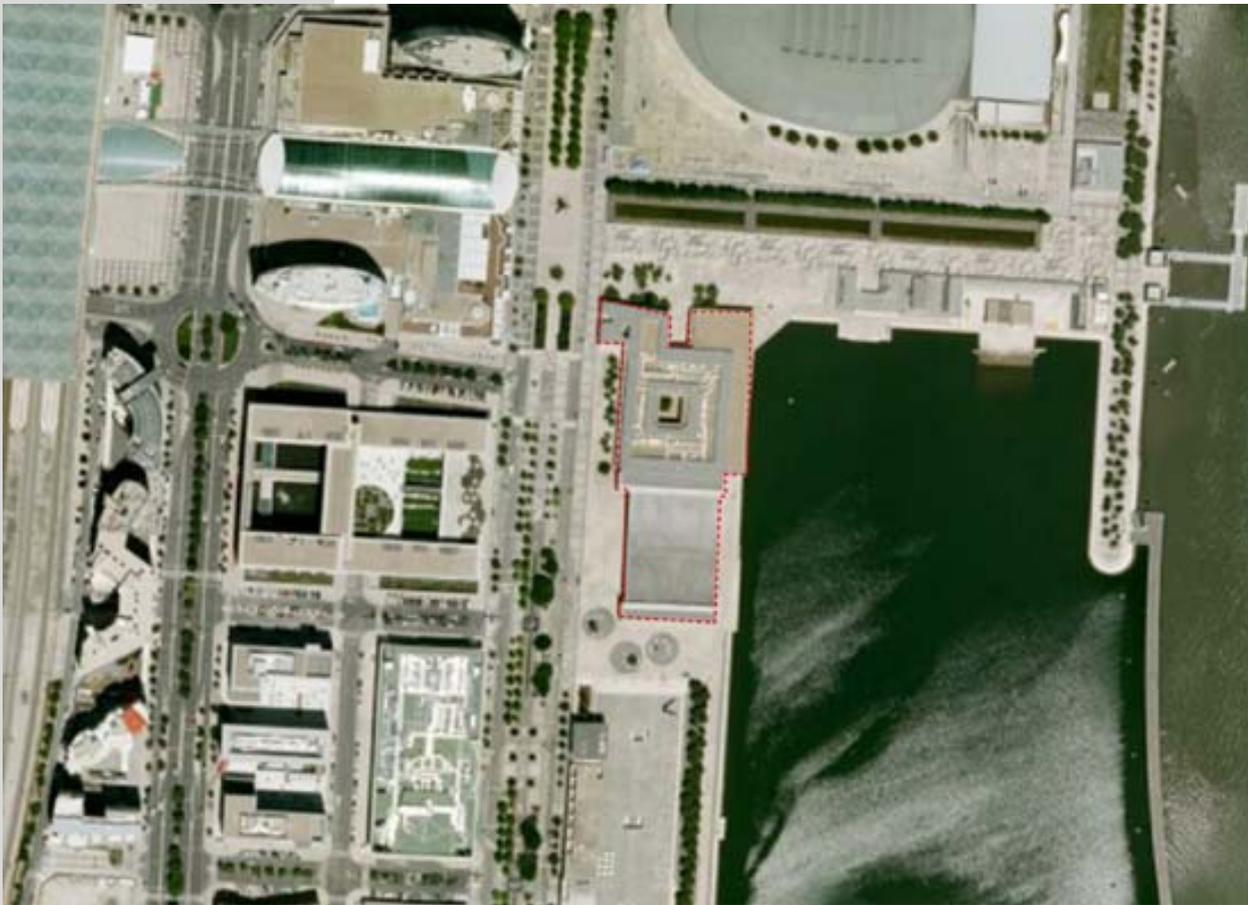
Pabellón de Portugal en la Expo Lisboa - Álvaro Siza.

Restaurante los Manantiales en Xochimilco – Félix Candela.

Pabellón de Japón en la Expo Hannover – Shigeru Ban.



**Pabellón de Portugal en la Expo Lisboa
Álvaro Siza, Portugal, 1998**



El programa para el cual fue proyectado el edificio pasaría por dos situaciones, una es para la exposición y la otra es una vez finalizada la misma porque este edificio iba a ser uno de los que iban a sobrevivir al final de la expo, la mayoría de los edificios destinados a los pabellones se demuelen.

Para la primera situación contaría con dos áreas, una gran plaza exterior techada y un edificio destinado a la exposición, servicios, etc.

Para la segunda situación en el momento de definir el proyecto no se conocía el destino que tendría el edificio, por lo que tampoco se podrían definir los cambios que sufriría el edificio para la nueva circunstancia.



Como solo estaba definida la primera situación comentemos un poco en que consiste el programa considerando que lo dicho en los párrafos siguientes vale también para el Pabellón de Japón en Hannover 2000.

En las distintas exposiciones universales cada uno de los países participantes construye un pabellón en donde muestran su cultura, turismo, costumbres, historia, etc., por lo que el

diseño del pabellón debe representar las características del país. Dependiendo de la inversión que puedan hacer los diferentes países podrán tener un pabellón compartido con otros países dentro de un pabellón más general representando a un continente o a un pabellón individual, siendo mayor la inversión que se requiere para este último.

En el caso del Pabellón de Portugal se trata de un pabellón individual, que representa a un país con una fuerte tradición naviera, por lo que Siza entendió que en eso debía basar el proyecto del techado de la gran plaza.

Durante el proceso de proyecto se probaron varias soluciones como una gran losa apoyada en varios pilares que no le convenció demasiado, ahí se dio cuenta de que debía hacer una gran cubierta sin apoyos intermedios, enfrentándose a un desafío que no sabía si era posible llevarlo a cabo requiriendo la colaboración de los ingenieros, quienes le propusieron cubrir el espacio con tela, a Siza no le pareció la mejor forma de resolverlo e insistía en que la solución debía ser pesada.

Surgió la idea de realizar una bóveda con una curvatura suave, que según él no brindaba la suficiente sensación de refugio, es así que la curvatura se invertiría para dar origen a la propuesta final: una lámina suspendida de hormigón siguiendo la configuración de una curva catenaria y que de algún modo rememora las velas de los grandes navíos portugueses.



Espacialidad de la plaza cubierta



Cubre un espacio de 60 por 58 metros con un espesor de tan solo 20 centímetros, en la que se utilizó hormigón ligero pasando por su interior unos tubos por donde van los cables de acero de los que está suspendida desde una altura de 10 metros.

El peso se descarga en dos pórticos, cada uno con 9 muros que actúan como una especie de contrafuertes para resistir los empujes laterales. Las fundaciones se resolvieron con profundos pilotes dado que el terreno era muy blando.

La lámina no llega hasta los pórticos, dejándose un espacio entre estos elementos y en el que solo pasan los cables para dejar una entrada de luz hacia los edificios.

La solución de esta cubierta resulta ambigua porque es una solución pesada que parece estar flotando en el aire como si fuera liviana, e inclusive los críticos de arquitectura no saben si calificarla como una obra de arquitectura o de la ingeniería debido al papel protagónico de la cubierta y de la forma en la que fue resuelta.



Separación de la lámina de los contrafuertes

Optimización de la lámina de la plaza cubierta

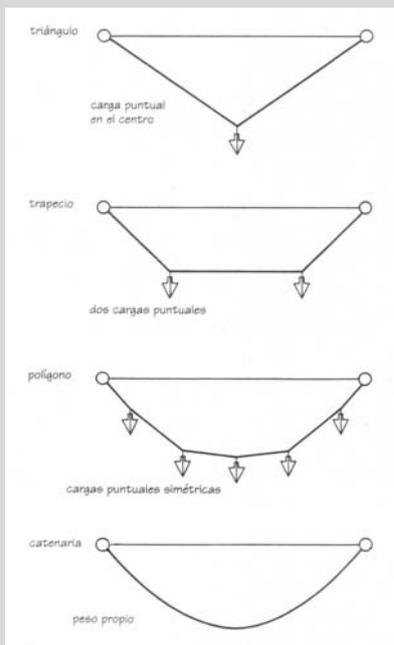
Definitivamente cubrir un espacio de dimensiones importantes es un desafío y la primera idea que se nos viene a la cabeza nos hace pensar que puede ser resuelta con una solución estructural liviana como por ejemplo disponer de una membrana colgada de dos puntos.

Pero qué pasa si queremos optar por una solución estructural pesada como lo hizo Siza.

Si deseamos mantener la idea de la membrana o una lámina pero que en este caso sea pesada en primer lugar tendremos que pensar en una cubierta curva dado que una plana no nos servirá porque para que sea una lámina el espesor debe ser mínimo con respecto a las otras dos dimensiones que son predominantes y esto no lo lograremos con cubiertas planas que requieren de espesores mayores.

Entonces los espesores serán menores siempre y cuando se busque la optimización de la lámina que aquí se consigue suspendiendo esta a través de cables que estabiliza a estos últimos y además se hace un pretensado para estabilizar la cubierta.

En primer lugar consideraremos los cables que es uno de los elementos fundamentales, tomemos uno de ellos y le colgamos una carga obteniendo 2 segmentos de recta, si colocamos 2



Diversas formas que adopta un cable según la cantidad y distribución de las cargas

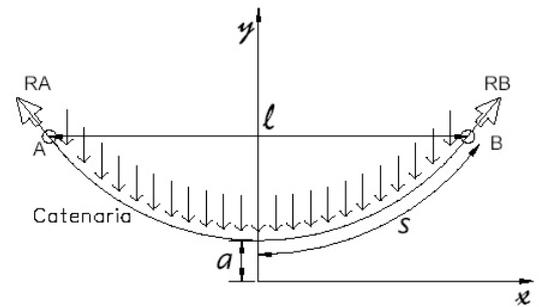
cargas obtendremos 3 segmentos y así sucesivamente concluyendo que el cable va adoptando formas en función de la distribución de las cargas pudiéndose llegar a la situación de tener cargas uniformemente repartidas a lo largo

de todo el cable y para este caso particular la forma que obtendrá se asemejará a la curva catenaria que es la geometría que adopta una cadena colgada en sus dos extremos y solamente sometida a la acción de la gravedad.

Ahora bien multipliquemos ese cable con carga uniforme por la cantidad de cables que se disponen en la cubierta, pero con la diferencia de que sobre esos cables la carga uniforme que actuará será la lámina. La forma que adoptaran como ya sabemos es semejante a la curva catenaria por lo que la lámina también adoptará esa forma cumpliéndose lo que mencionamos anteriormente respecto a la forma que deberá tener la cubierta.

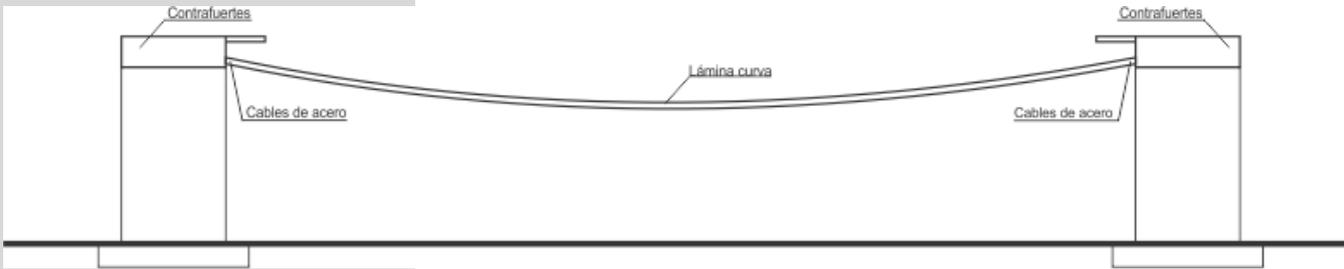
Pero a su vez el hecho de que esta adopte esa forma tiene una lógica detrás ya que las cargas viajan siguiendo su forma de manera constante a lo largo de toda la curvatura de la lámina, logrando que trabaje de manera eficiente solo con esfuerzos de membrana.

Entonces podemos estar pensando en una membrana que cuelga de dos puntos de apoyo y que trabaja bajo los



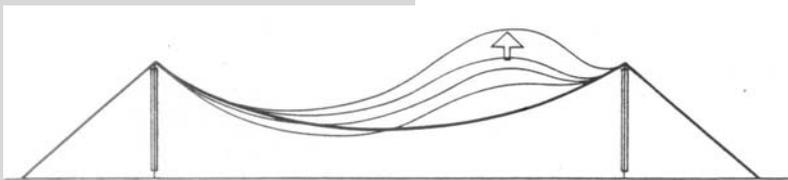
Un cable adopta la forma de una catenaria si la carga es uniforme a lo largo de su longitud

fundamentos de la teoría de las membranas que desarrollaremos más adelante.



Elementos que componen la cubierta

Hablar de membrana sugiere que debido a sus espesores mínimos su rigidez también sea mínima entonces puede resultar inestable porque por si sola no es resistente a las variaciones de cargas como las que puede introducir el viento. Cuando actúa, la cubierta puede ser levantada total o

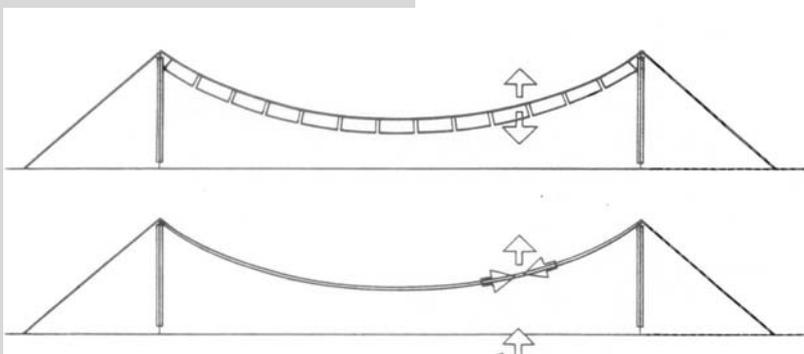


Variaciones de la curvatura que pueden ser producidas por el viento

parcialmente y como consecuencia trae la inversión de la curva siempre y cuando el efecto

producido por la succión sea mayor al peso de la misma.

