



Arquitectura e Ingeniería en Iberoamérica:
hombre, naturaleza y ciudad

primer premio

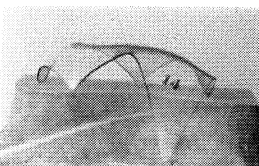
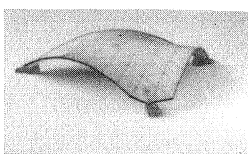
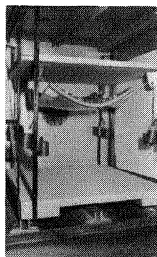
EXTENSIÓN DE LA TÉCNICA FUNICULAR DE GAUDÍ
A LA CONCEPCIÓN Y GÉNESIS DE SUPERFICIES
ESTRUCTURALES

400-26

**EXTENSION DE LA TECNICA FUNICULAR DE GAUDI
A LA CONCEPCION Y GENESIS DE SUPERFICIES ESTRUCTURALES.**

Oscar A. Andrés
Néstor F. Ortega.

RESUMEN:



El modelo funicular sirvió de apoyo a la tarea creativa de Gaudí facilitando la concepción de nuevas formas estructurales. Ese modelo, perfectamente apto para la representación de estructuras prismáticas (soportes, arcos, nervios), tenía sus limitaciones tratándose de estructuras superficiales. En este trabajo se presentan los resultados de una tarea de investigación cuyo objetivo fue precisamente extender las ideas de Gaudí al campo de las estructuras superficiales. Luego de revisar la técnica y el ideario de Gaudí, los autores proponen la utilización de un modelo que denominan homeostático en razón de que su génesis se apoya en el principio biológico de la homeostásis. Igual que el modelo funicular, el modelo homeostático es un modelo físico, pero en lugar de hilos, está constituido por material termoplástico y su forma se obtiene por la acción simultánea de cargas y calor. Este último degrada las propiedades mecánicas del material del modelo que sufre una metamorfosis en procura de nuevas formas de equilibrio.

Se exponen los principios de la teoría del diseño y se describen los procedimientos de la Técnica del Modelo Homeostático (HMT). Se discuten los resultados de las experiencias realizadas destacando, entre otras, la ventaja de la HMT en su aplicación al diseño de formas libres. Se ilustra con fotografías el procedimiento aplicado y algunos de los modelos construidos.

"La obra mejor es la que se sostiene por su forma y no por la resistencia oculta oculta de su material". (E. Torroja) (16)

1- INTRODUCCION.

La polifacética personalidad del Arquitecto Antonio Gaudí y su fecunda obra ofrecen a la consideración de profanos y especialistas múltiples temas de interés. Sobre uno de ellos en particular, se centrará aquí la atención: la excepcional capacidad de ese maestro de la Construcción para concebir y generar nuevas formas resistentes, como así también la técnica que introdujo y aplicó en esa prolífica labor creativa. No sólo se trata aquí de indagar acerca de los procedimientos aplicados por Gaudí y de la filosofía que los inspiraron, sino que se propone además, apoyados en esos mismos principios, extender su técnica al campo de las superficies estructurales o estructuras laminares propiamente dichas. Con este propósito, luego de analizar la técnica funicular de Gaudí, sus principios y motivaciones, se expondrá la *técnica de los modelos homeostáticos* o HMT (Homeostatic Model Technique) como la han denominado los autores ; serán examinados sus fundamentos, procedimientos y aplicaciones. Conviene aclarar desde ahora que la HMT igual que la técnica gaudinista sigue la vía experimental y que además de una extensión de aquella, implica una actualización en cuanto a uso de nuevos materiales para la construcción del modelo y de la obra.

Con relación a las fuentes tenidas en cuenta para la redacción de este trabajo corresponde señalar que fueron las siguientes:

A) para la técnica funicular de Gaudí: las publicaciones que con los números 1 a 10 se incluyen bajo el título Referencias Bibliográficas.

B) para la HMT: la tarea de investigación llevada a cabo desde 1988, año en que el primero de los autores de este trabajo concibió esa técnica e inició su desarrollo en el Laboratorio de Modelos Estructurales del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur (Bahía Blanca, Argentina). Un resumen de esa tarea puede verse en las publicaciones que con los números 12 a 14 están incluidas en las Referencias Bibliográficas. Se incluyen también otras referencias que sirvieron de base para la concepción y formulación de la HMT, señalándose entre ellas la N.º 11, del mismo autor, del año 1971, claramente vinculada a la técnica funicular y los principios de la teoría gaudinista.

Habiéndose nutrido los autores en el rico patrimonio de ideas y de obras que legara Gaudí a la posteridad, desean ahora contribuir con este trabajo a una mayor difusión y valoración de ese patrimonio y, al mismo tiempo, rendir su modesto homenaje a la memoria del ilustre Arquitecto.

"La verdadera silueta nace de la propia estructura..." (A.Gaudí) (3,8)

2- EL MODELO FUNICULAR.

Desde muy remotas épocas el hilo estuvo asociado a la Construcción. En efecto, el hombre se valió de ese simple instrumento para determinar la geometría del muro no sólo en planta sino también en elevación (en este último caso unido a un peso para formar la plomada). No es extraño pues,

que en una etapa posterior e introduciendo un cierto grado de refinamiento, aparezca el hilo usado para una nueva finalidad: diseñar la forma de estructuras tales como el arco y la bóveda. Nace así el *modelo funicular* que en términos generales puede definirse como una representación física de la forma de la estructura a diseñar. A continuación se tratará la técnica desarrollada por Gaudí y posteriormente serán analizadas las ideas que originaron y sustentaron la concepción de la misma.

2.1- Técnica funicular de Gaudí.

Como es bien sabido, la técnica funicular consiste en adoptar la forma del polígono funicular de las cargas como eje geométrico de la estructura. En su posición original y tratándose de cargas de gravedad, se tendrá una estructura de tracción pura; en su posición invertida, será una estructura de compresión pura para esas mismas cargas. En cualquiera de los dos casos la determinación del polígono podrá hacerse siguiendo la vía teórica (con modelos gráficos o analíticos) o bien por la vía experimental (con modelos físicos). También en ambos casos se obtendrán estructuras planas, como lo es el propio funicular, compuestas por piezas prismáticas de eje recto o curvo (según se trate de cargas concentradas o distribuidas). Es obvio señalar las ventajas que se obtienen para estas estructuras cuando responden al tipo unirresistente⁽¹⁵⁾, ya sea por la naturaleza del material o bien por el hecho de estar constituidas por piezas discontinuas (ladrillos o piedras, para el caso de estructuras de compresión).

Hasta aquí lo que podría llamarse "técnica funicular convencional".

Con el nombre de "*técnica funicular de Gaudí*" los autores quieren referirse

a una aplicación de esos mismos principios a estructuras no planas, sino espaciales, que implican un grado de complejidad mucho mayor, tanto desde el punto de vista geométrico como mecánico. Es precisamente en este tipo de estructuras donde Gaudí demostró tal grado de excelencia que permite diferenciar su tarea con relación a la técnica convencional.

