

FORMA ARQUITECTÓNICA Y ESTRUCTURA A TRAVÉS DE LA OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

NUEVOS MÉTODOS PARA ANTIGUOS PROBLEMAS

ARCHITECTURAL SHAPE AND STRUCTURE THROUGH TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OPTIMIZATION, NEW METHODS FOR OLD PROBLEMS

Mg. Arturo Lyon.

Arquitecto Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.

Master en Arquitectura AA, Escuela de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile.

alyon@uc.cl

Dr. Rodrigo García.

Arquitecto, Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile.

Doctor en Arquitectura Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Departamento de Diseño y Teoría de la Arquitectura,

Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

rgarcia@ubiobio.cl

Resumen

Nuevos métodos computacionales de optimización topológica permiten definir formas que alcanzan la máxima resistencia con el mínimo material, constituyendo una relación generadora del proyecto arquitectónico. Este artículo expone conceptos y técnicas de optimización estructural evolutiva, además de algunas experiencias en arquitectura contemporánea y experimentaciones universitarias realizadas en una investigación multidisciplinaria entre la PUC, UBB y UdeC. Revelando ejemplos significativos, como también algunas consideraciones de ejecución y expresión espacial, que sugieren posibilidades para la integración estructural en el diseño arquitectónico.

Abstract

New computational methods for topological optimization allow defining shapes with maximal resistance and minimum material, provoking a generative relationship for architectural design. This article exposes concepts and techniques for evolutionary structural optimization, with some experiences in contemporary architecture and university experiments carried out in a multidisciplinary research in PUC, UBB and UdeC. This work reveals expressive examples, as well as conditions for execution and spatial properties, such suggest integration of structure analysis in the architectural design.

Palabras clave: optimización topológica estructural, edificios en altura, mobiliario, losas prefabricadas.

Key words: structural topological optimization, medium-rise buildings, furniture, prefab slabs.

Recepción: 11 de abril de 2013.

Aceptación: 12 de julio 2013.

Introducción

La relación entre forma y estructura es una condición ineludible de un proyecto de arquitectura. Este artículo presenta nuevas exploraciones integradas entre forma y estructura a través de Optimización Topológica, para definir configuraciones que alcanzan la máxima resistencia con el mínimo material, constituyendo una relación generadora del proyecto arquitectónico. Las tecnologías contemporáneas de diseño, análisis y fabricación potencian procesos integrados entre arquitectos e ingenieros (Holzer y Downing, 2010), logrando que desde la fase inicial de un proyecto se vincule la generación de formas y la evaluación de comportamientos estructurales, estableciendo una nueva metodología proyectual interdisciplinaria.

La integración estructural en etapas tempranas del diseño arquitectónico permite asegurar una mayor eficacia resistente, pero también ampliar el campo de soluciones y posibilidades formales adecuadas, más allá de las tipologías estructurales convencionales. Esto requiere aplicar métodos de análisis en configuraciones inciertas y/o promover una exploración global de alternativas estructurales (Rappaport, 2010), que deben interactuar prontamente con revisiones espaciales y funcionales del diseño. A través de especialistas o plataformas de trabajo que incentiven y permitan resolver esta dinámica, pero también con actitudes colaborativas y creativas.

Obras paradigmáticas de arquitectos-ingenieros como Antonio Gaudí, Eduardo Torroja, Heinz Isler, Felix Candela y Frei Otto, son ejemplos de una integración entre forma y comportamiento estructural a partir de procesos innovadores combinaron integralmente la definición de la forma y su resistencia estructural, marcados por la utilización de modelos físicos y matemáticos para calcular relación óptima entre forma y resistencia. Como lo muestran las paradigmáticas cubiertas funiculares de Gaudí o las superficies mínimas definidas por películas de jabón de Otto.