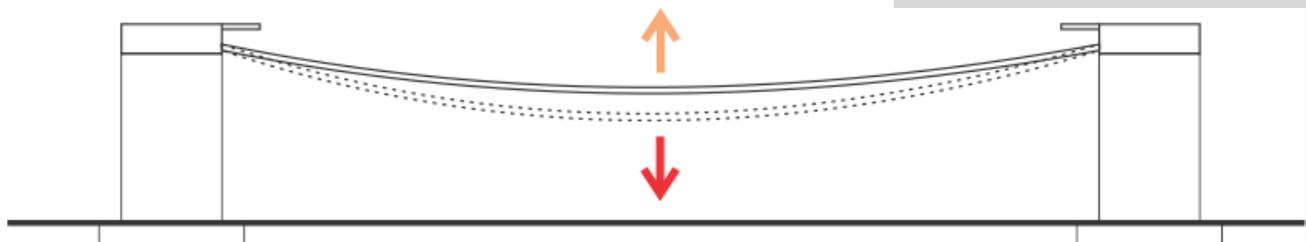
Para solucionar el inconveniente se debe aumentar la rigidez lográndose a través de dos caminos que son que el peso supere a los efectos de succión que se pueden registrar cosa que en esta cubierta se logra y la lámina estabiliza los cables, o



Formas de rigidizar este tipo de cubiertas, arriba mediante aumento del peso propio, abajo mediante pretensado

sino introduciendo una técnica que a lo largo del análisis no se ha tenido en cuenta hasta ahora pero que si se usó en el ejemplo que estamos analizando que es el pretensado.

En la práctica consiste en pasar los cables portantes de acero por unos huecos y previo tensado de los mismos mediante cables auxiliares que se fijan sobre un terreno firme que hacen tensión hacia abajo estirando el cable portante y estabilizándolo mientras se vierte el hormigón. Una vez fraguado los cables auxiliares se retiran y los portantes se acortan ocasionando que la cáscara de hormigón se comprima. Pero lo más importante son los beneficios que podemos obtener al ponerlo en práctica porque también colabora en el objetivo de buscar la optimización, en primer lugar el pretensado tiende a empujar la lámina hacia arriba, es decir contrarrestar los efectos de las cargas propias de la misma produciéndose una compensación de cargas.

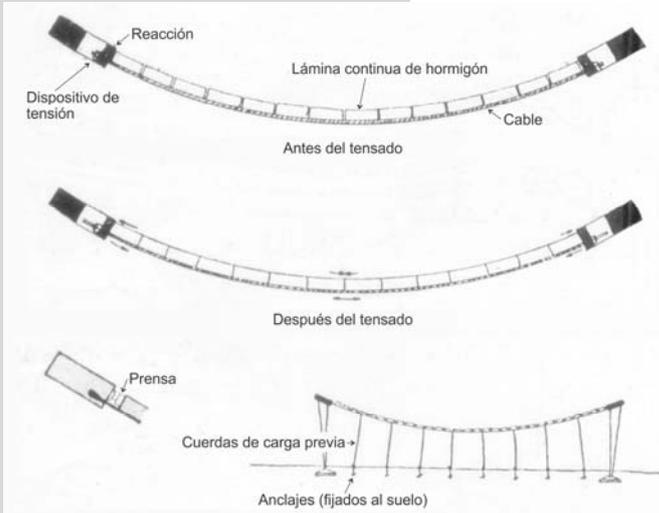


Si se disminuyen los efectos de las cargas esto trae como consecuencia la disminución de las sollicitaciones a las que se verá sometido y también se verá reducida la flecha.

Entonces nos permitirá una posibilidad de carga mayor, aumentar las dimensiones o las luces entre los apoyos y a su vez reducir el espesor de la lámina con lo que se explica el porqué del espesor de esta cubierta.

Efectos del pretensado, produce un contraflechado que levanta la lámina y permite reducir las cargas

A grandes rasgos se han expuesto los beneficios que aporta a nivel general pero también hay beneficios que se obtienen en el hormigón.



Los gráficos hacen referencia a placas de hormigón separadas pero puede asimilarse a una capa continua con fisuras que luego de aplicar el pretensado se reducen considerablemente, abajo se muestra uno de los métodos de aplicar tensión al cable

Dijimos que los cables portantes se tensan antes de verter el hormigón, estos deben tener un límite elástico alto para que se le pueda aplicar una tensión grande y poder contrarrestar el fenómeno de la retracción que se da en el hormigón sometido a esfuerzos de compresión y que pueden anular los efectos del pretensado.

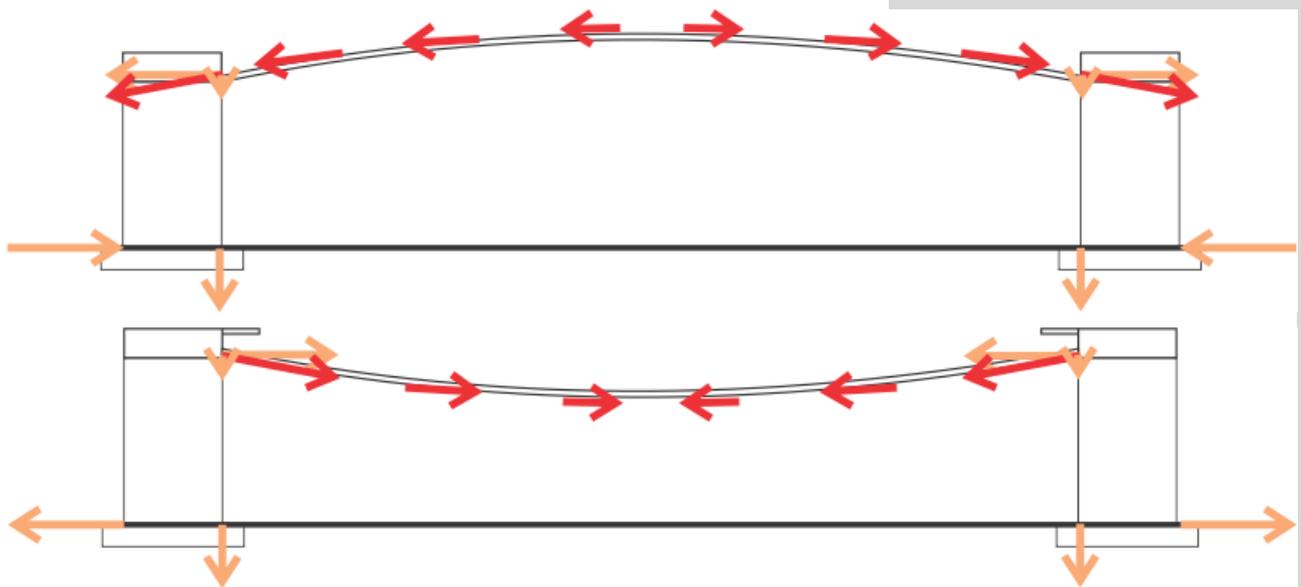
Tanto la tracción del acero como la compresión del hormigón se mantienen gracias a la adherencia entre estos, y en el supuesto de que por las retracciones o por algún estado de carga se presenten esfuerzos de tracción excesivos en el hormigón y produzcan fisuraciones, la tensión aplicada a los cables hace que las fisuraciones se cierren haciendo que el hormigón pueda resistir tracciones sin peligro de fisurarse.

Podemos establecer que en el pretensado los esfuerzos a los que se encuentran sometidos los cables son de tracción y en el hormigón son de compresión, con lo que se logra una eficiencia en el modo de trabajar de los materiales ya que trabajan con los esfuerzos que son capaces de resistir.

Si recordamos lo dicho en cuanto a las posibilidades que probó Siza frente al desafío que se planteó, una de las soluciones era

la de realizar una gran bóveda que luego se transforma en el proceso de proyecto en una curvatura invertida.

Pues bien lo que no estuvo muy lejos de esa bóveda fue la forma en la que trabajaría cuando invirtió la curva porque si combinamos la forma de la lámina basada en la curva catenaria con el pretensado, obtenemos un arco invertido.



El arco trabaja de la misma manera que un arco en su posición normal, es decir a compresión. En el caso del arco invertido se logra gracias al pretensado que cierran las fisuras que se producen y genera una cáscara continua a lo largo de toda la lámina, éste le otorga rigidez resistiendo las presiones del viento y a su vez no necesita refuerzos adicionales en los bordes libres.

Como ya se dijo trabaja bajo los fundamentos de la teoría de las membranas, fundamentalmente establece que son estructuras sometidas a esfuerzos de membrana siendo estos *“aquellos que se reparten de manera uniforme en el espesor de*

Arriba: forma en la que trabaja un arco en su posición normal, las cargas siguen la forma de la curva.
Abajo: las cargas en un arco invertido también siguen la forma de la curva.

*la lámina y actúan paralelamente al plano tangente a la superficie de la misma en cada punto”.*³

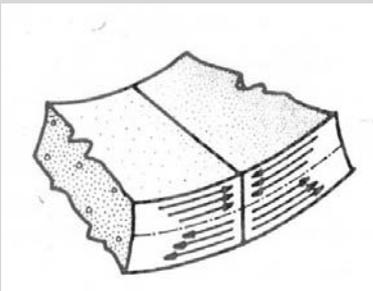
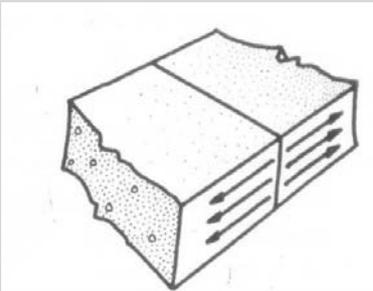
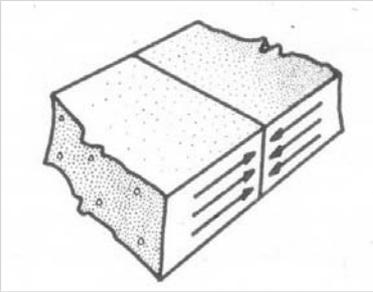
Tal como lo dice la sentencia, son esfuerzos paralelos los que actúan siguiendo la forma de la curva, y en ningún momento habla de esfuerzos perpendiculares (o cortantes) afirmando que estas estructuras no trabajan a la flexión y si tenemos en cuenta que en el hormigón pretensado se utilizaron cables de acero de alta resistencia obtendremos que será mucho más económico que haber realizado la cubierta con una armadura de acero convencional, dado que los cables tienen una resistencia mayor, con lo que nos lleva a un importante ahorro de acero.

De algún modo también se traduce en un gasto menor de hormigón porque se reduce el espacio que se necesita para la colocación de armaduras y colabora en la reducción del espesor y a menor espesor menor carga porque se reduce el peso propio.

De todas formas no todas son ventajas, también hay desventajas y son las que se presentan en los extremos desde donde cuelgan los cables.

Así como se da en los arcos también ocurre en uno invertido con pretensado, las cargas llegan a los apoyos de forma inclinada que se pueden descomponer en una vertical y en una horizontal. Para solucionar el problema se aligeró el peso de la

³ Faber, Collin; Las Estructuras de Candela, México DF, Compañía Editorial Continental, 1970. p. 20.



De arriba hacia abajo: esfuerzos de membrana en compresión, esfuerzos de membrana en tracción, esfuerzos de flexión

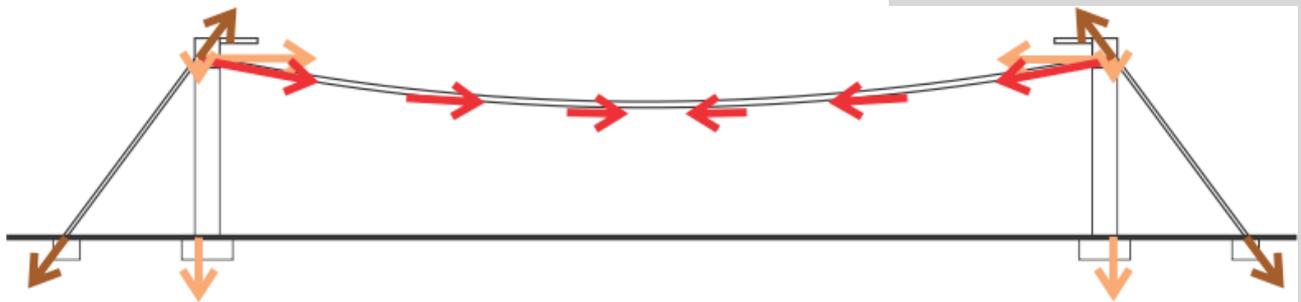
cubierta aún más porque el hormigón que se utilizó es un hormigón ligero para lograr que las descargas que llegan a los apoyos sean menores.

Los apoyos en los que descarga se resolvieron con dos pórticos, uno en cada extremo de los cables y cada uno de estos con nueve muros que tienen que actuar a modo de contrafuertes para resistir las fuerzas horizontales.

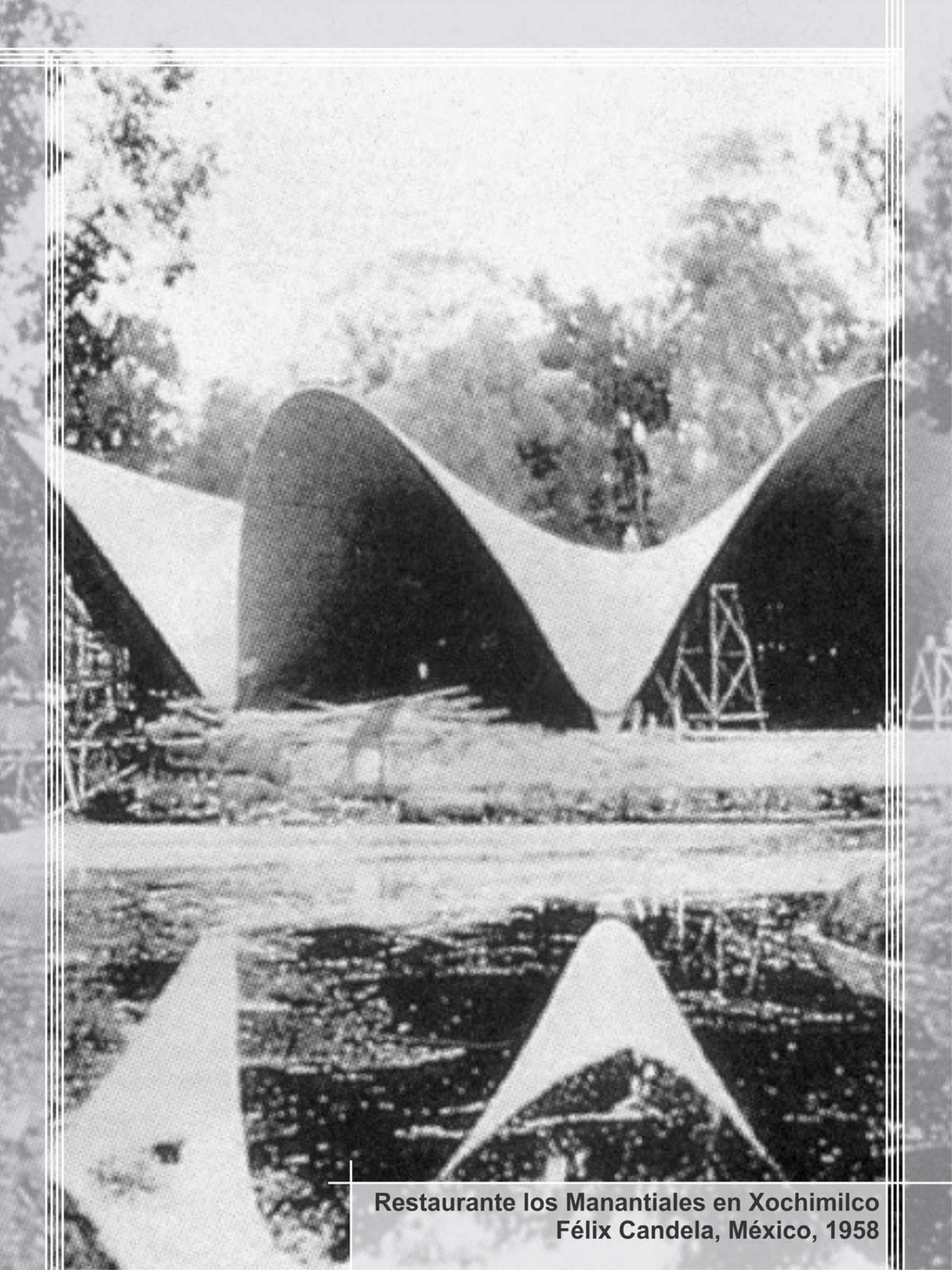


Contrafuertes

Si se hubiera querido prescindir de los mismos se podrían haber reemplazado por tensores oblicuos que van desde uno de los extremos de donde cuelgan los cables de la cubierta hasta el suelo debiéndose prever un dado de hormigón para resolver el anclaje del tensor con el suelo.



