

# Los modelos de medición y su contribución al progreso de la ingeniería civil y de la construcción

Bill Addis

Technical University Munich

## Resumen

Los modelos a escala reducida se han utilizado con muchos objetivos en la mayoría de las disciplinas de la ingeniería civil y de la construcción. Ayudaron a los maestros constructores a comunicar a los artesanos el diseño de complejas armaduras de cubierta, puentes y grandes estructuras de fábrica. Desde principios del siglo XVIII, los ingenieros teóricos los emplearon para comprender mejor los problemas técnicos; esto, a su vez, supuso un gran beneficio para los proyectistas en la práctica. Los ingenieros también usaron modelos en el proyecto de grandes construcciones cuando la teoría disponible se reveló insuficiente o inadecuada. Los modelos de medición se han utilizado desde mediados del siglo XVIII y su uso ha contribuido de manera considerable al progreso de la ingeniería. El presente artículo sostiene que la contribución de estos modelos al progreso de la ingeniería es al menos tan significativa como los avances teóricos que, usualmente, se presentan como el principal estímulo del progreso.

## Abstract

Reduced-scale models have been used for many purposes in most disciplines of civil and building engineering. They helped master builders to communicate to craftsmen the design of complex timber roof trusses and bridges and of large masonry structures. Since the early-18th century, they have been used by engineering scientists to develop better understanding of engineering phenomena which, in turn, has benefited designers. They have also been used directly by engineers to help design large and unprecedented constructions when it is felt that the engineering theory available was inadequate. Such measurement models have been used since the mid-18th century and their use has made a significant contribution to progress in engineering. The paper argues that the contribution of measurement models to achieving progress is at least as significant as engineering science which, transitionally, has been portrayed as the main stimulus for progress.

## EL PROGRESO EN LA INGENIERÍA CIVIL Y DE LA CONSTRUCCIÓN

La idea de progreso está hoy en día integrada en nuestra forma de pensar sobre la ciencia, la tecnología y la ingeniería: se trata de hacer las cosas mejor, ya sea con mayor impacto, con menos recursos, más rápido o más barato. Aunque no hay reglas precisas sobre cómo lograr el progreso en el futuro, un estudio del pasado indica que hay dos actividades esenciales: pensar y experimentar. Aunque la ciencia experimental moderna no comenzó hasta el Siglo de las Luces, el pensamiento y la experimentación se remontan a muchos miles de años atrás y condujeron a numerosos y grandes logros mucho antes del desarrollo de la ciencia moderna. Desgraciadamente, prácticamente no existen registros del pensamiento o la experimentación de la ingeniería en la antigüedad. Incluso los extraordinarios cuadernos de Leonardo revelan pocos detalles sobre experimentos prácticos. Sin embargo, tenemos abundantes pruebas de que los ingenieros de la antigüedad mejoraron lo que se había logrado anteriormente: puentes de fábrica, canalización de vías fluviales, grandes edificios públicos como las termas y anfiteatros romanos, así como templos, iglesias y catedrales. Las grandes historias de la tecnología están llenas de ejemplos. Debemos basarnos en la evidencia de las construcciones que sobreviven hoy en

día, y sólo podemos imaginar cómo se logró un progreso tan notable (Addis 2007).

El presente trabajo se centra en los progresos realizados en la época moderna, desde principios del siglo XVIII, cuando el método científico empezó a evolucionar rápidamente y los científicos comenzaron a publicar sus ideas y logros en libros y publicaciones periódicas. Y se centra sobre todo en la contribución al progreso realizada por la experimentación, especialmente los experimentos llevados a cabo con modelos físicos a escala reducida cuyo comportamiento se registraba mediante la realización de mediciones —de ahí el uso de la frase «modelo de medición», una traducción de la palabra alemana *messmodell*, ampliamente utilizada.

Conviene considerar los progresos de la ingeniería civil y de la construcción en tres apartados principales (Addis 1990, Addis 2003):

- Progreso en la práctica de la construcción
- Progreso en los métodos de proyecto o cálculo
- Avances en la ciencia de la ingeniería

En aras de la comodidad y la brevedad, la mayor parte de las ilustraciones y los ejemplos se han extraído de diversas ramas de la ingeniería estructural, excepto cuando se indica.

### Progreso en la práctica de la construcción

La meta u objetivo de los procesos de construcción es claramente conseguir que se construya algo. Abarcan una gran variedad de tecnologías y habilidades, cuyas mejoras en cualquiera de ellas indicarían progreso. Entre ellas se encuentran

- la tecnología de los materiales: los materiales utilizados, sus propiedades y calidad, los métodos de fabricación, conformación y conexión, la resistencia a la corrosión, la putrefacción, el fuego, etc.
- el tipo o la técnica de construcción, como la disposición de los nervios y plementerías en una bóveda de fábrica, la disposición de los maderos en una armadura de madera, o la disposición de la armadura en una estructura de hormigón
- los conocimientos y habilidades y los niveles de destreza de la mano de obra empleada en los procesos de construcción, por ejemplo, el saber cómo o «know-how» (Hall 1978);
- los indicadores de logros técnicos: la longitud de la luz, la altura de una estructura, la esbeltez o el peso de una estructura, la eficiencia de los recursos; las relaciones estructurales, como la relación entre la luz y la altura de un arco o una bóveda, la relación entre la luz y el canto de una viga o una celosía, la resistencia o la rigidez específicas
- la precisión y la coherencia con la que se construyeron las estructuras y los edificios; los conocimientos de medición y topografía;
- los tipos de instalaciones y maquinaria utilizados durante la construcción, y su capacidad;
- factores comerciales como la productividad, el coste y la rapidez de ejecución.

Con la ayuda de una lista de criterios como estos, es posible identificar las construcciones que representan una mejora o un progreso en comparación con las obras anteriores. Así, también es posible identificar a determinados ingenieros o proyectos que pueden considerarse innovadores o adelantados a su tiempo.

Desde la antigüedad, las innovaciones y mejoras han dependido de la realización de experimentos para probar las diferentes ideas. Este proceso se denomina a veces de «prueba y error,» pero esto suena denigrante, como si el proceso se llevara a cabo sin pen-

sar (Addis 1990). Una expresión más adecuada es «aprender de la experiencia.» Esto puede incluir todo tipo de pruebas sobre las innovaciones y la realización de experimentos para verificar un posible resultado o simplemente para ver «qué pasa si...». La prueba definitiva de la experimentación en la práctica constructiva es si realmente la obra se construye. La naturaleza de las mejoras, las innovaciones y los avances tienen un carácter secundario.