Los métodos contemporáneos de diseño y análisis asistido por computador han promovido la definición de formas en función de sus capacidades. Uno de los principales referentes ha sido el Mutsuro Sasaki, utilizando métodos de análisis sensible y optimización estructural evolutiva extendida, que pueden ser entendidos como una continuación de los procesos de Gaudí y de Isler, interpretados a través de algoritmos que amplían sus posibilidades aplicación.

“El diseño de la forma que yo estoy defendiendo (...) implica la generación de formas estructurales racionales dentro de un computador, mediante el uso de principios de evolución y la auto-organización de los seres vivos desde el punto de vista de la ingeniería” (Sasaki, 2005).

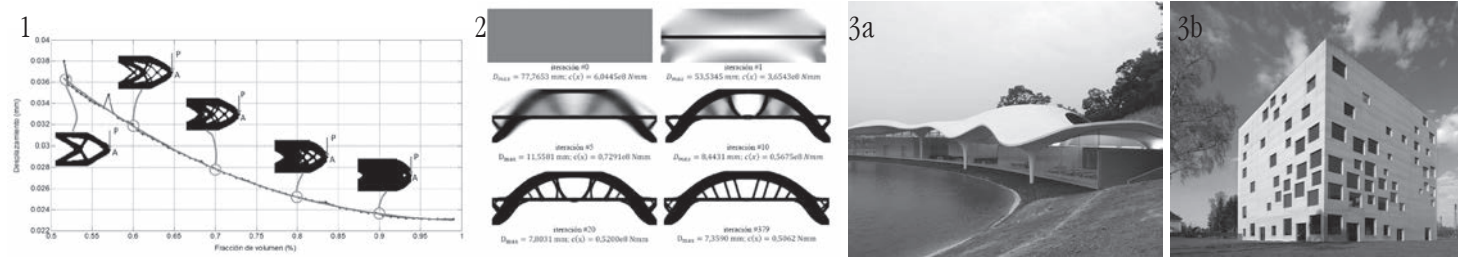


Imagen 1_Evolución de una forma con apoyo lateral y carga puntual en el extremo (fuente: Sanhueza, 2012).

Imagen 2_Evolución de un elemento longitudinal (fuente: Bendsøe y Kikuchi, 1988).

Imagen 3a y 3b_Museo Zollverein de SANAA y Crematorio Kakamigahara de Toyo Ito, (fuentes: <http://www.zollverein.de/#/angebote/sanaa-gebäude-events-mit-ein-und-ausblicken>, y bdonline.co.uk vistos el 27-07-2013).

Origen de la Optimización Topológica Estructural

La optimización estructural es la búsqueda de la condición resistente más efectiva para una situación constructiva, pero a diferencia de los métodos tradicionales de análisis estructural, la configuración formal no está totalmente definida, sino que es parte de los aspectos variables (Bendsøe y Sigmund, 2003). De modo que no se verifican capacidades de los elementos previamente definidos, sino que se generan distintas formas en que se comprueban comportamientos generales.

Se pueden considerar diferentes tipos de optimización estructural; de dimensiones, formas o topologías. En la optimización de dimensiones, se busca el tamaño adecuado de los elementos previamente definidos. Su aplicación más usual es en las estructuras reticuladas (enrejados), donde se definen las longitudes y conectividades, para luego optimizar la sección de las barras. En la optimización de formas se busca definir la mejor configuración de las medidas generales de un elemento, tales como los nodos de un reticulado o el contorno en una estructura continua. En cambio, en la optimización topológica, se busca definir una forma que representa la mejor distribución de material dentro de un volumen finito, de forma tal que maximice algún de desempeño (Imagen 1).

