Informes de la Construcción Vol. 24, nº 236
Diciembre de 1971

# Hacia la "Forma Libre" en las estructuras laminares (*)

OSCAR A. ANDRES (**)

445 - 11

**sinopsis** **Se analiza la actual evolución de las estructuras laminares hacia la «forma libre». Se estudia la filosofía inspiradora de este movimiento, su contenido y factores que favorecen su desarrollo.**

**Se plantea la necesidad de elaborar nuevas técnicas de diseño. Se propone la inclusión de los principios de la Mecánica Estructural como una de las pautas ordenadoras del diseño, por encima de la Geometría. Se comenta brevemente la técnica de la retícula elástica.**

**«La forma estructural no nace sólo de la intuición; necesita del conocimiento de sus relaciones técnicas para descubrirla y diseñarla, pero también para comprenderla en su observación.» (Curt Siegel) (1).**

## 1. Introducción

En el campo de la creación arquitectónica, más específicamente en el de las estructuras laminares, las «formas libres» han concitado por igual el interés de arquitectos e ingenieros durante estos últimos años. No obstante la difusión que ha alcanzado en la actualidad la expresión «Forma Libre» («Free Form» para los ingleses, «Frei Form» para los alemanes) estimamos conveniente, en mérito a la claridad, precisar su significado.

Entendemos por «forma libre» una forma resistente que no responde a una ley geométrica elemental o, dicho en otros términos, que no es fácilmente expresable mediante una ley matemática. Una esfera, un elipsoide o un paraboloide no son formas libres, en principio, porque fácilmente pueden expresarse mediante una función

$$z = f(x, y) .$$

¿Es entonces la forma libre una forma arbitraria o caprichosa? No. Podrá serlo, quizás en Escultura, pero no puede serlo en Arquitectura. Una forma concebida en la mente del proyectista y diseñada ya sea en el plano de un tablero o en las tres dimensiones de un modelo, para entrar en el campo de la Arquitectura tiene que superar, al menos, cuatro exámenes: debe ser funcional, debe ser estética, debe ser constructible y debe, además, ser apta para resistir la acción de las fuerzas de la Naturaleza (gravedad, viento, sismo, etc.). La calificación de los tres primeros exámenes dependerá del criterio del examinador (proyectista, usuario o constructor); en la última prueba es la Naturaleza misma el examinador: el cumplimiento de sus leyes es entonces ineludible y, en consecuencia, el conocimiento y respeto de las mismas por parte del proyectista estará indefectiblemente ligado al proceso creador.

Siendo nuestro propósito estudiar la tendencia evolutiva hacia la forma libre observada especialmente durante el último decenio en el proyecto y construcción de estructuras laminares, analizaremos primero el pensamiento rector que preside este movimiento y luego las técnicas de diseño conducentes a la transformación de esas ideas en realidades concretas, es decir, en obras.

## 2. Filosofía inspiradora de la forma libre

Centraremos nuestra atención sobre la filosofía inspiradora de la forma libre con el objeto de señalar no sólo las causas determinantes de su origen, sino también los principios esenciales de su contenido.

En primer lugar encontramos una actitud de rechazo, de negación, casi diríamos de rebeldía contra los rígidos cánones de la Geometría; la terna de ejes **x y z** acompaña indefectiblemente a toda estructura convencional; su presencia, aunque inmaterial, se percibe tutelando permanentemente esas estructuras; el impulso creador, reacio a toda tutela, ávido siempre de transponer nuevas fronteras, rechaza esas ataduras y procura su liberación.

(*) Presentado en la Reunión Conjunta de las XIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural y IV Simposio Panamericano de Estructuras, Buenos Aires, octubre de 1970.

(**) Profesor titular del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.



© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Pero esta sola actitud nihilista, vacía de contenido, no basta para impulsar una filosofía creadora; simultáneamente encontramos una actitud positiva, de atracción, de búsqueda de la originalidad, entendiendo por tal «la vuelta al origen», es decir, el retorno a la esencia misma de la estructura en toda su pureza, desprovista del ropaje teorizante impuesto por las exigencias del análisis. Esta actitud se manifiesta en la revaloración de los principios de la Mecánica Estructural que, por encima de la Geometría, se incorporan al proceso del diseño en lugar de quedar relegados únicamente a la etapa del análisis. Desde luego que la incorporación de estos principios como pautas rectoras del diseño no significa la exclusión de las restantes: función, estética, construcción; la conjugación armónica y equilibrada de todas ellas es siempre exigencia de buen diseño.

Por otra parte, a las actitudes mencionadas se suma la existencia de dos hechos que contribuyen al desarrollo de los principios enunciados:

a) Avances en los procedimientos de verificación de estructuras; en efecto, los adelantos registrados especialmente durante la última década, en las técnicas de análisis tanto experimental como matemático, permiten atacar el estudio de cualquier estructura por complejo que sea su diseño.

b) Avances en la tecnología de la construcción (pretensado, hormigones livianos, nuevos materiales, etcétera) que posibilitan la ejecución de obras hasta hace un tiempo irrealizables.

Resulta obvio señalar que el contenido positivo de esta filosofía no es patrimonio exclusivo de nuestros días; en este aspecto no hay innovación sino tan sólo renovación; el sentimiento estructural, como guía inspiradora del diseño, ha estado asociado al constructor de todas las épocas en sus obras de trascendencia verdadera; los avances apuntados solamente han venido a favorecer las manifestaciones de esta filosofía que aprovecha plenamente las posibilidades de la tecnología moderna, pero que tiene, a la vez, claro conocimiento de las limitaciones de la misma.

## 3. Técnicas de diseño

La materialización de una filosofía en el campo de la construcción implica su transformación en obras y esto exige la creación y aplicación de ciertas y determinadas técnicas. En efecto, para pasar de la idea creadora a la obra construida se requieren:

a) técnicas de diseño;
b) técnicas de representación;
c) técnicas de análisis;
d) técnicas de construcción.

Aunque sólo nos ocuparemos de las primeras —las técnicas de diseño—, conviene tener presente que durante el proceso creativo una íntima y dinámica relación vincula las cuatro etapas: marchas y contramarchas se suceden en esa tarea introduciendo modificaciones y contemplando los correspondientes ajustes.

**Diseñar** una forma es ordenar la materia en el espacio; para que esta ordenación sea tal es necesario que responda a determinadas pautas. En el caso que estudiamos —las formas laminares— ya hemos dicho que las pautas consideradas son cuatro: función, estética, construcción y estructura. La operación diseño exige entonces un ataque en amplitud sobre los cuatro aspectos mencionados y luego una síntesis de los mismos; el resultado se expresará siguiendo las técnicas de representación (dibujo, modelo físico, función analítica, etc.) y luego será estudiado según las técnicas del análisis.

En este punto conviene observar que la Geometría no aparece entre las cuatro pautas definitorias del ordenamiento; sin embargo, es obvio reconocer que la Geometría puede ser pauta de ordenamiento —quizás la más simple, la más inmediata—, pero no es nunca una pauta **esencial** en el planteo del diseño de formas para la construcción.

Si revisamos los procesos, ya sean de gestación o de aplicación, de las diferentes técnicas conocidas de representación, análisis y construcción, se observa que, si bien en todos ellos interviene la mente humana, durante el desarrollo de los mismos siempre se exteriorizan actos y resultados a través de diversas etapas; a medida que la tecnología evoluciona, esas etapas suelen ser más numerosas y a menudo exigen la intervención de equipo e instrumental más complejo.

Esta observación excluye, en términos generales, a la técnica del diseño; la «operación diseño» se inicia inevitablemente en la mente del proyectista; en muchos casos se cumple íntegramente en ella y sólo aflora al exterior el resultado; sin embargo, esta circunstancia no quita la posibilidad de que esa operación sea ayudada por una técnica adecuadamente instrumentada.