Una solución posible para prescindir de los contrafuertes es sustituir éstos por tensores oblicuos



**Restaurante los Manantiales en Xochimilco
Félix Candela, México, 1958**

El programa se trata de un restaurante con una capacidad para 1000 personas teniendo como fin reemplazar el antiguo edificio que había sido destruido por un incendio. La resolución del edificio quedó en la genialidad de Candela de cubrir ese espacio con una gran cáscara de hormigón.



Cuando se realizó esta obra, desde hace unos cuantos años ya se venía investigando sobre nuevas posibilidades constructivas que podía tener el hormigón armado, era un material totalmente nuevo para la época y se necesitaba estudiarlo más en profundidad.

Candela se interesó en este material estudiando la posibilidad de cubrir grandes espacios con muy poco material y por lo tanto reduciendo el costo económico.

Los primeros intentos se ven reflejados en la cubierta que realiza para el Laboratorio de Rayos cósmicos en la Ciudad Universitaria de México que es resuelta por un cascarón de 1,5

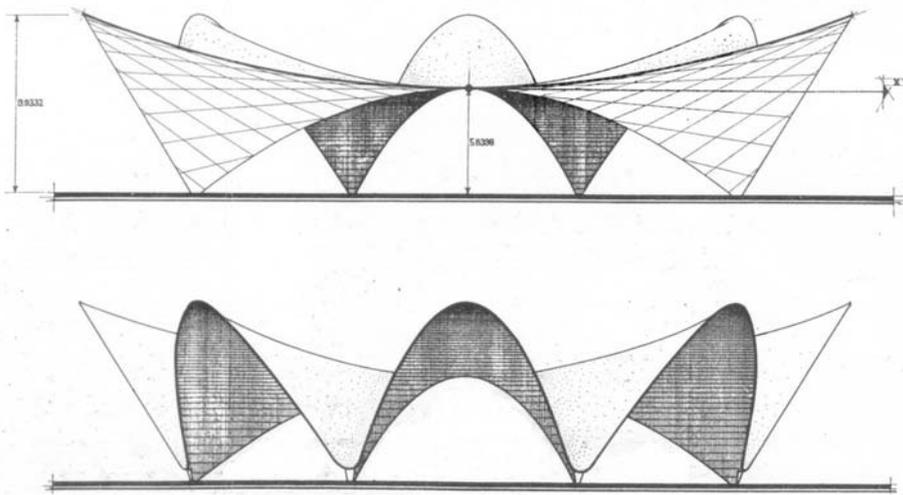


Laboratorio de Rayos C6smicos

centímetros de espesor que permitía pasar los rayos cósmicos al interior del laboratorio para poderlos estudiar, a un espesor mayor esto no sería posible.

Luego siguió experimentando, investigando y llevando a la práctica sus ideas hasta llegar a la construcción del restaurante que nos ocupa.

La cubierta se resuelve basada en la idea de una bóveda de arista octogonal que se compone por la intersección de cuatro paraboloides hiperbólicos o hypars, y como resultado de esa intersección se obtienen ocho gajos. Tiene un diámetro de 42 metros, la altura en los bordes es de 9,93 metros y hacia el centro se reduce a 5,83 metros.

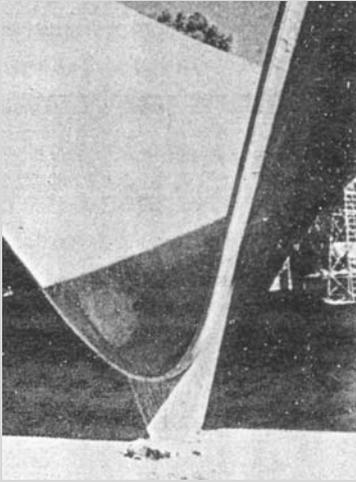


Los paraboloides son superficies de doble curvatura y le otorga la rigidez necesaria para reducir el espesor al mínimo que en este caso es de 4 centímetros. Además tiene el agregado de

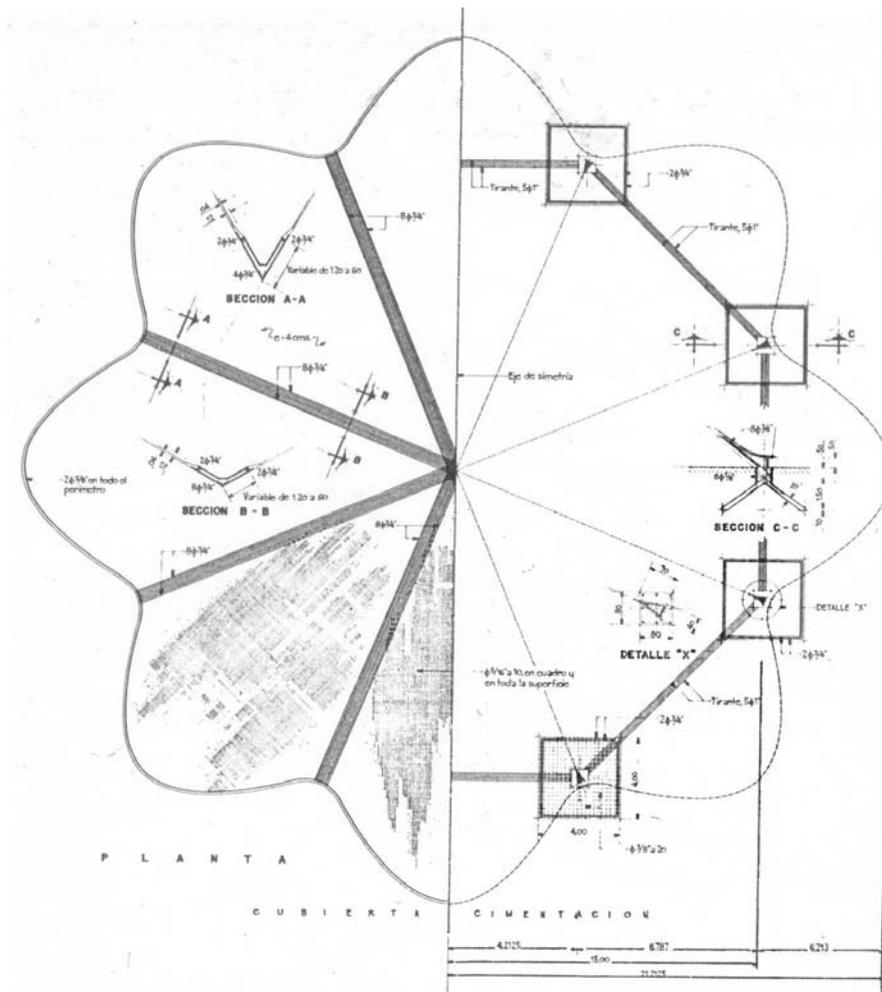
que en los bordes no se utilizaron arcos rigidizadores, es lo que se conoce como la técnica del borde libre.

Para ser posible prescindir de esos arcos rigidizadores el peso debió recaer en los bordes internos que son los que resultan de la intersección con cada hyperbolicoide siendo resueltos en forma de V y con un refuerzo adicional de acero para resistir la carga. Desde el punto de vista estético para que no fueran visibles se optó por disimularlos con curvas con las que pretendía generar una curvatura continua del cascarón.

Finalmente estos elementos descansan en unas bases de hormigón pero que por si solas no son capaces de canalizar todos los esfuerzos porque algo de lo que ya notamos en el edificio de Siza es el tema de los empujes laterales que ya sean cascarones o arcos suelen tener y aquí no es la excepción. Para resolver el problema y que los bordes internos solo se encarguen de descargar las cargas verticales se arriostraron las bases adyacentes con barras de acero.



Curvatura de la cubierta que disimula los bordes internos con forma de V



En la planta en la mitad izquierda se observa la cubierta y el modo en que se han dispuesto los refuerzos de las intersecciones entre los hypars, mientras que a la derecha se muestra la cimentación a la que llegan las intersecciones y el arriostramiento que se ha hecho entre las bases adyacentes.

¿Cómo se optimiza un cascarón de hormigón?

Candela en su búsqueda de la optimización en la construcción de cubiertas desarrolló la técnica del borde libre y como ya dijimos en el restaurante fue utilizada, de modo que para

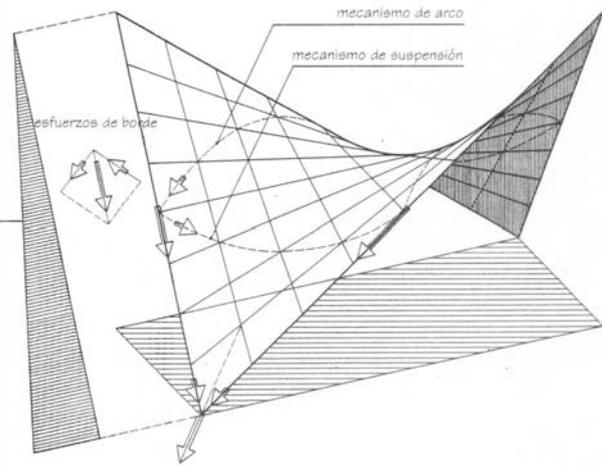
resolver la cubierta se utilizaron paraboloides hiperbólicos porque son las únicas superficies que permiten dejar los bordes o extremos de esos paraboloides completamente libres haciendo que los espesores puedan ser mínimos.

El paraboloides hiperbólico es una superficie curva que “contiene dos sistemas de generatrices rectas. Cada sistema es paralelo, a un plano director y ambos planos cuya intersección define la dirección del eje z (...). Las secciones planas paralelas al eje z son parábolas (...). Todas las demás secciones planas son hipérbolas (...)”⁴

Más allá de lo complicada que pueda ser la definición lo que importa es que es una superficie curva y se suele pensar en que los encofrados pueden ser dificultosos de resolver, sin embargo estas superficies tienen la particularidad de ser generados por rectas con lo que a partir de tablas comunes se logra generar la superficie lo que implica una facilidad en su ejecución y da la posibilidad de que se pueda realizar con mano de obra sin experiencia.

Otro punto a favor de es que la situación socio – económica del México de los años '50 le permitió a Candela desarrollar varias construcciones basadas en paraboloides hiperbólicos dado que

⁴ Andrés Martín, Francisco Ramón; Fadón Salazar, Fernando; Análisis Gráfico de Obras Emblemáticas de Félix Candela, XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Zaragoza, junio del 2004. p. 5



Esfuerzos de membrana en un paraboloides hiperbólico



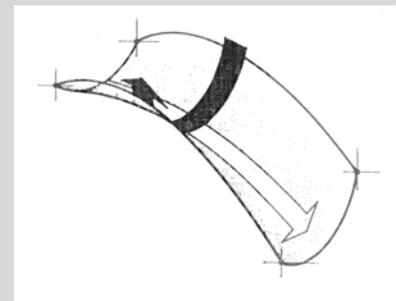
Construcción de la cubierta del restaurante

el salario de los obreros era bajo, por lo que era rentable realizar este tipo de estructuras.⁵

Para la lámina de Siza se estableció que las cubiertas de espesores mínimos presentan un problema, que las hace vulnerables a los efectos producidos por el viento y que para dar solución al problema debe tener rigidez.

Pues bien aquí la rigidez se resuelve de otra manera y esta vez es por las características geométricas de la superficie. De la definición se desprende que los paraboloides hiperbólicos son superficies de doble curvatura anticlásticas o sea que las concavidades de las curvas son en direcciones opuestas. Con estas características son capaces de otorgarle la rigidez necesaria para no ser vulnerable a las cargas producidas por el viento.

Otra ventaja de realizar superficies de doble curvatura es que no se producen esfuerzos de flexión, por lo visto en el edificio analizado anteriormente solo se dan esfuerzos paralelos al plano tangente de la superficie en cada punto siguiendo la forma de la curvatura y de manera uniforme en toda la sección, por lo que trabaja también bajo los fundamentos de la teoría de las membranas siendo los esfuerzos a los que está sometida de compresión o tracción.



Superficie anticlástica, curvaturas dirigidas en sentidos opuestos

⁵ Esta situación se mantuvo hasta finales de la década del '60 debido a que los salarios de los obreros aumentaron lo que hizo que no fuera rentable construir estas cubiertas y además aparecieron limitaciones dadas por nuevas normativas que priorizaban la seguridad de las estructuras.

Las mismas observaciones que se hicieron para el ejemplo anterior también son válidas aquí con algunas diferencias, el no trabajar a la flexión implica que se pueda utilizar una cantidad de acero menor ya que solo es necesario para resistir tensiones que se pueden dar por los efectos de la temperatura y que puedan provocar fisuras.

El posicionado de las barras tampoco presenta inconvenientes por ser una superficie curva valiéndose lo dicho para el encofrado, exigiéndose aquí precisión a la hora de colocarlas.

