

CUANDO LO ESTÉTICO NO FUE ESTÁTICO

Ingeniero Civil Victorio Hernández Balat
Quasdam Ingeniería – Departamento de Construcciones de la Facultad de
Ingeniería de la Universidad Nacional de la Plata

Resumen: Durante la segunda mitad del siglo XX pueden encontrarse numerosos ejemplos de colaboraciones exitosas entre arquitectos e ingenieros estructuralistas. En mucho menor número aparecen obras importantes en las que dicha colaboración no existió, no fue oportuna o fracasó por diferentes motivos. En este artículo se describen algunas obras internacionales muy conocidas cuya historia muestra lo ocurrido cuando por problemas de organización, por ir “más allá de lo conocido” forzados por razones estéticas o bien por falta de capacidad se arribó a estructuras que, por su concepción, presentaron serios problemas en las etapas de ingeniería de detalle, de construcción o de utilización. Todas las obras descritas en este artículo han sufrido grandes retrasos en su puesta en servicio, fuertes incrementos del costo estimado inicialmente, falencias en su resistencia o en su rigidez o una combinación de algunos de los inconvenientes antes citados. Algunas de ellas debieron ser reparadas o reforzadas y hasta parcialmente reconstruidas, aunque esto no sea demasiado conocido. Para acotar la extensión del artículo se ha elegido un período de 50 años que comienza con el Kresge Auditorium del MIT (EEUU, 1955) y finaliza con el edificio Turning Torso (Malmo, Suecia, 2005).

Abstract: On the second half of the XXth century we could find many examples of successful collaboration between architects and structural engineers. Less frequent are very important works in which the above mentioned collaboration did not exist, it was not opportune or it failed for different reasons. Some international very well-known works are described in this paper. The history of these works shows what happened when due to organizing faults, or going beyond the “state-of-the-art” forced by esthetic reasons or for lack of capacity the adopted structure lead to serious problems in the stages of detailed engineering, construction or use. All the works described in this paper have undergone schedule delays, increases in the initially considered cost, deficiencies in its resistance or its rigidity or a combination of some of the disadvantages before mentioned. Some of them had to be repaired or to be reinforced and even partially reconstructed although these are not very well-known facts. In order to limit the extension of this paper only a period of 50 years has been chosen. It begins with the MIT’s Kresge Auditorium (USA, 1955) and finalizes with the Turning Torso Building (Malmo, Sweden, 2005).

Introducción

En la bibliografía se encuentran numerosas obras de atractivo aspecto en las que las estructuras se integran armoniosamente con el diseño arquitectónico. Menos frecuentemente, se muestran también estructuras estéticamente olvidables. Suelen citarse asimismo los desafíos aparecidos durante las etapas de proyecto y construcción de obras muy conocidas pero casi nunca se muestran los pequeños y grandes “fracasos” que padecieron sus proyectistas aunque este conocimiento

resulta siempre enriquecedor para la comunidad técnica. En este artículo se describen algunos de esos “fracasos”. Los casos elegidos se concentran al principio y al final de la segunda mitad del siglo XX e incluyen obras muy conocidas que, en muchos casos, suelen citarse como ejemplos exitosos de soluciones estructurales.

Kresge Auditorium (EEUU, 1955)

Entre el final de la Segunda Guerra Mundial y la década de 1960 el mundo asistió a extraordinarios proyectos resueltos mediante el uso de estructuras con comportamiento predominantemente laminar (Nervi, Candela, Torroja) sin embargo no todos comprendieron que no era suficiente con tener doble curvatura y pequeño espesor para presentar un comportamiento membranar. Los siguientes dos ejemplos dan testimonio de ello.



Figura 1: Kresge Auditorium

En 1955, con proyecto arquitectónico de Eero Saarinen y proyecto estructural a cargo de Ammann & Whitney, se finalizó la construcción del Auditorio Kresge en el campus del Massachusetts Institute of Technology, en Cambridge. La cubierta (Figura 1) se resolvió mediante una cáscara esférica de hormigón armado de 34 metros de radio cortada por planos verticales que definen una planta en forma de triángulo equilátero. La distancia entre apoyos resultó de 49 metros y en cada uno de los vértices se ubicaron apoyos puntuales que, inicialmente, fueron el único sustento de la estructura. Tratando de resistir las fuertes concentraciones de compresiones se dispusieron vigas sobre los bordes libres. Las fotografías de la construcción muestran grandes congestiones de armaduras.

