

GENERACIÓN DE FORMAS DE ESTRUCTURAS LAMINARES EMPLEANDO MODELOS FÍSICOS Y NUMÉRICOS

Dra. Ing. Patricia Bellés, Dr. Ing. Néstor Ortega, Dra. Ing. Marta Rosales,
Ing. Oscar Andrés.

Dto. Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina⁽¹⁾.

RESUMEN. Este trabajo trata sobre la generación de formas de láminas estructurales dentro del campo del Diseño Conceptual. Se presentan y discuten tanto modelos físicos como simulaciones computacionales. Estas técnicas de diseño utilizan el principio biológico de la homeostasis que establece que cuando un agente externo ataca a la estructura, ella se defiende inteligentemente para recobrar su capacidad portante. Aquí se emplea calor como agente para causar la degradación del material del modelo adoptando el mismo una forma estructural más apropiada para continuar resistiendo cargas. El experimento físico se realizó introduciendo una placa de polimetilmetacrilato (PMMA) en un horno con cargas y condiciones de borde definidas previamente. La simulación virtual fue realizada usando un software de elementos finitos donde se incluyó un modelo material termo-elasto-plástico para representar el comportamiento del PMMA. Se comparan las formas encontradas con ambos enfoques. Pese a la diversidad de las metodologías y las incertidumbres en la caracterización del material, la concordancia es aceptable. La simulación numérica puede constituirse en un complemento económico de la morfogénesis de láminas llamada Técnica del Modelo Homeostático. Además la forma obtenida es utilizada como geometría de una lámina estructural para el análisis de tensiones experimentales y computacionales, observándose un comportamiento cuasimembranal.

ABSTRACT. *This paper deals with the shape generation of structural shells within the field of Conceptual Design. Both physical models and computational simulations are presented and discussed. The design was based on the biological principle of homeostasis which states that when an external agent attacks the structure, the latter defends itself intelligently to recover its bearing capacity. Heat is the external agent used to cause the model material degradation. Thus the model adopts a more appropriate structural shape in order to continue resisting loads. The physical experiment is carried out by introducing a Polymethyl Methacrylate (PMMA) plate in an oven with defined boundary conditions and load. The virtual simulation is performed using a finite element software. A thermal elasto-plastic material model is included to model the PMMA behavior. Comparison between the shapes found with both approaches is presented. Notwithstanding the diversity of the methods and uncertainties in the material characterization the matching is more than acceptable. The numerical simulation may constitute an economical complement to shell form-finding with the Homeostatic Model Technique. Additionally, the obtained shape is employed as the geometry of a structural shell and both experimental and finite element stress analysis are performed. A quasi-membranal behavior is observed.*

⁽¹⁾ Otros datos y antecedentes de los autores se consignan al final del trabajo.

1. INTRODUCCIÓN

A través de la historia, los hombres han mejorado la resistencia de las estructuras de dos formas, incrementando la cantidad y calidad de los materiales y/o a través de la concepción y desarrollo de nuevas tipologías y formas estructurales. Este trabajo se encuentra dentro del último enfoque. Más precisamente el trabajo que aquí se presenta está orientado al estudio de una técnica de diseño, i.e. concebir y generar nuevas formas laminares resistentes. El objetivo ideal de todo diseñador de estructuras superficiales fue muy bien resumido por A.M. Haas, quien escribió “Para obtener la mayor eficiencia estructural, el diseñador debe seleccionar una forma que, bajo las condiciones del proyecto, se aproxime al estado membranar de tensiones tanto como sea posible y en consecuencia, reducir la flexión o tensiones secundarias a un mínimo”¹. Hoy en día, el diseñador dispone de nuevas herramientas y tecnologías que le permiten no sólo elegir sino también concebir y generar diversas formas estructurales con las mismas metas propuestas por Haas.

Varios diseñadores se han destacado en la *generación de formas* de láminas de hormigón. En inglés, esta rama del diseño es conocida como *form-finding* y hoy en día también como *morphogenesis*. Eduardo Torroja, Félix Candela, Eladio Dieste, Heinz Isler han diseñado y realizado muchas construcciones utilizando esta filosofía. Muchos de ellos emplearon formas cuya resistencia estaba dada por la geometría, lo que facilita la construcción de las estructuras, aunque le impone ciertos condicionamientos al diseñador. Las geometrías de forma libre permiten relajar esas restricciones. El diseñador suizo Heinz Isler construyó más de mil quinientas láminas de hormigón armado empleando este concepto. En este tipo de estructuras la geometría resultante no deriva de una ecuación matemática preestablecida, e.g. como en el caso de un paraboloide hiperbólico. Establecer la geometría es generalmente una cuestión delicada si la forma final debe tener en cuenta los principios mecánico-estructurales relativos al comportamiento adecuado, i.e. cercano al estado membranar.

Teniendo en mente este objetivo, es interesante empezar por estudiar las formas más simples como los cables, que trabajan muy eficientemente bajo fuerzas de tracción puras dado que, debido a su nula rigidez flexional, adoptan la geometría del funicular de las cargas. En el caso de arcos la forma es luego invertida y manteniendo el mismo estado de cargas, de esta manera la estructura será sometida sólo a esfuerzos internos de compresión. Esto da lugar al *modelo funicular*, en el cual el eje geométrico de la estructura adopta la forma del funicular de las cargas. Su determinación puede ser realizada a través de planteos teóricos, analíticos, gráficos o a través de ensayos experimentales con modelos físicos. Debe notarse que las bases teóricas del cálculo de la catenaria y la línea de presiones fueron introducidas por F.J. Gerstner alrededor de 1830 y completadas por H. Moseley (1801-1892)². Antes, el concepto de la catenaria en el campo de la generación de formas estructurales había sido usado por Giovanni Poleni en la verificación de la basílica de San Pedro (Roma, 1748).

