

Diseño de Estructuras Laminares

Daniel Moisset de Espanés

Las estructuras laminares se caracterizan por su escaso espesor en relación a sus otras dimensiones. Esto las hace muy eficientes por su reducido consumo de material cuando se trata de cubiertas de grandes dimensiones.

Para poder construir con pequeños espesores en relación a la luz libre es necesario evitar los esfuerzos de flexión. Esto se logra con adecuadas relaciones entre las cargas, la posición y tipo de apoyos y, fundamentalmente, la configuración geométrica de la cáscara. Las formas que cumplen las condiciones anteriores se consideran óptimas y el proceso de encontrarlas se llama optimización.

Desde el siglo XIX el cálculo funicular da la solución para el problema de barras en el plano y Gaudí, a comienzos del siglo XX, logró importantes avances en el diseño experimental de complicados entrecruzamientos de arcos con modelos funiculares de hilos y pesas, dando origen a obras tan notables como la basílica de la Sagrada Familia y la capilla Güell en Barcelona. Esta línea experimental de modelos físicos, dedicada a obtener la configuración geométrica de las formas óptimas, ha sido continuada por Oscar Andrés, profesor consulto de la Universidad Nacional del Sur (Argentina), que ha desarrollado un método propio designado como de modelos homeostáticos que da solución a problemas de superficies continuas en el espacio. Utiliza para ello láminas planas de acrílico que al cargarse y calentarse en un horno adoptan variadas formas que se acercan rápidamente a soluciones membranales.

A partir de 1994, el Taller de Investigación de Diseño Estructural de la Universidad Nacional de Córdoba, con la colaboración del Prof. Andrés, construyó un horno e implementó, con tecnología propia, los demás elementos auxiliares para comenzar la experimentación en este tema. Gracias a estos nuevos equipamientos, en el TIDE se comenzaron a dictar cursos de Diseño Experimental de Estructuras Laminares. La gran actividad en el campo del diseño, se debía a que se trataba de un área nueva que merecía su investigación tanto por su originalidad como por sus posibles aplicaciones prácticas en la

construcción de este tipo de estructuras.

Simultáneamente con el aspecto experimental que sirve para la generación formal, se realizó la verificación estática y resistente de los modelos propuestos para acciones gravitatorias simples. Para esto se utilizó el programa ALGOR, con aplicación del método de elementos finitos para el cálculo estructural, que resuelve problemas estáticos y dinámicos, de primer y segundo orden.

Posteriormente se desarrolló un método propio en el que se simulan con computadora, las grandes deformaciones que sufre una lámina plana cuando es sometida a grandes cargas, que le producen un cambio total en la geometría. Las sucesivas formas que va tomando el modelo computacional se utilizan como formas estructurales y resultan intrínsecamente de una gran eficiencia.

Todas estas experiencias llevadas a cabo desde el TIDE fueron divulgadas en cursos así como también en presentaciones a jornadas científicas, como por ejemplo, en las jornadas de la AIE en 1998. A continuación una breve reseña de todas ellas.

Curso Diseño de Estructuras Laminares

PROGRAMA

- Inventario. Desarrollo histórico reciente de la optimización de las formas laminares. Obras de Gaudí, Torroja, Nervi, Candela, Dieste y Calatrava.
- Bases teóricas y experimentales. Concepto de eficiencia. Influencia de la escala. Los métodos funiculares. El método homeostático de deformación por calor.
- El método de grandes deformaciones por simulación en computadora. Los programas de elementos finitos. Métodos lineales y no lineales. Uso del programa ALGOR para generación y verificación de formas estructurales. Control de tensiones y deformaciones.
- Análisis crítico. Diseños realizados por estudiantes de arquitectura

con los métodos de optimización descriptos. Análisis y evaluación de resultados.

METODOLOGÍA

- Se impartirán clases y conferencias sobre el objeto del seminario. El disertante utilizará abundante material audiovisual para desarrollar el contenido propuesto.
- Cada grupo de participantes realizará su propia experiencia de diseño y optimización de la forma estructural, aplicando el método computacional descripto bajo la dirección y tutela del profesor invitado.
- Se realizarán sesiones de análisis crítico y una evaluación final de los proyectos a los que se deberá arribar.