La optimización topológica estructural surgió como método teórico a principios del siglo pasado (con el trabajo de Mitchell, 1904), pero sólo en las últimas décadas se logró implementar en procesos computacionales (a partir de Bendsøe, M. P. y Kikuchi, N., 1988). Destacando el año 2001 el desarrollo de un algoritmo de sólo 99 líneas (Sigmund, 2001), que permitió popularizar su experimentación. Los primeros métodos de generación recursiva de la forma, denominados ESO (Evolutionary Structural Optimization), establecieron procedimientos de análisis por elemento finito y criterios de eliminación (usualmente por rigidez máxima o tensión de Von Mises), con una función objetivo de término. Luego se desarrolló un método BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization), que permite tanto eliminar, como agregar material, para mejorar la definición de la forma. También se han caracterizado los métodos con penalización de material isotrópico (homógeno) denominados-SIMP (Solid Isotropic Material Penalization), que es más estable y requiere menor cantidad de iteraciones. Se distinguen también otros métodos que permiten diferenciar las capacidades de la forma para materiales de desempeño variable (como el hormigón armado), que podrían estimular la aplicación de Biomateriales o Nanomateriales en elementos estructurales de edificación.

Técnica

La optimización estructural trabaja sobre un ámbito de condiciones geométricas (una superficie o espacio total, con un nivel de detalle), con requerimientos resistentes globales (cargas, apoyos y capacidades materiales). Efectuando cálculos sucesivos, con una validación automática de cada segmento, generando evolutivamente una configuración. De este modo analiza distintas posibilidades en una secuencia similar a la evolución natural.

En este sentido, actúa de manera inversa a los procesos estructurales tradicionales. En vez de verificar el comportamiento de un elemento, busca la forma mínima que soporta los esfuerzos requeridos. En el análisis convencional la forma está definida y el análisis confirma que, sometida a determinadas cargas, se mantiene inalterable o presenta desplazamientos inferiores a los exigidos.

El análisis topológico al contrario, modifica la forma en una secuencia evolutiva, buscando conservar solamente las partes más resistentes, y evitar excesos de material (Imagen 2). El punto de partida es un dominio general (un área o volumen), que se subdivide en una malla y se establecen condiciones resistentes. Luego se calcula por análisis de elemento finito cuanto esfuerzo está absorbiendo cada parte, y se excluyen los elementos que están asumiendo bajos desempeños. Se va reduciendo o alterando sucesivamente la forma dentro de la malla, hasta que alcanza una reducción de material o fracción de volumen, con un desplazamiento máximo. De este modo se obtiene una forma “optimizada”, que es tan resistente como si el dominio estuviera completo, pero con material en las partes que resisten más adecuadamente. Los resultados son generalmente figuras complejas, con diversas ramificaciones, y espesores variables, que deben ser verificadas con métodos tradicionales, pero sugieren estructuras eficientes.

Experiencias en Arquitectura Contemporánea

Uno de las experiencias pioneras en optimización estructural, es un edificio de oficinas en la ciudad japonesa de Akutagawa, ejecutado entre el 2002-2004 por el arquitecto Hiroyuki Futai, con el ingeniero Hiroshi Ohmori. Este edificio, de cinco pisos en hormigón armado, presenta una fachada con perfiles sinuosos obtenidos de cálculo evolutivo y ejecutada con grandes moldajes plásticos. En Chile, el Edificio Manantiales de Izquierdo y Lehman, aplicó una iteración entre análisis estructural y diseño arquitectónico para definir la configuración de diagonales en la fachada poniente, pero sin metodologías computacionales integradas.

Diversos ejemplos con técnicas evolutivas han sido desarrollados por el ingeniero Matsuro Sasaki, con Toyo Ito, Arata Isozaki y recientemente con Fumihiko Maki y Kazuyo Sejima + Ryue Nishizawa (SAANA). El caso más significativo es el Centro Internacional de Convenciones de Qatar, de 40.000 m² con una losa superior de 250 mts. de largo por 110 de ancho, sostenida por dos “árboles” metálicos definidos con el método Extended-ESO. Este método se basa en el método original ESO, agregando; “la introducción de isolíneas (isosuperficies tridimensionales), y la evolución bidireccional dependiente en las condiciones del campo circundante” (Sasaki, 2005).