Lo descrito para el acero nos hace posible reducir la cantidad de hormigón necesario, por lo que se reduce el peso propio y por otro lado se puede reducir el espesor cubriendo grandes luces debido a que el material trabaja de modo eficiente por las características geométricas que le otorgan la rigidez.

De lo que hemos visto hasta ahora entre los dos análisis se puede deducir lo siguiente: para una superficie de simple curvatura como por ejemplo la generada a partir de una catenaria ya sea trabajando en su posición normal o invertida hay que introducir alguna técnica que le otorgue rigidez para lograr eficiencia en la forma de trabajar del hormigón, mientras que en las de doble curvatura como las del ejemplo en estudio es la geometría la que se encarga de hacerlo trabajar eficientemente.

También observamos que en los bordes que quedan libres (que serían los extremos de cada paraboloides) cuando actúan

esfuerzos de membrana no necesitaban refuerzos adicionales debido a la rigidez.

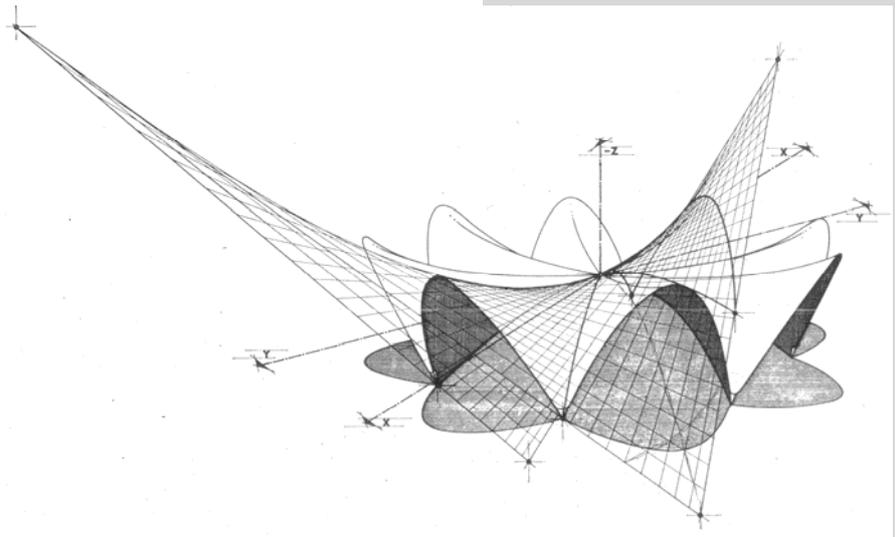
Conviene mencionar si acá también se tuvo en cuenta o no, por lo que al análisis que venimos realizando hay que agregarle el estudio de la técnica del borde libre.

Ya advertimos que en donde actúan esfuerzos de membrana el problema se presenta en los apoyos que reciben la descarga de una fuerza inclinada, además no debemos

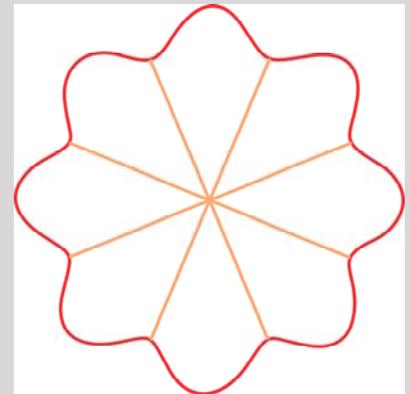
olvidar que para que una estructura laminar se comporte como tal en las zonas cercanas a los apoyos no deben presentarse esfuerzos cortantes.

Durante el análisis que estamos haciendo examinamos el comportamiento de un solo paraboloides pero la totalidad de la estructura está compuesta por cuatro paraboloides que se intersecan, y es en las intersecciones en donde está la clave de este sistema.

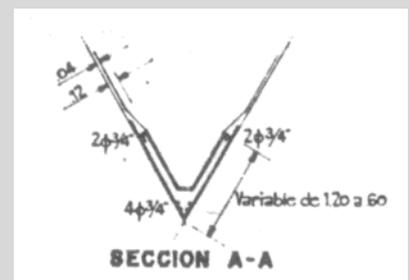
Entonces la decisión adoptada es que cada paraboloides siga trabajando con los esfuerzos de membrana y en la zona de la intersección lo que se hace es que esos esfuerzos descarguen sobre los bordes internos con forma de V. Se prefirió reforzar



Paraboloides hiperbólicos en la generación de la geometría

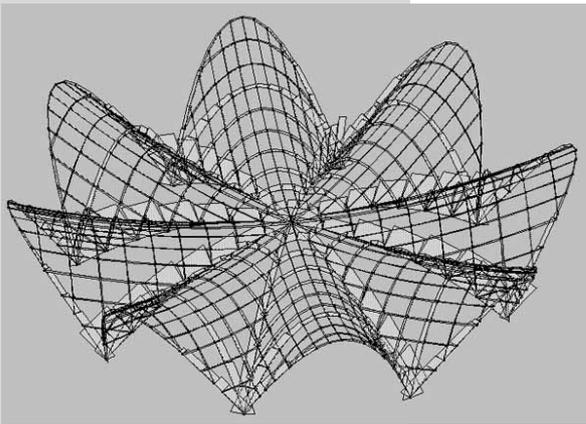
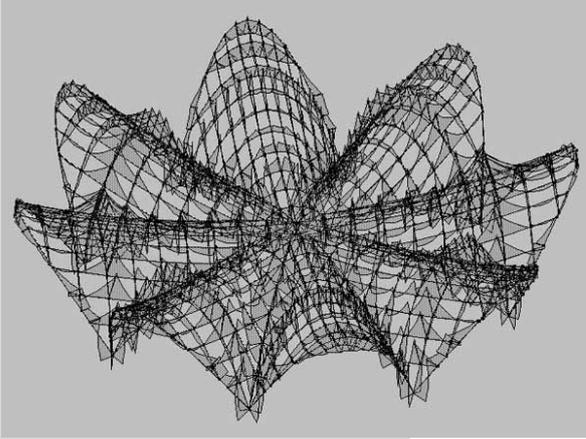


En rojo bordes externos, en naranja bordes internos.



Detalle de los bordes internos con forma de V que soportan las cargas provenientes de la cubierta del restaurante

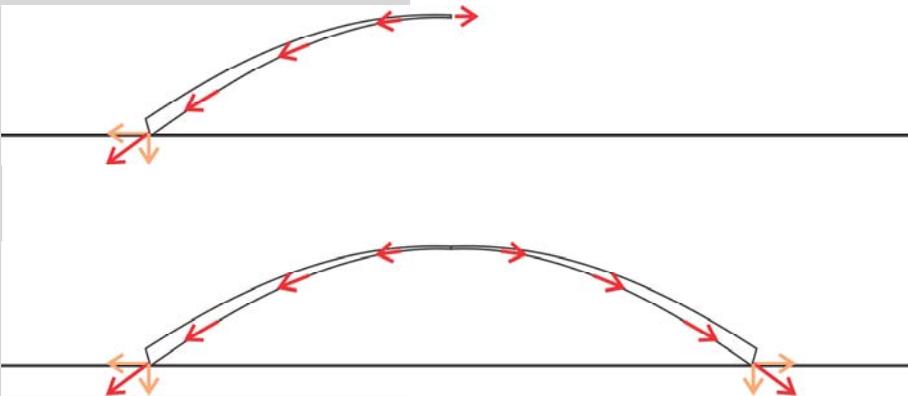
con mayor cantidad de acero las intersecciones para dejar el resto de la cáscara con la cuantía mínima requerida para resistir los esfuerzos que ya se explicaron.



Arriba: diagrama de momentos,
abajo: diagrama de axiles

Si lo estudiamos en la práctica cosa que se puede deducir de los distintos diagramas de solicitaciones, que los esfuerzos a los que se encuentra sometido son menores en los bordes externos y en la mayoría de la cubierta, haciéndose cada vez mayores a medida que nos acercamos a las zonas de las intersecciones, por lo que tiene sentido tener más acero allí.

Los bordes internos son los que se encargarán de llevar las cargas a las bases pero aún tenemos un inconveniente porque también son curvos y van desde la parte superior (o centro de la cubierta) hasta las bases, con lo que hay una fuerza horizontal que queda desequilibrada en la parte superior. Para que pueda funcionar y no tener problemas con esa fuerza



Si consideramos una solo uno de los bordes internos tendremos una fuerza horizontal en la parte superior que habrá que equilibrar. Para descargar esa fuerza es necesario contar con otro elemento para que conjuntamente trabajen como un arco, siendo posible en plantas simétricas

debemos contar con otro elemento simétrico lo que implica que la estructura deba ser simétrica.

Precisamente la solución de Candela es simétrica intersecando los cuatro

paraboloides formando ocho gajos en una planta octogonal, teniendo como punto en común el centro de la cubierta, por lo que obtenemos dos bordes internos simétricos que trabajarán conjuntamente como un arco triarticulado.

En los diagramas se observa que en el centro los esfuerzos son mínimos y van creciendo a medida que nos acercamos a las bases, a su vez en el centro se dan los mayores descensos con lo que se confirma el modelo de comportamiento. De no haberse utilizado estos arcos se necesitarían

refuerzos adicionales en los bordes externos y / o arcos rigidizadores.

Se deduce que la técnica del borde libre no es ni más ni menos que eliminar los arcos rigidizadores de los bordes y llevarlos hacia las zonas interiores de la cubierta de modo que se puedan integrar en la geometría de la misma. El modelo de comportamiento se puede asemejar al de una bóveda de arista que también resulta de la intersección de una o más bóvedas.

Como los bordes externos pasan a ser las partes menos exigidas además de reducir la cantidad de acero, se reduce el hormigón y por lo tanto el peso propio lo que lleva a que el espesor pueda ser menor.

Ya establecimos que los bordes internos que actúan como arcos son los encargados de descargar el peso a las bases. Los esfuerzos que actúan en los arcos siguen la configuración

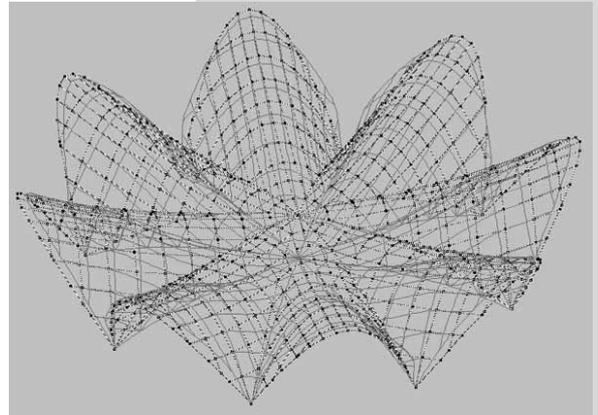
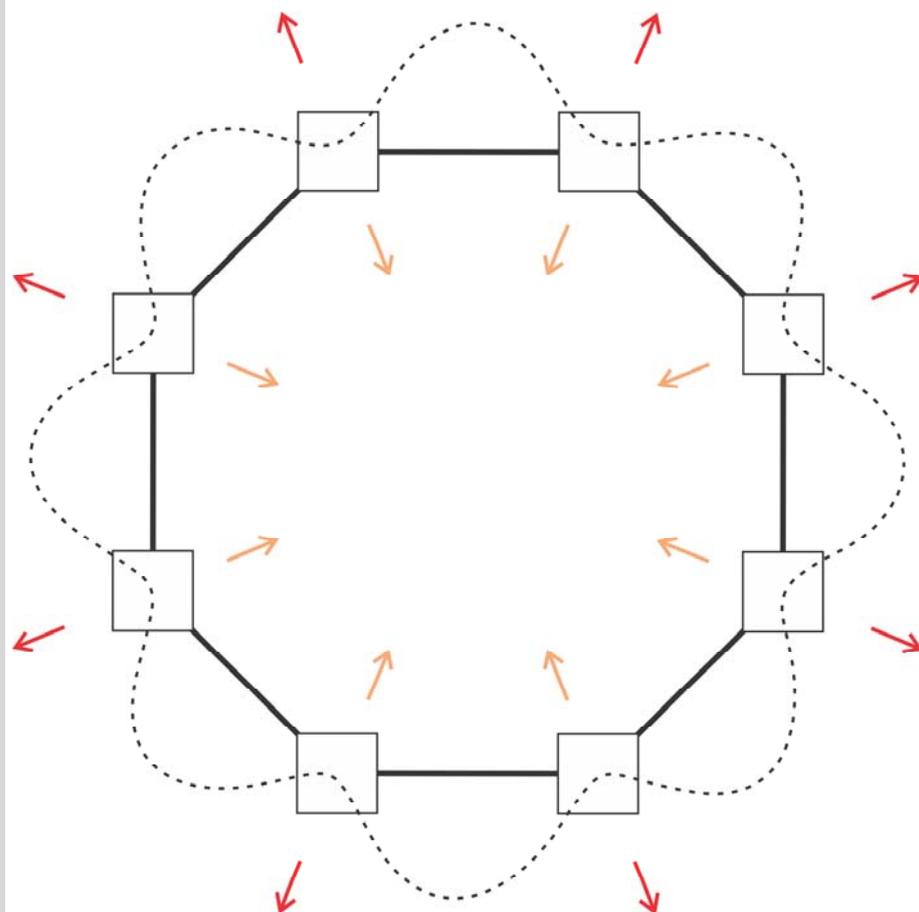


Diagrama de descensos

del mismo, por lo que no están sometidos a esfuerzos de flexión, solo están sometidos a compresión y cuando llegan a las bases tendremos también una fuerza inclinada, y ya sabemos que de la descomposición de esa fuerza tenemos una fuerza lateral que hay que equilibrar.

Digamos que los únicos contactos que tiene la cubierta con el suelo son ocho puntos donde están situadas las bases. Para evitar el desplazamiento en horizontal, se opta por arriostrar las bases adyacentes con tensores de acero rodeando todo el perímetro para que el cascarón quedara contenido.



En rojo se representa las fuerzas horizontales de la cáscara y en naranja las fuerzas que producen el arriostramiento de las bases

Aquí se prefiere esta solución simple porque los tensores bajo tierra no son visibles, no perjudican la estética y porque es más económico que realizar los contrafuertes del ejemplo anterior

que de haberse hecho estarían enterrados por lo que no tenía mucho sentido.

En resumen podemos decir que un paraboloides hiperbólico es eficiente por si solo, agregando la técnica del borde libre esa eficiencia se ve aumentada y de la comparación de las dos obras concluimos que si bien ambas estructuras son capaces de transmitir esfuerzos axiales las formas de resolverlos son totalmente distintas y están determinadas por el diseño, las condiciones geográficas, la economía o las tecnologías disponibles.