Una extensión natural de este principio a un espacio tridimensional, originalmente desarrollada para estructuras planas reticuladas, fue exitosamente resuelto por el

brillante arquitecto catalán Antonio Gaudí (1852-1926) a través de un modelo de hilos que forma múltiples estructuras planas. El análisis de estas estructuras hubiera sido casi imposible con los métodos en uso en esa época. Sin embargo, en los modelos de hilos fue simple observar la interacción entre la forma del modelo y las fuerzas a las que estaba sujeta cada estructura plana componente³. Gaudí diseñó la geometría de muchas de sus construcciones, que luego fueron construidas en mampostería y piedra, utilizando este *modelo estereo-funicular*. Esta técnica le permitió, a través de un proceso de prueba y error, corregir la forma de la estructura ya sea por razones estéticas o funcionales, sin dejar de lado su equilibrio. Los trabajos que mejor muestran la potencialidad de esta técnica son el Parque Güel y la Catedral de la Sagrada Familia en Barcelona, España.

Esta técnica funicular puede extenderse a superficies continuas, empleando una membrana en lugar de hilos. H. Isler, uno de los diseñadores de láminas más prominentes, desarrolló una herramienta ingeniosa para diseñar sus trabajos, haciendo sus modelos con una tela cuyo perímetro era aproximadamente igual a la planta a cubrir. Luego de mojar y colgar la tela, esta se deformaba principalmente por el peso del agua, adquiriendo una forma con estado de tracción dominante. Finalmente, la tela era puesta en un ambiente con temperaturas bajo cero para congelar su forma⁴.

Relacionada con la generación de superficies continuas, la *Técnica de los Modelos Homeostáticos* (HMT) es una extensión de la herramienta funicular de Gaudí. La HMT fue introducida por O. Andrés⁵ y está inspirada en el fenómeno de *homeostasis*, i.e. una concepción orgánico-vital de las estructuras. De acuerdo con ese principio, establecido por el fisiólogo norteamericano W. Cannon, todos los organismos que sufren un ataque a sus funciones vitales reacciona inteligentemente buscando el equilibrio de tales funciones⁶. El objetivo de la HMT es el diseño conceptual de estructuras superficiales. Esta técnica consiste en la aplicación simultánea de cargas y temperaturas sobre una placa plana de un material termoplástico. Como consecuencia de la degradación de las propiedades mecánicas debido al calentamiento, el material sufre una deformación, adoptando una forma funicular que resulta ser un estado de tracción pura, para el caso de cargas de peso propio. Luego, el modelo deformado es enfriado y posteriormente dispuesto en una posición invertida dando lugar a una lámina *antifunicular* que está sujeta a tensiones de compresión (un estado cuasimembranal) bajo la acción del peso propio.

Andrés y coautores^{5, 7-11} han publicado varios artículos sobre HMT describiendo las ideas básicas y verificando su confiabilidad como una herramienta para el diseño de formas estructurales. Resultados similares sobre la generación de formas de láminas de hormigón, usando el método de elementos finitos con incrementos progresivos de cargas pueden encontrarse en la bibliografía de referencia^{12,13}.

El propósito del presente estudio es describir los experimentos físicos y las simulaciones virtuales *via* el método de los elementos finitos (MEF), empleados como herramientas para la generación de formas laminares basadas en la acción simultánea de calor y cargas sobre una placa termoplástica. Además, se comentan resultados de otros estudios realizado por los autores¹⁴, relativos al análisis experimental y numérico de las tensiones.

En todos los casos, para fijar ideas, se estudia una lámina de planta cuadrada apoyada en los cuatro vértices. Los autores han estudiado otros casos y muchas características interesantes que, tanto desde el punto de vista funcional como estético, surgen de esta técnica.

2. MODELO HOMEOSTÁTICO: MODELO FÍSICO.

En el laboratorio de Modelos Estructurales de la Universidad Nacional del Sur se han desarrollado extensos estudios experimentales en los cuales se han generado más de cien modelos físicos. Aquí se incluirá una breve descripción de la técnica. Para mayores detalles pueden consultarse la bibliografía¹⁵⁻¹⁷.

El modelo experimental es una placa cuadrada de Polimetilmetacrilato (PMMA) apoyada en sus cuatro vértices. Sus lados miden 0.36 m y su espesor es de 2.4 mm. Se aplica una carga distribuida a través de un paño de carga (Figura 1) que equivale a la carga de diseño estructural (carga dominante). El paño está construido de una lámina de poliuretano con pequeñas piezas metálicas adosadas. De esta manera la carga se distribuye uniformemente sobre la superficie sin ofrecer resistencia a la deformación. La placa se cuelga de los cuatro vértices a través de un sistema de cuatro poleas con contrapesos que equilibran el peso del modelo. Luego, se introduce la placa en un horno donde se la calienta uniformemente hasta alcanzar los 140°C aproximadamente y las deformaciones del modelo se estabilizan. Luego el calor se interrumpe y las temperaturas disminuyen hasta alcanzar la temperatura ambiente y en esta etapa, la rigidez original se recupera.