Por lo general, los experimentos realizados para probar nuevas ideas relacionadas con la práctica de la construcción implicaban (e implican) el uso de modelos a escala reducida de «la obra real», sencillamente porque la realización de pruebas en artefactos a escala real es mucho más lenta y costosa que a pequeña escala.

### Progreso de los métodos de proyecto en ingeniería

Al igual que en la práctica y los procesos de construcción, el objetivo de los métodos de proyecto o cálculo en ingeniería es conseguir que se construya algo. Esto influye en la naturaleza de cualquier experimentación que pretenda ser innovadora, sobre todo porque los clientes de la construcción suelen tener aversión al riesgo y no quieren pagar por la innovación en sus proyectos.

El proyecto de ingeniería en la construcción consta de tres elementos distintos (Addis 1999):

- Proponer proyectos para las necesidades específicas de un proyecto;
- Comunicar el cálculo a los artesanos y constructores y proporcionarles las dimensiones y especificaciones de los materiales, antes de que comience la construcción;
- Lograr un nivel de confianza suficiente en que el cálculo propuesto es seguro y funcionará como se pretende, y compartir esta confianza con todo el equipo del proyecto. En la actualidad, esto podría describirse como la reducción del riesgo a un nivel aceptable.

El apartado segundo puede incluir el uso de dibujos, plantillas de madera, modelos de madera para mostrar los detalles de la construcción, así como descripciones o especificaciones precisas de los materiales necesarios, incluidas las propiedades mecánicas y químicas y otras características relevantes.

La confianza en un proyecto puede lograrse de muchas maneras, entre ellas:

- Utilizar un cálculo (anterior) bien probado
- Basar el cálculo en una práctica habitual (por ejemplo, utilizando normativas de cálculo establecidas)
- Utilizar cálculos y combinarlos con precedentes, por ejemplo, aumentar la luz de una armadura de cubierta en una pequeña cantidad.
- Utilizar procedimientos de cálculo bien establecidos (que no son infalibles si la nueva estructura es diferente de manera no prevista)
- Basar el cálculo en la experiencia de un ingeniero individual (difícil de convencer a otros ingenieros)
- Utilizar cálculos basados en la ciencia de la ingeniería establecida
- Ensayar un prototipo de tamaño real
- Realizar experimentos con un modelo a escala reducida.

El uso de estos criterios puede servir para determinar el grado de innovación de un proyecto en concreto y poner de manifiesto los progresos realizados. Desgraciadamente, de muchas construcciones se conserva poca información sobre el procedimiento preciso de cálculo utilizado para una estructura concreta.

### **Progreso de la ciencia de la ingeniería**

A diferencia de la práctica de la construcción y los métodos de cálculo, el objetivo de la ciencia de la ingeniería no es conseguir que se construya algo. Se trata de desarrollar una mejor comprensión del mundo: las leyes que rigen el comportamiento de los materiales, las estructuras y los fluidos en general, más que en un ejemplo concreto. Por supuesto, esta comprensión ha llevado a menudo a una mejor comprensión de ejemplos particulares y, de este modo, ha contribuido en gran medida al progreso de la práctica de la construcción y de los métodos de cálculo.

El progreso de la ciencia de la ingeniería ha seguido un patrón similar al de otras ciencias como la química y la física. La revolución de las ciencias tuvo lugar a finales del siglo XVII y principios del XVIII, el Siglo de las Luces. En su centro se encontraba el uso de experimentos para generar datos que pudieran estudiarse con el objetivo de revelar patrones y leyes, y también para

probar de forma práctica ideas (teorías) formuladas para ayudar a explicar lo que sucedía, en lugar de simplemente describir lo que sucedía. Estos experimentos se realizaban generalmente sobre modelos físicos simplificados y a escala reducida del mundo real.

Sin embargo, es una falacia creer que las teorías fueron anteriores al descubrimiento de patrones y leyes. Por ejemplo, la teoría de Euler sobre el pandeo de los pilares (1757) se publicó unos 30 años después del trabajo de Musschenbroek (1729), que descubrió la relación entre la carga de pandeo y la longitud tras centenares de experimentos (Addis 2021a, capítulo 4). Asimismo, es erróneo creer que la práctica de la ingeniería siguió a la formulación de las teorías de la ingeniería; las teorías se formularon para ayudar a explicar comportamientos y fenómenos que ya se habían observado y utilizado de forma práctica (Addis 1990).

Tal vez la mayor contribución debida al progreso de la ciencia de la ingeniería haya sido la de facilitar la reflexión sobre los fenómenos de la ingeniería y su comunicación a otros ingenieros. Es mucho más eficaz explicar a alguien el comportamiento de un sistema de ingeniería, como el flujo de agua en un canal, o la respuesta de una estructura a las cargas sísmicas, en forma de algunas ecuaciones matemáticas, que describir los fenómenos de forma cualitativa. La forma matemática se convierte así en una representación de los fenómenos del mundo real. En el lenguaje moderno, la ciencia proporciona un modelo matemático del mundo real.

### **EL EMPLEO DE MODELOS EN LA INGENIERÍA CIVIL Y DE LA CONSTRUCCIÓN**

Hoy en día, muchos ingenieros utilizan la expresión «modelar una estructura» para describir el proceso antes conocido como «análisis estructural.» En cierta medida, esto se debe a la utilización de ordenadores para realizar las operaciones matemáticas. En primer lugar, el ingeniero tiene que proporcionar al ordenador una disposición espacial de los elementos estructurales y la naturaleza de las conexiones entre ellos. A este modelo espacial hay que añadir un modelo de las cargas que debe soportar la estructura. Por último, el ordenador debe disponer de modelos de cada uno de los materiales que componen la estructura: sus propiedades físicas, desde la densidad y la rigidez hasta, quizás, la variación de su límite elástico con la temperatura.

