

LA FORMA IMPORTA



La forma importa
Form Matters

Fecha Recepción: 18 julio 2016

Fecha Aceptación: 4 agosto 2016

PALABRAS CLAVE

Forma | estructura | *form-finding* | optimización | modelado de fuerzas

KEYWORDS

Form | Structure | Form Finding | Optimization | Force Modelled

Sigrid Adriaenssens

Form Finding Lab, Department of Civil and Environmental Engineering, Princeton University

Princeton, EE.UU.

sadriaen@princeton.edu

Resumen_

A través de la historia, los maestros de la construcción han dado pasos significativos en el aprovechamiento de formas para definir espacios tridimensionales, para proporcionar refugio y protección o hacer puentes sobre vacíos, como los ocasionados por los cursos de agua y los caminos. En ausencia de métodos de predicción numérica, ellos debieron desarrollar prácticas de construcción por medio del ensayo y el error o teorías estructurales para establecer una forma estructural “suficientemente buena”. Actualmente, experimentamos un renacimiento de las formas libres como expresión arquitectónica; sin embargo, el desempeño estructural como principal impulsor del diseño es a menudo excluido del proceso inicial de diseño. La investigación del Form Finding Lab (Universidad de Princeton, EE.UU.) puede ubicarse en la tradición del modelado a base de fuerzas, indagando nuevas estrategias numéricas para generar formas estructurales únicas de vanguardia. Aquí se presentan tres estudios que muestran el desarrollo de esas técnicas, las que, cuando se emplean con procesos constructivos bien ejecutados, producen formas sorprendentes para puentes peatonales, cubiertas y barreras.

Abstract_

Master builders throughout history have made significant strides in exploiting forms to enclose three-dimensional spaces, to provide shelter and protection or to bridge voids, such as water and roadways. In the absence of numerical prediction methods, they resorted to trial and error construction practices or structural theory to establish a *good enough* structural form. Today, we experience a renaissance of free forms as an architectural expression. Yet, structural performance as the main design driver is often excluded from the initial design process. The scholarship at the Form Finding Lab (Princeton University, USA) can be placed in a force-modelled tradition by pioneering novel numerical structural form generation approaches and unique structural performative forms. Three studies are presented that showcase the development of such techniques, which when craftfully manipulated, result in surprising shapes for structurally efficient footbridges, roofs and barriers.

Figura 1: Barrera neumática contra marejadas a gran escala linear, mostrada en el contexto de la península Rockaway (NY, EE.UU.). Fuente: Elaboración propia.

A través de la historia, los maestros de la construcción han dado pasos significativos en el aprovechamiento de formas para definir espacios tridimensionales, para proporcionar refugio y protección (por ejemplo, el domo del Panteón en Roma, Italia, 126 d.C) o hacer puentes sobre vacíos bidimensionales (por ejemplo, los puentes peatonales de Robert Maillart en Toss, Suiza, 1932). Al no contar con métodos de predicción numérica, ellos recurrieron a la práctica del ensayo y el error en la construcción o a la teoría estructural para establecer una forma estructural suficientemente buena (ver Figura 2). Hoy, los ingenieros estructurales a menudo quedan excluidos de la etapa inicial de diseño de un edificio o un puente y solamente son incorporados al proceso una vez que la forma ha quedado fija. Pier Luigi Nervi, ingeniero estructural y diseñador del bellissimo Little Sports Palace (Roma, Italia, 1958), declaraba:

La resistencia dada por la forma, aunque es el tipo de resistencia más eficiente y más común que se encuentra en la naturaleza, aún no ha construido en nuestras mentes las intuiciones subconscientes que son la base de nuestros esquemas y realizaciones estructurales (1955: 96).

El objetivo de este artículo es categorizar diferentes formas estructurales curvas en la arquitectura moderna y contemporánea, y ubicar la investigación de nuestro Form Finding Lab (perteneciente al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Princeton, EE.UU.) en la tradición de las formas modeladas a base de fuerzas, exhibiendo nuevas maneras numéricas de encontrar formas estructurales únicas.