**Pabellón de Japón en la Expo Hannover
Shigeru Ban, Alemania, 2000**



Ya se habló un poco cuando analizamos el edificio de Siza de que características tiene el programa de un pabellón para una exposición. Lo que se comentó ahí también sirve para este edificio con algunas

diferencias respecto al ejemplo anteriormente citado.

El programa si está definido, solo va a ser diseñado para una sola situación, la de la exposición, porque una vez terminada el edificio sería desmantelado. La segunda diferencia es que el tema de la exposición era el medio ambiente, exigiéndose a aquellos pabellones que corrieran la suerte de ser desmantelados debían ser hechos con materiales que fueran reciclables.

Desde que Ban recibió el encargo pensó en que el material ideal para su construcción era utilizar tubos de cartón por ser un material de bajo costo que son fabricados como elementos auxiliares de soporte en la industria textil o del papel, y una vez que han cumplido su función son desechados y pueden ser fácilmente reciclados.

Es un material de uso poco común en la industria de la construcción que no era desconocido para Ban habiéndolo

utilizado como material para construcciones de emergencia a modo de refugio temporal para los perjudicados por los daños que causaron diversos desastres naturales.

También es un material que tiene un bajo peso, es fácil de transportar y puede ser fabricado de la longitud que se desee siempre dentro de ciertos límites.

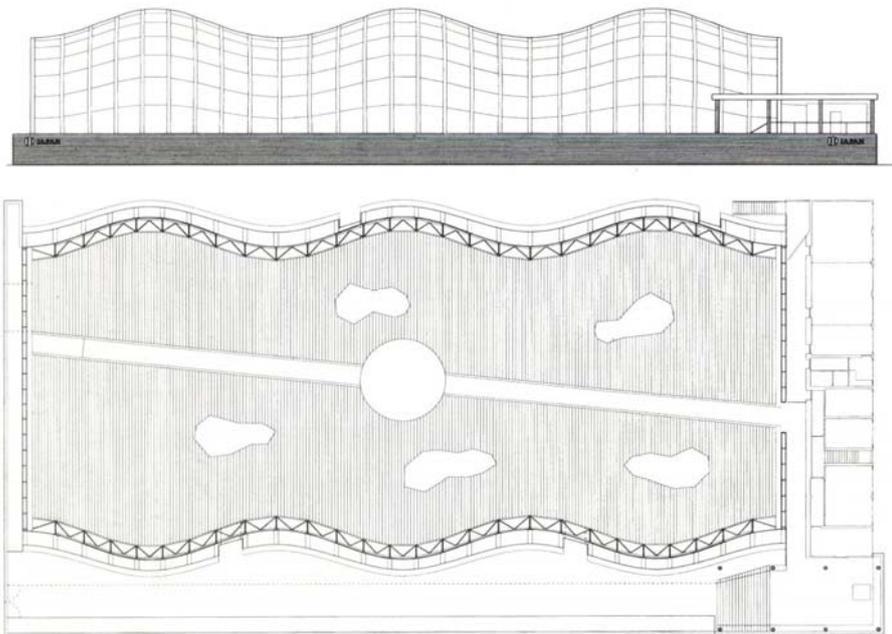
El pabellón también tendría carácter de individual, por lo que sus dimensiones también serán importantes, así que pensó que para poder utilizar sus tubos de la mejor manera era optar por un sistema estructural geodésico basado en *“una trama cruzada de elementos autoestabilizados (barras de pequeña longitud) en la que cualquier carga en cualquier dirección es equilibrada por las intersecciones de los bastidores”*.⁶

Estas estructuras también son de doble curvatura, que como ya descubrimos en el restaurante de Candela esta característica le otorga rigidez y a su vez la posibilidad de ser ligera. Esto permitió construir el pabellón con las siguientes dimensiones: 72 metros de largo, 35 de ancho y 15,5 metros de altura cuya cubierta está compuesta por la trama de 440 tubos de cartón de 40 metros de longitud con un diámetro de 12,5 centímetros y un peso aproximado de 100 kilogramos cada uno los cuales no se interrumpen en los cruces a diferencia de otras obras de Ban conformando así tres domos fusionados.

6

http://www2.uah.es/innovaciones/0405/trabajo%20de%20alumnos/practica4_grande_sluces.pdf, p. 5.





Para atar cada tubo se utilizan cintas de poliéster como si fuera una especie de nodo y fue la clave que permitió armar la estructura, que fue montada integralmente en el piso sobre un

plano. Las cintas a medida que se levantaba les permitía a los tubos situarse en su lugar, porque les permitía girar, doblar y flexionar para poder formar la estructura tridimensional en un montaje que duró dos semanas.



Es un procedimiento totalmente diferente de armar una estructura geodésica primero porque se utiliza barras de cartón en lugar de acero, algo en lo que Ban es innovador, pero por el otro lado en los domos geodésicos de acero, las barras se van colocando en el lugar final que ocupan en la estructura y no en el piso.



Arriba: armado del entramado sobre un plano horizontal, abajo: levantamiento del entramado para dar forma a los domos

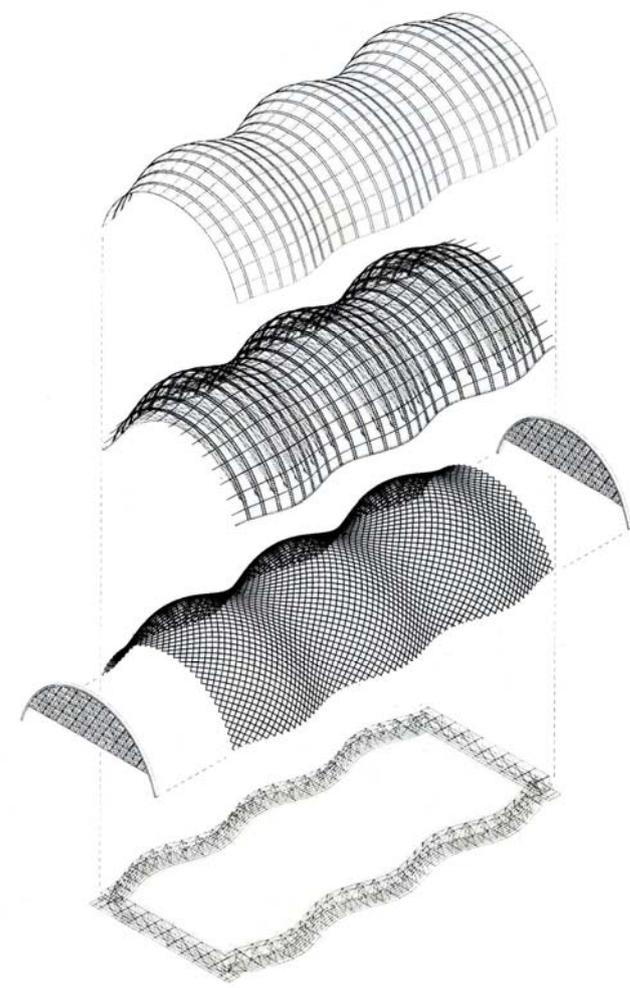
Por encima del entramado se coloca una membrana de papel fabricada especialmente para resistir el fuego y el agua, logrando que una cáscara y una rejilla en una misma estructura trabajaran conjuntamente.



En Japón la construcción con cartón contaba con la aprobación del Ministerio de Construcción como un nuevo método estructural, la estructura podía soportar su peso solo con los tubos de cartón pero su construcción era en Alemania y para ser aprobada legalmente dado que no les convencía y también pensaron que no era segura, junto con Frei Otto que colaboró en la estructura, agregaron los arcos de madera para que el entramado descansara sobre los mismos y estos tenían que estar estabilizados por cables tensados.

Para resolver las fundaciones, se cerró todo el perímetro de los domos con vigas de madera laminada anclándose en unas bases resueltas con una estructura de acero y tablas de madera rellenas con arena.

La optimización en los entramados de barras



Los distintos elementos que componen la cubierta: lámina de papel, arcos rigidizadores, entramado de cartón, fundaciones

A diferencia de los otros ejemplos la manera de lograr la optimización es diferente y fueron varias las técnicas que se utilizaron conjuntamente para conseguir el objetivo. Por un lado la geometría contribuye porque tiene elementos del comportamiento de los cascarones sumando la posibilidad de utilizar un sistema estructural geodésico.

También tenemos el empleo del cartón como material que introduce nuevas consideraciones, por lo tanto nuevas maneras de construir y el último factor que se ha tenido en cuenta lo relacionaremos a la facilidad de su montaje.

Hablemos primero de la geometría que es una de las técnicas que ya venimos manejando con los otros edificios. Su forma está compuesta por tres domos fusionados, un domo es una forma geométrica que se asemeja a una semiesfera, y al igual que el paraboloide hiperbólico que es una superficie de doble curvatura, por lo tanto son superficies que a través de la curvatura en distintas direcciones se obtiene la rigidez, por lo que valen las consideraciones ya hechas para la obra de Candela.

Desde el punto de vista estructural un domo tiene un comportamiento análogo al de una cúpula, que está sometida a esfuerzos de compresión y de tracción paralelos al plano tangente en cada punto de su superficie con lo que se concluye que los esfuerzos a los que se haya sometido un domo se rigen también por la teoría de las membranas en el caso de que sea una cáscara. Más adelante veremos que la geometría elegida está pensada en función de los esfuerzos que deberá resistir ya que es un aspecto que lo condiciona el material utilizado.

A diferencia de los anteriores la estructura portante no es una cáscara (más allá de que pueda considerársela como tal por la capa de papel de la envolvente pero esta no cumple funciones portantes) sino que la forma es generada a partir de un entramado de barras logrando conformar un sistema estructural geodésico.

La invención de estos sistemas se debe a las investigaciones que realizó Buckminster Fuller unas décadas atrás en su afán de



buscar un método o técnica que le permitiera construir una estructura eficiente. Decidió combinar la esfera por ser una geometría que podía encerrar un gran volumen con un área mínima junto a un sistema de barras que son los elementos

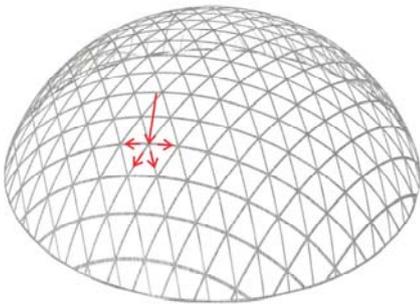
lineales que cumplen la función resistente, con muy poca sección en relación con su longitud.

Los esfuerzos a los que se halla sometida cada barra son exclusivamente esfuerzos normales, que pueden ser de compresión o tracción, los esfuerzos son normales debido al modelo de comportamiento con el que trabajan los domos que es la estructura que forman.

El sistema se completa con nodos articulados a los que las barras están sujetas dado que para estabilizar las barras deben estar dispuestas de forma triangular (en el ejemplo que estamos analizando se disponen de forma romboidal pero el principio de funcionamiento es el mismo), en donde los nodos

se ubican en los vértices. Se comentó que los triángulos son formas autoestabilizadas que le otorgan rigidez y hacen posible que se pueda lograr la curvatura del domo colaborando también en la estabilización general del mismo cuando se combinan porque pueden dirigir las fuerzas externas al domo y llevarlas por todo el entramado sin afectar la forma ya que el sistema es capaz de descomponer las fuerzas y canalizarlas por las barras, a estas estructuras reticuladas se las reconoce también con el nombre de estereoestructuras.

Gracias a la geometría del domo y los triángulos



Canalización de las fuerzas externas en un domo

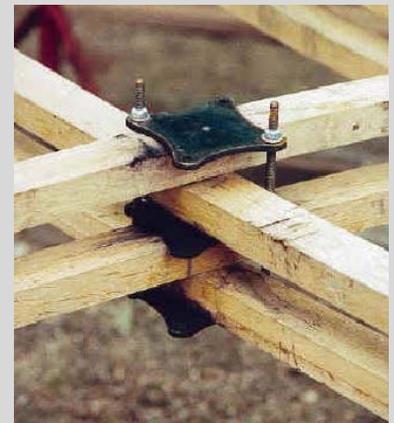


que se forman en el entramado de barras hacen posible que la estructura pueda cubrir grandes luces.

Otro beneficio que se obtiene de las estereoestructuras en relación con los cascarones de hormigón armado es que tienen menos peso propio por ser un entramado y no una superficie continua. Resultan ser estructuras livianas que a diferencia de lo que comúnmente se piensa no tienen problemas con los esfuerzos producidos por el viento gracias a las características propias de la geometría que ya comentamos.

Generalmente los domos son construidos con barras de acero y nudos del mismo material, también se han construido soluciones en las que las barras son de madera con nudos hechos por abrazaderas de acero. Pero no se utilizan ninguno de estos materiales, se utiliza un material no convencional, el cartón y que por lo tanto introduce nuevas técnicas en la construcción de domos.

Ya dijimos que los tubos de cartón son desechados y tienen un bajo costo por lo que no es un problema disponer de ellos. Se fabrican a partir de enrollar láminas de cartón en varias capas y entre ellas se coloca un pegamento para luego prensarlas, durante la fabricación también se pueden incluir aditivos especiales para mejorar la resistencia a la humedad. Una vez endurecida la cola esta tiene la propiedad de endurecerse con el tiempo lo que le otorga resistencia y a mayor número de capas mejora la rigidez del tubo.



Abrazaderas utilizadas en entramados de madera

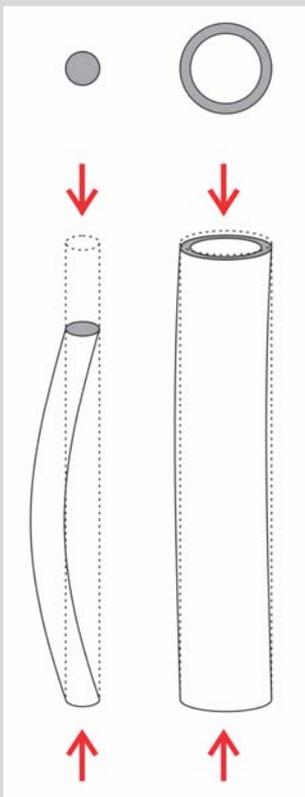


Pero no es lo único que contribuye a lograrla, lo mismo que se puede analizar para un tubo de acero podemos extrapolarlo a un tubo de cartón. En los tubos de acero para aumentar su rigidez y su rendimiento se aumenta la inercia de la sección aumentando su diámetro sin aumentar el área, dicho en otras palabras se trata mejorar la distribución de la masa en la sección.

Tanto una barra de acero maciza como un tubo de la misma cantidad de acero son capaces de resistir una carga determinada pero el tubo al tener una cavidad interior será mucho más estable que la barra maciza, de modo que si recibe una fuerza de compresión le será mucho más difícil pandearse al tubo que a la barra por las características geométricas, y es una de las maneras de reducir la esbeltez.