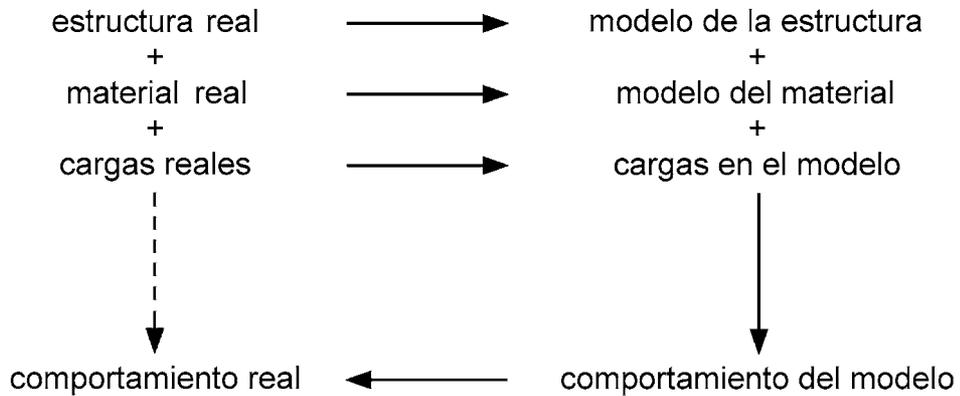


Figura 1. Relación entre los modelos físicos o teóricos y el comportamiento en el mundo real.

Estos tres tipos de modelos pueden interactuar de manera que se supone es una representación exacta, o modelo, de cómo se comportarían los equivalentes en el mundo real de los modelos matemáticos o a escala reducida (Figura 1).

La naturaleza de este proceso de modelización de las estructuras y del comportamiento estructural en un ordenador tiene su origen en el uso de modelos físicos utilizados en el cálculo de estructuras y, de hecho, de muchas otras obras de ingeniería como armas y barcos. Los modelos han sido utilizados por los proyectistas desde los albores de la ingeniería.

### Los modelos en la ciencia de la ingeniería y su finalidad

Los modelos físicos son esenciales para los procesos experimentales que subyacen al estudio de las ciencias de la ingeniería.

La realización de experimentos científicos a escala real suele presentar dos inconvenientes: el objeto o sistema estudiado es demasiado grande para trabajar en un laboratorio y, además, es demasiado complejo, con demasiadas variables o parámetros.

El experimento científico clásico, por tanto, suele ser a escala reducida y simplificada; por otra parte, en el experimento, idealmente, sólo se varía un parámetro a la vez y se observa el efecto de este cambio en el sistema. Después, se fija este primer parámetro y se varía otro diferente. Estos estudios paramétricos

pretenden descubrir y ayudar a explicar las contribuciones de las distintas variables al comportamiento del conjunto. Aunque los modelos físicos de los experimentos científicos son representaciones del mundo real, se idealizan y simplifican para que la investigación pueda llegar a una solución.

Los modelos físicos utilizados en los experimentos científicos proporcionan una representación fiel de los fenómenos del mundo real, aunque muy simplificada en comparación con las condiciones reales que se dan en los proyectos de construcción. Ayudan a desarrollar una comprensión de los fenómenos en términos cualitativos y cuantitativos, y facilitan así la reflexión y la comunicación sobre los fenómenos.

El papel de los modelos físicos y teóricos en la ciencia se explora con gran detalle en los estudios clásicos del tema (Hesse, 1966; Frigg & Hartmann 2006).

### Los modelos en el proyecto de ingeniería y su finalidad

Los modelos físicos a escala reducida que se utilizan en el proyecto de ingeniería son de dos tipos: pueden formar parte de un estudio para identificar cuál de varios proyectos alternativos es el mejor para un propósito determinado; o pueden servir para estudiar el comportamiento y el rendimiento de un proyecto casi terminado para, por ejemplo, un puente o una presa.

En cada caso, el modelo es una representación, tan exacta como sea necesario, de una obra que aún no

existe, pero que ha sido concebido en términos generales según el problema para el que se busca una solución técnica. El proceso de creación de un modelo de este tipo difiere de la creación de un modelo para un experimento científico de ingeniería (Addis 1988).

Desde mediados del siglo XVIII, los modelos físicos han sido utilizados por los ingenieros proyectistas de dos maneras (Addis 2005, 2013):

- Para ayudar en el cálculo de una estructura concreta, un determinado puente o presa, por ejemplo.
- Para estudiar una estructura genérica con el objetivo de probar los procedimientos de cálculo existentes, especialmente cuando se utilizan en una situación nueva, o para ayudar a desarrollar nuevos procedimientos de cálculo que sean mejores que los existentes.

En cualquier caso, el objetivo de utilizar modelos físicos para el cálculo de ingeniería es probar o explorar cualquiera de los aspectos del proyecto de ingeniería resumidos anteriormente, como por ejemplo

- Definir la forma y las dimensiones de una estructura;
- Aumentar la confianza en un proyecto propuesto para una estructura, especialmente uno que pretende mejorar o ir más allá de la experiencia pasada, es decir, uno que es innovador o, de alguna manera, sin precedentes;
- Corroborar los estudios teóricos (modelos matemáticos) de una propuesta de proyecto de una estructura, cuando se considere que la teoría puede ser inadecuada o no estar probada.

## **EL TAMAÑO Y LOS MODELOS PARA EL PROYECTO DE INGENIERÍA**

Cuando el uso de modelos a pequeña escala forma parte de un proceso cuyo objetivo es la construcción de una obra real, a tamaño real, como un puente, una presa o un muro portuario, es vital entender cómo los resultados obtenidos a pequeña escala pueden escalarse al tamaño real.

Los diversos fenómenos físicos que se dan en la construcción y la ingeniería civil pueden dividirse en dos tipos:

- Los que son independientes del tamaño (por ejemplo, una cadena colgante, la estabilidad de un arco);
- Los que NO son independientes del tamaño (por ejemplo, la flexión, el pandeo, las vibraciones elásticas, la presión del viento, el flujo de agua, la transmisión de las ondas sonoras).

### **Modelos independientes del tamaño**

Es un hecho fortuito que la forma más sencilla de construcción —apilar una piedra sobre otra— sea un fenómeno independiente de la escala. La estabilidad de un muro, o de una columna en un templo griego, frente a las cargas laterales del viento sólo depende de la geometría de la estructura: si todas las dimensiones se aumentan, digamos, por diez, la seguridad de la estructura frente al vuelco sigue siendo la misma.