En efecto, si se estudian algunas de las obras de Gaudí --en especial la Capilla de Colonia Güell, de la que se posee mayor información⁽¹⁰⁾-- se verá que se trataban de verdaderas estructuras espaciales, compuestas por múltiples estructuras planas, cuyo comportamiento mecánico sólo podía concebirse en el espacio de tres dimensiones. Su análisis por los procedimientos gráficos de la época hubiera resultado harto complejo. El *modelo de hilos*, por el contrario, permitía visualizar fácilmente, la interacción entre la Geometría y la Mecánica, reconociendo al mismo tiempo, la mutua influencia de acciones y reacciones de las múltiples estructuras planas componentes de la estructura total. Un ejercicio de prueba y error admitía la corrección de resultados condicionando la forma a los propósitos funcionales, estéticos o de expresión del diseñador, pero sin salirse nunca del marco obligado del equilibrio. La movilidad del modelo en esta ejercitación creativa le daba al mismo las características de un *ser vivo* en gestación. La exuberante imaginación de Gaudí, desbordando los límites del tablero plano de dibujo, había encontrado finalmente la herramienta adecuada: la *estereofunicula*, el tablero de tres dimensiones capaz de materializar su potencial creativo y encauzarlo, al mismo tiempo en el ineludible respeto a las leyes de la Naturaleza.

El modelo así concebido y construido debía ser transformado por Gaudí en una obra: se valió para ello del ladrillo y la piedra, los materiales mejor conocidos en su época y para los cuales disponía además de la

reconocida excelencia de la mano de obra catalana. La estructura construída con estos materiales tenía que corresponder mecánicamente y geométricamente con el modelo que "materializaba". Pues bien, esa correspondencia se lograba perfectamente en las piezas prismáticas (soportes, arcos, nervios, etc.) pero no se cumplía en los elementos superficiales (bóvedas) cuya complejidad de geometría y plexo tensional excedían las posibilidades del simple hilo de la funícula. (A lo sumo podía esperarse que el modelo funicular diera una representación parcial en el caso particular de las bóvedas de cañón corrido, limitándose a su línea directriz).⁽¹⁰⁾

Dentro de este planteo surgen dos interrogantes:

- a) Cómo resolvió Gaudí el problema de la concepción, y génesis de las superficies estructurales por él construídas.
- b) Cómo resolver en nuestros días ese mismo problema, aplicado a las formas laminares que se construyen con materiales distintos a los usados por Gaudí (hormigón armado, acero, plástico, etc) lográndose en muchos casos obras de dimensiones notables.

Con relación a la primera pregunta (quizás, un enigma más entre los muchos que presenta la vida y obra de Gaudí) los autores se permiten ensayar un respuesta más cercana a la hipótesis y la conjetura que al aserto de tesis indiscutida.

En primer lugar, se debe reconocer que Gaudí fue un precursor también en el tema de las estructuras superficiales ya que la introducción en el campo de la Construcción de formas tales como el paraboloides hiperbólico, el hiperboloides, el helicoides se deben a su genio innovador; sin embargo habrá que

aceptar, según datos recogidos por biógrafos y tratadistas (4,6) que la introducción de esas formas obedeció primariamente a razones funcionales (luminicas, acústicas), estéticas, constructivas y de expresión simbólica, antes que a motivos estructurales. Es posible que la bien probada resistencia de la bóveda catalana⁽¹⁵⁾ infundiera en Gaudí (igual que en sus colegas contemporáneos) tal grado de confiabilidad, que el problema estructural pasara a un segundo plano. Descartada la motivación estructural, habida cuenta de la reconocida sensibilidad espacial de Gaudí y siendo todas esas superficies de clara definición y generación geométrica, se puede admitir que la falta de representatividad del modelo físico no haya significado inconveniente alguno.

En cuanto a la segunda de las preguntas formuladas, su respuesta ha merecido y merece la atención y el esfuerzo de numerosos investigadores. Los autores han elaborado su propia respuesta proponiendo la Técnica del Modelo Homeostático (HMT) inspirada en el ideario gaudinista; por esta razón antes de referirse a la HMT se estima conveniente resumir brevemente ese ideario, es decir el basamento filosófico sobre el que Gaudí apoyó y elaboró su técnica.

2.2- El ideario de Gaudí.

En un análisis general del repertorio de ideas que desarrolló Gaudí, hay dos puntos que es necesario destacar por su directa vinculación al tema que se analiza:

a) Gaudí profesó un permanente respeto hacia las leyes de la Naturaleza; en la concepción de sus formas, antes que la copia o imitación de las formas de la Naturaleza, primó una ferviente admiración y veneración de las leyes del Supremo Creador, rectoras de todos los fenómenos naturales.

b) Gaudí fue dueño de una profunda *sensibilidad* espacial y mecánica del comportamiento de las estructuras; con frecuencia manifestó su confianza en esa sensibilidad y apoyó su pensamiento y accionar en ella. (5)

En el marco de ese ideario gaudinista no parece aventurado concebir el modelo estereofuncular como una imagen del conjunto orgánico que es la propia estructura, un *ser vivo* que se "mueve y palpita" bajo los efectos de las cargas y de las respuestas internas del material definidas por su plexo tensional. Podría así hablarse de una concepción "*orgánico-vital*" de las estructuras que por otra parte no es exclusiva de Gaudí (1852-1926) sino que también participan de ella en la misma época y en su misma tierra distinguidos ingenieros como F. Cardellach (1875-1919) y E. Torroja (1899-1961). En mérito a la brevedad y para no apartarse del asunto central, se remite al lector al Anexo, al final de este trabajo, donde podrá encontrar las citas que reiteradamente corroboran los conceptos que anteceden.

"En el gran libro de la Naturaleza es donde encontramos la verdad que preside a todas las manifestaciones materiales; en él debemos, pues, leer para alcanzar la realización de una obra lógica". (F. Cardellach)⁽¹⁵⁾

3- EL MODELO HOMEOSTÁTICO.

El modelo homeostático, igual que el modelo funicular de Gaudí, es un modelo físico, pero mientras este último está constituido por hilos, aquél se lo construye con placas de material termo-plástico. Su finalidad

es proporcionar el diseño de la forma de estructuras laminares, en lugar de las estructuras prismáticas propias del modelo gaudiniano. En los puntos siguientes se exponen las ideas básicas y la teoría del modelo homeostático; luego se describe la técnica desarrollada para su aplicación y finalmente se muestran y analizan los resultados obtenidos. En esa exposición, se procura reflejar y condensar la verdadera génesis de las ideas que condujeron a la concepción de la HMT, sin olvidar, claro está, la referencia a los principios de la Mecánica Estructural y de la Ciencia de los Materiales que nutrieron y sustentaron aquellas ideas.

3.1- Ideas básicas.

Los fundamentos del modelo homeostático tienen sus raíces en el ideario de Gaudí y encuadran en la concepción "organico-vital" que se ha mencionado en el punto 2.2, como se verá a continuación.

La génesis del modelo homeostático se obtiene sumando los efectos producidos por dos acciones:

- a) acción de las cargas (igual que en el modelo funicular),
- b) acción del calor.

La idea de introducir el efecto del calor está ligada al principio biológico de la *homeostasis* y requiere una explicación.

Fue Walter Cannon (1871-1945), fisiólogo norteamericano, quien acuñó el término *homeostasis* para designar la tendencia general del organismo

humano a restablecer el equilibrio de sus funciones vitales cuando alguna acción desordena ese equilibrio. Posteriormente se descubrió que el fenómeno no es exclusivo de la especie humana, sino que tiene lugar en todos los seres vivos cualquiera sea su posición en la escala biológica.