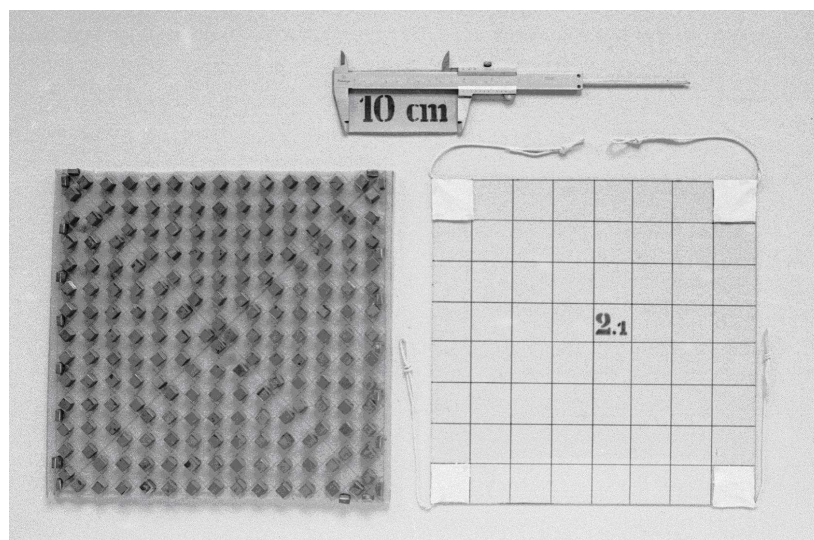


Figura 1. Fotografía del paño de carga.

En la Figura 2 se muestra un montaje típico dentro del horno (la foto corresponde a otro modelo estudiado de planta irregular). Utilizando HMT se han encontrado diversas formas con distintas condiciones de apoyo, resultando en varias formas atractivas satisfaciendo los principios mecánicos en una forma económica (Figuras 3 y 4).



a)



b)

Figura 2. Montaje típico de una placa de forma arbitraria. Comienzo (a) y final (b) del proceso de calentamiento.

Una vez que el modelo se saca del horno, se lo invierte logrando así la lámina estructural buscada. La geometría del modelo resultante puede recuperarse, e.g. con un dispositivo específico para medir coordenadas, como un brazo digitalizador 3D.

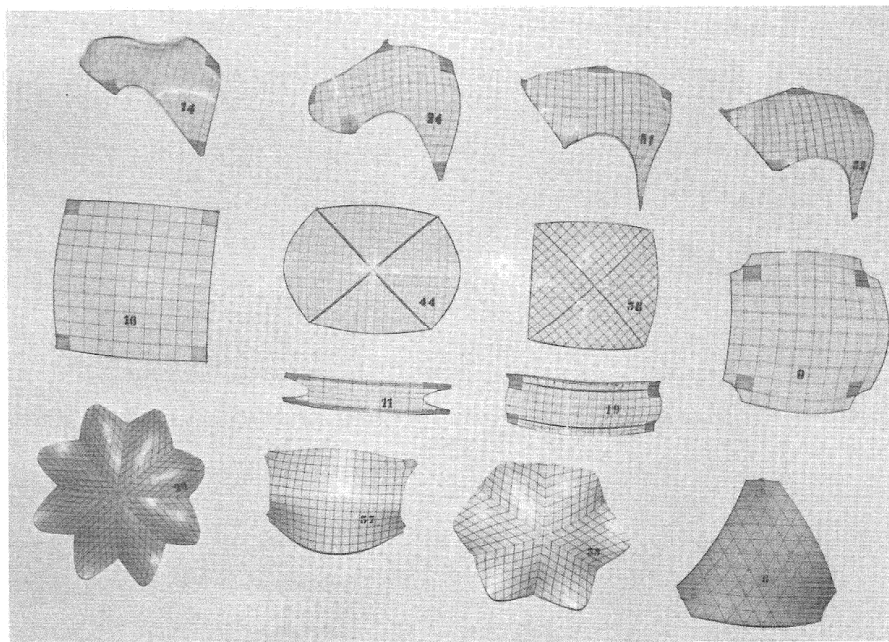


Figura 3. Modelos físicos resultantes de la aplicación de HMT. Vista en planta.

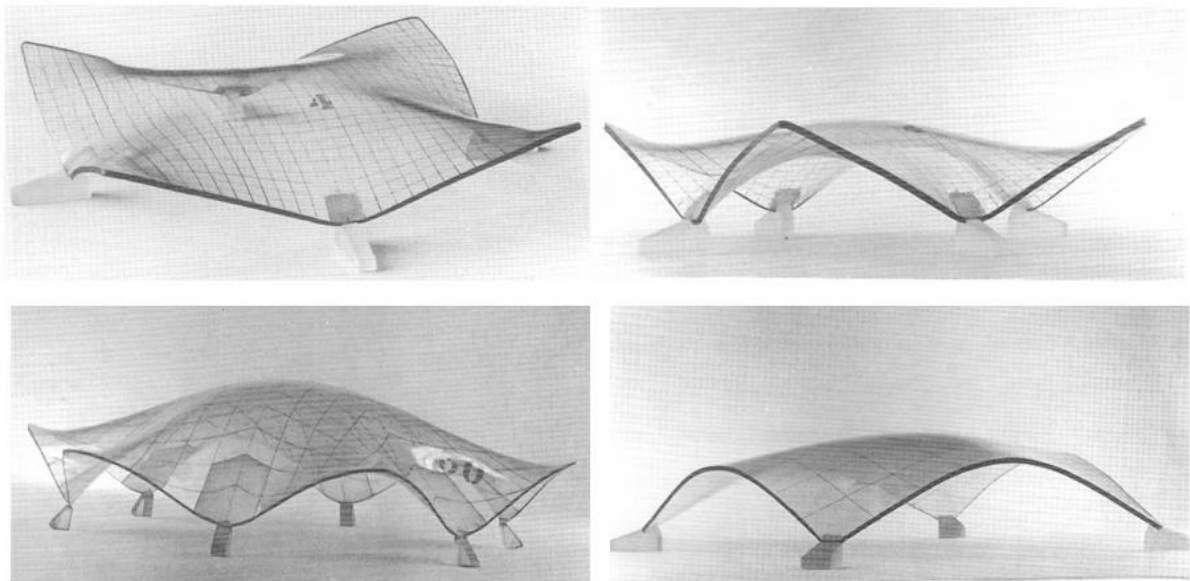


Figura 4. Modelos físicos resultantes de la aplicación de HMT. Vistas en perspectiva.