La forma de una cadena colgante también es independiente del tamaño. Esto es significativo para la estabilidad de los arcos, ya que, siguiendo la ley de Hooke del arco, un arco de fábrica (que actúa en compresión pura) es estable si su forma es la de la catenaria correspondiente (que actúa a tracción pura), pero invertida. De ahí que la estabilidad de los arcos de fábrica —y de las bóvedas, cúpulas y arbotantes— sea también independiente de la escala. Aunque Hooke formuló su ley en el decenio de 1670, sus implicaciones prácticas para la construcción de fábrica se conocían desde la época romana y se demostraron espectacularmente en las catedrales góticas. La estabilidad bajo la acción de la gravedad de un modelo de una catedral de tres metros de altura daría confianza para construir el edificio real de 30 ó 60 metros de altura (Addis 2021a, capítulo 2). Aunque simular la acción de la carga del viento habría sido un reto en el siglo XIV, no se nos escapa que se podría haber aplicado una suave presión lateral a una maqueta para demostrar un cierto rango de estabilidad segura, aunque no tenemos pruebas de que se hiciera.

Los modelos físicos de las complejas uniones de los puentes de madera y de las armaduras de cubierta se utilizaron ampliamente, al menos desde el siglo XVII, tanto para elaborar la compleja geometría tridimensional como para servir de enseñanza a los aprendices de su arte y, en lugar de dibujos, para comunicar la compleja geometría a los carpinteros que



Figura 2. Modelo original realizado por los hermanos Grubenmann del “puente de Trogen” (hacia 1745-1755), Grubenmannmuseum, Teufen, Suiza. (Imagen: Dirk Bühler)

construirían las armaduras (Addis 2021a, capítulo 1) (figura 2).

El funcionamiento de un modelo mecánico también es independiente de la escala, al menos dentro de un cierto rango, hasta el momento en que el efecto de las fuerzas de fricción tiene un efecto desproporcionado sobre, por ejemplo, la capacidad de giro de los ejes y los engranajes (Figura 3).

### Modelos dependientes del tamaño

Desde la antigüedad se sabe que algunos modelos no pueden ampliarse de forma fiable en tamaño —Vitruvio lo menciona con respecto a algunas máquinas de asedio militares (Addis 2021a: Capítulo 1, Apéndice 1). Galileo fue el primero en enunciar la ley del cuadrado-cubo que demuestra, por ejemplo, que los esqueletos de los animales no pueden ser escalados linealmente ya que la resistencia y la masa varían, respectivamente, como el cuadrado y el cubo de la escala lineal (Galileo 1638: 130-132; Addis 2021a: Apéndice 2). Leonard Euler fue el primero en dar una discusión rigurosa sobre el escalado en su artículo titulado «Una regla simple para determinar la resistencia de un puente o estructura similar, sobre la base de la resistencia conocida de un modelo» (Euler 1776; Addis 2021a: Capítulo 4, Apéndice 3).

La extrapolación de los resultados de los ensayos con modelos a obras de escala real se divide en tres categorías:

- Cuando se conocen reglas de proyecto fiables (por ejemplo, en la antigüedad para el proyecto de ballestas cuyas dimensiones podían obtenerse en función de la masa del proyectil).
- Cuando se conoce la ciencia de la ingeniería correspondiente (por ejemplo, la resistencia de las vigas, desde el decenio de 1730, mediante la cual se podía predecir la resistencia conociendo las dimensiones del modelo y de la viga a tamaño real, y la resistencia del material).
- Cuando la ciencia de la ingeniería NO se conoce (por ejemplo, en la dinámica de fluidos, desde el decenio de 1860, y el pandeo de las cáscaras de hormigón en el siglo XX). En estos casos pueden emplearse leyes de semejanza, utilizando constantes adimensionales (Addis 2021a: Capítulo 13).

### TIPOS DE MODELOS EN EL PROYECTO DE INGENIERÍA

Los modelos físicos que han utilizado los ingenieros de diseño se dividen en tres grandes categorías, aunque suele haber cierto solapamiento entre ellas:

- modelos que prueban si algo funciona, de forma mecánica
- modelos construidos a pequeña escala que determinan la forma de una estructura a tamaño real
- modelos que pretenden replicar, en miniatura, cómo se comportará una estructura grande