1. CONTEXTO Y RELEVANCIA

Cuando en nuestro laboratorio evaluamos formas curvas en la arquitectura moderna y contemporánea, distinguimos tres categorías: esculturales, geométricas y de modelado a base de fuerzas.

1.1 Formas esculturales

Con las herramientas disponibles de modelado geométrico

digital, algunos arquitectos desarrollan formas basadas en consideraciones estéticas con el único propósito de obtener efectos escenográficos. Este enfoque del diseño hace surgir preguntas desde un punto de vista estructural con respecto a la resultante falta de eficiencia estructural. Para desarrollar el diseño de una forma estructural de ese tipo es necesario un equipo de arquitectos, ingenieros y contratistas que encuentren la sinergia correcta entre estética, contexto, comportamiento estructural y constructibilidad. La armazón del Nuovo Polo Fiera Milano (Milán, Italia, 2012), desarrollada por el arquitecto Massimiliano Fuksas (1944) en conjunto con la oficina consultora Schlaich Bergermann and Partner y el contratista Mero & Co., ilustra este enfoque de diseño.

1.2 Formas geométricas

La geometría es una herramienta que ha sido usada desde la antigüedad para el desarrollo de formas arquitectónicas. Estas formas están, por lo tanto, limitadas por las reglas impuestas por la geometría analítica y la imaginación del diseñador. Por siglos, la arquitectura se ha desarrollado alrededor de geometrías "sencillas" escogidas por sus cualidades constructivas o estructurales. Se pueden encontrar ejemplos en las cáscaras de hormigón armado con forma de paraboloides hiperbólicos de Félix Candela (1910-1997) y en los muros y cubiertas sinusoidales de albañilería de Eladio Dieste (1917-2000).

1.3 Formas de modelado de fuerzas

De todos los elementos tradicionales de diseño (como la elección de materiales, las secciones de perfiles, los tipos de nodos, la geometría global y las condiciones de apoyo), la forma global es la que decide en su mayor parte si una forma curva será estable, segura y lo suficientemente rígida como para salvar una luz sin apoyos intermedios. Este es el desafío más importante para el diseñador de una superficie curva cuando busca eficiencia económica, ambiental y estructural. Al liderar innovadores acercamientos a *form-finding* numéricos y formas estructurales únicas, la investigación del Form Finding Lab de la Universidad de Princeton (EE.UU.) se ubica en esta tradición de formas de modelado a base de fuerzas.



Figura 2: Diagrama de tiempo versus peso para una selección de formas estructurales icónicas. Fuente: Elaboración propia.

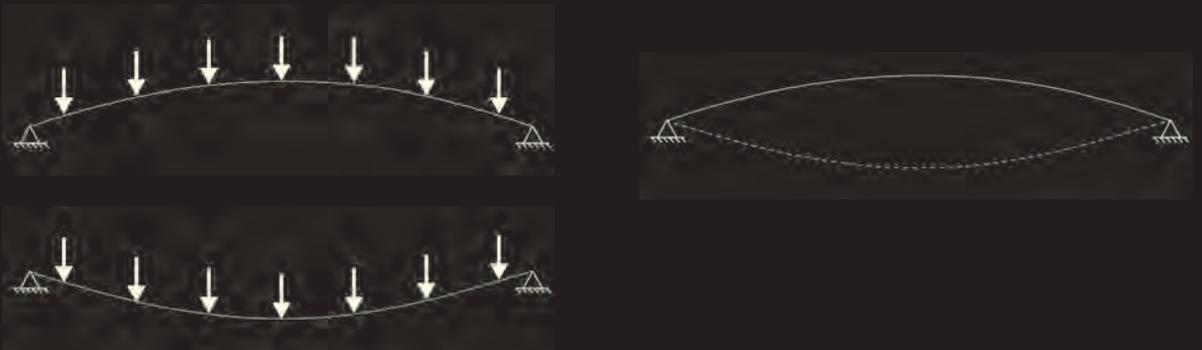


Figura 3: Ilustración de pandeo snap-through (izquierda) y resonancia (derecha). Fuente: Elaboración propia.

