

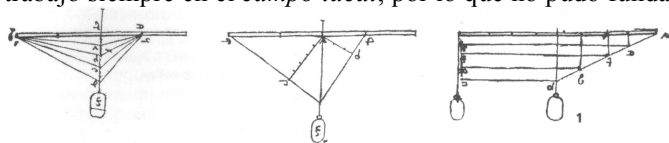
El diseño estructural por medio de los métodos gráficos

Jacobo, Guillermo José

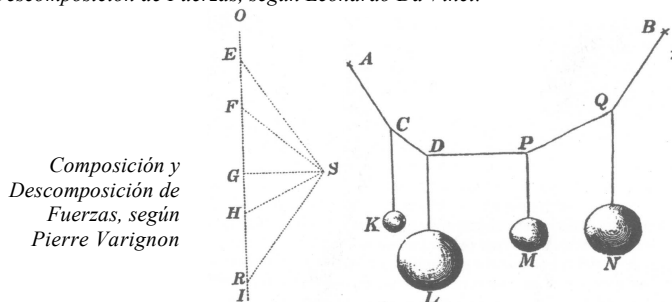
*Cátedra “Estructuras II” - Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Universidad Nacional del Nordeste
 Av. Las Heras N° 727 – (3500) Resistencia – Provincia del Chaco – Argentina - E-Mail: gjjacobo@arq.unne.edu.ar*

ANTECEDENTES

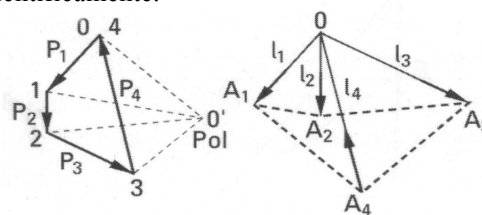
Al inicio del desarrollo de una de las ciencias de la física, la *estática*, se utilizaron los métodos gráficos para la determinación óptima de la situación estructural de los objetos a construir. A fines del siglo XIX se desarrollaron los primeros métodos teóricos de cálculo a aplicarse en la práctica profesional, sin embargo todavía se hacía hincapié en el uso y la enseñanza de los métodos estáticos gráficos. El objetivo básico de la *estática gráfica* es la de *resolver el equilibrio estable de un objeto por medio de dibujos exactos*. La base conceptual de estos gráficos se puede encontrar en el axioma del *Paralelogramo de Fuerza*, el cual fue aplicado ya por *Leonardo Da Vinci* (1452-1519). La *estática gráfica* conocida actualmente se inicia con la publicación de la monografía editada por *Karl Culmann* (1821-1881) en los años 1864-66 de similar nombre. Ya en 1860, *Culmann* dictaba clases de *Estática Gráfica* en la *Escuela Politécnica de Zürich* (Suiza). Según *Cullmann*: la *Estática gráfica* es la aplicación de la nueva geometría para realizar tareas accesibles al campo de la ingeniería que permitan encontrar soluciones a problemas de equilibrio de los objetos. *Culmann* entendía como *Nueva geometría* al tratado desarrollado por *Jean Victor Poncelets* (1788- 1867) sobre *Traite des proprietes projectives des figures* que hoy se conoce como *Geometría Descriptiva*. Para esto, se apoyó *Culmann* en la relación introducida por *Pierre Varignon* en la *Composición y Descomposición de las Fuerzas*. *Culmann* reconoció la relación directa entre el *polígono de fuerzas* y el *funicular de fuerzas* de un sistema de fuerzas, y sus reciprocidades. En su inconcluso tratado sobre *Estática Gráfica-Volumen II*, se intentó fundamentar matemáticamente sobre esta *relación y reciprocidad*, sin embargo este trabajo nunca fue terminado, pues *Culmann* trabajó siempre en el *campo ideal*, por lo que no pudo fundamentarlo científicamente.



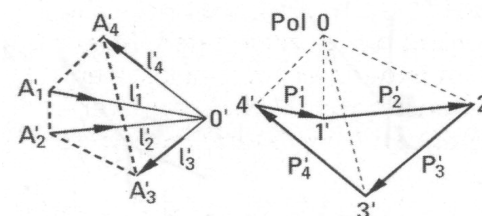
Descomposición de Fuerzas, según Leonardo Da Vinci.