3. MODELO HOMEOSTÁTICO: MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

En esta Sección se describe la simulación de la HMT utilizando MEF. Se utiliza en particular la herramienta de simulación de eventos del procesador no lineal (Mechanical Event Simulation–MES) de ALGOR¹⁸. Los resultados de este análisis fueron parcialmente publicados en el trabajo de Rosales y Bellés¹⁹. El ensayo experimental se reproduce con un modelo de material termoplástico con las mismas condiciones de borde y cargas que el ensayo realizado en el horno. La geometría del modelo de elementos finitos es un prisma cuadrado con las mismas dimensiones que el modelo físico. A pesar de tratarse de una placa delgada, se realizó un modelo tridimensional con elementos “brick” con tres grados de libertad traslacionales, en cada uno de sus ocho nodos, ya que sólo utilizando este tipo de elemento es posible introducir un modelo material elastoplástico. La placa fue restringida en sus cuatro vértices con vínculos que sólo restringen los desplazamientos transversales. La carga distribuida es tomada en cuenta imponiendo una densidad ficticia de 7900 kg/m^3 que incluye el peso propio y la carga superficial.

3.1. Modelo del material

En el problema que estudiamos, la caracterización del material es, sin duda, el aspecto que más incertidumbres ofrece dada la falta de información sobre alguna de las propiedades de los materiales usados en el ensayo físico. Los valores característicos de los plásticos, en su mayor parte, son suministrados por los proveedores de materias primas. Aunque se han hecho grandes progresos en este sentido, al usuario, a menudo le resulta difícil obtener los datos necesarios en las publicaciones técnicas y de empresas. El conocimiento de las propiedades específicas de los plásticos no está tan difundido como en el caso de los metales²⁰.

La herramienta MES con el modelo material termo-elasto-plástico requiere de la

definición de los coeficientes de expansión térmica, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, la tensión de fluencia axial y el endurecimiento por deformación, todos en función de la temperatura. Este modelo es apropiado cuando las tensiones pueden superar a la de fluencia y el comportamiento del material es afectado por cambios de temperatura. Dentro de las aplicaciones típicas pueden mencionarse a los metales y materiales polímeros. Este modelo posee una curva bilineal y su comportamiento mecánico bajo carga monótona, se caracteriza por una respuesta inicial lineal seguida de una fluencia distribuida, flujo plástico a gran escala y una rigidización gradual por deformaciones hasta que se inicia la falla. Tiene un módulo elástico que describe la tasa de tensiones de 0 hasta la deformación de fluencia, luego usa un módulo de endurecimiento que describe linealmente la tasa de tensiones desde la fluencia hasta la deformación infinita. El programa requiere la definición de índices con los datos de temperatura en el rango de trabajo del modelo (ver Tabla 1).

A pesar de la continua investigación, el origen físico del endurecimiento por deformación no se comprende totalmente²¹. El PMMA comercial siempre contiene algún copolímero como el etil acrilato (EA) para facilitar su procesamiento. En la Figura 5a⁽²¹⁾ se muestra como el endurecimiento por deformación disminuye con la temperatura para cuatro tipos de PMMA, con distintos contenidos de EA.

En este trabajo se adoptó un valor promedio de las curvas. Otros valores característicos fueron obtenidos de la literatura^{9, 22, 23}: variación del módulo elástico con la temperatura (Figura 5b), coeficiente de Poisson (Figura 5c), y el coeficiente de expansión térmica (Figura 5d).

Tabla 1. Propiedades del PMMA en función de la temperatura.

Indice	Temp. (°C)	Módulo Elástico (N/m ²)	Coeficiente De Poisson	Coeficiente de expansión térmica (1/°C)	Tensión de fluencia (N/m ²)	Módulo de endurecimiento por deformación (N/m ²)
1	0	3.2 10 ⁹	0.300	6.00 10 ⁻⁵	6.40 10 ⁷	5.0 10 ⁷
2	20	3.0 10 ⁹	0.313	6.50 10 ⁻⁵	5.76 10 ⁷	4.0 10 ⁷
3	40	2.6 10 ⁹	0.325	6.70 10 ⁻⁵	4.48 10 ⁷	3.0 10 ⁷
4	60	1.9 10 ⁹	0.345	8.20 10 ⁻⁵	3.62 10 ⁷	2.0 10 ⁷
5	70	1.5 10 ⁹	0.358	8.40 10 ⁻⁵	3.18 10 ⁷	1.5 10 ⁷
6	80	1.3 10 ⁹	0.370	8.60 10 ⁻⁵	1.70 10 ⁷	1.0 10 ⁷
7	100	4.0 10 ⁸	0.420	1.40 10 ⁻⁴	2.00 10 ⁶	5.0 10 ⁶
8	120	4.0 10 ⁸	0.490	1.95 10 ⁻⁴	2.00 10 ⁶	0
9	140	4.0 10 ⁸	0.490	2.00 10 ⁻⁴	2.00 10 ⁶	0

3.2. Simulación del proceso de calentamiento y enfriamiento.

Como se dijo al describir el experimento físico, la placa se introduce en el horno y es calentada uniformemente hasta que la temperatura alcanza 140°C aproximadamente, luego se enfría y en esta etapa la rigidez original se recupera. En el modelo de elementos finitos el proceso de calentamiento y enfriamiento se modela a través de la curva de un multiplicador, como se muestra en la Figura 6. Este multiplicador afecta a la temperatura uniforme unitaria aplicada inicialmente sobre la placa. La acción de la temperatura es activada una vez que se estabiliza el efecto de la carga gravitatoria.

Los desplazamientos experimentados por la placa transversalmente al plano original se muestran en la Figura 7. La leyenda ubicada arriba a la derecha indica que el máximo valor alcanzado en el centro de la placa es de 32.2 mm.