ANTECEDENTES

Desde que Gaudí desarrolló sus modelos funiculares para el trazado geométrico de sus bóvedas, quedó planteada la posibilidad de generar formas estructurales de alto valor arquitectónico a partir de modelos deformables que garantizan la máxima eficiencia. El Prof. Oscar Andrés ha ideado y puesto a punto un sistema de modelos homeostáticos que en vez de hilos utiliza láminas continuas de materiales plásticos que sometidas a cargas dan origen a formas estructurales de gran originalidad. Este método tiene ya



reconocimiento internacional y su autor fue galardonado con el premio al mejor trabajo de investigación en el concurso iberoamericano que otorgó el Instituto Eduardo Torroja en 1993.

Una vez en posesión de la tecnología y equipamiento necesario para comenzar la experimentación solo resta la creatividad e imaginación de los estudiantes de arquitectura para obtener resultados insospechados.

OBJETIVOS

Capacitar al alumno de arquitectura para utilizar la experimentación física como una posibilidad de dar origen a formas arquitectónicas.

ACTIVIDADES

- Previo al comienzo del curso el personal del TIDE prepara los instrumentos necesarios para la experimentación (horno, manto de carga, etc.)
- El curso comienza con instrumentación teórica a cargo del profesor invitado. Se plantean problemas de diseño de edificios a ser cubiertos por estructuras laminares.
- Se definen geoméricamente las superficies obtenidas para lo que se considera útil el uso del AutoCAD.
- Se realizan cálculos simples de predimensionado en base a instrumentación teórica y bibliografía existente.
- Se investiga la posibilidad de aplicación de programas de PC de elementos finitos para el análisis estructural.

RESULTADOS OBTENIDOS

- La búsqueda de un proceso de diseño experimentalista e innovador en la concreción formal de la idea generadora, ha permitido obtener resultados creativos y originales.
- Estos proyectos no se explican solamente a partir de maquetas sino que se continúan hasta la verificación y evaluación del comportamiento estructural.
- El resultado final es el producto de una estrategia que vincula la disciplina compositiva con las leyes de la estática y se logran formas y construcciones que se destacan por su dinamicidad. Ejemplo de ello son los trabajos de alumnos que a continuación se presentan:

Tema: Gimnasio cubierto

Alumnos: Gustavo González, Pablo Miraglia, Guillermo Castro.

El proyecto consiste en una cubierta para gimnasio multiuso. Las condicionantes funcionales marcaron la necesidad de una zona de actividad deportiva de superficie libre de 30 m x 25 m, con una altura mínima de 12 m en la parte central y un sector de tribunas.

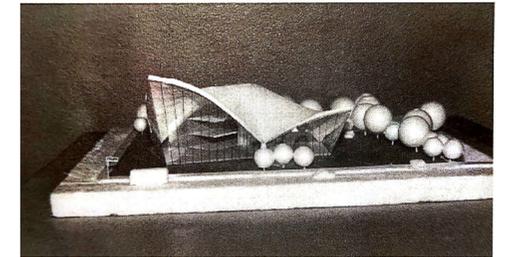
Se partió de aproximaciones formales, dibujadas en Autocad, y se realizaron sucesivos ensayos en el horno hasta obtener los resultados deseados.



Tema: Centro de exposición

Alumnos: Silvio Barrera, Marcelo Schwander, Miguel Dragone.

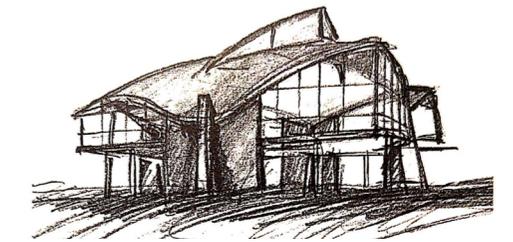
Ubicados sobre el sector comercial de Av. Colón y Sagrada Familia, la búsqueda de una "prefiguración" que respondiera a la metáfora formal y premisa: "el objeto ha de ser un hito más en el eje y su forma serán las velas infladas al viento", es el origen de esta propuesta.



Tema: Intercambiador de transporte

Alumnas: Nilda Molina, Claudia San Martín.

Sobre un trabajo de arquitectura ya resuelto, se reelabora el edificio conector de los distintos medios de transporte. Se respeta el perímetro del proyecto existente y se propone iluminación natural en el centro del espacio. Es el primer trabajo que plantea interrupciones en la superficie continua de la lámina y logra un excelente comportamiento estructural.



MÉTODO HOMEOSTÁTICO (MH)

La idea de obtener superficies membranales a través de modelos físicos, para ampliar el repertorio de formas estructurales, tiene varios antecedentes. Se puede mencionar a Isler, en Suiza, que congelaba la forma que adopta un pañuelo húmedo al ser suspendido de varios puntos. Oscar Andrés, de Bahía Blanca, ha desarrollado en el año 1993 el Método Homeostático (MH), consistente en deformar placas de acrílico sometidas a carga uniforme dentro de un horno. El calentamiento a unos 100° C hace entrar en fluencia al material, se flexiona libremente la superficie buscando un estado tensional más eficiente y casi sin momentos. Las formas así generadas pueden considerarse como superficies "funiculares". Las posteriores verificaciones con programas de elementos finitos demuestran que efectivamente tienen un comportamiento cuasi membranal.