Superficialmente considerada la homeostasis parece ser la expresión del principio harto conocido de que todo ser vivo tiende a conservar su vida. Sin embargo los especialistas en la materia coinciden en señalar la complejidad del fenómeno: frente a la acción desequilibrante (agente homeostático), el organismo vivo pondrá en juego todos sus recursos potenciales antes de sucumbir. El comportamiento homeostático implica una serie de acciones y mecanismos que se desarrollan automáticamente y lejos de ser arbitrarios o caprichosos, responden a un plan inteligente que se realimenta y ajusta según múltiples variables. Todo ocurre como si ese organismo obedeciera a leyes de un código o las instrucciones de un programa cuya concepción supera en muchos casos, sino en todos, la inteligencia e imaginación del hombre.

Muy ilustrativa y conducente a la reflexión, desde el punto de vista de los autores, resulta una experiencia desarrollada en el Departamento de Ingeniería y Ciencia de la Construcción de la Universidad de Edimburgo⁽¹⁸⁾. Buscando las formas más convenientes para tanques sumergidos en el mar, investigadores de esa Universidad se apoyaron en la observación del erizo de mar (*echinus esculentis*). Cuando se somete este organismo a presiones crecientes (agente homeostático), su caparazón adopta la forma más eficiente para resistir la presión con el mínimo de material disponible. Curiosamente las formas que adopta el erizo de mar siguiendo las leyes de la homeostasis coinciden prácticamente con las formas previamente halladas, vía teórica, por los investigadores. Todo ocurre como si ese modestísimo

ejemplar de la escala biológica fuera dueño, desde siempre y anticipadamente, del resultado descubierto por el hombre luego de paciente y esforzada labor.

Retornemos ahora al campo de la Construcción: aquí los sujetos, esto es las estructuras, están constituidos por materiales obtenidos de la Naturaleza, pero además incluyen otros dos componentes:

a) la tarea manual del hombre que se incorpora en el procesamiento de los materiales y en la construcción de las estructuras mismas.

b) la tarea intelectual del hombre que se incorpora bajo la forma del Diseño y Análisis Estructural y que está dirigida, entre otras cosas, a satisfacer el cumplimiento de las funciones de la estructura.

El hombre ennoblece el material agregando, con su tarea intelectual, un código de comportamiento, de tal suerte que frente a una acción desequilibrante (exceso de carga, por ejemplo) la estructura pondrá en juego toda su potencialidad resistente antes de llegar al colapso, siempre que la misma haya sido bien concebida y ejecutada; aquí también, la estructura reaccionará según un plan inteligente, activando los mecanismos que demanden las instrucciones del programa concebido por el hombre y que a veces, en sus detalles más íntimos y recónditos, superará y perfeccionará las previsiones del propio diseñador. Para ilustrar este proceso bastaría con recordar y analizar en profundidad algunos fenómenos de la Mecánica Estructural que por ser muy conocidos, sólo se los enuncia aquí:

a) redistribución de tensiones en una sección solicitada a flexión: mecanismo de ayuda de fibras menos solicitadas a las más solicitadas cuando se supera el límite elástico del material.

b) redistribución de momentos en una viga continua: mecanismo de ayuda de las secciones menos solicitadas (tramo) a las más solicitadas (apoyo) cuando se supera el límite elástico del material.

c) mecanismos de fisuración en vigas de hormigón armado solicitadas al corte: inclinación de las fisuras con el ángulo más conveniente para lograr la mayor eficiencia de los materiales.

Un detenido análisis de estos y muchos otros casos, permite reconocer un claro paralelismo entre el comportamiento de los seres vivientes y de las estructuras. Unos y otras, ante la presencia de agentes homeostáticos, desarrollan en forma automática un plan inteligente dirigido a la estabilización de sus funciones (vitales o resistentes, según el caso).

En los tres casos arriba mencionados se ha considerado como agente homeostático el incremento en la acción de las cargas aplicadas a la estructura. A continuación se verá un fenómeno muy interesante que se produce cuando se introduce la acción del calor como agente homeostático.

3.2- Teoría del diseño mediante el modelo homeostático.

Como es bien sabido, el diseñador de estructuras laminares, debe apuntar hacia la membrana como meta ideal (17). En este estado el plexo tensional que equilibra a las cargas externas está configurado únicamente por esfuerzos normales y tangenciales.

Imaginemos ahora, para concretar ideas una placa cuadrada de material termo-plástico (acrílico, por ejemplo) de 30x30 mm de lado y 2 mm de

espesor, suspendida de sus cuatro vértices y cargada con carga uniforme de 1,5 gramos por centímetro cuadrado, por ejemplo. Esta carga queda equilibrada fundamentalmente con los esfuerzos de flexión como placa en el campo de las pequeñas deformaciones, esto es, sin alterar prácticamente su geometría inicial.

Qué sucede cuando esta estructura se introduce en un horno y se eleva la temperatura por encima de los 120 °C ? El calor degrada las propiedades mecánicas del plástico (hasta adquirir la consistencia de una goma) y se altera el equilibrio inicial; entonces la estructura desarrolla automáticamente un plan inteligente activando toda su potencialidad resistente para evitar el colapso. La placa incrementa sus deformaciones en forma notoria, pasando claramente al campo de las grandes deformaciones; disminuye la capacidad portante por flexión y aumenta la capacidad portante por esfuerzos membranales.

La estructura, obedeciendo a las leyes de la homeostasis, trata de estabilizar su función resistente modificando su forma inicial en busca de una nueva *tipología estructural*: la estructura "escapa" de su condición de placa y se "refugia" en su nueva condición de membrana.

Una vez cerrada esta evolución homeostática (verdadera metamorfosis que da lugar a la nueva configuración de equilibrio) la estructura se constituye en un *modelo homeostático*. El diseñador podrá aprovechar el comportamiento inteligente de la estructura, leyendo la geometría que el modelo mismo autodiseña.

Puesto que la génesis del modelo se produjo cuando la rigidez flexional del material era muy pequeña o despreciable (debido al calor), la

forma resultante tendrá un comportamiento cuasi membranal o de mínima flexión para la carga de diseño. Conviene aclarar que como carga de diseño se habrá adoptado previamente la correspondiente al estado de carga dominante. Sólo para ese estado de carga corresponde la determinación de la geometría de la lámina por la vía aquí descripta; para los restantes estados, se aplicará directamente el análisis estructural sobre la forma ya obtenida.

3.3- HMT: Técnica del diseño mediante el modelo homeostático.

Para materializar las ideas que anteceden se ha concebido y llevado a la práctica la técnica que se sintetiza a continuación:

- 1º De una hoja plana de material termo-plástico se corta una placa de forma semejante al perímetro de la planta a cubrir y en una escala dada, por ej. 1:50. (Se admite, para concretar ideas, que la estructura laminar cuya forma se trata de determinar es una cubierta.)
- 2º Se dispone la placa en condiciones de vínculo similares a las que tendrá la estructura real.
- 3º Sobre la placa se coloca un "pañó de carga" representando, en escala adecuada la carga de diseño de la estructura. (El pañó de carga está hecho con pequeños trozos de hierro adheridos a una lámina de poliestireno, de tal modo que no ofrece resistencia a los cambios de forma). (Fig.1). Simultáneamente se colocan en los vínculos pesos equilibrantes del pañó de carga, representando las reacciones.