La gráfica de la Figura 8 muestra la variación temporal de los desplazamientos en dos nodos de interés: el centro de la placa y un nodo ubicado en el centro de uno de los bordes. Puede observarse que los desplazamientos se estabilizan luego de los 12 segundos.

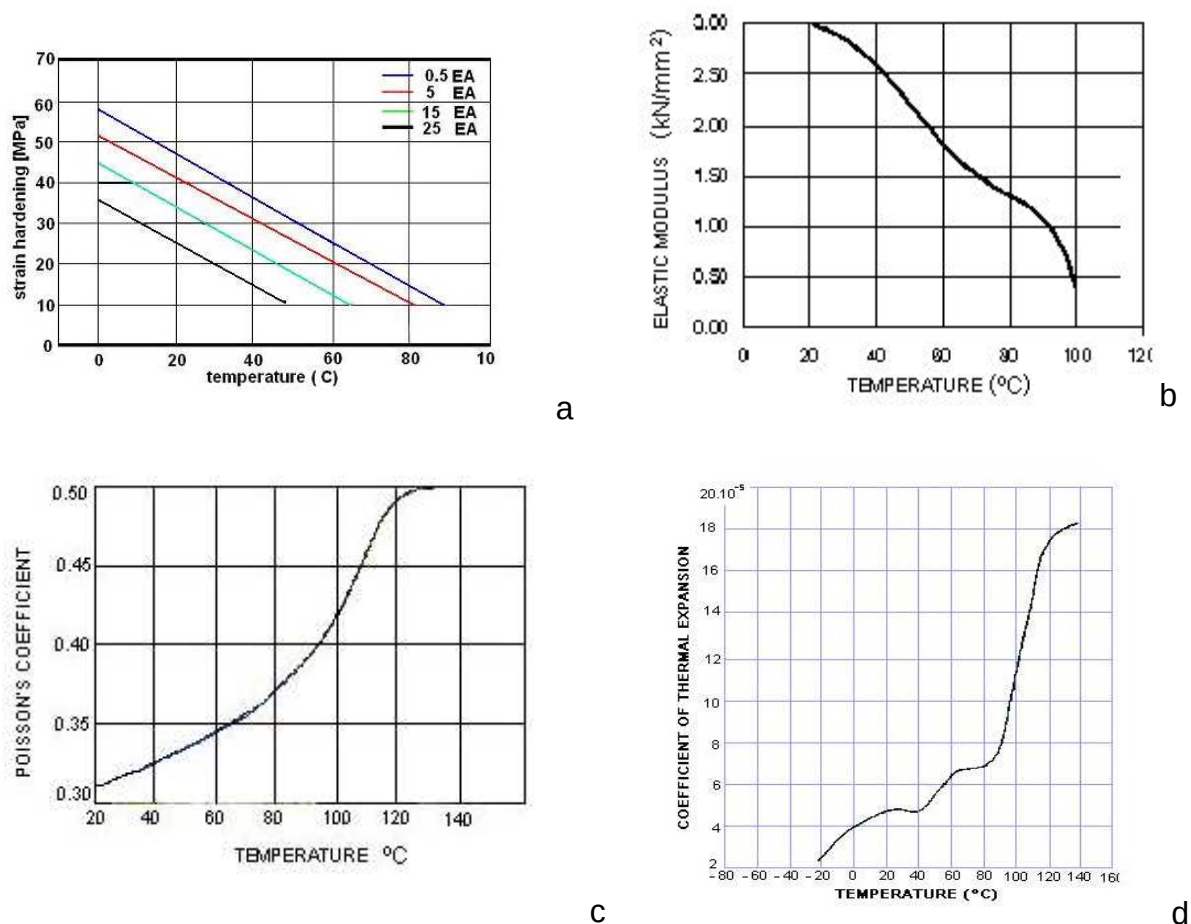


Figura 5. Variación de propiedades del PMMA con la temperatura. a) Endurecimiento por deformación para distintos contenidos de EA; b) Módulo de elasticidad; c) Coeficiente de Poisson; d) Coeficiente de expansión térmica.

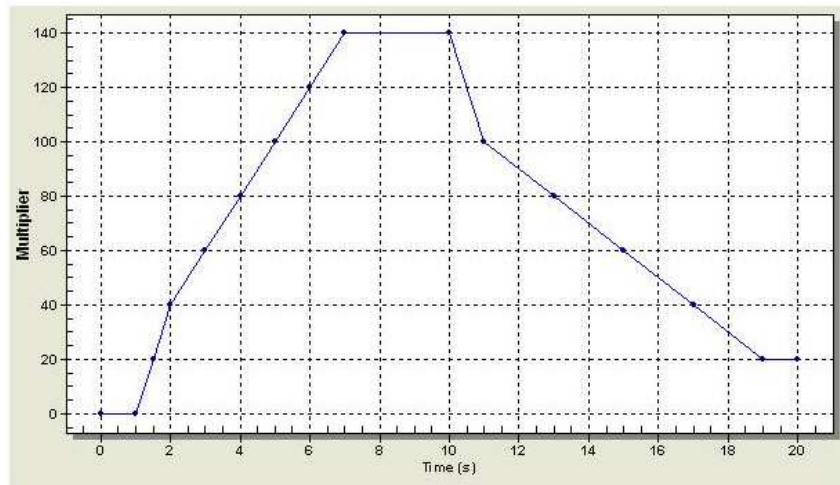


Figura 6. Variación de la temperatura en el proceso de calentamiento-enfriamiento (MES).

La Figura 9 muestra las curvas de deformación final obtenida con el modelo numérico, comparadas con las resultantes del experimento físico. El origen del sistema de referencia se ubica en el punto central de la placa con diez divisiones de cada lado. Puede observarse que ambos modelos se comportan similarmente. El acuerdo es mayor en los bordes con mayores discrepancias hacia el centro. Tales diferencias son debidas principalmente a la materialización de los apoyos en los modelos físicos y numéricos. También las incertidumbres en el modelo material contribuyen a aumentar las diferencias.