Las deformaciones instantáneas y por creep de los bordes libres fueron muy superiores a las esperadas lo que obligó al apuntalamiento de la estructura. Como recurso extraordinario de refuerzo se adaptó la carpintería exterior de modo que obrara como apoyo de dichos bordes. Aún así la cubierta experimentó una fisuración muy importante. A través del tiempo la estructura ha requerido sucesivas reparaciones mayores originadas por la corrosión de las armaduras.

Aún hoy muchas referencias bibliográficas citan erróneamente a esta obra como un ejemplo exitoso de estructura laminar pasando por alto que su geometría y sus condiciones de apoyo son incompatibles con un funcionamiento de ese tipo.

Opera de Sydney (Sydney, Australia, 1956)

El arquitecto danés Jorn Utzon resultó ganador del concurso internacional que se realizó en 1956 para el proyecto del nuevo edificio para la ópera de Sydney. Las bases indicaban que el proyecto no tendría límite de costo. El jurado llegó a decir del anteproyecto ganador: “Los dibujos son simples, al punto de ser esquemáticos. Sin embargo hemos vuelto una y otra vez sobre ellos y estamos convencidos de que presentan el concepto de un edificio para una ópera que es capaz de transformarlo en una de los más grandes edificios del mundo”. La Figura 2 muestra uno de los dibujos a los que hace referencia el jurado.



Figura 2: Opera de Sydney
Bosquejo Licitación

Los bosquejos del edificio fueron entregados al famoso estudio Ove Arup and Partners de Londres. Utzon había utilizado en su proyecto formas libres que pretendían ser cáscaras pero sin serlo por sus singulares condiciones de geometría y apoyos. En el momento de presentarse al concurso no había contado con el asesoramiento de un ingeniero especialista en estructuras con la suficiente experiencia como para prever los problemas que luego se presentarían.



Figura 3: Opera de Sydney. Exterior

La solución estructural resultó notoriamente compleja y costosa. Arup declara haber invertido 350.000 horas hombre en el estudio del problema y sólo se llegó a un planteo constructivo razonable en 1961 después de que Utzon realizara sucesivos cambios en la geometría de la cubierta (Figura 3).

Constructivamente la solución final consistió en montar el techo a partir de elementos prefabricados de gran tamaño y costo. La obra fue calificada como “el trabajo de montaje de elementos prefabricados más dificultoso en la historia de la construcción”. Se dice que la ingeniería del techo costó más que lo que inicialmente se había previsto gastar en la construcción del mismo.

Como ocurre con más frecuencia de lo que podría pensarse, el edificio comenzó a ser construido sin tener solucionado el problema estructural de la cubierta lo que obligó incluso a demoler por voladura parte de las fundaciones que se habían ejecutado con la idea de ir ganando tiempo.

El costo estimado inicialmente en 10 millones de dólares resultó ser finalmente de 130 millones de dólares. Asimismo en lugar de terminarse en 1960 se finalizó alrededor de 1973.

En defensa de Utzon cabe decir que si al presentarse al concurso lo asesoró un ingeniero estructuralista éste no estuvo a la altura de la estructura, asimismo en el jurado faltó un ingeniero especialista que pudiera advertir los problemas que se avecinaban y para complicar las cosas, durante el proyecto, el gobierno introdujo cambios que llegaron a incluir la modificación del número de salas de concierto.

Frank Gehry ha dicho respecto a esta obra “Utzon hizo un edificio muy avanzado para su tiempo, muy avanzado para la tecnología disponible y perseveró a través de una publicidad maliciosa y de una crítica negativa hasta construir un edificio que cambió la imagen de un país. Es la primera vez en mi vida que una pieza épica de arquitectura ha ganado una presencia universal de tal magnitud”.

Berlin Congress Hall (Alemania, 1956)

La Figura 4 muestra la geometría que se había proyectado inicialmente para la cubierta del Berlin Congress Hall.