Sasaki también ha tenido un rol relevante en las ondulantes cubiertas del Crematorio Kakamigahara de Toyo Ito (Imagen 3a), y del Centro Rolex en Lausanne, Suiza de SANAA, utilizando en ambos casos el Método de Análisis Sensitivo, que modifica progresivamente una forma predefinida para obtener las mínimas tensiones y deformaciones. A través de un proceso algorítmico que varía levemente la coordenada Z (vertical) de los puntos que definen la superficie, y luego analiza su implicancia en las tensiones y deformaciones resultantes. Este proceso se repite múltiples veces hasta alcanzar la forma que responde mejor a los parámetros.



Imagen 4_ Modelos de Optimización Topológica de Torre Santa María, Santiago (fuente: Arturo Lyon).

Imagen 5_ Prototipo de Mobiliario Arborea (fuente: Lyon Bosch Arquitectos).

Imagen 6_ Losas Estructurales Optimizadas (fuente: Oscar Otárola).

Imagen 7_ Modelos de Pabellón (fuente: Oscar Otárola).

Otro caso de interés desarrollado por Sasaki es el Museo Zollverein de SANAA (imagen 3b), cuya distribución de vanos, aparentemente aleatorios, sigue una distribución optimizada de esfuerzos. En los sectores de menores tensiones se disponen los vanos y empaques plásticos con aire para reducir material y mejorar el aislamiento térmico. Estos ejemplos demuestran la integración incipiente de optimización estructural evolutiva, revelando la combinación la eficiencia resistente con propiedades expresivas.

En el ámbito universitario, Asbjørn Sondergaard de la Escuela de Arquitectura Aarhus de Dinamarca, ha encabezado el estudio de diversos componentes constructivos, como vigas, losas y plataformas (Dombernowsky y Sondergaard, 2009). Ejecutando prototipos a escala real en hormigón armado para cubiertas con métodos de optimización topológica. En Australia, el Centro para Materiales y Estructuras Innovadoras (CISM) de Melbourne ha desarrollado una variedad de estudios y herramientas de software aplicadas en diseño arquitectónico.

Aplicaciones_

A través del proyecto Fondecyt 1100374, hemos trabajado los últimos años con un equipo multidisciplinario de la Pontificia Universidad Católica, Universidad del Bío-Bío y Universidad de Concepción, en la exploración de optimización topológica estructural en el diseño arquitectónico de diversos componentes constructivos. El grupo de trabajo ha estado integrado por investigadores de arquitectura, ingeniería estructural e informática, además de estudiantes de pre-grado y post-grado. Este equipo ha trabajado en distintos centros universitarios, coordinados a través de una plataforma web común, compartiendo el uso de diversos software para implementar procesos de diseño evolutivo desde la perspectiva de las distintas disciplinas involucradas. Se han efectuado una serie cursos y talleres con estudiantes y profesionales que han permitido explorar la aplicación de la optimización estructural evolutiva a la definición de elementos arquitectónicos estructurales. Paralelamente se ha desarrollado tesis de magister que han permitido profundizar en la formulación de distintos algoritmos para la optimización topológica de estructuras y su aplicación en estrategias de diseño arquitectónico.

A continuación se presentan una serie de ejercicios que apuntan a explorar la formulación e implementación de algoritmos evolutivos de optimización topológica aplicados a elementos arquitectónicos.

Se efectuaron primero experimentaciones sobre elementos estructurales básicos (principalmente vigas, losas y muros), a través de tesis de estudiantes de Ingeniería Estructural de la Universidad de Concepción (dirigidos por el profesor Patricio Cendoya). Desarrollando algoritmos en Matlab con bibliotecas CALFEM 3.4 con una interfaz gráfica (OpTop PP), y exportación de las formas a través de mallas numéricas o imágenes, a software de modelación 3D y diseño paramétrico, para su visualización y fabricación.