*Composición y
Descomposición de
Fuerzas, según
Pierre Varignon*



*Relación y Reciprocidad entre los polígonos de
fuerzas y los funiculares según Culmann.*

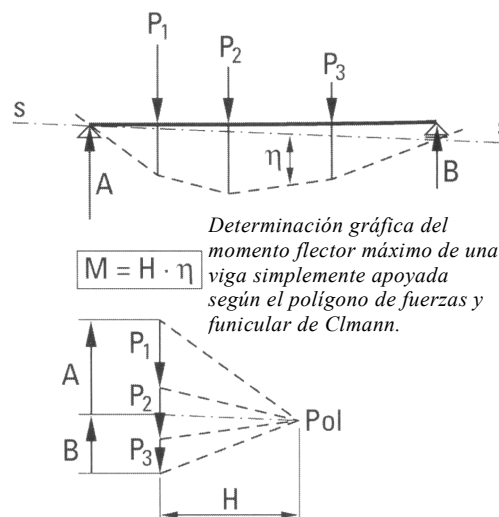


MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolla partiendo de la información brindada por la bibliografía consultada (ver bibliografía). Se estudian antecedentes relacionados a al diseño estructural en obra de arquitectura, evaluando los resultados obtenidos en diferentes experiencias internacionales. Se utilizan los recursos que se crean apropiados para la comprensión de la temática específica, para que sea una herramienta de consulta accesible por parte de cualquier interesado.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La visualización culmanniana del equilibrio de los elementos estructurales por medios gráficos del polígono de fuerzas y del polígono funicular para determinar el momento flexor máximo fue la gran aplicación práctica en el diseño estructural dentro del campo de la ingeniería y es la mejor manera didáctica de visualizar académicamente el comportamiento mecánico de los objetos constructivos, que alcanza su máxima expresión práctica durante el siglo XIX. De esta manera se pudo desarrollar las teorías de cálculo y de visualización gráfica de los entramados estructurales planos tipo *cerchas* (1850 - 75), siendo así que entre 1875-1900 se alcanza al desarrollo total de todos los métodos gráficos actualmente conocidos. El más reconocido de los trabajos clásicos sobre la *estática gráfica*, lo escribió el alumno más destacado de *Culmann*, el *Prof. Dr. Ing. Wilhelm Ritter* (1847 - 1906), quien escribió entre 1888 y 1906 el libro técnico formador de generaciones de ingenieros, editado en cuatro volúmenes,