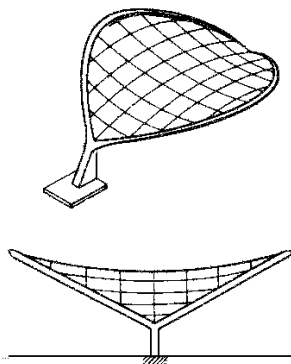


Figura 4:
Esquema inicial
estructura Berlin
Congress Hall

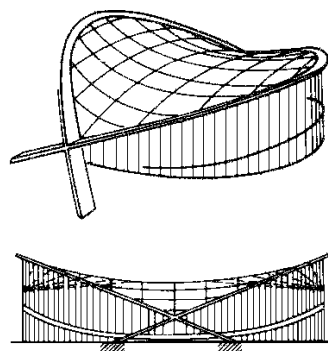


Figura 5:
Esquema
estructura Arena
Raleigh

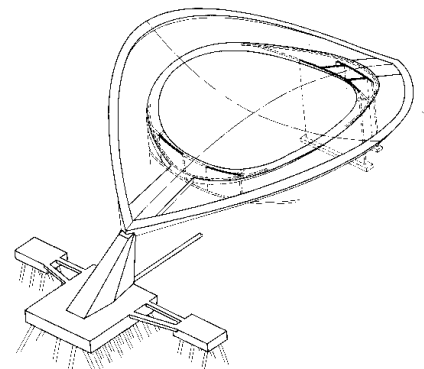


Figura 6: Esquema final
estructura Berlin Congress
Hall

La estructura guarda cierta similitud visual con la Arena de Raleigh (Figura 5) pero en el caso de Berlin los arcos inclinados que sostienen el techo no llegan a las fundaciones sino que se interrumpen en su intersección siendo tomados por ménsulas que llegan hasta los cabezales de pilotes (Figura 6). En la estructura de Raleigh la tendencia a “caer” de los arcos inclinados era compensada por los cables traccionados de la cubierta y los efectos desequilibrantes eran tomados también por los soportes verticales de las carpinterías exteriores. En el caso de

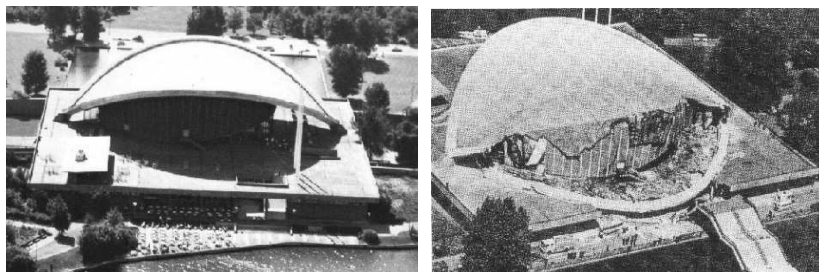
Berlin la estructura de cables fue reemplazada por un paraboloides hiperbólico de hormigón pretensado y los efectos desequilibrados debían ser tomados por torsión en las ménsulas. En principio este techo debía dar la impresión de “flotar” sobre el auditorio que se encuentra en su interior (Figura 7).



Figura 7: Berlin Congress Hall

Sin embargo, durante el proyecto se vio que el sistema no era estable y se decidió apoyar la estructura en las paredes perimetrales del auditorio en lugar de modificar íntegramente el proyecto de arquitectura buscando una forma estructural más lógica. Los arcos resultaban ahora casi decorativos y su peso (que se utilizó para estabilizar la cubierta frente a la succión por viento) se suspendió de la zona central a través de cables de pretensado. Mediante una buña en la parte superior de las paredes del auditorio se creó la ilusión de que el techo no apoyaba en ellas.

Las cargas de nieve, el creep y los cambios de temperatura entre las zonas de cubierta expuestas a la calefacción interior y las sometidas a temperatura ambiente fueron provocando movimientos relativos que fisuraron el encuentro entre la cáscara del techo y los arcos. La estructura fue construida en forma bastante poco prolija dado que se fijó su plazo de ejecución en sólo diez meses (1956-57). En 1980, como resultado de la corrosión de los cables, uno de los arcos y parte del techo cayeron provocando la muerte de una persona (Figura 9).



Figuras 8 y 9: Vistas aéreas antes y después del colapso

La estructura fue reconstruida (1987) manteniendo su aspecto original.

En 1956 Frei Otto dijo de esta estructura: “Nunca antes un techo suspendido se había construido con una estructura tan cara y torpe”. Sin embargo aún hoy se leen más reconocimientos que críticas a esta construcción.

Millenium Bridge (Londres, Inglaterra, 2000)

En 1996 el Financial Times llamó a un concurso internacional junto con el London Borough of Southwark y el Royal Institute of British Architects para el proyecto de un puente peatonal que cruzaría el Támesis entre Southwark y los puentes ubicados en Blackfriars.