Idéntico razonamiento podemos aplicarlo a un tubo de cartón que por lo general tiene una cavidad central, entonces el área de cartón se encarga de canalizar las cargas, cuanto mayor sea el número de capas de cartón que tenga el tubo más resistente será, la cavidad central colabora aumentando la inercia de la sección y por lo tanto reduce su esbeltez aumentando su rigidez y su eficiencia.

Otra de las ventajas del material es que se pueden fabricar de cualquier largo, sin embargo más allá de lo dicho hasta ahora puede existir la posibilidad de que se pueda pandear si los tubos tienen una luz muy grande pero eso no es un problema



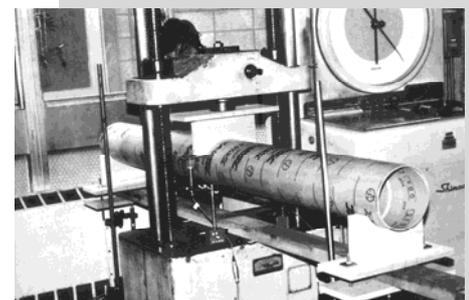
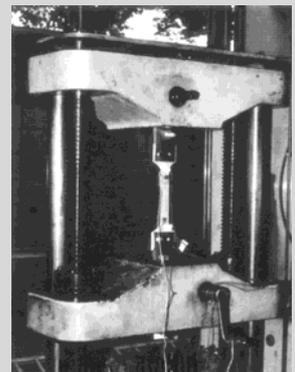
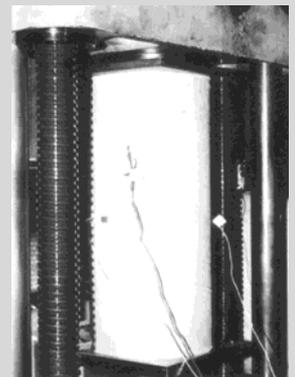
Incidencia de la inercia en la resistencia de barras con la misma área, la barra de la izquierda es maciza y se pandea más fácilmente que la barra de la derecha que tiene una cavidad central. En esta última se aumenta el diámetro de la sección reduciendo la esbeltez con la misma cantidad de material

porque con los distintos rombos que conforman el domo producto del entramado se reduce la luz de pandeo de los tubos.

Unos párrafos atrás se dejó pendiente que la geometría estaba condicionada a los esfuerzos que puede resistir el material que se iba a usar, esto es así porque el cartón es mucho más resistente a los esfuerzos normales que a los cortantes dado que no es lo suficientemente rígido como para hacer frente a estos esfuerzos, es por eso que los tubos de cartón no trabajan a la flexión y para poder utilizarlo se debía pensar en una estructura que estuviera solamente exigida por los esfuerzos normales.

Se afirmó también que un domo con un entramado de barras tenía menos peso propio que un cascarón, lo que falta agregar ahora es que el cartón tiene un peso menor que el acero,⁷ cosa que reduce aún más el peso de la estructura y por lo tanto se reducen las cargas a soportar, se reduce la cantidad de material, o como en este caso da la posibilidad de utilizar uno menos resistente. Un domo de acero para el pabellón también hubiera sido posible construirlo pero dadas las condiciones que imponía la exposición se usa el cartón.

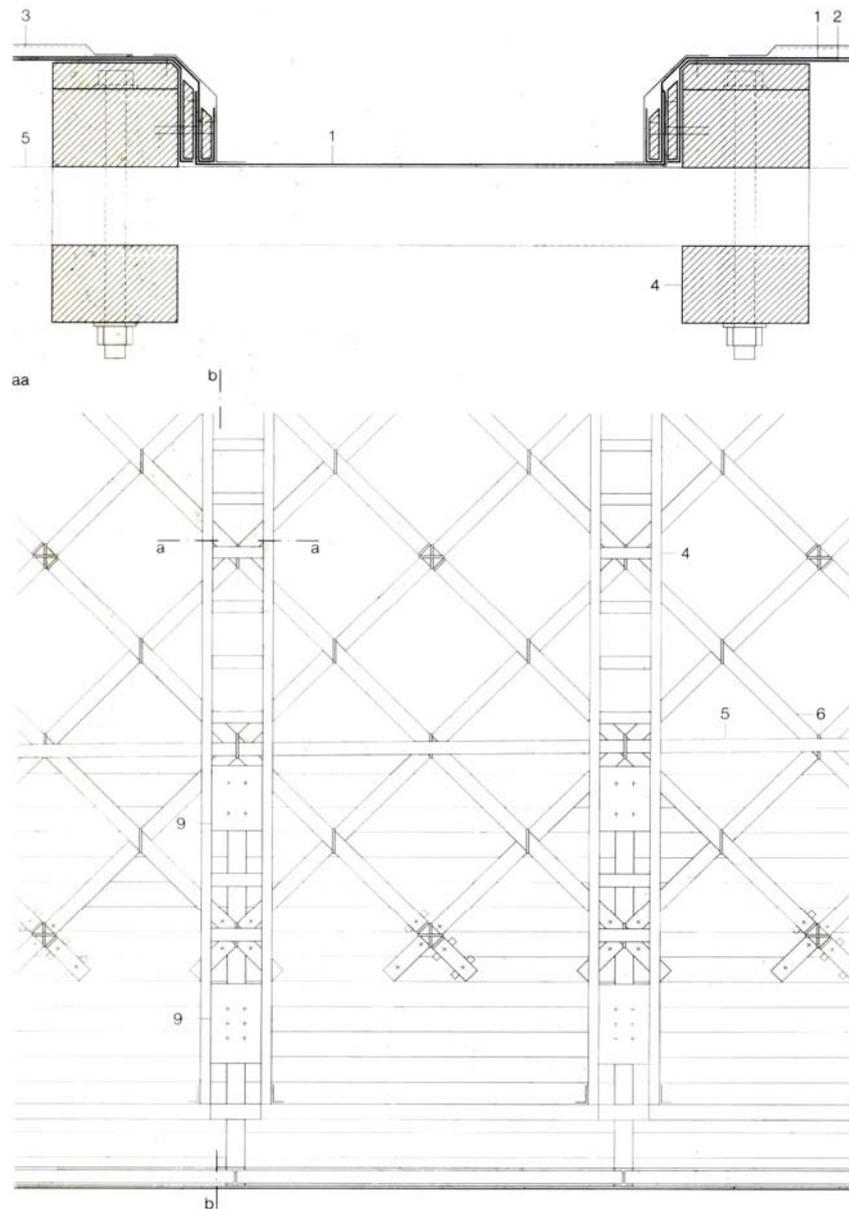
Sin embargo las autoridades alemanas no confiaban en las propiedades del cartón que ya se mencionaron y ante la posibilidad de que tanto el material como la estructura



Ensayos a los que se ha sometido el cartón para evaluar su resistencia. De arriba hacia abajo: compresión, tracción, flexión

⁷ Densidad del acero: 7850 Kg/m³, densidad del cartón: 714,3 Kg/m³.

resultaran débiles se resolvió agregar arcos de madera cada 2,66 metros y cables de acero que tienen la función de rigidizar la estructura encargándose además de llevar las cargas a las bases, cosa que Ban no consideraba necesario porque confiaba en las capacidades del material.



Detalle del anclaje de las barras de cartón a los arcos rigidizadores de madera



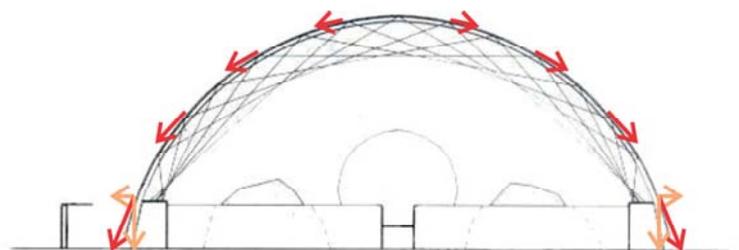
Comentadas las propiedades del cartón nos falta ahora hablar de las técnicas que introdujo en el montaje, que es muy sencillo a tal punto que se arma tendiendo el entramado sobre un

plano, luego se van atando los tubos con cintas de poliéster para posteriormente levantarlos y llevarlos a su lugar definitivo, cosa que en los domos de acero consideramos que debe situarse cada barra en el lugar definitivo debiendo armar la estructura en tres dimensiones.

Lo que permite esto es por un lado utilizar mano de obra sin experiencia por ser de fácil montaje y por el otro para atar cada tubo se hace de manera fácil sin tener piezas especiales como si sucede con los de acero que además requieren soldadura. Si lo comparamos con el montaje de una estructura de hormigón armado presenta otras ventajas adicionales como que no se requiere construir un encofrado para luego proceder a armar la estructura y además su construcción es en seco por lo que permite evitar los tiempos de secado y curado propios del hormigón haciendo más rápido el montaje.

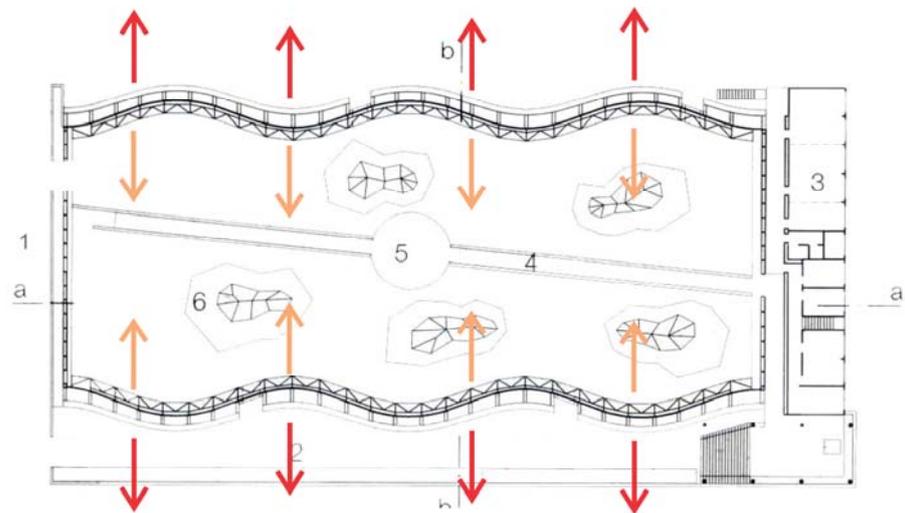
De modo que con el montaje ahorramos en mano de obra, en materiales y en tiempos de construcción consiguiendo que sea una solución económica y además por ser sencilla lo hace apto para estructuras temporales como el pabellón en cuestión.

De todos modos y al igual que en los otros ejemplos el problema se presenta en la manera en que descarga la cubierta que por las características geométricas otra vez es una fuerza inclinada y por lo tanto



Descarga del entramado

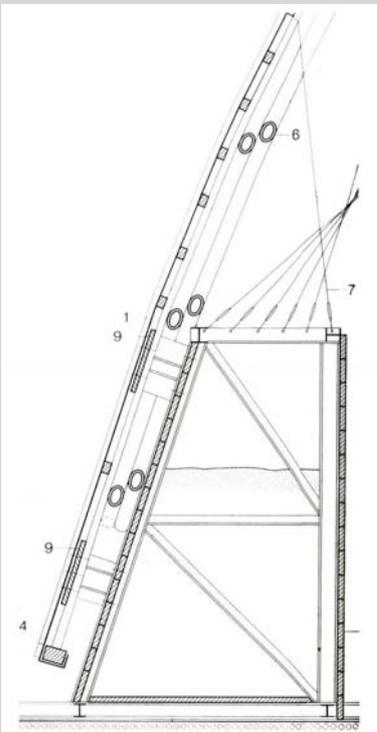
se tiene que resolver el problema. Así como el montaje es sencillo, la respuesta al problema es sencilla, se resuelve cerrando el perímetro de los domos con vigas de madera y las bases se resuelven con una estructura de acero y tablas de madera rellenas con arena.



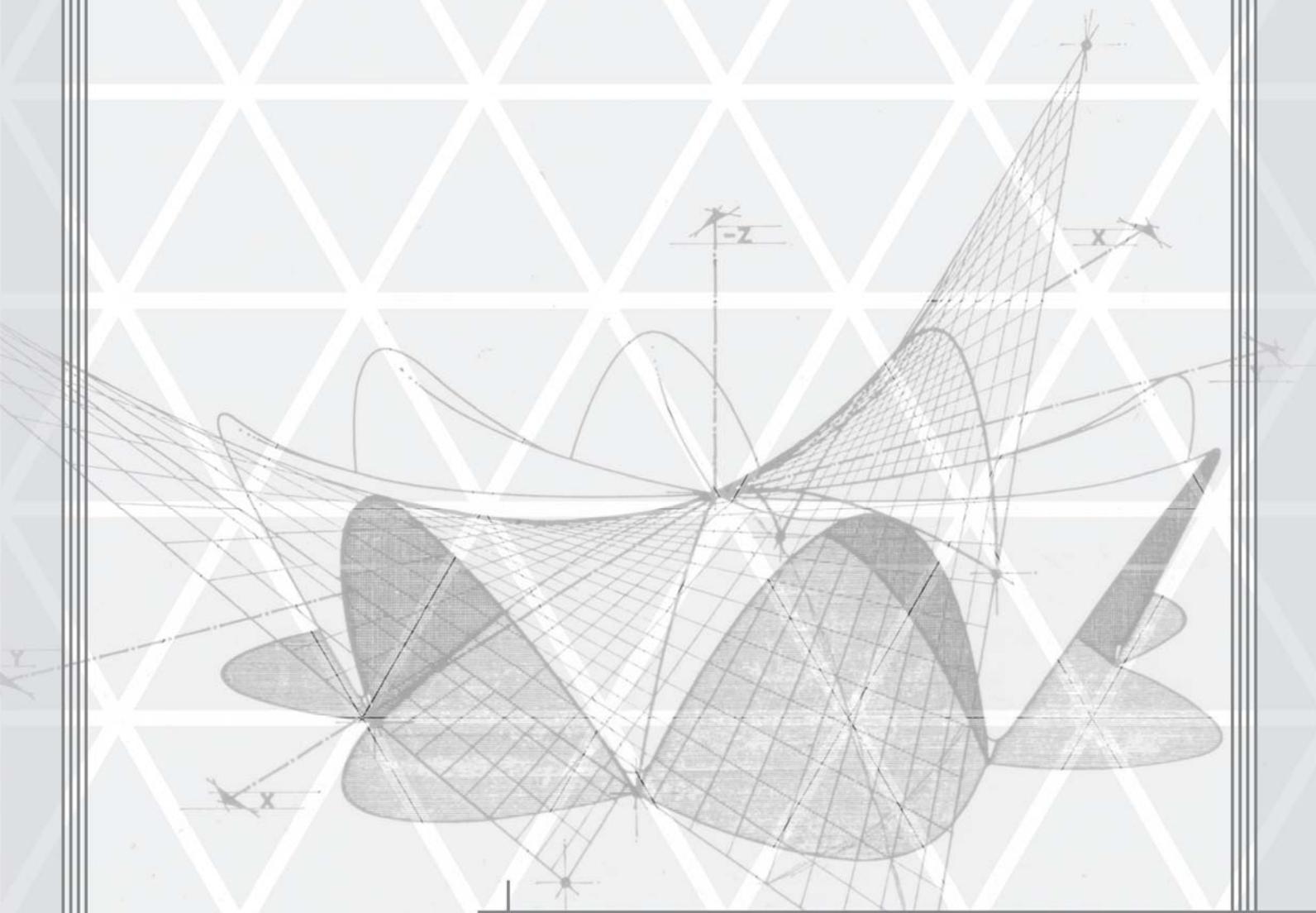
En rojo se representa las fuerzas horizontales del entramado y en naranja las fuerzas que producen el arriostamiento de las bases de madera

El principio es semejante a lo visto para la estructura de Candela pero el acero no es un material reciclable por lo que termina optándose por dicho sistema.