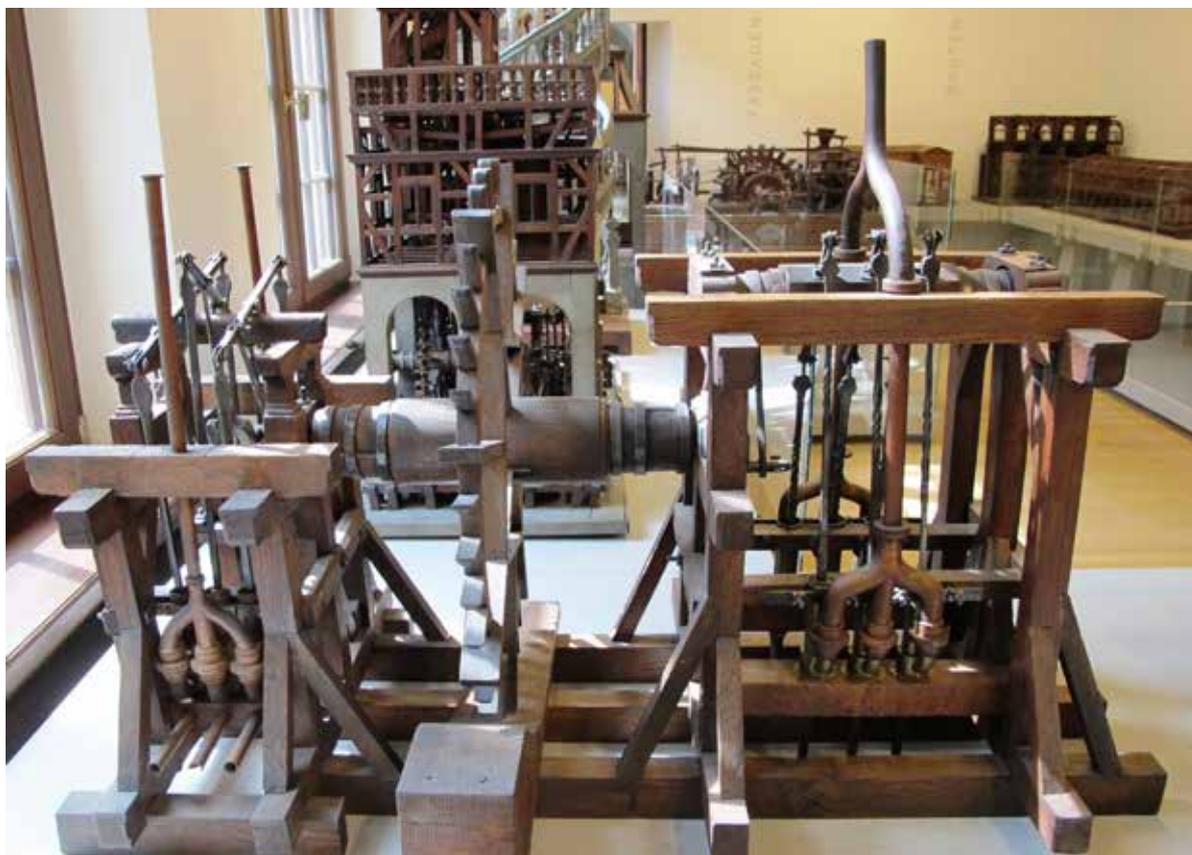


Figura 3. Modelos de dos bombas de agua realizados por Caspar Walter en 1754, Maximilianmuseum de Augsburgo (Kunstsammlungen und Museen Augsburg, Inv.-Nr. 9753) (Imagen: Dirk Bühler)

cuando esté sometida a las cargas que deberá soportar a escala real.

### Modelos mecánicos

En la «cámara de modelos» de Augsburgo, en el sur de Alemania, se conserva una colección especialmente rica de modelos mecánicos. Fueron realizados principalmente por Elias Holl (1573-1646) y Caspar Walter (1701-1769), principales ingenieros civiles y mecánicos del famoso sistema de distribución de agua de Augsburgo. Entre la colección de 126 modelos se encuentran bombas, torres de agua, ruedas hidráulicas, compuertas, puentes, armaduras y diversas piezas de maquinaria. Otras colecciones similares de la época incluyen grúas, perforadoras, martinets y otros equipos de construcción. Aunque no hay pruebas de que estos modelos se utilizaran en experimen-

tos para determinar el comportamiento estructural o las capacidades de las máquinas de forma cuantitativa, lo cierto es que eran mucho más que adornos. Servían como «proof of principle», prueba de funcionamiento, y demostraban su ejecución a los constructores, así como su eficacia a los clientes potenciales (Addis 2021a: Capítulo 1).

En tiempos más recientes, el gran ingeniero japonés Mamoru Kawaguchi (1932-2019) utilizó grandes maquetas mecánicas para probar la construcción de varios de sus enormes estadios y edificios de gran envergadura, por ejemplo los que utilizaban su sistema Pantadome (Figura 4).

### Modelos de búsqueda de formas ('form finding')

Como se ha mencionado anteriormente, los proyectistas de varios tipos de estructuras en las que la ac-

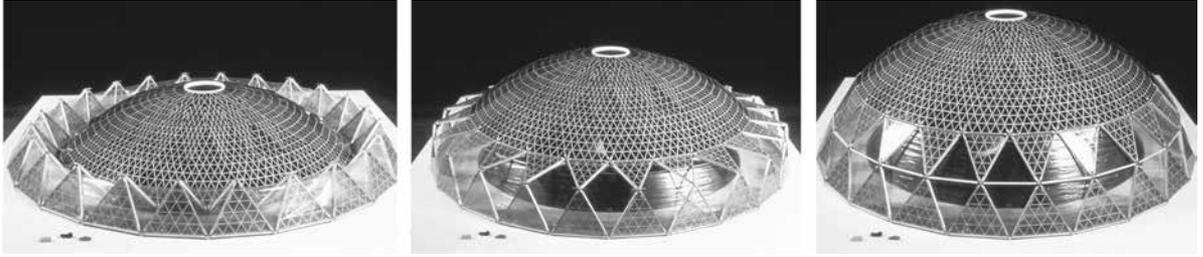


Figura 4. Modelo genérico a pequeña escala (1:100) para estudiar el mecanismo mecánico y el procedimiento de montaje del Pantadome. (Imagen: Mamoru Kawaguchi)

ción estructural es tracción pura pueden utilizar modelos pequeños para determinar la geometría de una estructura a tamaño real, ya que la forma es independiente del tamaño. Así lo hizo, por ejemplo, Thomas Telford para determinar la forma precisa de las cadenas de su puente colgante del estrecho de Menai a principios del decenio de 1820.

En el decenio de 1960, el arquitecto Frei Otto trabajó con varios ingenieros para crear varias estructuras a base de redes de cables tensados que estaban basadas en experimentos con modelos a pequeña escala realizados con membranas y películas de jabón. Entre ellas se encuentran el Pabellón del Instituto de Estructuras Ligeras de Frei Otto en la Universidad de Stuttgart (Figura 5), el Pabellón de Alemania en la Expo 67 de Montreal y los estadios de los Juegos Olímpicos de Múnich de 1968.

Haciendo uso de la ley de Robert Hooke de la catenaria invertida, muchos ingenieros y arquitectos han determinado la forma de las estructuras de compresión creando modelos colgantes e invirtiéndolos: estructuras como bóvedas de fábrica (Antoni Gaudí),

cáscaras de hormigón (Heinz Isler) y una cáscara de rejilla de madera (Frei Otto con Ove Arup para el Multihalle en el Bundesgartenschau de Mannheim en 1973) (Addis 2004, 2014) (Figura 6).

Una característica clave de todas estas estructuras es que el proceso de modelado no sólo crea una forma —cualquiera puede crear una forma aleatoria— sino que crea una forma que funciona perfectamente como una estructura sujeta a cargas gravitatorias.