Sobre la necesidad de disponer de técnicas de diseño son muy elocuentes las palabras del especialista suizo Heinz Isler:

> «Cuando empezamos a trabajar en el diseño de cáscaras nos dimos cuenta de un gran dilema: nuestros tableros de dibujo son planos, son placas lisas, mientras que las cáscaras son estructuras tridimensionales.
>
> Tenemos conciencia de que no podemos trabajar con nuestros viejos medios.
>
> Necesitamos nuevos medios de diseño» (2).

La cita tiene una antigüedad de casi un decenio; en ese lapso se observa un creciente interés por el problema, como lo atestigua la atención que, en los últimos Congresos de la IASS, han dedicado a este tema diferentes autores: F. Otto (3), J. Marsh (4), L. Zetlin (5), H. Isler (6, 7, 8), D. Bini (9), E. Traum (10), F. del Pozo (11), H. Rühle (12), S. Rutkin (13).

Heinz Isler ha desarrollado dos procedimientos de diseño que se fundan en principios de la Mecánica: En uno de ellos se obtiene la forma del modelo mediante la presión neumática ejercida sobre una membrana elástica cuyos bordes reproducen el perímetro, previamente definido de la estructura. En el segundo procedimiento se utiliza para definir la forma, en lugar de la presión neumática, el peso propio de una tela mojada y suspendida según las condiciones de vínculo admitidas para la estructura; la tela congelada e invertida constituye el modelo de una estructura de compresión.



© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

Particular interés ofrece la técnica introducida por el arquitecto Dante Bini, cuya innovación no se limita al campo del diseño, sino que cubre, además, el de la ejecución. Igual que Isler utiliza el principio de la presión neumática actuando sobre una membrana elástica, pero no sólo lo aplica para determinar la forma del modelo, sino también para conformar la propia estructura. En efecto, sintéticamente el proceso constructivo consiste en lo siguiente: una membrana flexible de neopreno se ancla en forma estanca al perímetro de la cimentación; sobre esta membrana (todavía a nivel de piso) se colocan las armaduras de acero y se vierte el hormigón; el conjunto se eleva luego inflando le membrana hasta adquirir la forma deseada.

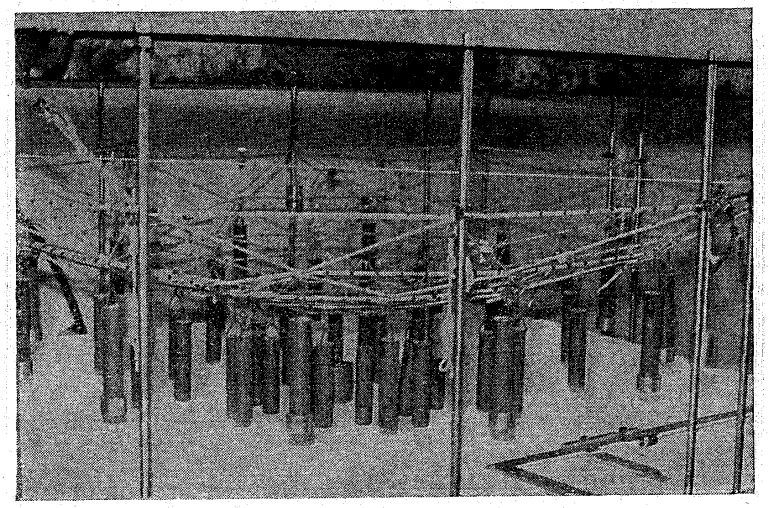
Por nuestra parte nos hemos ocupado también del problema del diseño elaborando una técnica que denominamos la RETICULA ELASTICA; los detalles de la misma han sido expuestos en otro trabajo (14) y, por tanto, sólo nos limitaremos aquí a un breve comentario.

Se inspira la técnica propuesta en la teoría del funicular que alcanzara tan fecundo y magistral desarrollo a través de la obra del arquitecto Antonio Gaudí; se trata simplemente de una extrapolación de principios bien conocidos en el campo de las estructuras planas, al campo de las estructuras espaciales.

