

# Variaciones intensivas: diseño paramétrico de edificios en altura basado en análisis topológico

## Intensive Variations: Parametric Design of Tall Buildings Based on Topological Analysis

**Arturo Lyon Gottlieb**

Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

✉ alyon@uc.cl

**Rodrigo García Alvarado**

Universidad del Bío-Bío, Chile

✉ rgarcia@ubiobio.cl

### ABSTRACT

Several building works have demonstrated the possibilities of architectural design based on structural performance. This work discusses some examples and digital design strategies that approach this issue, as well as an exercise for a tower generated through topological optimization. That experience presents alternatives for a traditional office tower in Santiago, Chile, the *Torre Santa Maria*, based on generative design strategies for the incorporation of structural and environmental requirements to define parametric models. The experience and the capabilities studied reveal an intensive variation of architectural shape. This approach challenges conventional building regularity and suggests new ways of designing based on material performance.

**KEYWORDS:** parametric design, topological analysis, tall buildings, environmental performance, structural performance.

Las formas arquitectónicas se han definido tradicionalmente por su extensión y por el perfil de sus aristas, que asumen una condición homogénea de la materia con trazados regulares y repetitivos para facilidad del diseño y ejecución; sin embargo, sabemos desde las teorías de la percepción que las formas se reconocen por partes, más que por su totalidad. Así mismo, las condiciones de los espacios se sustentan más en las capacidades de la envolvente, que en su configuración, de modo que el desempeño de los recintos depende tanto su disposición formal como de sus propiedades materiales.

Las nuevas tecnologías de análisis nos permiten reconocer la distribución variable de diversas condiciones, como los esfuerzos estructurales, la transmitancia térmica, la reverberancia acústica o el desarrollo lumínico, basado en las condiciones del contexto, del propio ambiente y su conformación. En particular, el comportamiento resistente de las formas es significativamente diverso por la distribución de esfuerzos, a pesar que se utilicen materiales continuos y configuraciones regulares. Estas condiciones son variadas porque corresponden a propiedades físicas intensivas de la materia, que se distribuyen distintamente por la forma en relación con la composición general y factores externos.

Esta disposición variable ha sido difícilmente reconocible en proyectos, por lo que se diseñan elementos similares y repe-

titivos dimensionados con los valores máximos, que se comprueban luego con tolerancias amplias de comportamiento. Sin embargo, el incremento de requerimientos económicos y ambientales y las plataformas contemporáneas de análisis y diseño permiten una mayor progresión de estos diseños, para determinar configuraciones más próximas a su desempeño. Este trabajo presenta algunas exploraciones arquitectónicas basadas en desempeños estructurales, estrategias computacionales y una experiencia de diseño paramétrico basado en condiciones ambientales y análisis topológico de edificios en altura.

### Formas arquitectónicas basadas en desempeños estructurales

La definición de configuraciones arquitectónicas basadas en el comportamiento intensivo de los materiales se puede remontar a las bóvedas romanas y las catedrales góticas, que optimizaron elementos según los esfuerzos asumidos, aunque utilizando distribuciones uniformes y mamposterías de piedra que impedían una discretización significativa. Un avance singular fue el conocido estudio de las catenarias de Gaudí, que recogía en espejos el comportamiento gravitacional de cuerdas para diseñar arcos soportantes; también los trabajos de

los ingenieros Heinz Isler y Eladio Dieste y el arquitecto Félix Candela, quienes a mediados del siglo XX desarrollaron inusitadas superficies laminares de reducidos espesores con base en la experimentación práctica (Bernabeu, 2009).

Un estudio más meticuloso fue desarrollado en el Instituto de Estructuras Ligeras, de la Universidad de Stuttgart, bajo la dirección de Frei Otto, quien estudió el comportamiento de burbujas, mezclas viscosas, hilados y telas para deducir formas estructurales eficientes, vertidas en algunas construcciones tensadas (Songel, 2005). Sin embargo solo desde la última década, con la disponibilidad de sistemas computacionales de análisis de elemento finito, se ha podido profundizar en la generación de formas estructurales según criterios de desempeño.

Un trabajo pionero ha sido el del ingeniero Mutsuro Sasaki, que colaboró en la mediateca de Sendai de Toyo Ito, entre 1995 y 2000, y desarrolló el método de análisis sensitivo, que después ha aplicado en diversas obras con membranas finas de hormigón (The Island of City Central Park Gringrin). Luego desarrolló el método de optimización estructural evolutiva extendida, que permite formular estructuras soportantes aplicadas en el proyecto para la Nueva Estación de Florencia y la Ciudad Educacional de Qatar con Arata Isozaki, actualmente en construcción (Sakamoto, Ferre y Cubo, 2008).