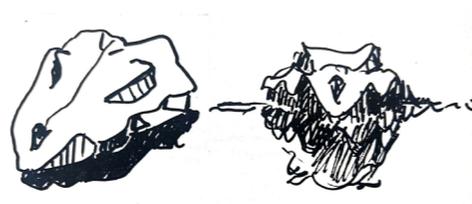
Intercambiador de transporte. Se han utilizado las posibilidades de láminas con bordes libres para construir grandes voladizos. Las discontinuidades permiten aberturas para iluminar el interior.

En el TIDE, con el asesoramiento del Ing. O. Andrés, se desarrolló un proyecto de investigación, para estudiar las posibilidades de diseñar formas estructurales a partir del MH.

En ese tiempo, se obtuvieron numerosos trabajos realizados por alumnos avanzados de arquitectura, con formas logradas experimentalmente en el laboratorio y verificados posteriormente de forma numérica. Se destaca la enorme posibilidad creativa tanto en el campo de las formas que siguen leyes geométricas más o menos simples, como en el de las formas orgánicas o naturales.



Stand para exposición de veleros. La metáfora de la vela inflada por el viento se logra con una extrema sencillez de recursos.



Museo paleontológico. Los autores se propusieron evocar la idea del cráneo de un animal prehistórico como forma estructural de alta eficiencia y expresividad.

METODO DE LAS GRANDES DEFORMACIONES (MGD)

Este método surge con posterioridad al MH a partir de la incorporación de los procesadores al TIDE. Gracias a ellos se desarrolló un método propio, totalmente computacional, que en alguna medida simulaba el proceso de deformación que se producía en el horno. Este método se denominó como método de las grandes deformaciones (MGD).

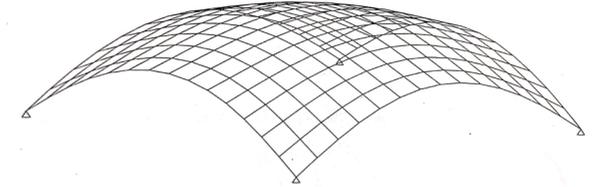
El MGD consistía en producir una deformación de una superficie inicialmente plana, o no, por acción de cargas hacia arriba, inversas al peso. Para mantener la validez de la hipótesis de linealidad del software utilizado, los desplazamientos producidos deberían mantenerse relativamente pequeños para no alterar significativamente la geometría original. No obstante, si se multiplican los desplazamientos por un factor de escala convenientemente elegido, eventualmente grande, las superficies deformadas adquieren formas y proporciones que bien pueden ser empleadas como envolventes de espacios arquitectónicos.

La extrapolación lineal realizada carece del sentido físico del MH, el cual es un proceso no lineal, tanto en lo geométrico como en las características del material. A pesar de esta aparente incongruencia, se ha podido verificar por medio de elementos finitos que, en la generalidad de los casos, el comportamiento para cargas similares a las iniciales es prácticamente membranal.

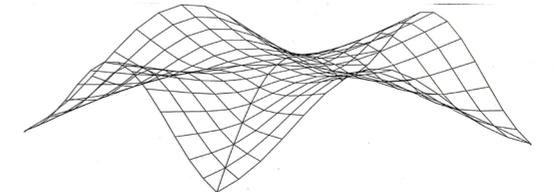
Si las tensiones o desplazamientos resultaran excesivos, se corrige la primera forma obtenida cargando nuevamente la estructura hacia arriba, para producir ahora pequeños desplazamientos, y la nueva superficie así obtenida es una segunda aproximación. El proceso puede repetirse iterativamente hasta llegar rápidamente, con una variación casi asintótica, a un punto a partir del cual las siguientes correcciones carecen de interés práctico. Este procedimiento de corrección de la geometría sí es un proceso de no linealidad geométrica, que corrige el resultado inicial de las grandes deformaciones.

Lo más llamativo del caso es que para producir la gran deformación elástica inicial se pueden usar elementos rigidizadores auxiliares que luego se quitan para configurar la estructura definitiva. A pesar de haber eliminado los rigidizadores el comportamiento cuasi membranal de la superficie se mantiene. Con distintas posiciones y momentos de inercia de los rigidizadores se pueden obtener diferentes diseños para la cáscara.