También es importante señalar que los modelos de *form finding* no se utilizan ni se utilizaron nunca como único medio para determinar la forma de una estructura. Los ingenieros también realizaban cálculos en paralelo utilizando modelos teóricos; y a menudo, los datos geométricos recogidos utilizando un modelo físico se utilizaban para corregir el proceso de modelado teórico, y viceversa. Además, los modelos de *form finding* suelen representar sólo dos tipos de carga: la gravedad y las fuerzas internas de pretensado. Si se imponen otras cargas, por ejemplo el viento, la forma de equilibrio cambia en respuesta a las nuevas cargas. En la práctica, la acción de las cargas de viento se calcula



Figura 5. Pabellón de Instituto de Estructuras Ligeras (IL) en la Universidad de Stuttgart (a) Modelo de lámina de jabón con un solo lazo de cuerda. (b) La red de cables en construcción. (Imágenes: Berthold Burkhardt)

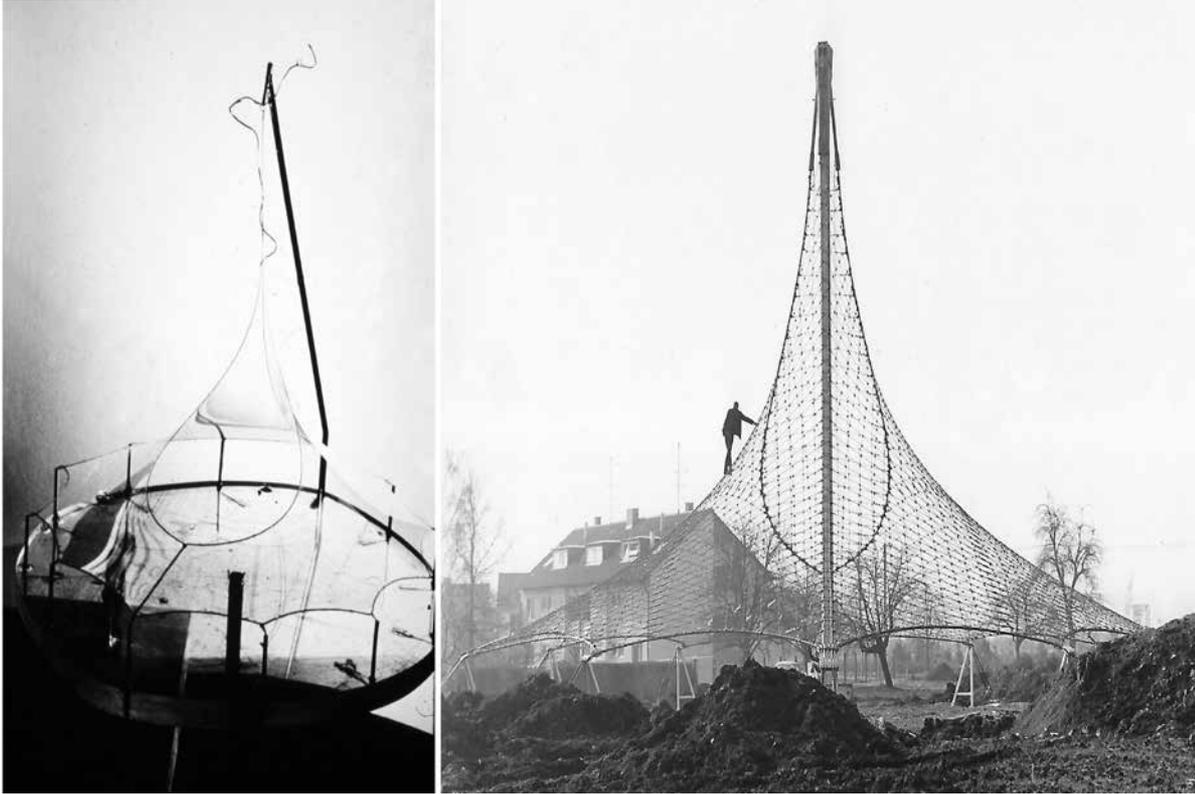


Figura 6. Multihalle en el Mannheim Bundesgartenschau. (a) Modelo de cadena colgante (Imagen: Instituto de Estructuras Ligeras, Stuttgart); (b) la retícula de madera terminada. (Imagen: Sobre Arup & Partners)

mediante modelos teóricos, aunque la magnitud y la dirección de las cargas de viento pueden determinarse mediante modelos de túnel de viento.

### Modelos de medición

Los modelos más productivos utilizados por los ingenieros durante los últimos doscientos años han sido los modelos de medición - *messmodelle* en alemán. Se utilizan desde mediados del siglo XVIII, siguiendo una trayectoria paralela a la evolución de la ciencia experimental en general.

Los campos de la ingeniería en los que se utilizaron por primera vez los modelos de medición fueron aquellos en los que la teoría de la ingeniería estaba menos desarrollada, debido a la complejidad de los fenómenos, y que eran menos capaces de generar un nivel de confianza suficiente en las propuestas de proyecto o cálculo. Dos ejemplos tempranos, en el decenio de 1870, fueron, en mecánica de fluidos, en

relación con la resistencia de los barcos que atraviesan el agua y sobre el flujo de agua en los canales de los ríos y estuarios. Otro, que comenzó hacia 1900, fue el proyecto de presas de fábrica y, más tarde, de hormigón armado.

El reto en todos los modelos de medición es la elección de los factores de escala para los diferentes elementos de una obra de ingeniería. Para el proyecto de una estructura de hormigón armado, por ejemplo, es necesario escalar cada una de las siguientes variables:

- Dimensiones lineales
- Carga(s) aplicada(s)
- Rigidez (acero y hormigón)
- Coeficiente de Poisson (acero y hormigón)
- Rigidez de la sección (segundo momento del área) (acero y hormigón)
- Resistencia (y quizás fragilidad) (acero y hormigón)

Además, estos valores deben elegirse para poder medir con precisión las flechas y las deformaciones unitarias superficiales. Inevitablemente, hay que hacer concesiones y, a menudo, se pueden hacer diferentes modelos de una estructura para estudiar distintos fenómenos. Con este fin, en una serie de artículos fundamentales publicados en 1931-1933, el ingeniero español Carlos Fernández Casado (1905-1988) distinguió dos tipos de ensayos de modelos: los ensayos en «estructuras reducidas equivalentes» y los ensayos en «modelos a escala reducida» (Fernández Casado 1931). Una «estructura equivalente a escala reducida» es aquella en la que las propiedades mecánicas, como las rigideces absolutas y relativas, son similares, pero no se mantiene una semejanza geométrica precisa. En un «modelo a escala reducida» se mantiene una semejanza geométrica precisa. Lo ilustró con muchos proyectos en cuyo diseño se utilizaron resultados obtenidos mediante modelos equivalentes de tamaño reducido y modelos a escala reducida, especialmente de arcos tanto de puentes como de presas de arco, que se habían realizado en varios países (Fernández Casado 1932a, 1932b, 1932c, 1933).