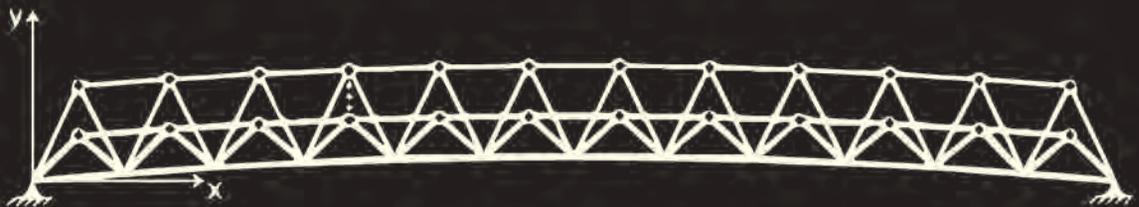


Figura 4: Optimización de la forma de una pasarela peatonal reticulada permitiendo que los nodos de la cuerda superior se muevan. Fuente: Elaboración propia.

El origen de esta tradición se encuentra en las obras de Robert Hooke, el filósofo naturalista, arquitecto y polímata inglés del siglo XVII. En 1675, Hooke resolvió el acertijo planteado en la Royal Society sobre cuál es la forma ideal de un arco. «Así como cuelga la línea flexible, de igual manera, pero invertido, se sostendrá el arco rígido» (Hooke, 1676).

En el siglo XX, tanto arquitectos como ingenieros —Antonio Gaudí (1852-1926), Sergio Musmeci (1926-1981), Heinz Isler (1926-2009) y Frei Otto (1925-2015)— han experimentado con técnicas físicas de *form-finding* basadas en los modelos de catenaria con cadenas colgantes inspirados en Hooke para llegar a formas de modelado de fuerzas. Para una revisión extensa de la historia de las técnicas físicas de *form-finding* y sus pioneros, podemos remitir al lector a Adriaenssens, Block, Veenendaal y Williams, 2014.

En colaboración con la Escuela de Arquitectura de la Universidad Roma Tre, estudiamos las investigaciones y los proyectos del menos conocido Sergio Musmeci (Adriaenssens, Gabriele, Magrone, & Varano, 2016). Aprendiz de Pier Luigi Nervi (1892-1979) y Riccardo Morandi (1902-1989), Musmeci es digno de atención por su habilidad para diseñar y construir cáscaras estructurales continuas con formas sin precedentes y muy adelantadas a su tiempo. En esta cita, él captura la esencia de los beneficios de las formas de modelado a base de fuerzas:

No hay razón por la cual los factores desconocidos deban ser siempre las tensiones internas y no, por ejemplo, los parámetros geométricos que definen la forma misma de las estructuras, puesto que en este último caso se puede obtener una uniformidad de tensiones y un uso mucho más completo y eficiente del material. Con este método, es posible llegar a una síntesis de nuevas formas, ricas en fuerza expresiva (Musmeci, 1980).

Él comprendió, ya en los sesenta, cuando desarrolló el diseño del Puente Basento (Potenza, Italia, 1967), la importancia de minimizar el área al mismo tiempo que se maximizaba la función estructural en las cáscaras. Lo más interesante de Musmeci es su comprensión y manejo de

métodos físicos, numéricos y analíticos de *form-finding* para lograr su diseño propuesto.

2. TÉCNICAS INNOVADORAS DE GENERACIÓN DE FORMAS Y FIGURAS ESTRUCTURALES

Una vez que hemos definido qué son las formas modeladas a base de fuerzas y cómo los profesionales han adoptado técnicas físicas y digitales de *form-finding*, mostramos a continuación otros tres estudios realizados en nuestro laboratorio que ilustran la variedad de técnicas que desarrollamos, así como el amplio campo de formas y sistemas estructurales innovadores que emergen usando estas técnicas.