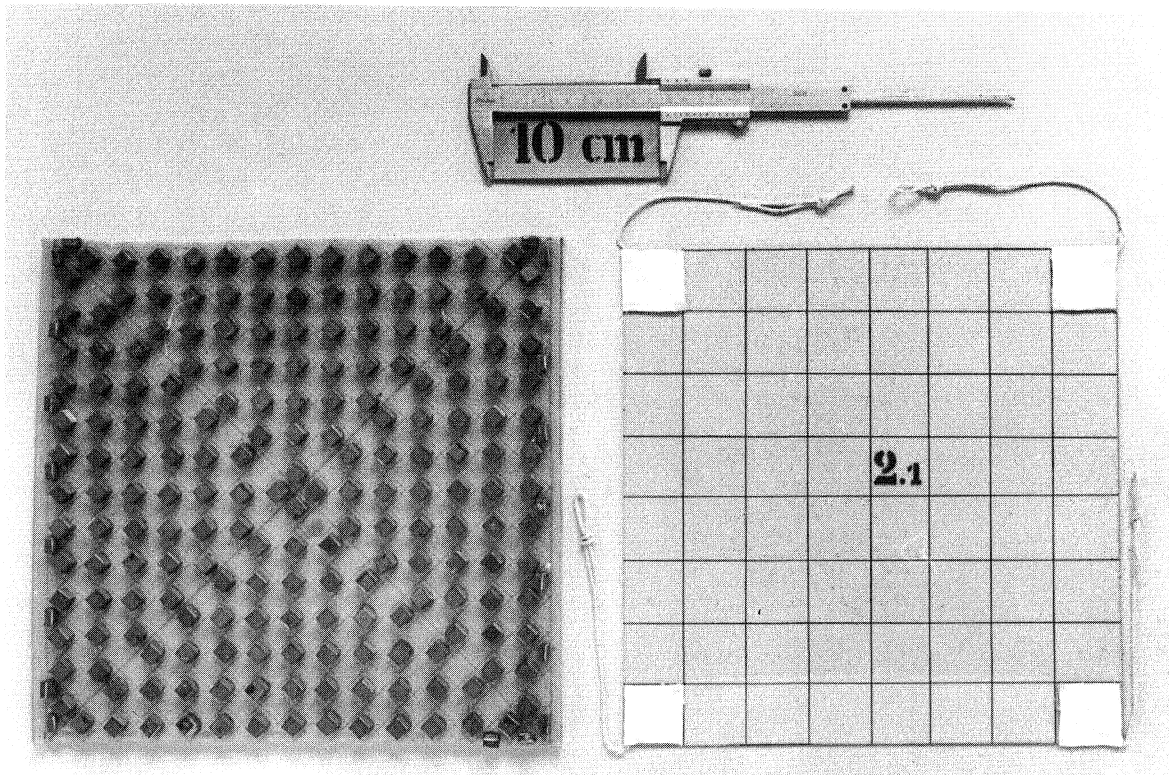


Fig. 1.—Paño de carga y placa listos para su montaje.

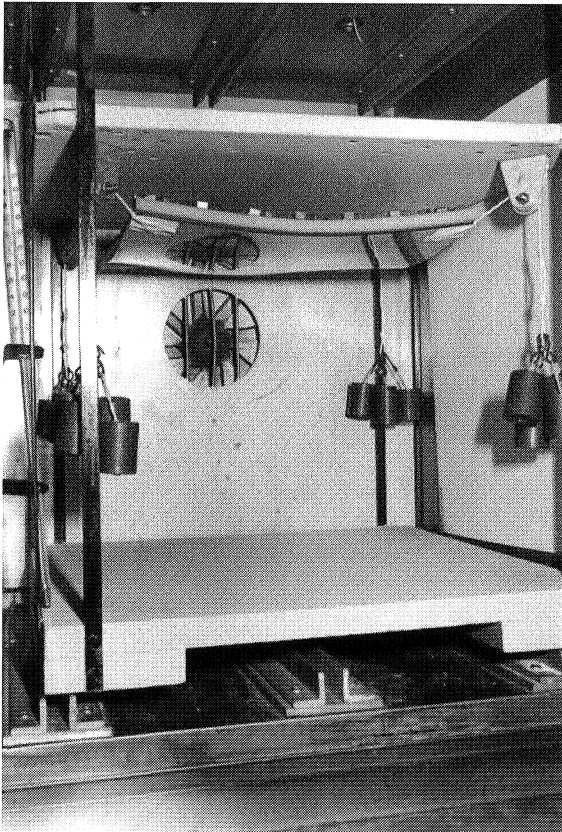


Fig. 2.—El modelo entra al horno.

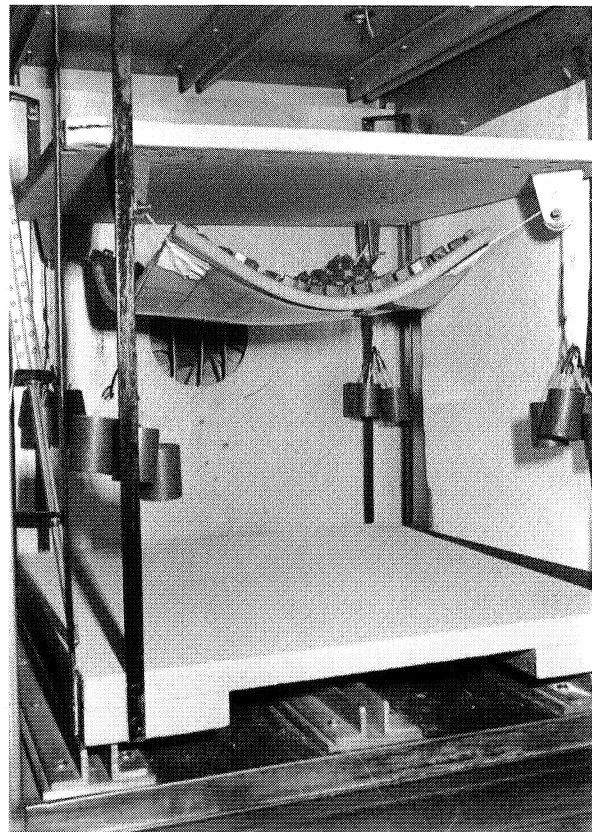


Fig. 3.—El modelo sale del horno.

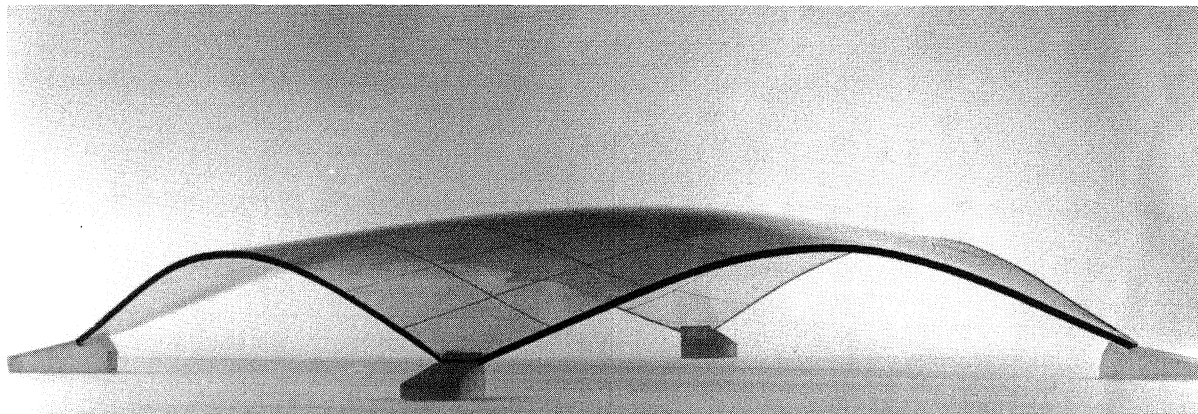


Fig. 4.—Modelo N.º 2 luego de salir del horno, invertido y montado sobre sus apoyos.