Figura 10: Millenium Bridge

El proyecto ganador resultó ser un puente colgante de tres tramos con una luz central de 144 metros (Figuras 10 y 11). La definición estructural estuvo fuertemente influenciada por la apariencia propuesta por los arquitectos (Foster and Partners) lo que redundó en catenarias de suspensión muy esbeltas (los cables tienen una relación flecha/luz = $1/64$, es decir, alrededor de una sexta parte de lo que tienen los puentes colgantes convencionales) y a un sistema de sustentación del tablero de bajo impacto visual.

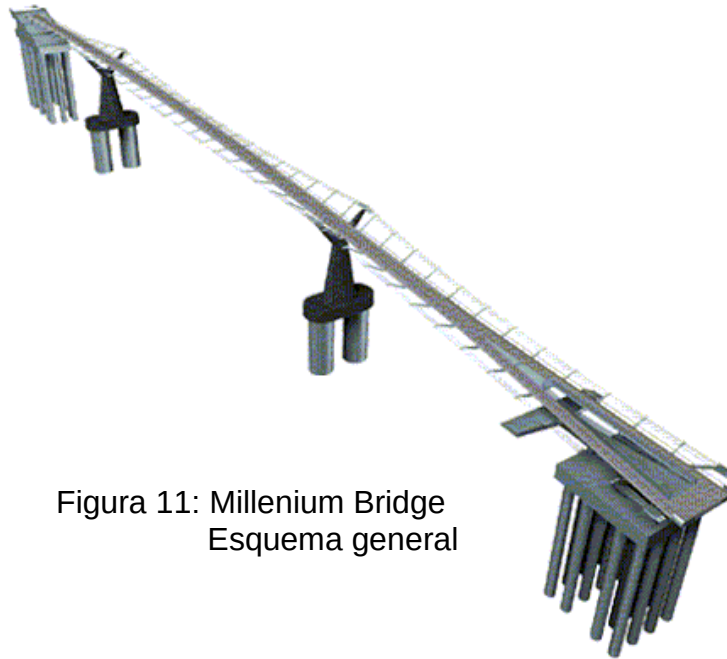


Figura 11: Millenium Bridge
Esquema general

Las características antes mencionadas condujeron a una estructura con una baja capacidad de amortiguamiento lo que, sumado a la frecuencia propia de vibración hizo que, inaugurado al tránsito el 10 de Junio de 2000, el puente tuviera que ser cerrado el 12 de Junio de 2000, es decir dos días después, porque, al ser transitado por un número importante de peatones, se producían oscilaciones laterales de tal magnitud (alrededor de 70 mm) que algunas personas debían tomarse de los pasamanos para poder continuar su marcha sin caer.

Luego de largos y costosos estudios se agregó un sistema de triangulación inferior y amortiguadores sumamente sofisticados (originalmente proyectados para ser utilizados por la NASA) que lograron disminuir las oscilaciones llevándolas a niveles imperceptibles.

Según los proyectistas, a partir de este episodio se descubrió un nuevo fenómeno denominado en inglés “synchronous lateral excitation”. El fenómeno consiste en una excitación creciente que sufre el puente porque los peatones, al percibir las oscilaciones laterales, inconscientemente acomodan su paso de modo de sincronizarse con ellas para facilitar la marcha. De esta forma el fenómeno se retroalimenta dando lugar a oscilaciones cada vez mayores. La instalación de amortiguadores se realizó luego de varias pruebas de carga con un número creciente de peatones cada vez. Los trabajos se realizaron a lo largo de todo el año 2001 y finalizaron en febrero de 2002.

Los proyectistas afirman que el episodio no se debió a las características de la estructura sino a la falta de conocimiento de este “recientemente identificado” fenómeno de sincronización.

Existen algunos ejemplos anteriores de este tipo de oscilaciones pero no fueron asociados entre sí ni a la existencia de este fenómeno hasta que se produjo el episodio del Millenium Bridge que, por su trascendencia internacional, la

disponibilidad de recursos y la necesidad de poner el puente en servicio, permitió realizar un estudio de suficiente profundidad.