En estas pruebas se establecieron condiciones de carga y apoyo a distintos dominios de diseño, subdivididos en una malla con propiedades isotrópicas de material equivalentes a hormigón armado. Utilizando técnicas BESO se analizaron las tensiones resultantes y desplazamientos dentro de rangos dimensionales aceptables por normas sísmicas en Chile. La mayor parte de los ejemplos, en un centenar de evoluciones, logra definir una forma resistente con el 50% de volumen original. Las configuraciones resultantes son formas bifurcadas, con distribuciones complejas cuando los perímetros o cargas son variables, que incluyen tirantes y apoyos secundarios, con secciones volumétricas variables de acuerdo a los esfuerzos que recibe cada porción de la estructura.

Ejercicios de diseño de altura: Torre Santa María_

Para este ejercicio, sobre la aplicación de las metodologías a un edificio en altura, se tomó como caso hipotético rediseñar la Torre Santa María de Santiago. El estudio comenzó con la modelación BIM de la torre para proveer una descripción de sus elementos constructivos, así como para transferir información a software de simulación ambiental, llevando a cabo estudios de iluminación natural y de uso de energía. Los requerimientos estructurales fueron desarrollados en MATLAB, CALFEM y ANSYS utilizando procesos de Análisis Topológico. Algunos de ellos actuaron a nivel global de la estructura, definiendo una nueva configuración general para la estructura y otros operaron sobre elementos prefabricados discretos. Diferentes algoritmos para optimización topológica fueron revisados y modificados para ser aplicados en este caso, explorando nuevas estrategias como Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) y Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO).

Los resultados fueron transferidos a software de diseño paramétrico a través de matrices numéricas, editando la información para extraer perfiles así como la definición de volúmenes (Imagen 4). Estos trabajos se utilizaron para establecer estrategias de integración entre desempeños estructurales y ambientales en el proceso de diseño de torres.

Diseño y fabricación en mobiliario: Propotipo arborea_

El diseño y fabricación de un espacio de trabajo encargado a Lyon-Bosch Arquitectos a través del Concurso Habitáculos de Conexión organizado por Arauco para el lanzamiento de nuevos tableros aglomerados, fue utilizado para investigar la Optimización Topológica como base para el diseño de mobiliario (imagen 5).

La propuesta se basó en tres usos propios del espacio de trabajo contemporáneo; una estantería para libros de distintos pesos y tamaños; una superficie de trabajo y una reposera. Estos fueron articulados dentro de una misma estructura compuesta por un conjunto de piezas optimizadas topológicamente en función de las cargas, restricciones constructivas y condiciones de uso. Los resultados de la optimización topológica fueron traducidos a una

plataforma paramétrica en la cual se definieron perfiles que luego fueron cortados a través de fresado CNC, obteniendo las piezas estructurales.

Este caso permitió establecer una relación desde el inicio del proceso de diseño, resultando en la fabricación a escala real. La restricción de trabajar con tableros planos que no permiten ser curvados y el uso de Optimización Topológica en 2D, permitió establecer una continuidad y concordancia entre algoritmos evolutivos y las propiedades materiales.

Losas prefabricadas de hormigón_

Se desarrolló un ejercicio enfocado en losas prefabricadas de hormigón debido a que son elementos repetitivos y moldeables, que al mismo tiempo tienen una importante presencia en los espacios construidos. Aunque las técnicas de optimización han sido escasamente exploradas en estos elementos, se logró verificar un procedimiento para placas rectangulares (Uarac, 2012). Experimentando primeramente un volumen de 1x1 mt. con 0,1 de espesor y cuatro apoyos con carga distribuida, generando una figura en cuatro cuadrantes de curva central aguzada que permiten una reducción material del 50%. En revisiones progresivas con distintos tipos de apoyo y magnitudes de losas se obtienen variaciones con oscilaciones curvas de los espesores dentro del plano inferior, siguiendo simetrías según los apoyos. En losas empotradas laterales se producen fuertes variaciones de espesor hacia el costado apoyado con curvas altas (“dedos”). En las losas más abiertas se generan algunos sectores más gruesos aislados (“nudos”) que acumulan resistencias distribuyendo esfuerzos perimetralmente. Logrando en general rebajar el volumen estructural a la mitad. Las configuraciones poseen evidentemente una complejidad de ejecución, exigiendo moldajes irregulares que se pueden sistematizar, pero que implican mayores esfuerzos de fabricación e instalación. Sin embargo, lograr una reducción tan significativa en un elemento recurrente permite aligerar el peso general del edificio, y por ende los esfuerzos sísmicos, y los elementos soportantes subsecuentes (muros arriostrantes, vigas, columnas y especialmente fundaciones). Por lo que la optimización de las losas permite una rebaja sustancial en toda la construcción, y por ende también de su impacto ambiental,