Una interesante experiencia en este ámbito la ha desarrollado la Oficina Chilena de Arquitectura Izquierdo-Lehman, en el Edificio Manantiales, en Santiago (Fig. 1), donde la asimetría estructural, dada por la mayor rigidez propia de los muros portantes perforados del volumen envolvente respecto a la elasticidad de las fachadas de la torre (formadas por una sucesión de vigas apoyadas en pilares), se refleja en el distanciamiento entre los centros de rigidez y de gravedad de las plantas, produciendo momentos de rotación y oscilaciones en los pisos altos, que fueron neutralizados por una retícula variable de diagonales y pilares capaz de compensar las rigideces del edificio.



Figura 1. Edificio Manantiales, en Santiago de Chile

El diseño de las fachadas de la torre corresponde a la ecuivalización de las rigideces de un volumen asimétrico, mediante un proceso interactivo con el cálculo estructural tendiente a emparejar las cargas de los pilares cilíndricos que tienen igual sección y similar resistencia, de modo que no quedaran elementos estructurales sobrantes. Así, las fachadas muestran el diagrama estructural de cargas estáticas y dinámicas y re-

flejan la condición inestable de nuestro suelo sísmico; sin embargo, este caso fue desarrollado en un proceso secuencial de diseño y verificación numérica, utilizando metodologías computacionales analíticas, a través de una optimización no automatizada, ejecutada con base en múltiples (17 para ser precisos) iteraciones entre arquitectos e ingenieros, que fueron refinando progresivamente la distribución homogénea de las rigideces de los muros perimetrales.

## Métodos de análisis topológico

La optimización del diseño basado en los comportamientos es evidentemente un proceso iterativo que requiere integrar información y herramientas de diseño y análisis con un manejo eficiente para problemas de gran complejidad. La disponibilidad de plataformas del tipo *Building Information Modeling* (BIM), utilidades de programación gráfica y la integración de diversas condiciones específicas sugiere relevantes capacidades al respecto. El análisis estructural basado en un proceso de búsqueda de la forma constituye una novedosa estrategia para lograr un mejor desempeño material, que se puede vincular a la vez con los requerimientos funcionales y ambientales de la edificación.

La optimización topológica es un enfoque matemático que analiza la distribución de material dentro de un espacio de diseño determinado con condiciones de contorno (o borde) para un determinado conjunto de cargas, de manera que la estructura resultante define un conjunto prerracionalizado de objetivos de rendimiento. Así, mediante la optimización topológica es posible encontrar la mejor versión para un diseño que reúne los requisitos de desempeño esperados.

Desde el nacimiento de esta disciplina (Bendsøe y Kicuchi, 1988), se han propuesto diversos métodos para este problema con variables de diseño discretas o continuas, implementados a través de los elementos finitos, donde a partir de una discretización espacial inicial de un dominio definido se busca la distribución óptima de material que satisfaga las condiciones resistentes exigidas. Estas operaciones son frecuentes en el diseño mecánico, que posee objetos de trabajo de pequeña escala y producción masiva, pero se usan poco en las edificaciones de mayor magnitud y complejidad (especialmente en procesos de búsqueda de la forma que implican un proceso evolutivo de agregación o extracción volumétrica, así como de variación formal según el desempeño). Esto requiere una simplificación formal y requerimientos estructurales y aplicación de normas. En ese sentido se entienden estos procesos como de desarrollo conceptual, y no de verificación o validación de los diseños, los cuales deben efectuarse después de definida la forma final.

La discretización consiste en la subdivisión del espacio de diseño en segmentos similares (trama regular), a fin de analizar los esfuerzos en cada unidad en relación con el conjunto y de esta manera excluir o agregar según diferentes umbrales de condición, revisando luego el desempeño general. Así se

van obteniendo diferentes configuraciones y valores globales de comportamiento. Estos valores, en sucesivas evoluciones, pueden ir reduciéndose o ampliándose, de modo que en una magnitud de búsqueda determinada (por ejemplo en un centenar de evaluaciones) se puede identificar el valor más eficiente y, por ende, la forma más adecuada según ese criterio, combinándolo con otros requerimientos, como magnitud de superficie ocupada o libre (para transparencia lumínica por ejemplo) o consumo de material.