Edificio One Wall Center (Vancouver, Canadá, Año 2001)

Los fenómenos aeroelásticos (interacción entre fenómenos aerodinámicos y respuesta dinámica de la estructura) son complejos y, a veces, difíciles de predecir sin realizar ensayos en túnel de viento. En algunas oportunidades su aparición es inevitable y en otras, aún siendo evitable, por razones arquitectónicas se ha preferido lidiar con ellos. Este es el caso del edificio One Wall Center.



Figuras 12 y 13: One Wall Center. Vista y Planta

En las Figuras 12 y 13 se muestran el aspecto general y una planta del edificio “One Wall Center” construido en Vancouver, Canadá en el año 2001. El edificio cuenta con 48 Pisos y 150 metros de altura. La relación entre su altura y la menor dimensión en planta es del orden de siete, la misma relación que las torres del “World Trade Center” de Nueva York pero con una altura mucho menor y una disposición estructural menos eficiente que la de las desaparecidas torres. Las pruebas realizadas en túnel de viento indicaron un comportamiento desfavorable (oscilaciones excesivas). Con la restricción de mantener una fachada transparente y un número mínimo de columnas, utilizaron los recursos estructurales que hoy la técnica indica como más efectivos (vinculación del núcleo interior con las columnas exteriores a través de vigas muy potentes en los niveles 5, 21, 31 y azotea) pero éstos resultaron insuficientes para el control de oscilaciones. En este punto se debió decidir entre modificar el proyecto de arquitectura o recurrir a soluciones más sofisticadas para controlar las

oscilaciones. Se decidió dar prioridad a la arquitectura. Para lograr un comportamiento satisfactorio se proyectaron dos amortiguadores de columna líquida consistentes en dos tanques de agua de cuatro pisos de altura y más de 200.000 litros de capacidad cada uno ubicados en la parte superior del edificio. Fue el primer uso a nivel mundial de este tipo de amortiguadores. Este ejemplo muestra que un edificio que se encuentra muy lejos de cualquier record de altura puede presentar problemas si la forma de la planta y el partido estructural no son compatibles con la altura aunque esta sea moderada. También muestra que un desafío estructural culminó con una interesante innovación tecnológica.

Edificio Turning Torso (Malmo, Suecia, 2005)

Una situación similar se presenta, magnificada, en el edificio “Turning Torso” (Figuras 14 a 17) proyectado por el arquitecto e ingeniero español Santiago Calatrava.

Este edificio de 45 pisos y 190 metros de altura se encuentra en Malmo, Suecia y su forma está basada en la de un torso torsionado (Figura 14). En el momento de su terminación (2005) fue el edificio de departamentos más alto de Europa y el edificio más alto de Escandinavia. El efecto visual de torsión se logra por la rotación de nueve de cubos de cinco pisos de altura cada uno. El último cubo resulta girado 90° respecto al primero. Todo el edificio se desarrolla en voladizo alrededor de un tubo hueco circular de hormigón armado construido con encofrados deslizantes cuyo espesor es de 2 metros a nivel del suelo y de 0.40 metros en el extremo superior. El tubo contiene los ascensores, escaleras y otros servicios. La resistencia del conjunto está reforzada por un “exoesqueleto” metálico que busca asemejarse visualmente a una columna vertebral. La deformación horizontal máxima por viento se estimó en unos 30 centímetros para un viento de cien años de recurrencia.