Los datos recogidos en los experimentos con modelos de medición se utilizaban siempre para corroborar los cálculos teóricos realizados para la estructura. Este proceso podía servir para aumentar la confianza en un proyecto, tanto al utilizar los datos del modelo físico para corroborar los resultados del modelo teórico, como al utilizar el modelo teórico para validar todo el proceso de ensayo del modelo físico en sí mismo: la similitud tanto de los materiales y la construcción del modelo como de las técnicas mediante las cuales se aplicaban las cargas y se medían las deformaciones. En muchos casos, también se realizaron mediciones en la estructura a tamaño real una vez terminada y sometida a las cargas reales. De este modo, se podía obtener una validación final de los ensayos del modelo físico y de los estudios del modelo teórico, lo que aumentaría la confianza con la que ambos podrían utilizarse en un nuevo proyecto.

En la práctica, la experiencia adquirida durante el proyecto y la construcción de una obra de gran envergadura suele dar lugar a mejoras en las técnicas de ensayo de los modelos, en los modelos teóricos utilizados para el análisis de un tipo concreto de estructura, y en el diseño de detalle y la construcción de la propia estructura a tamaño real. De este modo, se consiguen avances en un determinado campo de la

ingeniería civil o de la construcción, en los que tanto los modelos físicos como los modelos teóricos desempeñan su papel, unas veces más debido a los modelos físicos, otras veces más a los modelos teóricos, y siempre debido a la experiencia adquirida durante el propio proceso de construcción.

El uso de modelos físicos ha contribuido directamente al progreso en otro aspecto de la ingeniería civil y de la construcción, concretamente en las tecnologías asociadas a la medición del comportamiento de muchas obras de ingeniería. En la ingeniería estructural, esto incluye el desarrollo y la mejora de los dispositivos para medir las flechas y, especialmente, para medir las deformaciones superficiales utilizando una variedad de galgas extensométricas (Figura 7).

### ¿POR QUÉ LOS INGENIEROS CALCULISTAS UTILIZAN MODELOS DE MEDICIÓN?

Quizá la observación más importante sobre la comprobación de los modelos de medición es que siempre se utilizan o se utilizaron junto con los cálculos mediante modelos teóricos o matemáticos, incluyéndose desde los años 1960 los modelos informáticos. A menudo, los resultados de los modelos teóricos se utilizan para proyectar y probar los modelos de medición, y viceversa.

La razón principal por la que los ingenieros proyectistas diseño utilizaban modelos de medición era porque no tenían suficiente confianza en la capacidad de los modelos científicos (teóricos) para ofrecer información fiable sobre el comportamiento real (futuro) de la estructura que se estaba proyectando especialmente cuando un diseño es innovador (Addis 2021b). En términos modernos, el uso de modelos físicos puede ayudar a reducir el riesgo. Aparte de un experimento a tamaño real, la comprobación de un modelo físico es la única manera de complementar, verificar o comprobar los resultados de los cálculos teóricos por comparación con el comportamiento en el mundo real.

Esta necesidad de modelar físicamente puede surgir en las siguientes circunstancias

- Cuando un proyecto propuesto no tiene precedentes;
- Cuando no se dispone de otros medios para alcanzar el nivel de confianza necesario de que un proyecto será satisfactoriamente seguro y tendrá el comportamiento deseado;

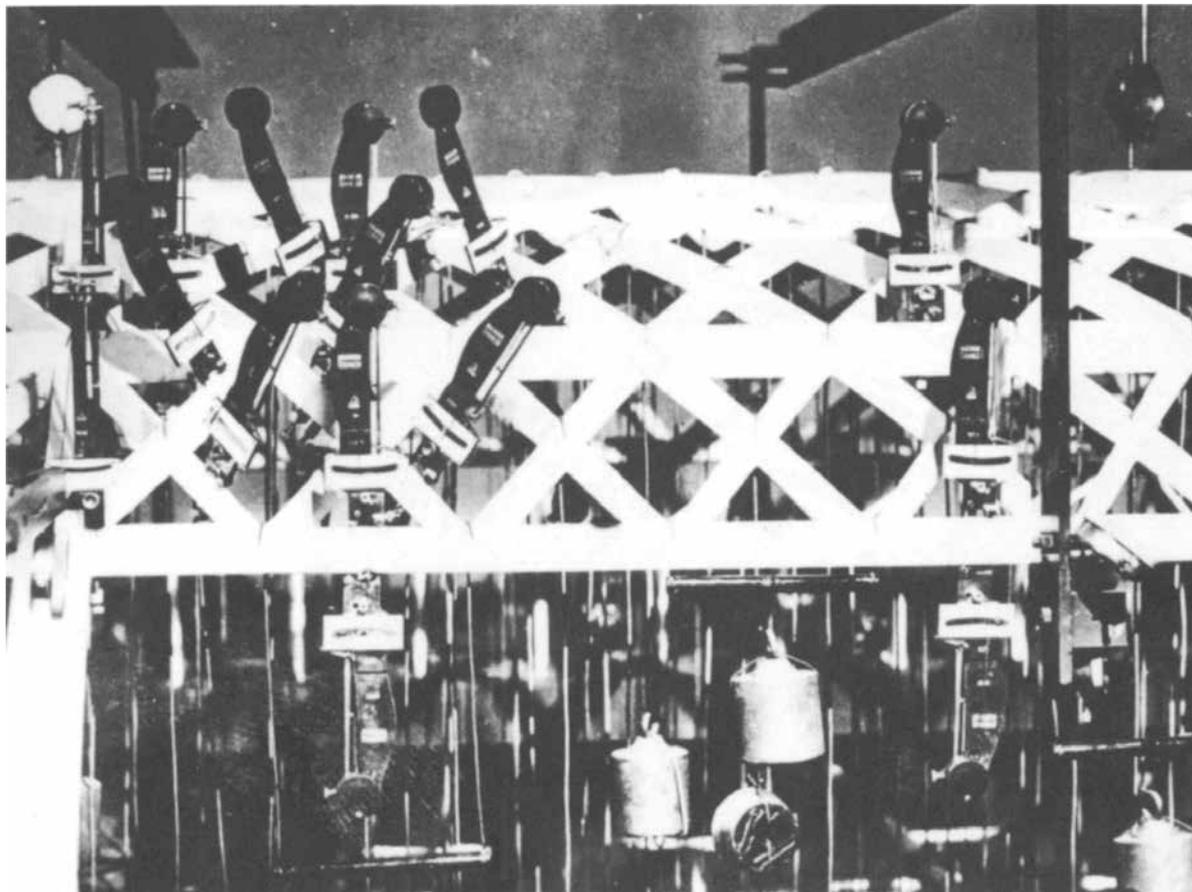


Figura 7. Tensómetros de Huggenberger (galgas extensométricas) colocados en un modelo de celuloide a escala 1:37,5 de los hangares de hormigón armado diseñados por Pier Luigi Nervi, 1935. (Imagen: Archivo Histórico del ISMES)

- Cuando la ciencia de la ingeniería se considere inadecuada;
- Cuando los cálculos teóricos sean demasiado complejos o lleven demasiado tiempo, por ejemplo, si una estructura es muy hiperestática o si el flujo de fluidos es muy turbulento.