De nuevo vemos que el contexto influye en el modo de resolver una misma situación con técnicas y materiales distintos.



Detalle de cómo se resolvieron las fundaciones



Un cuarto ejemplo...

Durante el proceso de realización de este trabajo surgió la necesidad de estudiar un cuarto ejemplo, que a diferencia de los ya estudiados éste no fue construido sino que se trata de una suposición para plantear algunas hipótesis y que nos permitirán sacar otras conclusiones.

Para eso volveremos a retomar el restaurante de Candela de un modo distinto. Acaso ya no se comentó que trabajaba eficientemente y lográbamos disminuir la cantidad de acero, entre otras cosas. Si pero no es suficiente porque todavía hay cosas que se pueden mejorar.

El enfoque se realiza 50 años después de que se realizara su construcción y considerando algunas de las tecnologías que se tuvieron en cuenta en la obra de Ban sin llegar a la construcción en cartón.

Si nos situamos en el contexto de la obra de Candela en ese momento estaba apareciendo el hormigón armado que ya se conocía pero lo que no se conocía eran las potencialidades que brindaba, cosa que logró Candela con su obra. No nos olvidemos también que fue construido en México, que no se disponía de tecnología y la mano de obra sin experiencia era lo más accesible por su bajo salario.

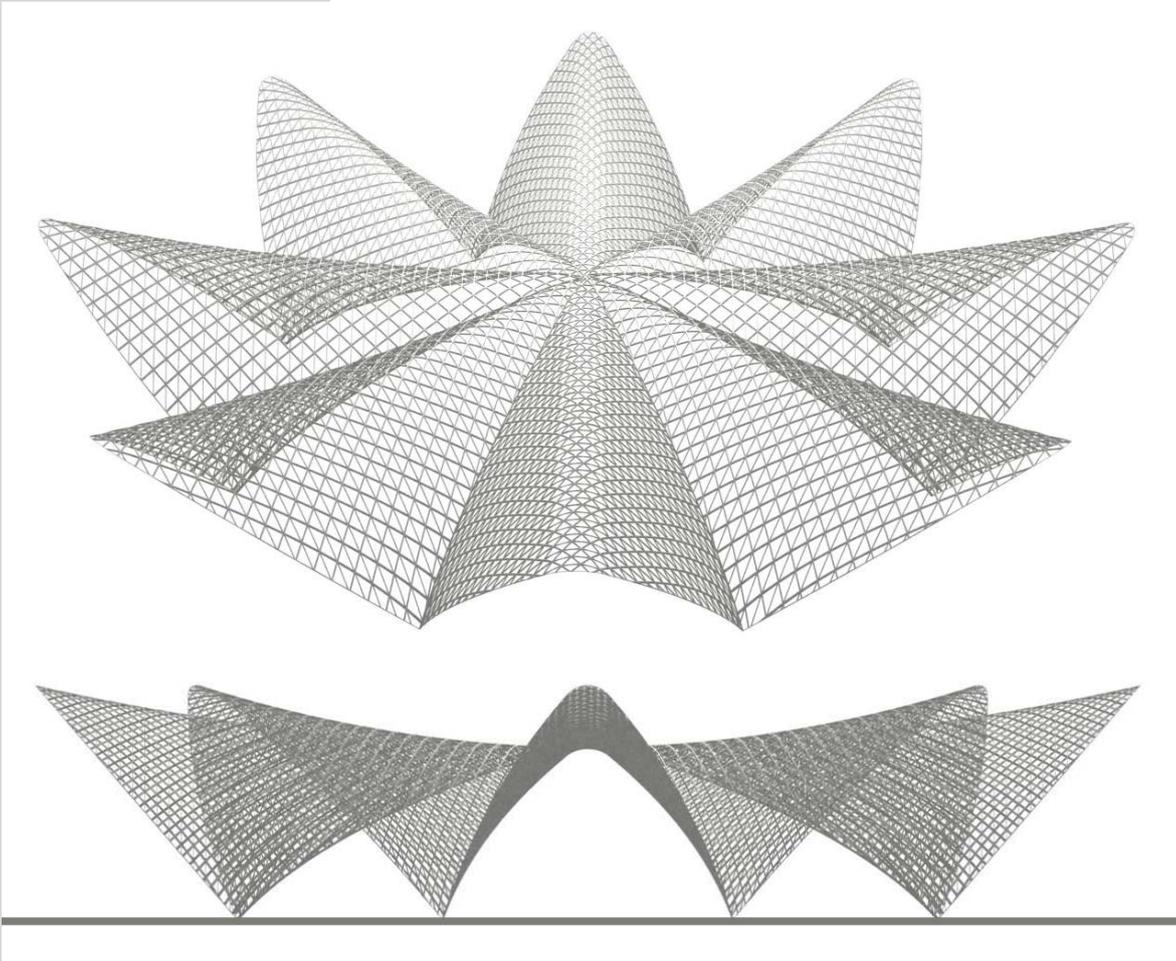
Por aquellos años también estaban apareciendo nuevas maneras de construir que en ese momento eran solo ideas e investigaciones, me estoy refiriendo concretamente a las investigaciones de Buckminster Fuller sobre los domos

geodésicos de acero, que incluso Candela llegó a ponerlas en práctica en el Palacio de los Deportes hacia finales de la década del '60 cuando las cubiertas de hormigón dejaron de ser convenientes.

Es por eso que luego de 50 años surgen nuevas dudas después de haber analizado edificios en los que se manejan distintas prácticas para lograr una optimización de la estructura. Así que la idea del cuarto ejemplo es intentar revisar el cascarón del restaurante con técnicas que hoy están disponibles, que por ese entonces era imposible aplicarlas y ver los beneficios que se hubieran obtenido.

Pensemos en reemplazar ese cascarón por un domo de acero, cubrir ese espacio con un solo domo hubiera sido posible porque esa planta octogonal se podría haber transformado en circular sin ningún problema y en cuanto a sus dimensiones las luces se pueden salvar.

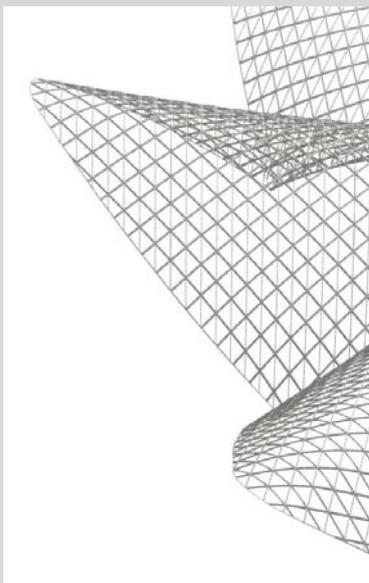
Pero con el domo perdemos desde el punto de vista estético la expresividad que tiene la cubierta con las curvas que generan los paraboloides. Sabiendo que los domos y los paraboloides hiperbólicos son superficies de doble curvatura y como si fuera poco estos últimos son superficies generadas por rectas, no se podrá generar una estructura de acero en la que se pueda seguir las formas de los paraboloides hiperbólicos obteniendo la misma expresividad de la cubierta de Candela.



Se puede generar un entramado con tubos de acero siguiendo la configuración de los paraboloides disponiéndolos de la misma manera que se dispondrían las barras de acero en el hormigón, como ambas son rectas ya se concluyó que no presenta ninguna dificultad el posicionado a pesar de que la superficie es curva.

En el entramado también vamos a tener que formar triangulaciones para aumentar la rigidez y la estabilidad de la estructura y de las barras. Cada barra estará conectada con piezas especiales también de acero, que conformarán los nudos a donde llegan las barras.

Consideraremos las mismas hipótesis que manejó Candela para la descarga de la estructura. En cada barra tendremos

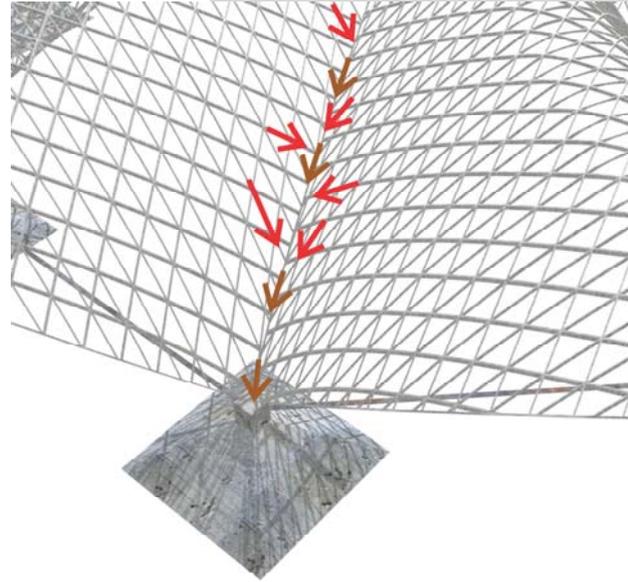


Triangulaciones en el entramado que rigidizan las barras y posibilitan respetar la geometría que se obtuvo con el cascarón de hormigón

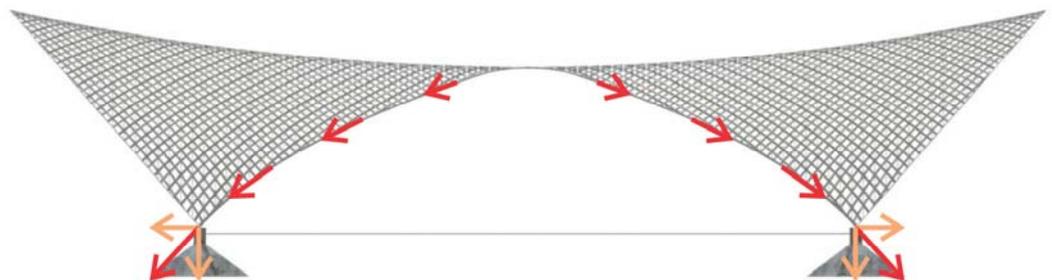
esfuerzos normales que de algún modo reproducen los esfuerzos de membrana de la cáscara de hormigón.

En las intersecciones de los paraboloides también tomaremos una lógica idéntica de resolverlo pero con un método distinto, es decir con un elemento que resuelva el encuentro de los paraboloides pero que no sea de hormigón, en cambio se utilizará un tubo de acero que seguirá la curvatura.

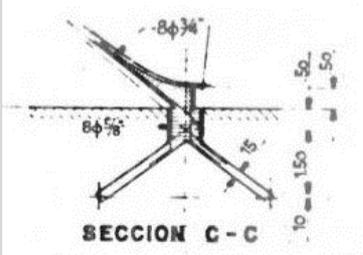
Como la planta es simétrica tendremos otro tubo similar que conjuntamente trabajarán como un arco. Sin embargo de todas formas nos enfrentamos con un problema que nos ha venido acompañando a lo largo de los tres edificios, la descarga en las bases también es una fuerza inclinada. La resolución las bases no la vamos a cambiar y adoptaremos la misma que adoptó Candela para su restaurante, bases de hormigón arriostradas con barras de acero.



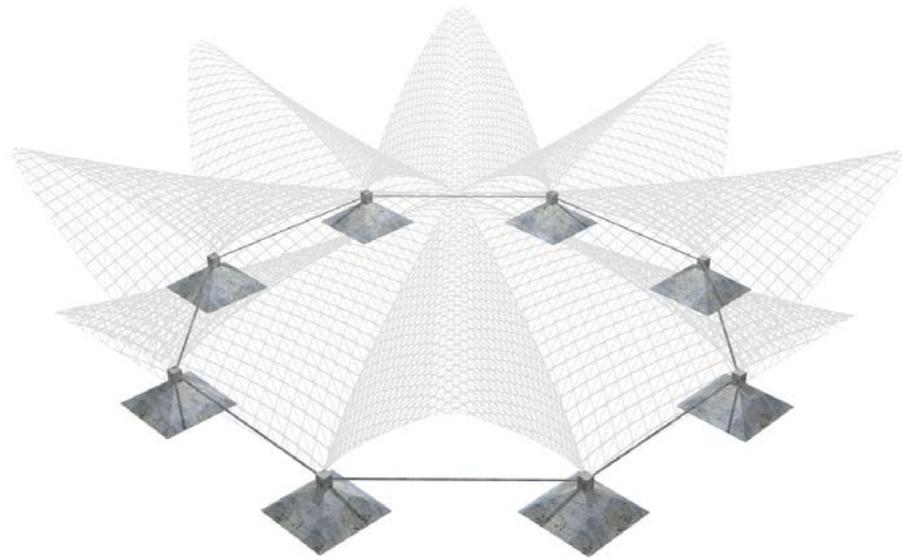
Descarga del entramado hacia el tubo que cumple la misma función de los bordes internos con forma de v de la estructura de hormigón



Descarga de los tubos que cumplen la función de los bordes internos con forma de v, la manera en que trabajan es la misma que resolvió Candela



Detalle de las fundaciones que son los únicos elementos de la estructura que no se propone cambiar



Para cubrir la estructura podemos solucionarlo con tela sin perder la imagen de continuidad que tiene la cáscara de hormigón.