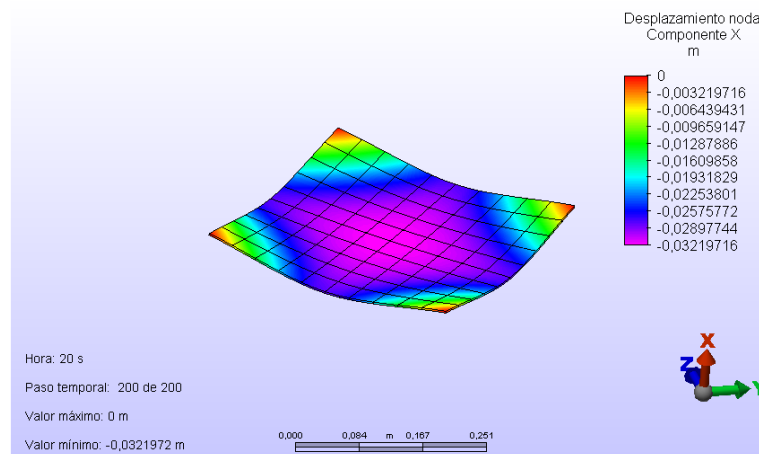


Figura 7. Diseño del modelo MEF de PMMA obtenido con HMT. Desplazamientos transversales.

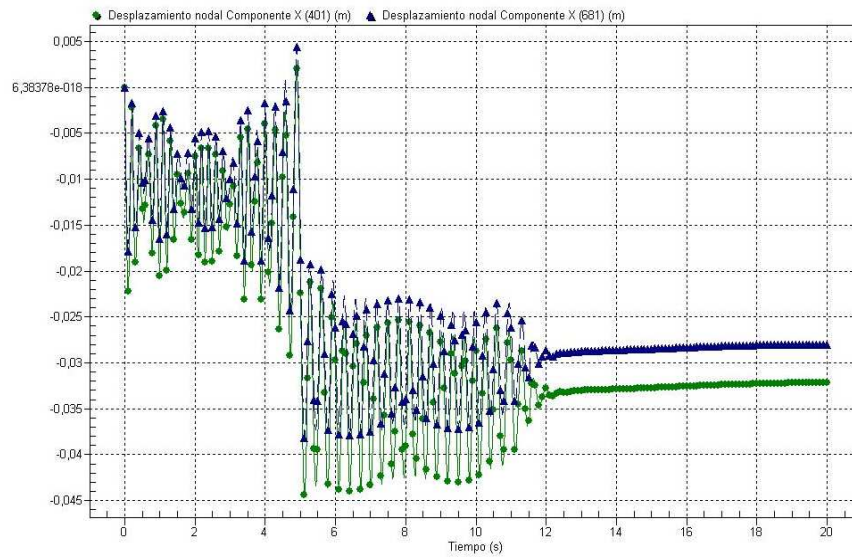


Figura 8. Idem Figura 7. Desplazamientos transversales en el centro de la placa (●) y en el centro de un borde (▲).

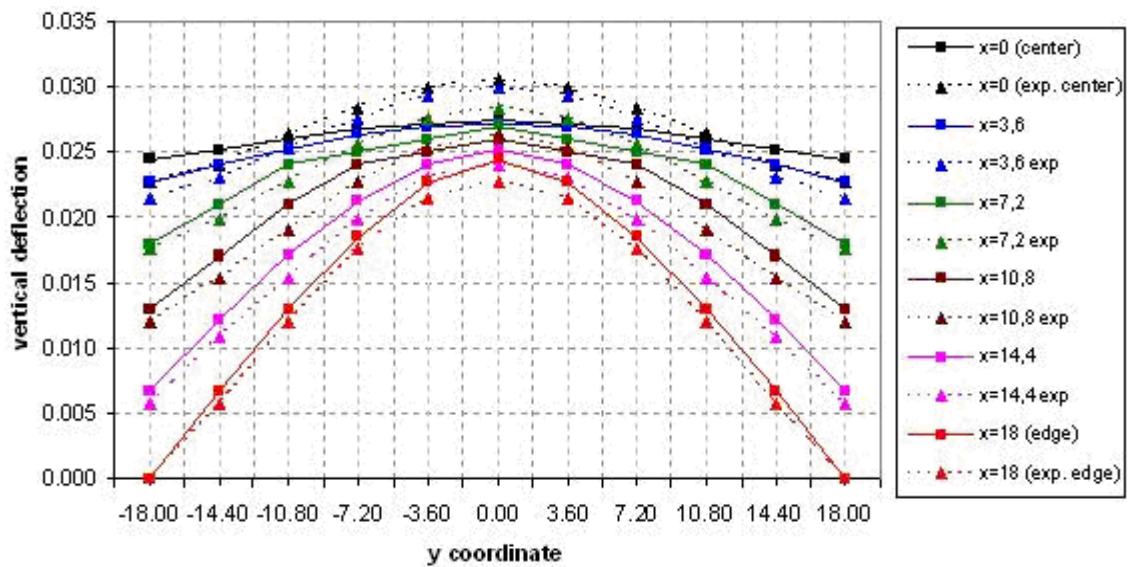


Figura 9. Idem Figura 7. Desplazamiento transversal a lo largo de varias líneas de la placa. Modelo físico (líneas punteadas) y modelo numérico (líneas continuas).

Para hacer una equivalencia con las cargas aplicadas en el ensayo físico a través del paño de carga, se ajustó la densidad del material asignándole un valor ficticio. Se estudió la influencia de la densidad del material en las deformaciones. En este problema se adoptó una densidad de 7900 kg/m^3 incluyendo cargas muertas y sobrecargas.

4. VERIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO.

Se describen brevemente los análisis de tensiones realizados en los modelos físicos y numéricos. Más detalles se incluyen en el trabajo de Bellés *et al.*¹⁴. Con el objeto de evaluar el comportamiento mecánico de los modelos generados con HMT y sujetos a cargas de diseño, se calcularon tensiones a través del análisis con el método de elementos finitos. Primero se capturó la geometría del modelo físico con un brazo digitalizador que permite obtener la geometría espacial de la lámina. Las coordenadas así obtenidas se compararon con las resultantes del modelo de Korda. El comportamiento de ambos modelos bajo cargas de peso propio y sobrecarga fue verificada. En la publicación de Andrés *et al.*¹⁰ muestra en detalle el estudio y concluye que la forma encontrada conduce a un estado de tensiones cuasimembranal. También se midieron tensiones en forma experimental, utilizando “strain gauges” para hallar las tensiones sobre las caras exteriores de la lámina²³.

Respecto al modelo diseñado con la simulación de eventos empleando elementos finitos, se realizó también el análisis de tensiones. Para ello se estudió una lámina estructural de hormigón con la forma antes generada, con las siguientes propiedades: densidad=2404.6 kg/m³, módulo de Young $E=2.0684 \cdot 10^{10}$ N/m², coeficiente de Poisson $\nu=0.15$. Como antes se utilizaron elementos “brick” en el modelo tridimensional. A través de una capacidad del programa, se capturó la geometría y luego fue re-escalada apropiadamente, asumiendo que debía cubrir una planta cuadrada de 20 m de lado resultando en un espesor de 0.143 m. Se restringió el modelo eliminando todos los grados de libertad en sus cuatro esquinas y se le aplicó peso propio. Del análisis estático se obtuvieron, entre otros valores, las tensiones máximas y mínimas principales (Figura 10). Los valores extremos son de 2.1 Mpa (tracción) para la máxima tensión principal y -8.78 MPa (compresión) para la tensión principal mínima. Ambos valores están dentro de los límites admisibles asumidos para el material (2.1 MPa para la tracción y 21 MPa para la compresión). Más resultados pueden verse en el trabajo mencionado anteriormente¹⁴.

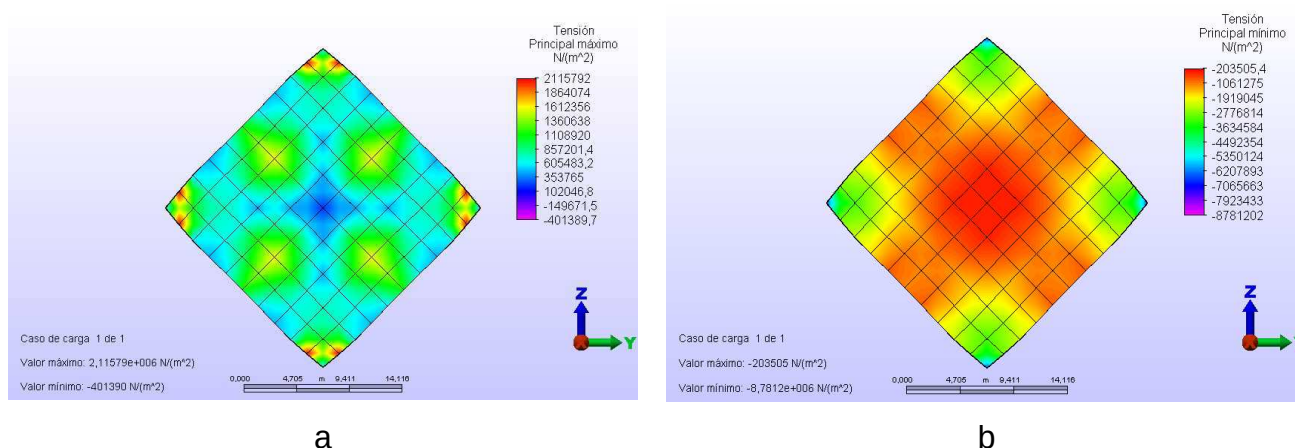


Figura 10. Modelo MEF de hormigón. Tensiones principales máximas (a) y tensiones principales mínimas (b).

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se abordó la generación de formas de láminas estructurales dentro del campo de Diseño Conceptual utilizando el principio de *homeostasis*. El mismo establece que cuando un agente externo ataca a la estructura, ésta se defiende inteligentemente para recobrar su capacidad portante. En este estudio se utiliza calor para causar la degradación del material. Así el modelo adopta una forma estructural más apropiada para continuar resistiendo cargas. Se describieron simulaciones físicas y virtuales y en ambos casos se emplearon modelos de PMMA (Polimetilmetacrilato). En el primer enfoque se introdujo una placa en un horno con restricciones en los bordes impuestas a través de poleas y contrapesos y sujeta a una acción prescrita de temperatura. La placa deformada, una vez enfriada, fue invertida generando así la geometría deseada. Un modelo numérico usando elementos finitos con condiciones análogas al ensayo físico, fue estudiado con el mismo propósito. El principal obstáculo en la construcción del modelo de elementos finitos estuvo en la caracterización del material termo-plástico en lo que se refiere a las propiedades constitutivas.

Puede concluirse que los ensayos de laboratorio fueron adecuadamente replicados. Además, el análisis de tensiones y deformaciones de una lámina de hormigón con la forma del antifunicular (brevemente comentados en este trabajo) permitieron verificar un comportamiento muy cercano al membranar, objetivo de todo diseñador de estructuras superficiales.

6. AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen a la SCyT de la Universidad Nacional del Sur, CIC (Buenos Aires), CONICET, todas instituciones de Argentina, por el apoyo financiero recibido para la realización de este estudio.