2.1. Arco reticulado peatonal

En este primer estudio, volvemos a la pregunta “¿cuál es la forma perfecta de un arco?” o, más precisamente, de un arco reticulado peatonal. La pendiente máxima de una pasarela que permita a los peatones cruzar un espacio vacío se fija según la pendiente máxima dada por guías de accesibilidad, las que indican que debe ser poco inclinada. Como resultado, el arco es propenso a una pérdida violenta de estabilidad geométrica de tipo pandeo *snap-through*. Esto significa que el arco puede asumir una posición de equilibrio invertido (ver Figura 3, izquierda). Como el puente del arco es también liviano, su vibración natural puede coincidir con la vibración inducida por el paso de los peatones (ver Figura 3, derecha), un fenómeno que experimentaron quienes visitaron el Millenium Bridge de Londres (diseñado por Norman Foster) el día de su inauguración en el 2000. Cuando esto sucede, se produce una resonancia que puede llevar a un daño estructural. Por lo tanto, ¿qué sucede cuando tratamos de optimizar el pandeo o el comportamiento dinámico (resonancia) de una pasarela reticulada permitiendo que se desplacen los nodos de la cuerda superior de la retícula? (ver Figura 4). En la Tabla 1 se muestran las formas resultantes de las retículas, optimizadas en 2D (los nodos se mueven en un plano x, y vertical) y 3D (se permite mover los nodos en las tres direcciones). Las formas de retículas resultantes cumplen con las recomendaciones de pendiente máxima con una gran variedad de formas

	2D optimized form	3D optimized form
linear buckling		
nonlinear response (linear function)		
nonlinear response (quasi-quadratic function)		
fundamental frequency		
compliance		

Tabla 1: Formas de pasarela peatonal reticulada 2D y 3D optimizadas para pandeo (primeras tres filas), comportamiento dinámico (cuarta fila) y rigidez (quinta fila). Fuente: Elaboración propia.

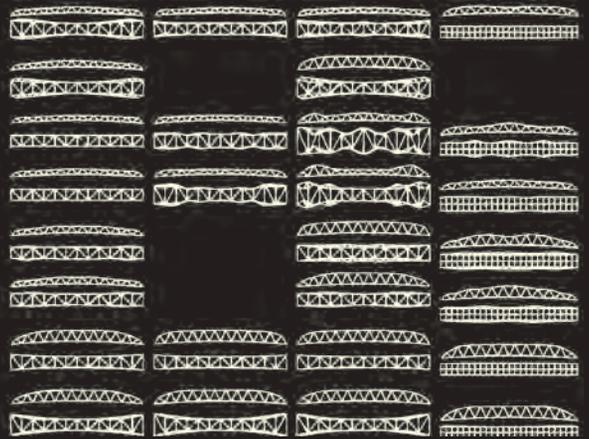
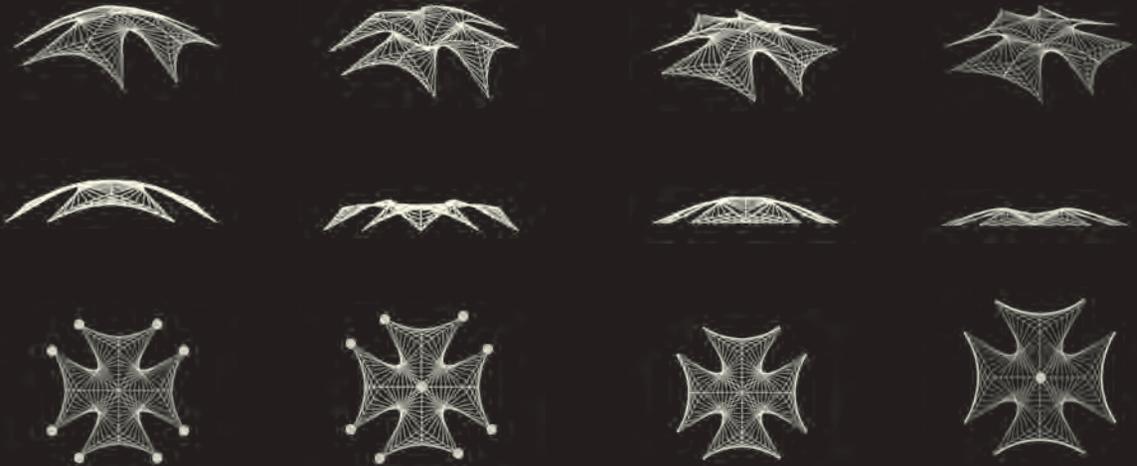


Figura 5: Una abundancia de formas de pasarelas peatonales reticuladas optimizadas bajo varias condiciones de apoyo. Fuente: Elaboración propia.