último se trabaja sobre un modelo de forma definida y se le somete a un estudio en profundidad dentro del campo estructural exclusivamente, mientras que en la «retícula elástica» se trabaja sobre un modelo cuya forma se puede modificar rápida y fácilmente; para cada modificación se balancean ventajas e inconvenientes observados desde los puntos de vista correspondientes a cada una de las pautas del diseño.

Por otra parte, es fácil advertir que la construcción y estudio de los modelos de la «retícula elástica» demanda mucho menos tiempo y dinero que en los modelos convencionales.

La técnica de la «retícula elástica» reconoce, naturalmente, limitaciones; en nuestro propósito de aumentar la extensión del enfoque debimos aceptar simplificaciones, respetando, eso sí, una exigencia fundamental de la Mecánica: el equilibrio, mientras que otros aspectos (deformaciones, estabilidad elástica, resistencia, etc.) son postergados para la etapa del análisis. Básicamente se ha procurado obtener un instrumento capaz de brindar una respuesta rápida y directa en términos de fuerzas a las modificaciones que se introduzcan en la forma de la estructura, modificaciones que pueden tener su origen en cualquiera de las cuatro pautas del diseño. En resumen, se ha tratado de instrumentar el anunciado de Neal B.



Se trabaja con un modelo formado por una retícula de hilos de goma de características elásticas conocidas. (En la fotografía se muestra el modelo, invertido naturalmente, de una cúpula). La forma del modelo se obtiene por la acción de pesos aplicados en los nudos de la retícula, la que previamente se ha suspendido reproduciendo las condiciones de vínculo de la estructura; luego se miden las longitudes de los lados de los triángulos que forman la retícula y los alargamientos de los mismos; con estos valores es posible determinar aproximadamente el plexo tensional de la membrana continua, cuya forma, carga y condiciones de apoyo corresponden a la retícula discontinua del modelo.

Conviene señalar una diferencia importante entre esta técnica y el análisis convencional de modelos: en este

Mitchell: «... toda decisión de forma implica una decisión sobre las fuerzas» (15).

* * *

Una revisión de las técnicas de diseño nos muestra que en la situación actual existe, como ya se dijo, creciente interés por el problema y que las soluciones conducen en su mayoría hacia la forma libre; pero es necesario reconocer, además, la existencia de un marcado desequilibrio entre el notable grado de desarrollo alcanzado actualmente por las técnicas de análisis y los adelantos, todavía incipientes, en las técnicas de diseño; la necesidad de provocar y producir nuevos avances en este último campo es evidente. A modo de reflexión final, permítasenos ce-



© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es

rrar este comentario transcribiendo la autorizada opinión del arquitecto Félix Candela (16):

«Pienso que estamos en la fase final de un período en la historia en que todo el énfasis se ha puesto en los métodos analíticos. Con la invención de la matemática superior se hizo práctica común utilizarla para cualquier problema, a veces forzando el problema con el objeto de resolverlo matemáticamente, ignorando muchos otros medios capaces de resolverlo. En la construcción, las formas más convenientes no son a menudo fáciles para investigar desde un punto de vista rigurosamente matemático y ellas han sido muy descuidadas en favor de otras formas menos apropiadas pero que deleitan al matemático. Confío que esta era de obsesivo análisis está próxima a su fin, de modo que podamos empezar un nuevo período en el cual el diseño sintentizado de las cosas llegará a ser usual otra vez.»

## Referencias bibliográficas


(1) SIEGEL, C.: «Formas estructurales en la Arquitectura Moderna», CECSA, 1966.

(2) ISLER, H.: «Experimental Shell Design», Proceedings of the Symposium on Shell Research, Delft, 1961, North Holland Publishing Company, pp. 356-358.

(3) OTTO, F.: «Shells and Membranes», World Conference on Shell Structures, San Francisco, 1962, pp. 3-20.