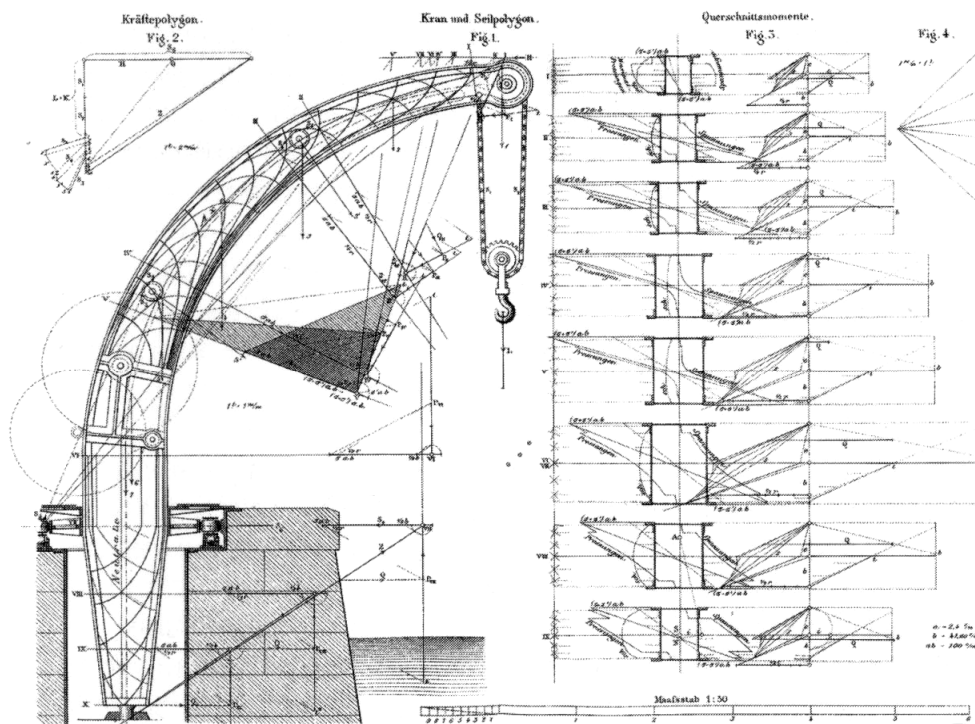


*Determinación gráfica del
momento flexor máximo de una
viga simplemente apoyada
según el polígono de fuerzas y
funicular de Culmann.*

$$M = H \cdot \eta$$

Aplicación de la estática gráfica.

Siendo el primer tratado científico de normas verificadas en la práctica profesional. De este modo, la *estática gráfica*, sirvió al ingeniero en construcciones de manera total y lo transformo también en un diseñador de formas estructurales optimizadas. Se puede afirmar que se racionalizaron las tareas de diseño estructural, según premisas estéticas de cada época, tal como se observa en el siguiente gráfico, *diseño de una grúa de metálica según Ritter*, con determinación de las secciones adecuadas según las alturas analizadas, que expresa todo el espíritu de la revolución industrial a fines del siglo XIX (ver en la siguiente página).

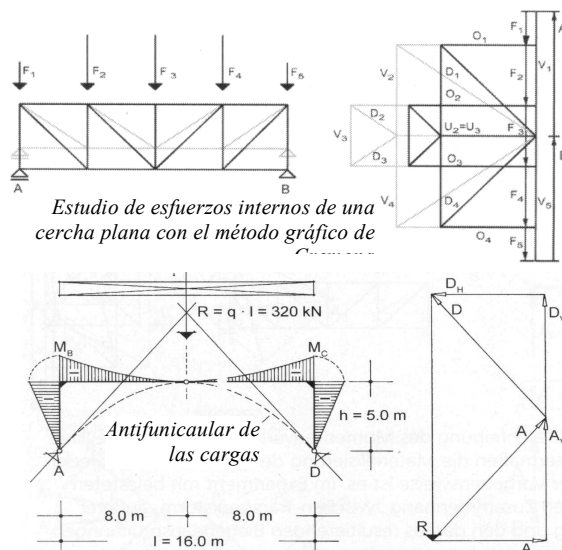


Grúa metálica, según diseño estructural optimizado de Ritter.

Como se comentó, la *estática gráfica* alcanzó su máxima aplicación práctica en las dos últimas décadas del siglo XIX, tal como lo demostró otro destacado alumno de Culmann, Maurice Koechlin (1856 - 1946), cuando analizó gráficamente la Torre de Eifel en París. Sin embargo, a partir de 1900 se verifica que la *estática gráfica* aplicada en la construcción pierde relevancia debido a los avances en los métodos teóricos de cálculo, lo que implicó un nivel mayor de racionalización de los métodos de diseño estructural, pero al mismo tiempo la ruptura de la unidad conceptual entre *Diseño*, *Cálculo* y *Construcción*, conceptos que la *estática gráfica* mantenía unificada en la práctica. De esta manera se evidencia claramente la separación entre las carreras de Ingeniería y de Arquitectura.