7. REFERENCIAS

- 1 Haas AM. Láminas de Hormigón. Spanish version of Thin Concrete Shells, Madrid: Instituto Eduardo Torroja. 1971; 24.
- 2 Timoshenko SP. History of Strength of Materials. Ed. McGraw-Hill Book Co., NY. 1953; 211-3.
- 3 Andrés OA, Ortega NF. An extension of Gaudi's funicular technique to the conception and generation of structural surfaces. IASS Bulletin 1994; 35:161-72.
- 4 Bechthold M. Sobre cáscaras y blobs. Superficies estructurales de la era digital. Arq (Santiago), 2006; 63: 30-5.
- 5 Andrés OA. Modelos homeostáticos para diseño de cubiertas laminares. Memorias de las VIII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Buenos Aires, 1988.
- 6 Encyclopedia of Science and Technology. McGraw-Hill, NY, USA. 1966; 6.

- 7 Andrés OA. Homeostatic Models for Shell Roofs Design. In: Proc. of 10 Years of Progress in Shell and Spatial Structures. IASS Congress, CEDEX Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, Madrid, 1989: 1.
- 8 Andrés OA, Ortega NF. Experimental Design of Free Form Shell Roofs. Proc. of IASS Symposium, Kunstaademiets Forlag Aritetsolen, Copenhagen, 1991; II: 69.
- 9 Andrés OA, Ortega NF. Extensión de la técnica funicular de Gaudí a la concepción y génesis de superficies estructurales. Informes de la Construcción 1993; 44:10-34.
- 10 Andrés OA, Ortega NF, Schiratti C. Comparison of two different models of a shell roof. In: Proc. of the ASCE Structures Congress XII – IASS International Symposium '94. Atlanta, Georgia; 1994.
- 11 Andrés OA, Ortega NF, Paloto JC. The homeostatic model as a total model. In: Proc. of the IASS Symposium on Lightweight Structures in Architecture, Engineering and Construction, Sydney; 1998, Vol. 2.
- 12 Fernández MC, Ruata ME, Moisset de Espanes D. Capacidad sismorresistente de estructuras laminares antifuniculares. Memorias de las VII Jornadas de Ingeniería Estructural, Rosario, 2002.
- 13 Moisset de Espanes D, Fernández MC, Ruata ME. Efectos del viento y seguridad al pandeo de estructuras laminares antifuniculares. Instituto de la Construcción y Gerencia, Lima. <http://www.construccion.org.pe/>
- 14 Bellés PM, Ortega NF; Rosales MB; Andrés OA. Shells form-finding: physical and numerical design tools. Enviada a Engineering Structures. Junio 2008. En revisión.
- 15 Ortega NF. Diseño y análisis de estructuras laminares mediante modelos físicos. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, Departamento de Ingeniería, Bahía Blanca, 1998.
- 16 Andrés OA, Ortega NF. Application of the homeostasis principle to expand Gaudi's funicular technique. Optimization Mechanics in Nature, International Series on Design and Nature; Editores: Collins M.W., Bryant J.A., Atherton M.A.; Witt Press; Southampton, UK; 2004, 79-92 Chapter 5.
- 17 Andrés OA, Ortega NF, Paloto JC. The homeostatic model as a tool for the design and analysis of shell structures. Nature and Design, International Series on

Design and Nature; Editors: Collins M.W., Bryant J.A., Atherton M.A.; Witt Press; Southampton, UK; 2005, 145-55 Chapter 8.

- 18 Algor Software. V.20.4, Pittsburg, 2007.
- 19 Rosales MB, Bellés PM. Virtual simulation of shape generation of homeostatic shell models. In: Mecánica Computacional, Proc. of the XV Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones ENIEF 2006. Santa Fe, Argentina; 2006. XXV. 549-60.
- 20 van Melick HGH, Govaert LE, Meijer HEH. On the origin of strain hardening in glassy polymers. Polymer 2003; 44:2493-502.
- 21 Kierkels JT, Leblanc T, Goossens JG, Govaert LE, Meijer HE. Influence of network density on the strain hardening of PMMA copolymers. Eindhoven Department of Technology, Department of Mechanical Engineering (internal poster). 2005.
- 22 Oberbach K. Plásticos. Valores característicos para el diseño de estructuras. Buenos Aires: América Lee, 1978.
- 23 Paloto JC, Ortega NF. Experimental analysis of acrylic models. Strain 1998; Vol. 34, 3: 95-8.

Antecedentes de los autores

Patricia M. Bellés.

Ingeniera Civil, Magíster y Dra. en Ingeniería (UNS, Argentina). Profesora Asociada de Ingeniería Civil en el Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. Investigadora Adjunta en la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la Prov. de Bs.As., Argentina. Desarrolla sus actividades docentes y de investigación en dinámica estructural y método de los elementos finitos.

Néstor F. Ortega.

Ingeniero Civil, Dr. en Ingeniería (UNS, Argentina). Profesor Asociado de Ingeniería Civil en el Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. Desarrolla sus actividades docentes y de investigación en patología de estructuras, diseño estructural y estructuras laminadas. Jefe del Laboratorio de Modelos Estructurales de la UNS.

Marta B. Rosales.

Ingeniera Civil. Master of Engineering Science (UWO, Canada) y un Doctorado en Ingeniería (UNS, Argentina). Profesora Titular en Ing. Civil, Mecánica e Industrial del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca,

Argentina. Investigadora Independiente en el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Argentina.

Desarrolla sus actividades docentes y de investigación en estática y dinámica estructural.

Oscar A. Andrés.

Ingeniero Civil. Profesor Consulto del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.

Desarrolla actividades de investigación en morfogénesis y enseñanza de la ingeniería. Ha sido Profesor Titular de diseño estructural y hormigón armado en Ingeniería Civil.