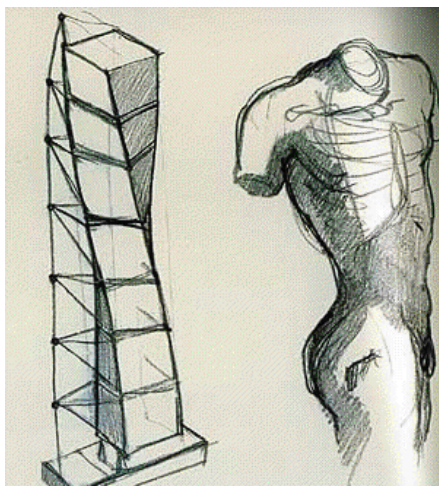


Figura 14: Primeros bocetos

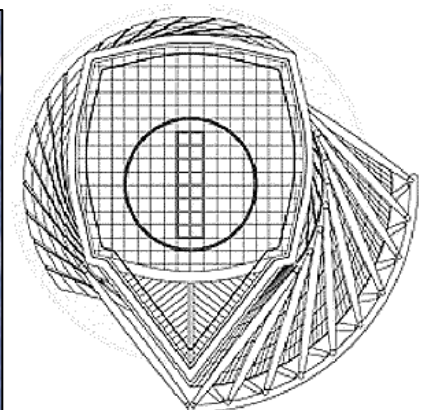
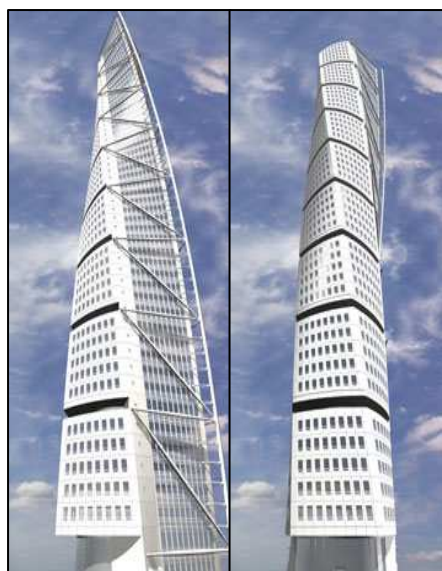


Figura 16: Planta

Figura 15: Maqueta virtual



Figura 17: Turning Torso terminado

Se trata obviamente de un edificio de una altura importante con plantas irregulares en el que, por razones arquitectónicas, se ha decidido asumir un alto costo proveniente de la ineficiencia estructural.

El costo final del edificio fue de 235 millones de dólares y el aumento del mismo necesario para mejorar la respuesta frente al viento originó un gran revuelo en el consorcio financiero. El acero necesario para la construcción habría pasado de una estimación inicial de 1850 toneladas a 4400 toneladas.

Calatrava es un ejemplo claro de un proyectista de arquitectura que crea problemas estructurales cuyas soluciones son costosas. En muchos casos estéticamente interesantes, pero siempre costosas. Algunos colegas europeos suelen hablar con ironía del “coeficiente Calatrava” que es la relación entre lo que efectivamente cuesta una estructura y el valor estimado para la misma en el momento del anteproyecto. Con el mismo tono irónico se comenta que este coeficiente es del orden de tres.

Empresarios de la ciudad norteamericana de Las Vegas han manifestado su intención de construir dos réplicas de este edificio en dicha ciudad pero aumentando su altura de 190 a 250 metros.

De cualquier forma, sorprenderse por el costo de una estructura de Calatrava resulta tan desubicado como hacerlo respecto al de una cartera de Louis Vuitton o un traje de Dolce y Gabbana.

CONCLUSIONES

- a) Varias de las obras expuestas presentaron problemas originados en una ineficiente o inexistente cooperación entre el proyectista de arquitectura y el proyectista de la estructura durante la etapa de concepción.
- b) En los jurados de concursos de “arquitectura” es imprescindible la participación de un ingeniero especialista en estructuras como en los concursos de “ingeniería” lo es la presencia de un arquitecto. La existencia de muchos puentes “baratos” y estéticamente impresentables es un claro ejemplo de lo dicho en segundo término.
- c) Las malas concepciones estructurales originadas en la etapa de concepción son frecuentemente difíciles, caras y lentas de solucionar en etapas posteriores.
- d) En la actualidad se ve con relativa frecuencia la construcción de obras emblemáticas aceptadas desde un principio como “caras”. Sin embargo con el avance del proyecto y de la construcción una mala concepción estructural inicial puede volverlas inesperadamente más caras de lo previsto e incluso de lo aceptable.
- e) Los desafíos técnicos que imponen los arquitectos a los proyectistas de estructuras han conducido la mayoría de las veces a soluciones exitosas. Para la comunidad técnica el resultado final ha sido el avance en las tipologías estructurales, materiales y métodos de cálculo.
- f) La divulgación en la bibliografía y en las universidades de los problemas surgidos en las etapas de proyecto y construcción de estructuras permite evitar que otros recorran caminos que ya se han mostrado como insatisfactorios y resulta fundamental para un avance conjunto tanto de la Arquitectura como de la Ingeniería Estructural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- David Billington, “The Tower and the Bridge. The New Art of Structural Engineering”. Princeton University Press. 1983
- Tony Robbin, “Engineering a New Architecture”. Yale University Press. 1996
- Rowland J. Mainstone, “Developments in Structural Form”. Architectural Press. 1998
- En Internet:
 - <http://en.structurae.de/>
 - http://www2.eng.cam.ac.uk/~den/ICSV9_06.htm