Su aplicación computacional puede estudiarse integrando *software* de diseño geométrico avanzado (como CATIA) con *software* de análisis estructural con elemento finito (como ANSYS) (Koenig y Wintermantel, 2005), o desarrollando la geometría e implementando algoritmos de optimización estructural en programas como CALFEM® (Ríos, 2010). Recientemente se han desarrollado utilidades de programación, como Scan&Solver para Rhino-Grasshopper, que permiten integrar análisis de elemento finito directamente en la programación gráfica de diseño paramétrico (Intact Solutions, 2009).

### Ejercicio de optimización topológica en edificios en altura

Para experimentar estas capacidades de análisis estructural y ambiental se desarrolló un ejercicio en un curso semestral operativo de la Escuela de Arquitectura de Pontificia Universidad Católica de Chile, utilizando como referencia el Edificio Torre Santa María, ejecutado entre 1978 y 1980 por los arquitectos Alemparte, Barreda y Asociados en la zona nororiente de Santiago. Este edificio, destinado a oficinas, consiste en un prisma rectangular de 109 metros de altura y 25×25 metros de lado, con 33 pisos en planta libre (Fig. 2), con una estructura de hormigón armado de núcleo y columnas en el perímetro. Así, conforma cuatro fachadas idénticas de elementos verticales alternados con vidrios, por lo que constituye un ejemplo típico de la racionalización modernista, que establece un diseño homogéneo e independiente de las condiciones particulares de desempeño. Es una solución de edificio en altura de gran presencia urbana y notoriedad (fue el edificio más alto de la ciudad durante trece años), especialmente en un país sísmico, que exige construcciones bajas y macizas.

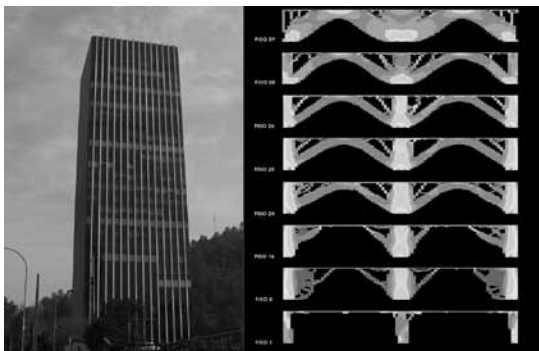


Figura 2. Edificio Torre Santa María

Durante el ejercicio, realizado con una docena de alumnos de pregrado y posgrado, se elaboraron modelos constructivos, en *software* Revit; estudios solares, lumínicos y energéticos, con *software* Ecotect; análisis de optimización topológica de la estructura, con base en las rutinas implementadas por Ríos (2010) sobre CALFEM®; diseño paramétrico general, con Rhino-ceros y Grasshopper, y diseño paramétrico de componentes, con Digital Project, en diversas secuencias de trabajo (Fig. 3).

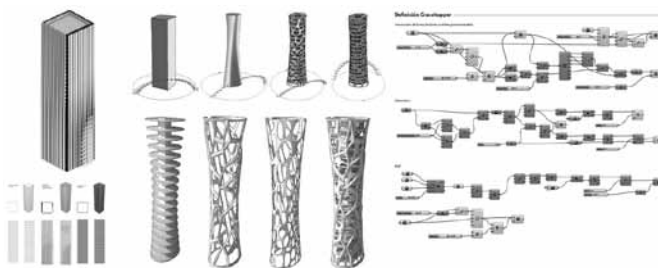


Figura 3. Diseño paramétrico de componentes en diversas secuencias de trabajo

Algunos estudiaron las condiciones de asoleamiento y necesidades lumínicas de las oficinas, con su oscilación diaria y anual en relación con las actividades, que generan una distribución muy diferenciada. Se propusieron deformaciones geométricas que regulan el aporte solar, así como el sobrecalentamiento de verano. En algunas alternativas, con pieles sobrepuestas o articulando la estructura de fachada combinando su desempeño estructural. Otros diseños propusieron alteraciones más significativas del programa funcional, incorporando unidades residenciales en una configuración vertical paralela, o variaciones generales de la forma

En el estudio basado en el análisis topológico se diseñó una estructura tramada de muros como alternativa al sistema de columnas de la torre, que conservó su forma general. Los muros fueron cargados con peso propio y de uso, mientras en el programa LABMAT+FEMGEN se elaboró la lista de puntos y tensiones. Luego se editó la lista en Excel, se borraron datos redundantes y se concatenaron en secuencias de tensión, posición X, Y, Z e identificador (también se edita la puntuación en Notepad).