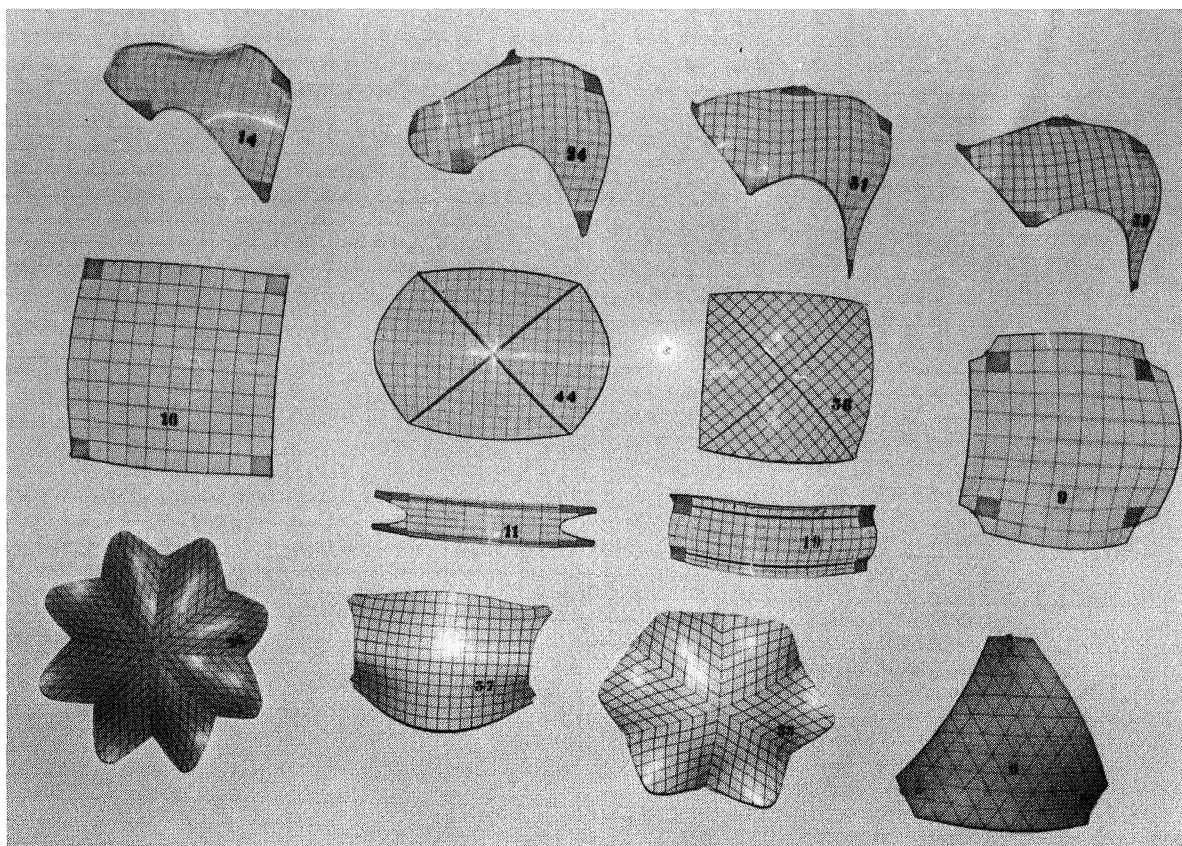


Fig. 5.—Algunos de los modelos obtenidos mediante HMT.

4º El conjunto (placa, vínculos, cargas y reacciones) se introduce en un horno con distribución uniforme de temperatura, y se calienta hasta alcanzar los 120/130 °C en que las deformaciones se estabilizan. Luego se corta el ingreso de calor. (Fig.2 y 3)

Una vez que el modelo se ha enfriado, el material recupera su rigidez original; la forma así "congelada" proporcionará la geometría buscada en la escala previamente adoptada. Es obvio señalar que la evolución homeostática del modelo generó una tipología de tracción dominante; bastará invertir la forma obtenida para pasar a una tipología de compresión dominante.(Fig.4)

2.4- Resultados obtenidos mediante HMT.

Aplicando la HMT, los autores han construido alrededor de cuarenta modelos de estructuras laminares de diversas formas y condiciones de vínculos (Fig.5). Algunos de ellos se detallan a continuación:

Modelo N° 2: planta cuadrada, bordes libres, apoyos en los cuatro vértices. (Fig.4)

Modelo N° 4: planta cuadrada, bordes libres, apoyos en los puntos medios de los cuatro lados. (Fig.6 y 7)

Modelo N° 6: planta triangular con vértices truncados, bordes libres, apoyos en tres puntos. (Fig.11)

Modelo N° 14

y N° 31: forma libre sobre planta no regular, bordes libres, cinco apoyos ubicados en dos niveles distintos. (Fig.9 y 10)

Modelo N° 30: forma libre sobre planta regular (hexagonal), bordes libres, seis apoyos ubicados en un solo nivel; superficies sinclásticas y anticlásticas.(Fig.8)

Modelo N° 44: planta cuadrada, bordes libres, nervios diagonales, apoyos en los cuatro vértices, superficies sinclásticas.(Fig.12)

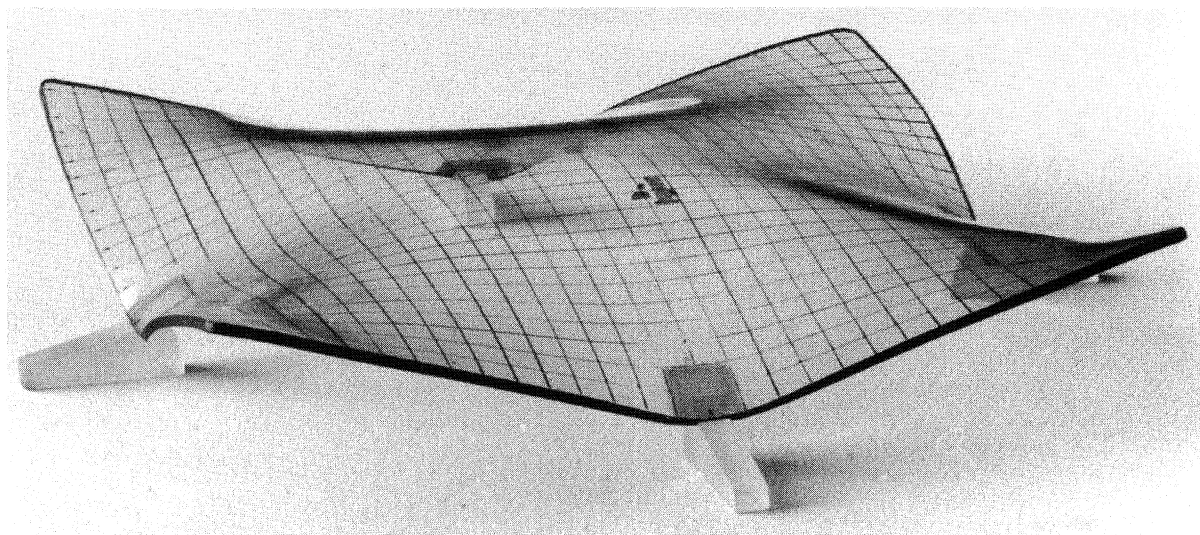


Fig. 6.—Modelo N.º 4. Vista aérea.