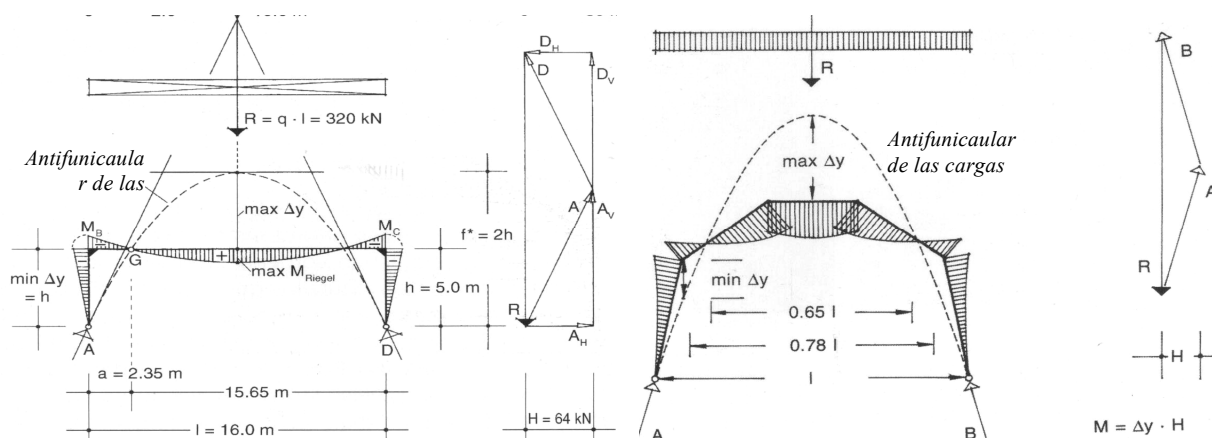
Sin embargo, se sigue utilizando a la *estática gráfica* como herramienta didáctica de enseñanza superior debido a que es posible visualizar y comprender sin cálculos complicados a las estructuras diseñadas o en proceso de diseño, tal como lo demuestra el siguiente gráfico del *método gráfico de Cremona* para determinar los esfuerzos internos de los elementos estructurales-constructivos cuando se varía la altura total del sistema estructural en estudio. Los procedimientos gráficos de diseño estructural tienen una ventaja, como hecho indiscutible, el diseño, el cálculo y la construcción son influenciados entre sí y experimentables como unidad, así son verificables directamente las posibilidades de optimización e implementación inmediata sin esfuerzos teóricos complejos. Un ejemplo de esta situación es el *pórtico triarticulado*, basado en el concepto del antifunicular de las cargas según los principios del polígono funicular y de fuerzas, lo que permite la determinación gráfica de las reacciones de apoyo y los momentos máximos flectores (ver siguiente gráfico).

En el siguiente gráfico izquierdo se puede observar claramente como aumentado la flecha del antifunicular de las cargas, se produce una reducción sustancial de los valores de los momentos flectores máximos, una verticalización de las reacciones, una reducción de las reacciones horizontales y por ende una simplificación constructiva del sistema estructural, pero esto implica la incorporación de dos articulaciones en el travesaño del pórtico, así se alcanza un nivel de optimización superior al del caso anterior. Lo anteriormente comentado también es aplicable en sistemas estructurales hiperstáticos, tal como se observa en el siguiente gráfico derecho



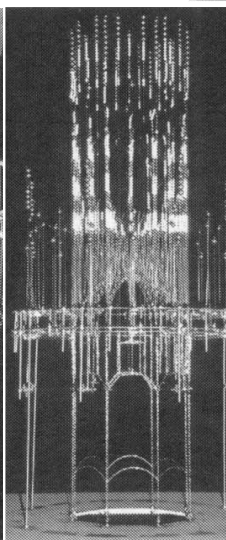
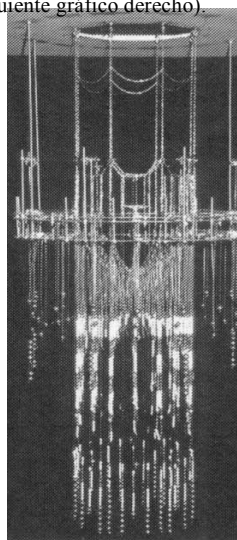
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE

Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2004



Los ensayos con modelos a escala tienen la ventaja didáctica de demostrar el comportamiento estructural de los sistemas constructivos y permiten la comprensión de los conceptos teóricos, algunas veces abstractos, pues son explicados matemáticamente. El caso más simple es el del hilo colgado de ambos extremos, al que se le aplica una carga externa. Esto puede ser extrapolable, su comportamiento, al caso de una viga simplemente apoyada (ver el siguiente gráfico). Se observa la relación entre la solicitación externa, la deformación del elemento estructural y el máximo momento flector resultante. Para el dimensionamiento de un elemento estructural es importante el valor y la distribución del momento flector, sin embargo los esfuerzos internos son dificultosos de imaginarlos en cuanto a valores y distribución, por lo que la forma de la deformación del objeto estudiado permite determinar los puntos críticos y su comportamiento global, sin necesidad de aplicar cálculos complejos. Así se verifica que con una analogía es posible realizar un diseño estructural cualitativo. La coincidencia de la forma estructural y los esfuerzos internos implica sin duda la alta calidad estética del diseño estructural. Esto lo demuestran los objetos constructivos estructural que se corresponden con el sentido de las cargas y su correspondiente deformación como forma final del objeto han dejado su marca en la historia de la arquitectura, tal es el caso de las obras de Antonio Gaudí en Barcelona (ver el siguiente gráfico derecho).

También, uno de los objetivos de la estática gráfica, es el análisis de los objetos arquitectónicos con altos valores históricos, así los estudiantes, tanto de ingeniería como de arquitectura, pueden analizar los comportamientos estructurales como herramienta académica. Tal es el caso de las estructuras de tracción pura utilizadas para reconstruir estructuralmente las edificaciones antiguas a base de arcos, cúpulas y bóvedas, sin aplicación de cálculos complejos y abstractos (ver los siguientes gráficos, a la derecha y a la izquierda abajo en esta página y en la página siguiente). Esta situación se



Parque Guell,
Barcelona.
Construido y
diseñado
experimentalmente por
Antonio Gaudí.
Análisis del comportamiento
estructural de los muros de
contención

Izquierda: Modelo de hilos colgados de la cúpula de la catedral de la ciudad de Aachen, Alemania, desarrollado por los estudiantes de la Universidad Politécnica de Aachen, Alemania.

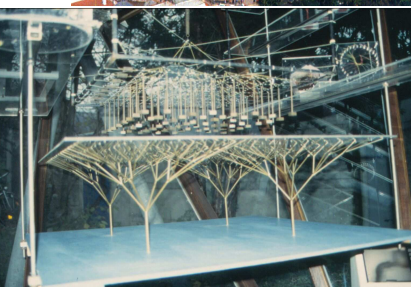
Derecha: Imagen invertida del modelo desarrollado, donde se observa claramente, la forma final global del objeto arquitectónico según la forma de la deformada de la estructura.

verifica en la iglesia de la Sagrada Familia, en Barcelona, España, donde trabajó Antonio Gaudí, un práctico por excelencia, que no diseñaba sus obras, sino que las construía directamente y experimentaba con las formas constructivas, hasta alcanzar la optimización de las mismas por medio de la prueba y el error a escala real. Sin embargo a partir de 1950, el alemán Frei Otto, aplicó los conceptos de Gaudí, pero de manera científica, experimentando con modelos a escala, sino que luego analizando matemáticamente el comportamiento estructural alcanzado, para fundamentar futuros emprendimientos, tal es el caso del Complejo Olímpico de Múnich, Alemania, desarrollado entre 1969 y 1972, por medio de modelos de ensayos a partir de conceptos de composición y descomposición de fuerzas (ver las siguientes fotos y gráficos en la siguiente página).

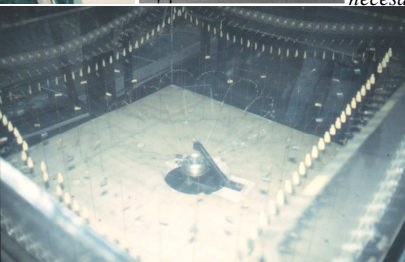
Iglesia de la Sagrada Familia, Antonio Gaudí, Barcelona, España.



Modelo de Ensayo de la cubierta del Aeropuerto Internacional de Stuttgart, Alemania. Institut für Leichttragwerke-Universität zu Stuttgart, Dr. Frei Otto. Estructura a compresión pura, según el principio del antifunicular de las cargas.