(4) MARSH, J. H.: «Construction of Thin Shell Structures by the Lift-Shape Process», op. cit. refer. número 3, pp. 447-452.

(5) ZETLIN, L.: «Engineering Features of Free Form Concrete Thin Shell for Eastman Kodak Pavillion of 1964-1965, New York World's Fair», Large Span Shells, IASS Congress, Leningrad, 1966, Vol. 1, pp. 242-254.

(6) ISLER, H.: «Ideal and Non-Ideal Shell Shape», Memorias del Congreso Internacional sobre Aplicación de Estructuras Laminares en Arquitectura, IASS-IMCYC, México, 1967, Vol. II, pp. 791-800.

(7) ISLER, H.: «Recent Applications of Representative Shells», op. cit. refer. núm. 6, Vol. I, pp. 437-499.

(8) ISLER, H.: «Twelve Years of Application of Bubble Shells», op. cit. refer. núm. 6, Vol. I, pp. 125-159.

(9) BINI, D.; ISLER, H.; SALVADORI, M. G.: «The Binishell Technology», op. cit. refer. núm. 6, Vol. II, pp. 912-934.

(10) TRAUM, E. E.: «New Shells Forms Developed by Model Techniques», op. cit. refer. núm. 6, Vol. III, pp. 1127-1144.

(11) DEL POZO, F.: «Estudios Experimentales y Ensayos sobre Modelos», op. cit. refer. núm. 6, Vol. III, pp. 1351-1369.

(12) RUHLE, H.: «Experimental Studies and Model Tests», op. cit. refer. núm. 6, Vol. II, pp. 1681-1686.

(13) RUTKIN, S.: «New Freedom of Shape in New Shell Forms. Free Form Shells», op. cit. refer. núm. 6, Vol. II, pp. 601-644.

(14) ANDRES, O. A.: «Diseño Experimental de Estructuras Laminares», La Ingeniería, Pub. del Centro Argentino de Ingenieros, Buenos Aires, núm. 1006, diciembre 1969, pp. 29-38.

(15) MITCHELL, N. B.: «Conferencias», Facultad de Arquitectura, Universidad del Zulia, Maracaibo, 1964.

(16) FABER, C.: «Candela: The Shell Builder», Reinhold P. C., 1963, p. 222.



## résumé

### Vers la «forme libre» des voiles minces

**Oscar A. Andrés**

**L'auteur analyse l'évolution actuelle des voiles minces vers la «forme libre». Il étudie la philosophie sur laquelle s'est inspirée cette tendance, ainsi que son contenu et les facteurs qui favorisent son développement.**

**Il évoque la nécessité d'élaborer de nouvelles techniques de conception et propose l'inclusion des principes de la mécanique structurale comme l'une des directives de la conception, au-dessus de la géométrie. Finalement, il commente brièvement la technique de la réticule élastique.**

## summary

### Towards «free form» thin shell structures

**Oscar A. Andrés**

**This paper discusses the evolution of thin shell structures towards a «free form». A study is made of the philosophy underlying this movement, its contents and the factors favouring its development.**

**The need to develop new design techniques is brought up. The proposal is made to include the principles of structural mechanics as one of the factors to systematise free form design, with priority over geometry. A brief comment is made on elastic reticules.**

## zusammenfassung

### Auf dem Weg zur «Freien Form» beim Flächentragwerk

**Oscar A. Andrés**

**Hier wird die derzeitige Entwicklung der Flächentragwerke hin zur «freien Form» analysiert; die Philosophie, die dieser Tendenz zugrundeliegt, ihr Inhalt sowie die begünstigenden Faktoren werden untersucht.**

**Es stellt sich die Notwendigkeit, neue Entwurfstechniken auszuarbeiten. Der Autor macht den Vorschlag, die Prinzipien der strukturellen Mechanik als eine der Richtlinien des Entwurfs noch vor der Geometrie aufzunehmen. Er gibt einen kurzen Kommentar zur Technik des elastischen Netzes.**




© Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es