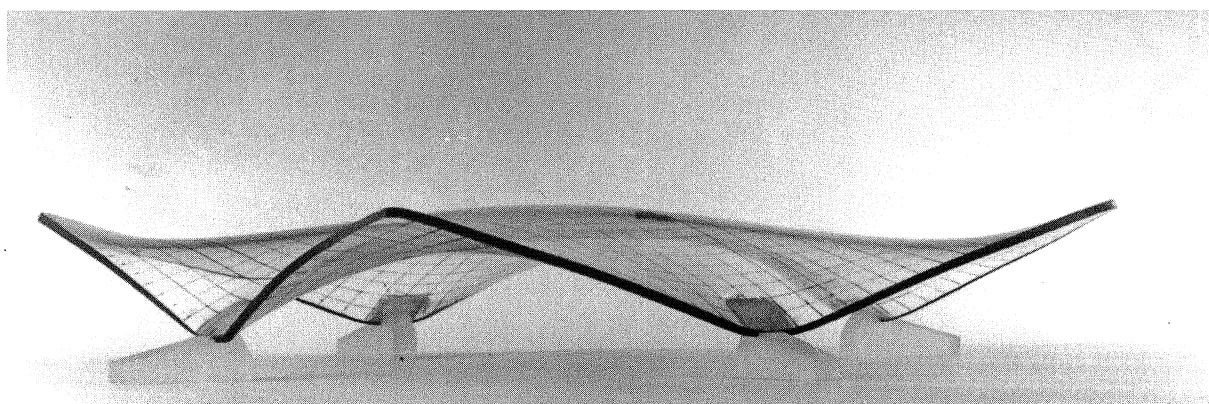


Fig. 7.—Modelo N.º 4. Vista a nivel del suelo.

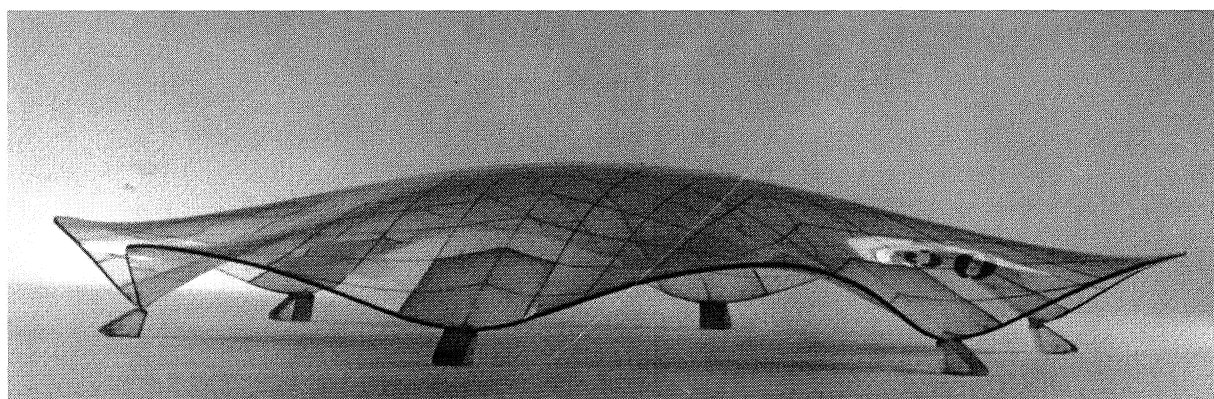


Fig. 8.—Modelo N.º 30. Vista a nivel del suelo.

Nota aclaratoria sobre las fotografías: para la mejor visualización del material transparente de los modelos, se trazó una retícula de líneas rectas sobre las placas, antes de ser introducidas al horno.

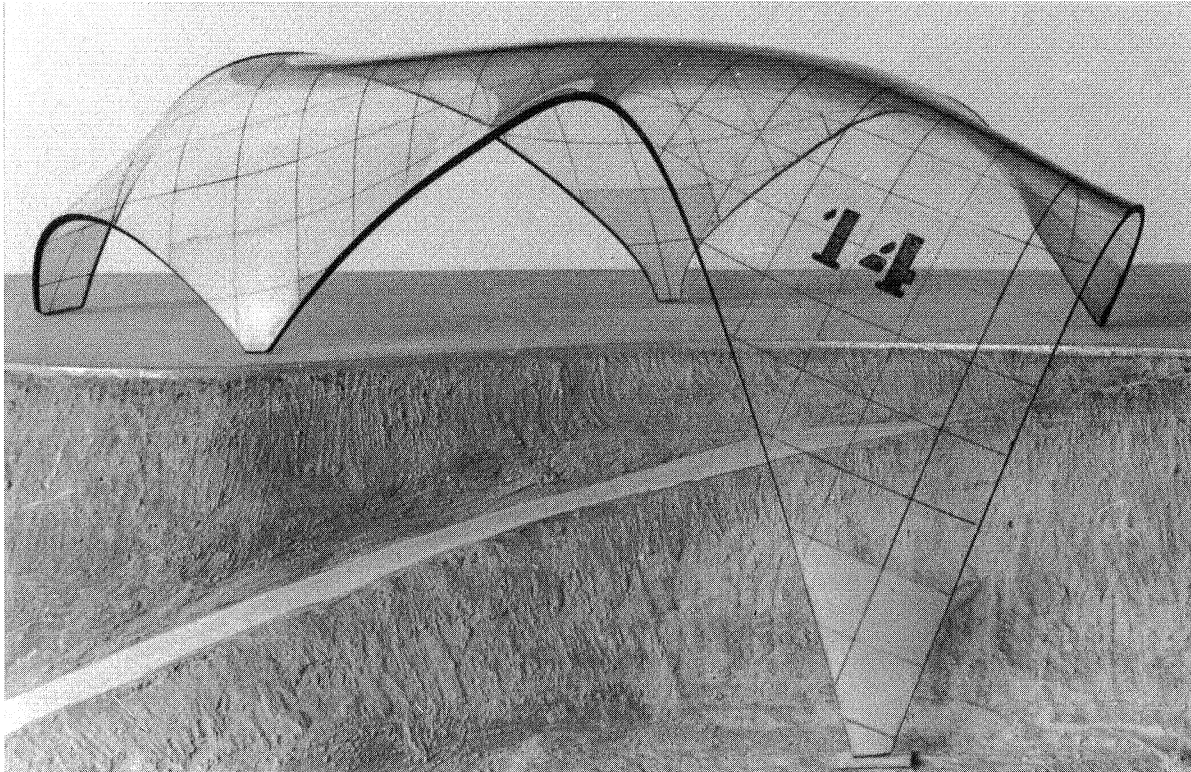


Fig. 9.—Modelo N.º 14.