PINNED
VERTICALLY SLIDING



Variation 1:
8 extremities pinned

Variation 2:
8 extremities and center point
pinned

Variation 3:
4 outer curves pinned

Variation 4:
4 outer curves and center point
pinned

Figura 6: El algoritmo permite la generación de una amplia gama de nuevas formas de *gridshells*. Fuente: Elaboración propia.

que incluyen topologías no estándar, incluyendo topologías en arco, ahusadas, con forma de corbata y otras. Cuando evaluamos estas formas optimizadas para otros criterios estructurales como carga axial máxima y deformación global, nos sorprendimos al encontrar que todas las formas optimizadas obtenidas tienen mejor comportamiento que la forma inicial. En otras palabras, cuando empezamos a optimizar la forma base según diferentes condiciones límite, se nos reveló un completo campo de formas nuevas (ver Figura 5) (Halpern & Adriaenssens, 2014, 2015). Este estudio nos mostró que aun en un simple sistema estructural como un arco reticulado peatonal, hay una gran riqueza de formas inexploradas que se comportan de manera extraordinaria.

2.2 Formas activas elásticas

¿Qué forma toma una franja elástica cuando se curva? Jacob Bernoulli abordó esta pregunta por primera vez en 1694. Para describir esa forma, trabajamos un algoritmo que establece la forma de una vara elástica bajo una carga axial y flexión en el plano. Este algoritmo, que luego fue implementado por Daniel Piker en Kangaroo (Rhino), ha permitido la generación de sistemas de curvatura activa incluyendo una amplia exploración de formas de *grid shells* tridimensionales. Estas formas complejas, que se muestran en la Figura 6 como ejemplo, no pueden ser descritas usando expresiones analíticas. Estamos muy agradecidos a Daniel por ese algoritmo que se incorporó en un trabajo de investigación disponible para la comunidad del diseño digital (Adriaenssens & Barnes, 2001; Barnes, Adriaenssens, & Krupka, 2013; Richardson, Adriaenssens, Coelho, & Bouillard, 2013; Tysmans, Adriaenssens, & Wastiels, 2011), y por el creciente interés en el diseño de *grid shells*.

2.3 Barrera neumática contra marejadas

En 2012 fuimos testigos de la fuerza destructiva del huracán Sandy en Nueva Jersey, EE.UU. Este fenómeno natural tuvo como resultado grandes pérdidas económicas y sociales, especialmente en la costa de Nueva Jersey. Por este motivo, empezamos a pensar en una barrera accionada por aire que se pudiera guardar y que pudiese ser

trasladada a lo largo de la costa para bloquear inundaciones y cambios abruptos en la altura del agua (ver Figura 1). Las barreras neumáticas se han usado para represas pequeñas, pero no para grandes barreras sujetas a cargas extremas causadas por huracanes. Una barrera neumática es una membrana cerrada flexible, pre-tensada por medio de la presión interna del aire y cargada por fuerzas externas. Una barrera de ese tipo puede deformarse extensamente al mismo tiempo que retiene su funcionalidad. A medida que la magnitud de las cargas externas aumenta, la barrera flexible cambia su forma. A medida que cambia su forma, se altera la orientación de las cargas, lo que a su vez tiene efecto en la forma de la barrera. Esta interdependencia de fuerza y forma requiere un enfoque modelado de la interacción entre estructura y fluido. Por lo tanto, el análisis y diseño de una barrera de ese tipo no es sencillo. Resolvimos el acoplamiento de la fuerza y la forma flexible en un algoritmo nuevo (Streeter, Rhode-Barbarigos, & Adriaenssens, 2015) y desarrollamos un procedimiento de actualización de la presión interna que toma en consideración la tensión del aire del sistema. Nuestros resultados revelaron que la suposición de una presión constante, usada comúnmente en la literatura científica, no debería usarse en un análisis bajo carga de marejadas; esto subestima la tensión de la membrana y podría convertirse en una ruptura de la barrera, lo que sería una catástrofe. Se ha investigado muy poco sobre *form-finding* de formas rígidas o flexibles sometidas a cargas extremas producidas por huracanes, terremotos o tsunamis. Estamos entusiasmados por haber comenzado a trabajar en este campo de tanta relevancia social.