A continuación, se muestran algunas de las formas logradas con el MGD.



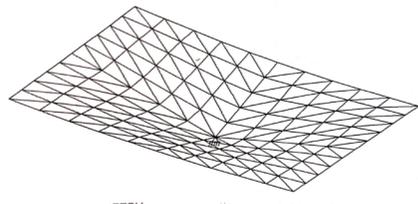
Cúpula sobre planta cuadrada sin elementos de borde. Se obtuvo con el MGD a partir de una placa cuadrada apoyada en sus cuatro vértices, con carga uniforme hacia arriba en toda la superficie. Esta forma es muy similar a la que se obtiene por el MH.



Bóveda sobre planta cuadrada. Tiene el mismo origen que la de la figura anterior, con el agregado de dos nervios rigidizadores auxiliares, que no existen en la cáscara final. Variando la rigidez y posición de las vigas pueden obtenerse infinitas alternativas.

Con este método también se han logrado reproducir algunos diseños ya consagrados, como los paraboloides hiperbólicos de Candela o las bóvedas gaussas de Dieste.

Para generar una sombrilla de planta rectangular y un único apoyo central, como las que ha utilizado Candela, se parte de una losa plana con un solo apoyo. Si se carga uniformemente hacia arriba los bordes se curvan. Para obtener bordes rectos es necesario colocar en la periferia y también en las aristas internas vigas auxiliares de gran rigidez, teóricamente infinita. Todas estas vigas se articulan en los extremos para permitir los quiebres buscados. Cargando hacia arriba se obtiene una superficie idéntica a la de la obra de Candela. Una verificación de tensiones y deformaciones por un programa de elementos finitos 3D demuestra el excelente comportamiento de la cáscara, aún sin ninguno de los refuerzos iniciales. Los refuerzos en las aristas internas que usó Candela son convenientes para evitar la concentración de tensiones que se da en las cercanías del apoyo y también para reducir el nivel de deformaciones.

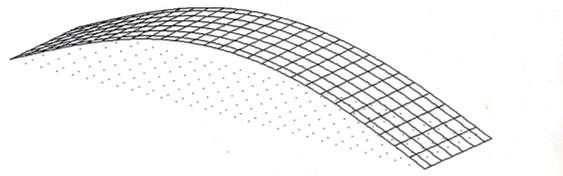


Sombrilla similar a las utilizadas por Candela.

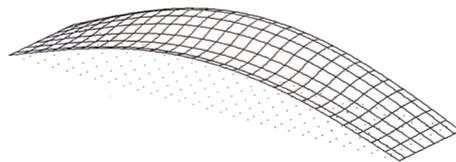
Para obtener las bóvedas de Dieste, se podría partir de una placa rectangular apoyada en los dos bordes de menor longitud. Se obtendría entonces, por un rápido proceso iterativo, una bóveda cilíndrica con forma de catenaria. El problema es que al carecer de curvatura transversal el sistema es muy sensible al pandeo y a la

flexión producida por cualquier otro tipo de carga distinta a la del peso propio.

Para lograr doble curvatura se puede partir de una serie de vigas paralelas, unidas por bielas transversales. Las vigas tienen distintos momentos de inercia para lograr flechas distintas que varían entre un máximo y un mínimo. La curva en S que tiene transversalmente la clave de la bóveda se elige para generar el desagüe pluvial, por ejemplo, recibir el aventanamiento entre bóvedas, además de aumentar suficientemente la rigidez.



Bóveda catenaria de simple curvatura, sin rigidez flexional. Peligro de pandeo.



Bóveda gaussa al estilo Dieste. Se parte de vigas paralelas de distinto momento de inercia, unidas por bielas. La superficie final se materializa con una cáscara que prescinde de vigas y bielas.

CONCLUSIONES

Hasta principios de los noventa, el equilibrio estático del cuerpo rígido y las ecuaciones diferenciales de la elasticidad sólo pudieron dar solución a unas pocas formas geométricas simples y con determinadas condiciones de contorno. Cuando se intentaron formas más libres, para lograr estados tensionales “calculables”, se debió recurrir a enormes vigas de borde, caso de la terminal aérea de la TWA de Saarinen, o a complicados sistemas de pretensado como en la cúpula ferial de Páez, en Barcelona.

Desde el año 1994, tanto el MH como el MGD tienen el valor de permitir al diseñador una gran libertad y creatividad formal, garantizando al mismo tiempo un excelente comportamiento estático y una alta eficiencia.