Hasta aquí se ha hablado de la propuesta y parece ser posible, pero cuales son los beneficios que aporta. Por ser un entramado lo que estamos reduciendo es el peso de la estructura, se está utilizando menos material pasando de una solución pesada a una más liviana, que tampoco tendrá problemas con la succión por las características de la geometría y la rigidez que le otorga el entramado. Por lo tanto se están reduciendo las cargas que llegan a las bases y eso puede repercutir en que sea necesario menos material para resolver las fundaciones.

Por otro lado las mejoras están en el montaje ya que el sistema es en seco, lo que nos ahorra tiempos de secado, curado, etc., no tenemos la necesidad de usar encofrado, así que seguimos

ahorrando en materiales. Pero tiene sus desventajas tales que para armar la estructura se puede requerir mano de obra especializada y también que los encuentros entre los distintos elementos (barras, nudos) requieran soldadura.

De todas formas lo que se intentó ver aquí es que no solamente existe una técnica o combinación de ellas que permitan llegar a la optimización, sino que puede haber otras y que su elección estará condicionada ya sea por las técnicas, tecnologías o recursos disponibles en un determinado contexto.

Fue posible plantear la suposición debido a que hoy disponemos de más sistemas constructivos, los cuales en la época de Candela recién estaban viendo la luz.

Llegamos así a una conclusión de que no hay una peor o mejor solución, simplemente se usan los recursos disponibles en determinado contexto, quizás en el futuro aparezcan otros nuevos que plantearán otra visión distinta a lo que hoy creemos que está solucionado, es decir mientras se desarrollan determinadas técnicas, al mismo tiempo se están empezando a investigar otras nuevas.



Conclusiones

Si bien las conclusiones son el fruto del análisis de estos edificios que representan un pequeño universo, la tarea no se agota aquí ya que se pueden hacer extensibles a otras obras o incluso incorporar estas ideas a obras que puedan ejecutarse en el futuro.

Cuando definimos optimizar había una pregunta a la que se intentó dar una respuesta primaria que no era suficiente porque no teníamos las suficientes herramientas como para dar respuesta al problema. ¿Cuál es la mejor manera de realizar una estructura?

La mejor manera de realizarla nunca debe dejar de lado el programa para el cual va a estar diseñada, es importante contemplar un estado actual, si sufrirá cambios en el futuro y dar cumplimiento a ambas situaciones, teniendo en cuenta su durabilidad.

No olvidar tampoco el contexto donde estamos insertados ya que eso nos definirá los recursos y los sistemas constructivos de los que disponemos.

Si queremos luego optimizar la estructura hay que plantearse el objetivo desde el principio, debemos saber que es lo que queremos optimizar y como lo vamos a hacer para que el resultado sea el deseado, en esto también influye el contexto en el que nos situamos.

Al enfrentarnos al problema de la optimización, el proyecto debe ser posible de construir, por eso es necesario conocer las

técnicas y lo que podemos obtener de ellas, debiendo satisfacer las condiciones de seguridad y los cálculos pertinentes.

Si tenemos dudas sobre si es posible realizarla se puede recurrir a las pruebas en escala, para evaluar posibles dificultades que se puedan presentar en el proceso constructivo, sin pretender que suplanten los cálculos.

Además de considerar estos aspectos previos a la construcción, debemos considerar otros que contribuyen a la mejor manera de realizar una estructura.

Al principio mencionamos que se considera importante plantearse el objetivo desde el inicio, mejor dicho desde el proyecto porque en esas etapas definimos la forma. Todo diseño una vez definido es un hecho que se vaya a construir y por lo tanto va a requerir materiales y sería preferible que se utilizara la menor cantidad de material posible.

Utilizar menos material implica que trabaje de modo eficiente y una de las maneras de lograrlo es con un buen diseño de la forma, que debe brindar seguridad, es decir que sea estable, debe ser rígida, hay casos como las superficies de doble curvatura que son rígidas por sus características geométricas y son capaces de que su forma se mantenga invariable ya sea bajo acción de su propio peso o bien frente a los efectos del viento.

Un buen diseño debe responder ante estos esfuerzos siendo estable y logrando además que los materiales trabajen de manera eficiente para ambas situaciones.

Pero no todas las formas por si solas son capaces de lograrlo como es el caso de las superficies de simple curvatura, sin embargo si se combina con alguna técnica constructiva es posible aumentar su rigidez y obtendremos algunos beneficios adicionales, por ejemplo disponer de menos cantidad de determinado material o utilizar menos armaduras.

Eso es lo que logra el pretensado al pretender aumentar la rigidez de una lámina cuando adopta la forma de una curva catenaria haciendo que la curvatura no varíe con el viento y por el otro lado los materiales trabajan de manera eficiente.

Hablamos de la forma pero a que nos referimos con que un material trabaje de manera eficiente. A modo elemental sería que el material trabaje a los esfuerzos que puede resistir, con lo que pretendemos mejorar el rendimiento o el desempeño del mismo. Un buen desempeño implica que las tensiones normales sean uniformes y que el material que conforma la sección sea exigido de igual manera.

Por otro lado se puede atribuir a la organización de la sección porque no siempre se requiere mayor área para darle rigidez a un tubo de acero, basta con aumentar su inercia sin variar el área, la capacidad de resistir los esfuerzos es la misma y se habrá ahorrado material.

Cuando el hormigón trabaja de manera eficiente (no trabaja a la flexión), se reduce la cantidad de acero necesario. Entonces nos permite organizar mejor la sección, las barras son de menor diámetro, o necesitamos menos cantidad de barras, nos permite reducir el espesor de hormigón, logramos bajar el peso propio, se reducen las cargas, necesitaremos menos acero... y así el ciclo se repite sucesivamente hasta llegar a un punto de equilibrio.

Generalizando: logramos utilizar los materiales del mejor modo posible es decir eficientemente, eso nos permite utilizar menos cantidad y obtendremos una reducción del peso propio, nos sigue permitiendo usar menos material y así sucesivamente hasta llegar a un punto de equilibrio.

Ahí habremos llegado a una estructura óptima, utilizando solo el material necesario para resistir a los esfuerzos. No es más ni menos material, solo el necesario.

Pero no solo de los materiales trata la optimización, eso es solo una parte también debe poderse montar de manera sencilla, sin elementos sofisticados y utilizando los recursos disponibles.

Si los materiales trabajan de eficientemente de nada nos servirá tener que montar la estructura mediante un sistema complicado, en el peor de los casos nos puede hacer perder todas las ventajas que ganamos con la menor utilización del material.

Para que no pase eso también tendremos que optimizar el montaje, si se requieren piezas especiales, se tenderá a una estandarización que facilite el montaje, si no se requieren será mucho más fácil ya que se podrá inventar uno que resulte más económico que las piezas especiales y permiten utilizar mano de obra sin experiencia.

El transporte también incide en el montaje, si las piezas se pueden fabricar cerca de la obra mejor, sino implicará costos mayores. Lo más importante es que el montaje implica plazos, un montaje sencillo nos permitirá reducir los tiempos con respecto a uno más complicado.

Mientras los materiales trabajan eficientemente y su montaje es fácil llegaremos a la reducción de los costos que es el objetivo principal con el que pretendemos llegar con la optimización de la estructura.

Si hay mayor gasto de materiales hay más gastos, si el montaje es complicado hay un gasto mayor y si los plazos de montaje llevan más tiempo del previsto siguen aumentando los gastos.

Entonces la mejor manera de hacer una estructura es utilizar menos material, montándola de una manera sencilla y cumpliendo los plazos previstos, sin descuidar la seguridad y la estabilidad para reducir el costo. Esta afirmación respalda las hipótesis iniciales que nos habíamos plantado.

De todas formas el tema no termina aquí porque lo que nos pueda parecer la mejor manera hoy, tal vez mañana no lo sea,

porque hoy conocemos determinadas técnicas que de algún modo las podemos utilizar para llegar a una estructura óptima, pero están limitadas a los recursos materiales, al contexto, tecnologías disponibles, cosas a las que se debe responder. Al mismo tiempo surgen las que se utilizarán mañana. Eso no descarta que para lo que hoy fuera resuelto con lo que disponemos y conocemos, mañana pueda ser resuelto de manera distinta.

Resulta que la optimización es un tema que está en constante revisión y deja el campo abierto a inventar nuevos sistemas constructivos en el afán por seguir reduciendo costos.

Bibliografía

- Arquitectura Viva No. 72**; Madrid, Ed. Arquitectura Viva SL, may-jun 2000.
- Buck, David N.**; (introd.), Shigeru Ban – Portfolio, Barcelona, Ed. Gustavo Gili, 1997.
- Casañas, Virginia; Fernández, César**; Ficha estructuras traccionadas, Cátedra de Estabilidad de las Construcciones I.
- Detail 6/2000 – Construir con membranas**; Múnich, Institut für internationale Architektur Dokumentation GmbH & Co. KG, 2000.
- Diccionario de la Real Academia Española**; edición online <http://www.rae.es>.
- El croquis 68/69+95 Álvaro Siza 1958 – 2000**; Madrid, Ed. El croquis, 2000.
- Engel, Heino**; Sistemas de Estructuras. Barcelona, Ed. Gustavo Gili. 2001.
- Faber, Collin**; Las Estructuras de Candela, México DF, Compañía Editorial Continental, 1970.
- Microsoft Encarta 2008**; Microsoft Corporation, 2007.
- Otto, Frei**; Cubiertas colgantes – versión española por Francisco Folguera, Barcelona, Editorial Labor SA, 1958.
- Rüsch, Hubert**; Hormigón armado y hormigón pretensado - Propiedades de los materiales y procedimientos de cálculo - Vol. 1, México, Compañía editorial continental SA DE CV, 1975 - 1982.
- Schinca, Jorge**; Ficha Optimización, Cátedra de Estabilidad de las Construcciones III.
- Tectónica 09 – Acero I**; Madrid, ATC ediciones, setiembre 1998.
- Tectónica 17 – Geometrías complejas**; Madrid, ATC ediciones, setiembre 2004.
- Torroja Miret, Eduardo**; Razón y ser de los tipos estructurales, Madrid, Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, 1976.

Internet

- Alba Lozano, Sara**; Práctica 4: grandes luces – Pabellón Japonés Expo Hannover 2000.
http://www2.uah.es/innovaciones/0405/trabajo%20de%20alumnos/practica4_grandes_luces.pdf
- Andrés Martín, Francisco Ramón; Fadón Salazar, Fernando**; Análisis Gráfico de Obras Emblemáticas de Félix Candela, XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Zaragoza, junio del 2004.
<http://www.egrafica.unizar.es/ingegraf/pdf/Comunicacion17102.pdf>
- Arqhys**
<http://www.arqhys.com/noticias/2009/09/fundamentos-del-diseno-optimo-de.html>
- Arquitectura en red**
<http://www.arqred.mx/blog/2009/09/13/alvaro-siza-pabellon-de-portugal-expo-98/>
<http://www.arqred.mx/blog/2009/10/01/contexto-pabellon-de-portugal/>

<http://www.arqred.mx/blog/2009/10/06/programa-pabellon-de-portugal-expo-98/>
<http://www.arqred.mx/blog/2009/10/14/relacion-programa-contexto-pabellon-de-portugal/>
<http://www.arqred.mx/blog/2009/11/01/estructura-pabellon-de-portugal-expo-98/>
<http://www.arqred.mx/blog/2009/11/08/materiales-pabellon-de-portugal-expo-98/>
<http://www.arqred.mx/blog/2009/11/23/critica-pabellon-de-portugal/>

Arquitecturas de precisión

<http://arquitecturasdeprecision.blogspot.com/search/label/FELIX%20CANDELA%20%20SU%20ESCUELA>

Artículos de estructura

<http://articulosdeestructura.blogspot.com/2009/08/ondulaciones.html>

Assembly language

<http://www.assemblylanguage.com/reviews/Ban.html>

Bechthold, Martín; Sobre cáscaras y blobs: superficies estructurales de la era digital, ARQ N° 063, Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2006. p. 30 – 35.

<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/375/37506307.pdf>

Buckminster Fuller Institute

<http://www.bfi.org/about-bucky/buckys-big-ideas/geodesic-domes>

Churtichaga, José María; La estructura veloz – a propósito de la obra de Emilio Pérez Piñero y Félix Candela.

http://www.chqs.net/archivos/informes/archivo_1_040310_la+estructura+veloz.pdf

Del Cueto Ruiz Funes, Juan Ignacio; Félix Candela, el mago de los cascarones de concreto, Arquine – Revista internacional de arquitectura N° 2, México, 1997.

<http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/1925/1/3.pdf>

Design boom

http://www.designboom.com/history/ban_expo.html

Diario El Mundo de España

<http://www.elmundo.es/larevista/num135/textos/siza1.html>

Eco 2 Site

<http://www.eco2site.com/arquit/earquit2.asp>

Félix Candela – Ex sitio oficial

<http://web.archive.org/web/20010717225400/www.gsd.harvard.edu/~lburks/f1/research/candela/candela/gsd2302.html>

Guía de la exposición Félix Candela La Conquista de la Esbeltez, Madrid, febrero - abril 2010.

<http://www.madrid.es/UnidadWeb/Contenidos/EspecialInformativo/TemaCulturaYOcio/Cultura/Centros/CondeDuque/Actividades/CANDELA.Guia.pdf>

Konstandt, Matías M; Estructuras espaciales, domos geodésicos, marzo 2010.

<http://www.domosargentina.com/pdf/Domos%20Geodesicos-Teoria1.pdf>

Mi moleskine arquitectónico

<http://moleskinearquitectonico.blogspot.com/2009/05/alvaro-siza-y-la-expo-2000-en-lisboa.html>

Museo de arte de la Universidad de Princeton

<http://mcis2.princeton.edu/candela/manantiales.html>

Peraza, J. Enrique; Shigeru Ban, Arquitecto de urgencia.

http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_4145_12275.pdf?PHPSESSID=89ce15d4f846dd75f069d98439f64716

Pro cartón

http://www.procarton.com/files/publications_item/glossaryspanish.pdf

QL – ingeniería

<http://www.ql-ingenieria.es/?p=216>

Rincón del vago

<http://html.rincondelvago.com/estructuras-de-vector-activo.html>

Shigeru Ban – Sitio oficial

http://www.shigerubanarchitects.com/SBA_WORKS/SBA_PAPER/SBA_PAPER_10/SBA_paper_10.html

Skyscraper city

<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=981060>

<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=981060&page=2>

<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=981060&page=3>

<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=981060&page=5>

Wikiarquitectura

http://es.wikiarquitectura.com/index.php?title=Restaurante_Los_Manantiales

Wikipedia

http://es.wikipedia.org/wiki/Optimizaci%C3%B3n_%28matem%C3%A1tica%29

http://es.wikipedia.org/wiki/Pabell%C3%B3n_japon%C3%A9s_para_la_Expo_2000