Posteriormente se ingresaron estos datos en la programación en Rhino-Grasshopper, según VR.net (diferenciando tensiones y puntos). Después se desplegó la geometría como malla rectangular con el perfil de la forma optimizada y se aplicó un *metaball* para dibujar la línea periférica. Luego se extruyó la silueta y se aplicó una tapa (*cap*) para efectuar una superficie completa (*polysurface*). En la cara exterior del volumen generado se aplicaron los valores de carga como espesores para generar extrusiones variables de acuerdo con los esfuerzos locales e intersectando ambos resultados paramétricos. De este modo, los distintos componentes estructurales poblaron la distribución del edificio de acuerdo con la trama de pisos previa. Con esta estrategia, siguiendo la forma regular del edifi-

cio, se obtuvo una optimización progresiva de sus elementos, que combina el desempeño estructural con la transparencia lumínica.

Finalmente, todos los modelos, así como algunos componentes parciales, fueron exportados en formato STL para generar modelos materiales a través una impresora 3D de polvo, a fin de estudiar la configuración volumétrica y física de los diseños elaborados (Fig. 4).

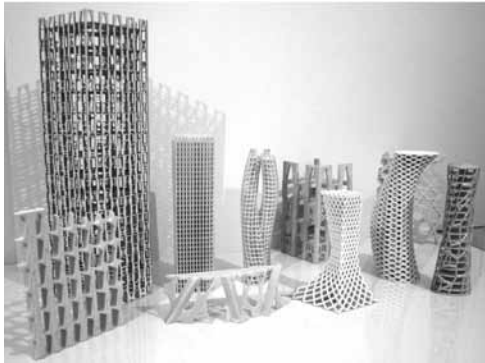


Figura 4. Modelos en formato STL

## Conclusiones

Este trabajo presenta algunos antecedentes sobre el diseño arquitectónico basado en desempeños estructurales, así como estrategias computacionales y un ejercicio académico orientado a edificios en altura con diseño paramétrico según análisis energéticos y topológicos. Se planteó una estrategia de trabajo basada en el estudio computacional de condiciones estructurales y ambientales que orientan la definición de la forma arquitectónica, según la cual se proponen diversas alternativas de diseño para una configuración determinada de edificio en altura. Actualmente se pretende profundizar este procedimiento en el mismo caso de estudio, con el fin de desarrollar una metodología de diseño y elaborar algunos componentes constructivos.

Esta experiencia y las capacidades estudiadas sugieren posibilidades para el diseño paramétrico de proyectos constructivos, que generan una variación intensiva de las formas arquitectó-

nicas, al formular diseños más próximos a su desempeño a través de configuraciones diversas, que cuestionan la regularidad constructiva convencional.

## Agradecimientos

Se agradece la colaboración de Patricio Cendoya y Matías Ríos, de la Universidad de Concepción; a José Miguel Armijo, a José Hernández y a Manuel Araya, de la Pontificia Universidad Católica, y el apoyo de la investigación, a Fondecyt 1100374.

## Referencias

- Bendsøe, M. P. y Kikuchi, N. (1988). Generating optimal topology in structural design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 71 (2), 197-224.
- Bernabeu, A. (2009). *Shape design methods based on the optimisation of the structure*. Historical Background and Application to Contemporary Architecture Proceedings of the Third International Congress on Construction History, Cottbus.
- Intact Solutions (2009). *Scan&Solve™: FEA without Meshing*. Berkeley: Spinoff from the University of Wisconsin-Madison.
- Koenig, O. y Wintermantel, M. (2005). *CAD-based Evolutionary Design Optimization with CATIA V5*. Recuperado de [http://www.dynardo.de/fileadmin/Material\\_Dynardo/bibliothek/WOST\\_1.0/WOST\\_1\\_CAD-basedEvolutionaryDesignOptimization\\_En.pdf](http://www.dynardo.de/fileadmin/Material_Dynardo/bibliothek/WOST_1.0/WOST_1_CAD-basedEvolutionaryDesignOptimization_En.pdf).
- Ríos, M. (2010). *Implementación de un algoritmo de optimización estructural evolutiva para problemas de optimización topológica de estructuras sometidas a tensión plana*. Memoria de Título de Ingeniero Civil, Universidad de Concepción, Chile.
- Sakamoto, T., Ferre, A. y Kubo, M. (2008). *From control to design: Parametric/algorithmic architecture*. Barcelona: Actar.
- Songel González, J. M. (2005). *Frei Otto y el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente*. Tesis doctoral no publicada, Universidad Politécnica de Valencia, España.