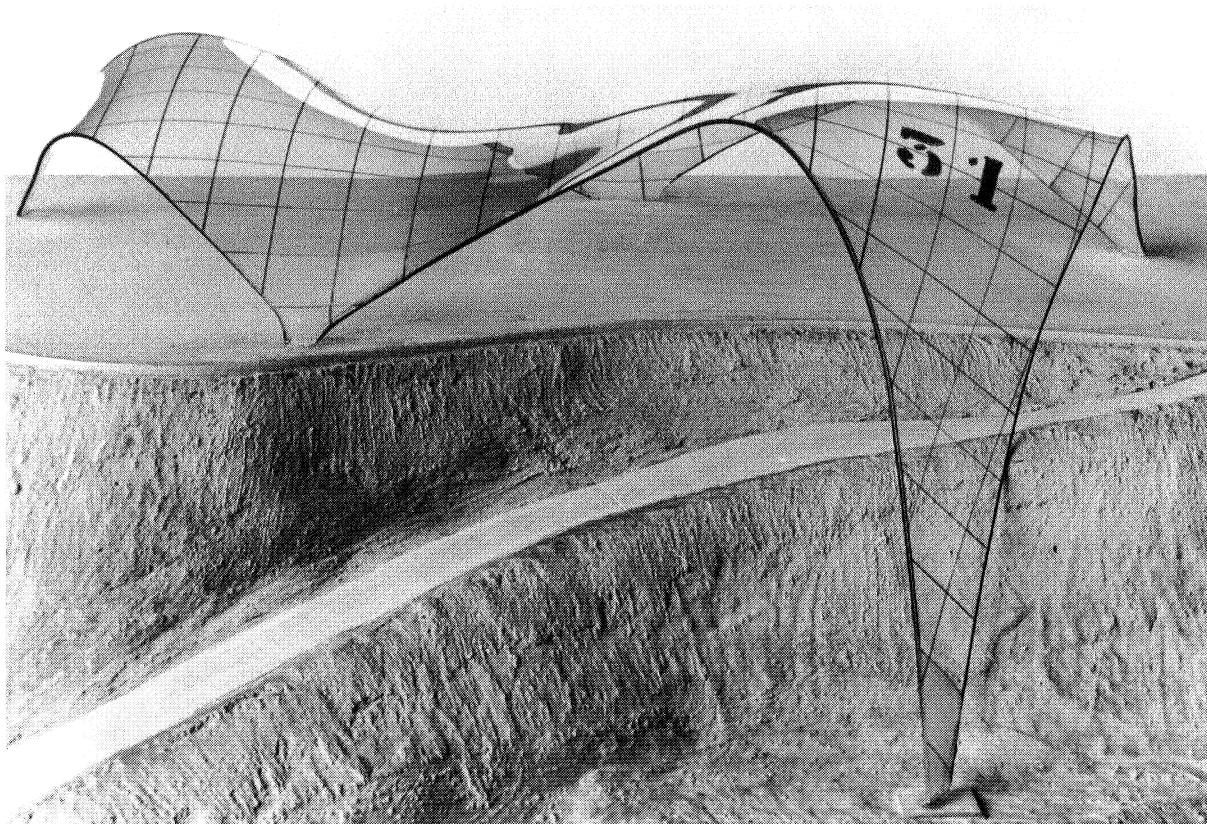


Fig. 10.—Modelo N.º 31.

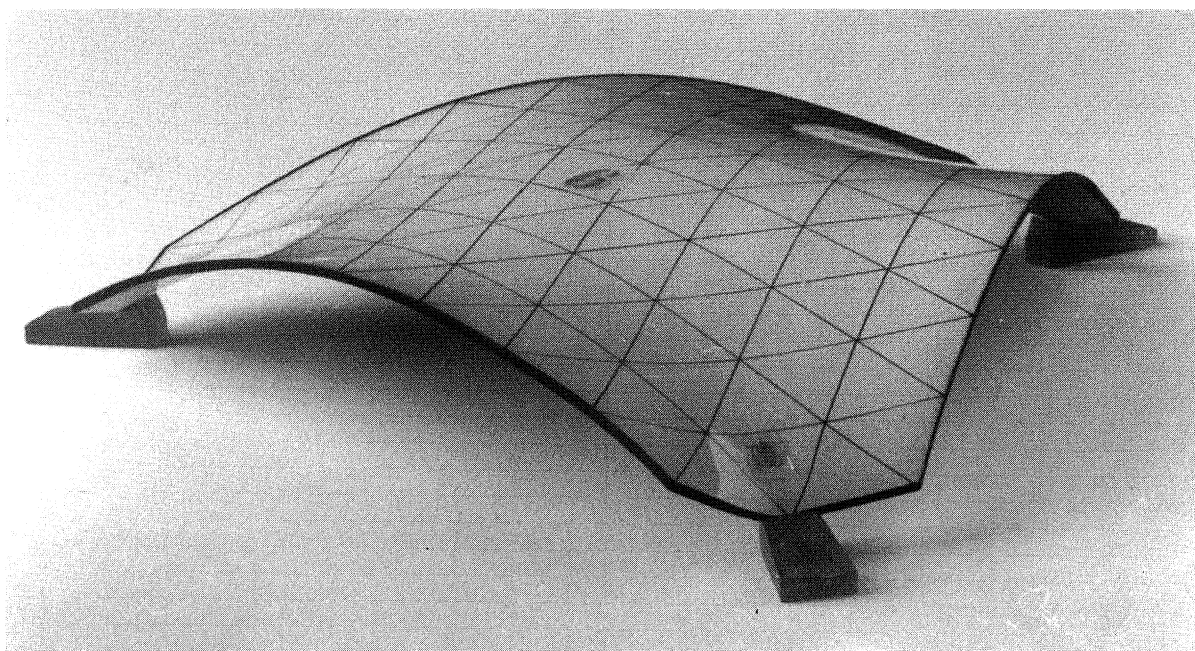


Fig. 11.—Modelo N.º 6.

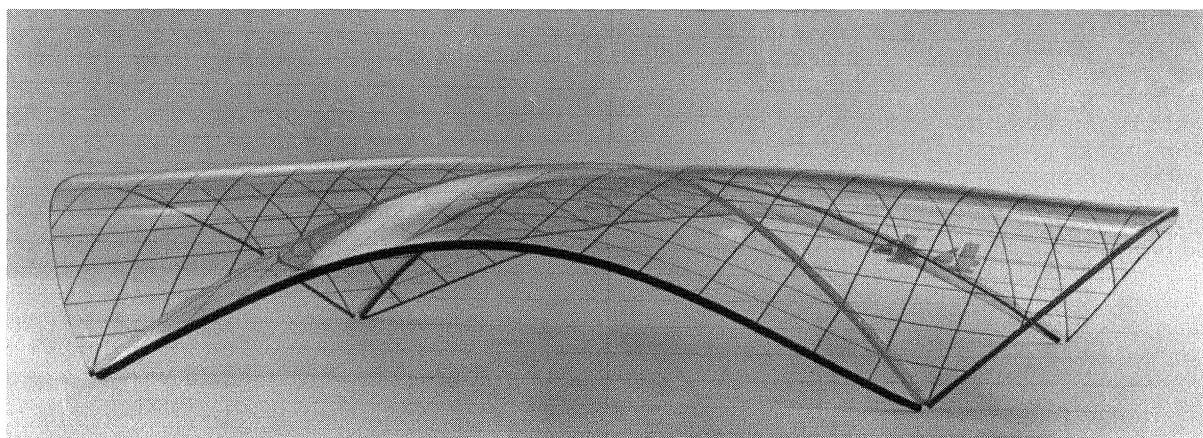


Fig. 12.—Modelo N.º 44.

Como resultado de las experiencias realizadas pueden señalarse las siguientes conclusiones:

- 1°. La construcción de los modelos resulta una tarea sencilla, rápida y de costo muy reducido; solamente los vínculos y uniones requieren cuidados especiales.
- 2°. Las superficies muestran un acabado de textura por demás lisa, de tal modo que la precisión de sus coordenadas geométricas está limitada solamente por la precisión de los aparatos de medida.