3. CONCLUSIÓN

La búsqueda de mejores formas estructurales urbanas funciona como un *leitmotif* de nuestra investigación. Nuestras contribuciones han sido el desarrollo de nuevos algoritmos de *form-finding* numéricos y de metodologías de diseño que permitan formas únicas para puentes de grandes luces, construcciones y barreras para un ambiente construido resiliente y sostenible. Estas formas están dictadas por el flujo de fuerzas. Por lo tanto, las formas pueden ser muy delgadas y económicas y tienen una baja huella de carbono, al mismo tiempo que mantienen

la fuerza y la estabilidad, siendo estéticamente agradables y cómodas para los usuarios. En nuestra investigación reciente, comenzamos abordando nuevos desafíos, tales como usar puntos de partida no dados por el diseño estructural o cargas extremas que llevan al mismo objetivo. Al hacerlo así, esperamos avanzar en la práctica del diseño estructural, resolviendo los desafíos de resiliencia que las sociedades urbanas enfrentan globalmente. 

REFERENCIAS

- ADRIAENSSENS, S. M., & BARNES, M. R. (2001). Tensegrity spline beam and grid shell structures. *Engineering structures*, 23(1), 29-36.
- ADRIAENSSENS, S., BLOCK, P., VEENENDAAL, D., & WILLIAMS, C. (2014). *Shell structures for architecture: Form finding and optimization*. Londres, Inglaterra: Routledge.
- ADRIAENSSENS, S., GABRIELE, S., MAGRONE, P., & VARANO, V. (2016). Revisiting the form finding techniques of Sergio Musmeci: The Bridge over the Basento River. *3rd International Conference on Structures and Architecture (ICSA) 2016*, Guimares, Portugal (págs. 543-550).
- BARNES, M. R., ADRIAENSSENS, S., & KRUPKA, M. (2013). A novel torsion/bending element for dynamic relaxation modeling. *Computers & Structures*, 119, 60-67.
- HALPERN, A. B., & ADRIAENSSENS, S. (2014). Nonlinear elastic in-plane buckling of shallow truss arches. *Journal of Bridge Engineering*, 20(10), 04014117.
- HALPERN, A. B., & ADRIAENSSENS, S. (2015). In-plane optimization of truss arch footbridges using stability and serviceability objective functions. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 51(4), 971-985.
- HOOKE, R. (1676). *A description of Helioscopes and Some Other Instruments Made by Robert Hooke* (Vol. 65). Londres, Inglaterra: J. Martyn.
- MUSMECI, S. (1980). Struttura ed architettura. *L'Industria Italiana del Cemento*(10), 771-786.
- NERVI, P. L. (1955). *Costruire correttamente*. Milán, Italia: Hoepli.
- RICHARDSON, J. N., ADRIAENSSENS, S., COELHO, R. F., & BOUILLARD, P. (2013). Coupled form-finding and grid optimization approach for single layer grid shells. *Engineering structures*, 52, 230-239.
- STREETER, M., RHODE-BARBARIGOS, L., & ADRIAENSSENS, S. (2015). Form finding and analysis of inflatable dams using dynamic relaxation. *Applied Mathematics and Computation*, 267, 742-749.
- TYSMANS, T., ADRIAENSSENS, S., & WASTIELS, J. (2011). Form finding methodology for force-modelled anticlastic shells in glass fibre textile reinforced cement composites. *Engineering Structures*, 33(9), 2603-2611.