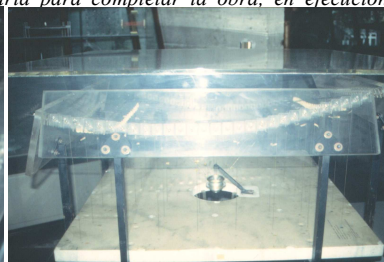


Modelo de Ensayo para la cubierta de la Piscina Olímpica, München, Alemania. Institut für Leichttragwerke-Universität zu Stuttgart, Dr. Frei Otto. Estructura de doble curvatura a tracción pura, según el principio del hilo colgado de dos extremos.

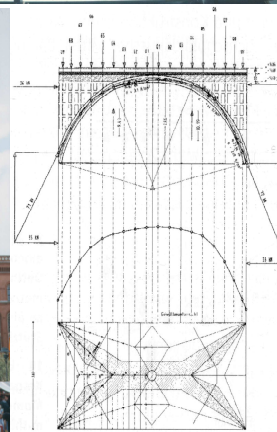
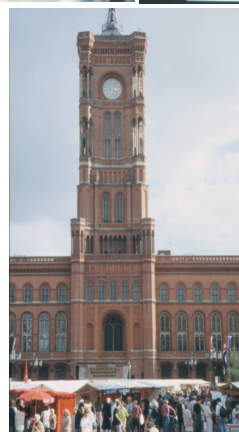


Aunque la obra sigue inconclusa, en 1970-80

se realizaron los estudios de comportamiento estructural con modelos a escala de hilos y cargas proporcionales para determinar la forma óptima global, pues Gaudí no realizaba proyectos previos, sino que experimentaba hasta alcanzar la forma ideal. Por medio de estos estudios se consiguió desarrollar la documentación técnica necesaria para completar la obra, en ejecución



Actualmente se utiliza a la *estática gráfica* por medio de sistemas informáticos computarizados tipo CAD para análisis de estructuras complejas, pues así se puede visualizar los comportamientos estructurales de obras diseñadas y construidas, como *lenguaje ingenieril*. Se puede citar el caso de las cúpulas de la escalera principal del *Palacio Municipal de la ciudad de Berlín* (Roten Rathauses), *Alemania*. Estas cúpulas se encontraban revestidas con ladrillos a la vista y no permitían observar, si la refuncionalización y refacción de las salas superiores sobre dichas cúpulas, producirían algún tipo de movimientos y asentamientos dañinos debido a sobrecargas no admisibles que podrían causar algún tipo de inseguridad constructiva-estructural. Así, por medio de *modelos gráficos digitales* se estudiaron diversos estados de cargas para determinar los estados críticos de las cúpulas en servicio, sin realizar cálculos complejos (ver el gráfico derecho).



Roten Rathauses, Berlín, Alemania. Análisis de la capacidad estructural de la cúpula sobre la escalera principal bajo la torre.

CONCLUSIÓN

El aumento desmedido de la racionalización de las tareas ingenieriles en la etapa final de la *estática gráfica* aplicada a la construcción (1885-1910) llevo a que la misma se aplicada en procedimientos independientes y aislados, que poseían algunas características de recetas formales. A partir de 1980, cuando se inicia el proceso de uso generalizado de la informática, tanto en el campo de la arquitectura como en el de la ingeniería, como herramienta de trabajo, se transformo el calculista como eje central del proceso de diseño, por medio de los paquetes informáticos de calculo y planillas de cálculo electrónicas, perdiendo espacio el factor diseño y el estético de la forma estructural. Por lo tanto, es necesario recuperar a la *estática gráfica* aplicada en la construcción de objetos arquitectónicos, como factor didáctico de enseñanza superior técnica, pero con las bondades que brinda actualmente la informática. Este trabajo pretende ser una contribución académica para las carreras de Arquitectura e Ingeniería de la UNNE.

BIBLIOGRAFÍA

- DÖRING, Wolfgang (1995), *Konstruktion und Form*, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, Alemania.
 FÜHRER, Wilfried (1995), *Der Entwurf von Tragwerken*, Rudolf Müller Verlag, Köln, Alemania.
 JACOBO, Guillermo (1995-1996; 2000-2001), *Pasantías de Investigación en el Institut für Tropentechnologie-Fachhochschule Köln*, Alemania.
 LEDER, Gerhard (1985), *Hochbaukonstruktionen – Band I: Tragwerke*, Springer Verlag, Berlin, Alemania.