- 3°. La mayoría de los modelos presentan zonas con curvatura sinclástica y anticlástica, sin observarse quiebres de continuidad en los cambios de curvatura.
- 4°. Una vez ubicados sobre sus apoyos, los modelos impresionan por su elevada rigidez, con relación a las placas originalmente planas. Desde el punto de vista didáctico, esta experiencia es altamente ilustrativa y conducente a la reflexión para el alumno.
- 5°. Tanto los análisis geométricos como los estructurales arrojan resultados muy satisfactorios. Así por ejemplo, en el caso del modelo N° 2, su geometría da buena coincidencia con el modelo de Korda (16) y su plexo tensional, obtenido por elementos finitos, acusa marcado régimen membranal.
- 6°. Desde el punto de vista estético, los modelos homeostáticos (igual que los modelos funiculares) impresionan como objetos bellos; ellos son, en efecto, el resultado de fenómenos naturales y poseen como tales "*la belleza de las formas mecánicas*" (Gaudí,⁽⁷⁾ p.15).
- 7°. Un campo singularmente apto para la aplicación de la HMT es el de las estructuras de *forma libre*. En este caso, el proyectista puede accionar con entera libertad sobre las diversas variables: forma del perímetro en planta, tipos de vínculos, posición y dirección de los vínculos (tanto en planta como en elevación), etc., sin violar los principios del equilibrio. Para ilustrar estas posibilidades se construyeron los modelos N° 14, 24, 31 y 32 siguiendo el estilo del conocido modelo del club Táchira, estudiado por Torroja⁽¹⁹⁾ (Fig.5, 9 y 10). (Mayores detalles pueden verse en (14)).

8°. Si bien la HMT se concibió como técnica para el *diseño* de formas mediante modelos, podrían usarse esos mismos modelos para el *análisis* estructural aplicando las bien conocidas técnicas de análisis experimental de tensiones.

En síntesis: se concluye que la HMT es una técnica de diseño de superficies estructurales que garantiza el cumplimiento de las leyes de equilibrio y al mismo tiempo concede amplia libertad al proyectista. Frente a otras técnicas experimentales, sus modelos presentan la ventaja de la permanencia en el tiempo de sus formas permitiendo una precisa determinación de sus coordenadas. Con relación a los modelos teóricos, vía computación, es interesante señalar que su aplicación no requiere conocimientos especializados y al mismo tiempo, que la construcción y manejo de los modelos homeostáticos (como todo modelo físico) es altamente estimulante de la creatividad del proyectista.

4-REFLEXION FINAL.

De la lectura de estas líneas podría surgir la impresión que existe una sobrestimación del valor de las técnicas de modelos con respecto a su aplicación a la concepción y génesis de formas estructurales. No es así, o por lo menos no lo es en opinión de los autores para quienes está claro que ninguna técnica de diseño, por perfecta que fuere, podrá considerarse como una herramienta completa e infalible para la consumación de un acto creativo; sin embargo la HMT, o cualquier otra técnica de modelos, puede constituirse en una valiosa ayuda para el proyectista, unas veces encauzando su imaginación en el marco de los ineludibles requerimientos del equilibrio y resistencia de los materiales, otras veces encendiendo la chispa creativa que provoca la apertura hacia nuevas sendas en el campo de la Construcción.

En cualquier caso, la trascendencia del acto creativo sólo podrá esperarse cuando en la mente del proyectista confluyan los conocimientos técnicos y la inspiración artística, capaces de alcanzar una visión sintetizadora y jerarquizada de los aspectos que hacen a la funcionalidad, estética, estructura y constructividad de la forma buscada. Para expresar cabalmente esta idea, arraigada convicción en los autores, nada mejor que la claridad conceptual y la elegancia formal de la autorizada palabra de Torroja (19): *"el nacimiento de un conjunto estructural, resultado de un proceso creador, fusión de técnica con arte, de ingenio con estudio, de imaginación con sensibilidad, escapa al puro dominio de la lógica para entrar en las secretas fronteras de la inspiración."*

ANEXO.

Citas que corroboran los conceptos del punto 2.2. :

- De Gaudí : Ref.3, p. 112. Ref.6, p.142,144.
- Sobre Gaudí : Ref.4, p.20. Ref.5, p.18,22,97. Ref.7, p.36,29,70. Ref.8, p.64,120.
- De Cardellach: Ref.15, p. 5,12,13,21,45,56,119.
- De Torroja : Ref.19, p. 13, 19, 22. Ref. 20, p. 30,33.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

A:

- 1 . BASSEGODA NONELL, J., La Construcción Tradicional en la Arquitectura de Gaudí, Informes de la Construcción, N° 408, Vol. 42, p. 9-14, Madrid, Jul. Ago. 1990.
- 2 . CASALS BALAGUE, A., GONZALEZ MORENO-NAVARRO, J.L., Gaudí y el Misterio de la Encarnación (Las Incógnitas de la Cripta de la Colonia Güell) Informes de la Construcción, N° 408, Vol.42, p.63-76, Madrid, Jul. Ago. 1990.
- 3 . CASANELLES, E., Nueva Visión de Gaudí, Ed. Polígrafa S.A., Barcelona, 1967.
- 4 . COLLINS, G.R., Antonio Gaudí, Ed. Bruguero, Barcelona, 1961.
- 5 . Jornadas Internacionales de Estudios Gaudinistas, Ed. Blume, Barcelona, 1970.
- 6 . MARTINELL Y BRUNET, C., Gaudí, su Vida, su Teoría, su Obra, Colegio de Arquitectos de Cataluña y Baleares, Barcelona, 1967.
- 7 . MARTINELL Y BRUNET, C., Conversaciones con Gaudí, Ed. Punto Fijo, Barcelona, 1969.
- 8 . PERUCHO, J., POMES L., Una Arquitectura de Anticipación, Ed. Polígrafa S.A., Barcelona, 1967.
- 9 . RUBIO, S., Cálculo Funicular del Hormigón Armado, Ed. Gili, Buenos Aires, 1952.
- 10 . TOMLOW, J., El Modelo, Institut fur leichte Flachentragwerke, Stuttgart 1989.

B:

11. ANDRES, O.A., Experimental Design of Shell Structures, Proc. IASS Symposium on Tension Structures and Space Frames, Tokyo and Kyoto, Oct. 1971, Architectural Institute of Japan Tokyo, Japan, 1972.
12. ANDRES, O.A., Modelos Homeostáticos para Diseño de Cubiertas Laminares, Memorias de las VIII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Asociación de Ingenieros Estructurales, Buenos Aires, 1988.
13. ANDRES, O.A., Homeostatic Models for Shell Roofs Design, Proc. IASS Congress, CEDEX Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, Vol.1, Madrid, 1989.
14. ANDRES, O.A., Experimental Design of Free Form Shell Roofs, Proc. IASS Symposium, Kuntsakademiets Forlag Arkitektskolen, Vol,II, p.69, Copenhagen, 1991.
15. CARDELLACH, F., Filosofía de las Estructuras Ed. Técnicos Asociados, Barcelona, 1970.
16. KORDA, J., Ribless Membrane Shells with Point Supports at the Corners, Proc. IASS Symposium on Shell Structures on Engineering Practice, Budapest Sep. 1965, Kultura B., Hungary.
17. NOVOZHILOV, V.V., Thin Shell Theory, Ed.Radok, Noordhoff Ltd, Groningen, The Netherlands, 1964.
18. ROYLES, R., SOFOLUWE, A., BAIG, M., CURRIE, A., Behaviour of underwater enclosures of optimum design, Strain, Jan. 1980, Journal of the British Society for Strain Measurement.
19. TORROJA, E., Razón y Ser de los Tipos Estructurales, I.E.T., 3a. Edición, Madrid, 1960.
20. TORROJA, E., Conferencia "Las Formas Laminares" publicada en "La Modernidad en la Obra de Eduardo Torroja", Colegio de Ingenieros de C.C. y P., Ed. Turner, Madrid, 1979.