ya que la huella de carbono es mayormente producida por el consumo de este material. Por otro lado, la configuración irregular de las caras inferiores cualifican la definición espacial a través efectos de luz (recordemos los cielos ondulantes de Gaudi). De este modo una conformación naturalmente eficiente, al mismo tiempo pueden generar efectos espaciales de una planta libre (imagen 6).

Conclusiones_

Estas experimentaciones permitieron revisar estrategias evolutivas de diseño estructural y arquitectónico integrado, que sugieren formas optimizadas y expresivas, motivando un singular lenguaje formal y abriendo posibilidades al desarrollo de edificaciones eficientes y espacialmente calificadas. El uso de metodologías de optimización topológica estructural permite un análisis evolutivo de la forma arquitectónica y sus capacidades resistentes, promoviendo la utilización de técnicas computacionales generativas en procesos colaborativos durante el proceso de proyecto, especialmente en las etapas tempranas de diseño. Este es un desafío relevante, tanto en el dominio técnico, como en la integración multidisciplinaria, que ofrece posibilidades de enfrentar antiguos problemas con nuevos métodos que permiten alcanzar soluciones innovadoras y resistentes (imagen 7).

La ejecución de estas formas complejas requiere resoluciones constructivas adecuadas, con piezas diversas y procesos variables. Sin embargo, los propios avances computacionales en diseño paramétrico y fabricación automatizada, permite subsanar estas dificultades con una planificación adecuada y un incremento de la calidad constructiva.

Desde otro punto de vista, estas formas generan estructuras espaciales equilibradas, singulares y con cierta expresividad urbana, que promueve una significación, como también una alteridad de la lectura visual en la ciudad y el ambiente cotidiano. Lo anterior otorga un dinamismo e identidad que se relaciona con el sentido natural de las formas y de la vida humana, a partir de la utilización de tecnologías avanzadas. De modo que estas capacidades de optimización topológica, integradas en el diseño arquitectónico, pueden otorgar nuevas perspectivas de desarrollo urbano y constructivo. cus

Referencias

- Bendsøe, M; Kikuchi, N., 1988. *Generating optimal topology in structural design using a homogenization method*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 71(2). 197-224.
- Bendsøe, M; Sigmund, O., 2003. *Topology Optimization Theory, Method and Applications*. Springer Verlag, Berlín.
- Dombrowsky, P; Sondergaard, A., 2009. *Three-dimensional topology optimisation in architectural and structural design of concrete structures*. Proceedings of IASS Symposium, Valencia, España.
- Holzer, D; Downing, S., 2010. *Optioneering: A New Basis for Engagement Between Architects and Their Collaborators*. Architectural Design, 80: 60–63, Wiley, London.
- Rappaport, N., 2010. *A Deeper Structural Theory*. Architectural Design, 80: 122–129, Wiley, London.
- Sasaki, M., 2005. *Flux Structure*. Ed. Toto Shuppan, Japón, 2005
- Sasaki, M., 2007. *Morphogenesis of Flux Structure*. AA Publications, Londres.
- Uarac, P., 2012. *Optimización Topológica de Estructuras Planas Considerando una Formulación Multicapa*. Memoria de Título Ingeniero Civil. Universidad de Concepción. Concepción.