Las circunstancias enumeradas anteriormente dependen claramente del momento histórico en el que se realiza el proyecto, así como de dónde y quién lo realiza: los conocimientos y la experiencia en ingeniería disponibles pueden variar según el país e incluso según los ingenieros implicados.

En el ámbito de la ingeniería estructural de edificios, por ejemplo, la modelización física se utilizó en los primeros años de la construcción de hierro forjado (décadas de 1830 y 1840), pero desapareció cuan-

do se desarrollaron las técnicas de análisis estructural, primero para las estructuras estáticamente determinadas y, a partir del decenio de 1870, para las estructuras hiperestáticas. Se reanudó cuando se utilizaron nuevos materiales (hormigón armado y luego hormigón pretensado) y nuevas formas estructurales (cáscaras delgadas y estructuras de malla o celosía) a partir de los años 1920 y hasta los 1970. Hoy en día prácticamente no se utilizan modelos de medición para comprobar el equilibrio de las estructuras de ingeniería, porque los modelos teóricos e informáticos están muy bien desarrollados y son muy fiables. No es el caso de la ingeniería eólica ni de la respuesta dinámica de las estructuras a las cargas sísmicas, para las que todavía se necesitan modelos físicos (junto con modelos informáticos) en muchos proyectos.

## MODELOS DE MEDICIÓN EN INGENIERÍA CIVIL Y DE LA CONSTRUCCIÓN

Los ingenieros que trabajan en casi todas las ramas de la ingeniería civil y de la construcción han utilizado modelos de medición en algún momento de su desarrollo, y éstos han desempeñado un papel esencial en la consecución de avances en el proyecto y la construcción en estos campos. Los siguientes ejemplos se analizan en mayor profundidad en otro lugar (Addis 2021a):

- proyecto de bóvedas de fábrica y puentes de arco (desde mediados del siglo XVIII)
- proyecto de puentes colgantes (a partir del decenio de 1820 y, sobre todo, del de 1930)
- ingeniería hidráulica y de aguas libres (a partir del decenio de 1870, véase más adelante)
- ingeniería eólica (desde el decenio de 1890, y especialmente desde el decenio de 1980)
- ingeniería sísmica (desde el decenio de 1890)
- proyecto de presas de fábrica (a partir de 1900, véase más adelante)
- ingeniería acústica (desde el decenio de 1910)
- proyecto de puentes de arco de hormigón armado (desde el decenio de 1920) (Fernández Casado 1932a, 1932b, 1933)
- proyecto de presas de hormigón armado (desde el decenio de 1920) (Fernández Casado 1932c)
- proyecto de cáscaras de hormigón (desde el decenio de 1920)
- modelización por centrifugación en ingeniería geotécnica (a partir de los años 30)
- ingeniería contra incendios (a partir del decenio de 1960)
- movimiento de aire en edificios para la ventilación natural (desde 2000)

## ALGUNOS CASOS DE ESTUDIOS

### Ingeniería estructural: presas

A medida que crecía el tamaño y el número de las grandes ciudades europeas durante la segunda mitad del siglo XIX, aumentaba la demanda de agua y se construían muchas presas nuevas. Un número creciente de ellas eran de fábrica, en lugar de las tradicionales presas de terraplén, y había muchos enfoques diferentes e incompatibles para proyectar estas

presas, basados en diferentes modelos teóricos. Desgraciadamente, se produjeron varios hundimientos y la respuesta fue ser mucho más conservador con los supuestos de cálculo. En 1904 se probaron algunos modelos muy sencillos de bloques de madera para una presa de fábrica que ponían en duda el método de cálculo más utilizado, pero estos resultados fueron desacreditados porque parecían cuestionaban varias presas que resultaron un éxito completo. No obstante, la idea de fabricar y ensayar modelos suscitó un gran interés y en el decenio siguiente se dieron varios ejemplos del éxito de ensayos de modelos físicos utilizados para desarrollar y corroborar modelos teóricos.

Uno de esos proyectos fue una propuesta para elevar la altura de la presa de Asuán (Egipto). El ingeniero era Sir Benjamin Baker (proyectista del puente ferroviario de Forth, en Escocia) y una de sus preocupaciones era hasta qué punto la presa de fábrica y los cimientos sobre la roca se comportaban como un cuerpo elástico homogéneo. Al considerar el proyecto original, utilizó un modelo para investigar el vuelco de la sección trapezoidal propuesta y la distribución de las tensiones en la presa. Utilizó este modelo, hecho de «gelatina ordinaria» y de unos 200 mm de altura, para corroborar los cálculos que se habían hecho suponiendo que la presa y su base se comportaban como un cuerpo elástico homogéneo. Cuando este enfoque cálculo fue cuestionado por otros ingenieros, hizo otro modelo de gelatina rígida para ilustrar el patrón de tensiones. Este modelo le permitió comprobar que la magnitud de las tensiones internas en la base no era tan elevada como habían sugerido los críticos. Sin embargo, este último ensayo también reveló que era probable que las cargas de la presa se transmitieran a mayor profundidad de la que se había supuesto en la roca subyacente, lo que hacía que el proyecto de los cimientos de la presa tuviera especial importancia (Figura 8).

Cuando Baker estuvo en la obra en Egipto, mandó hacer una docena más de modelos de este tipo «para que los ingenieros experimentaran con ellos, de diferentes maneras, incluyendo el recorte de algunas partes frontales para simular roca arrastrada por el agua que corría por las compuertas. Se comprobó que si se cortaba la roca delante de la presa, las tensiones sobre ésta se modificaban considerablemente. Después de 3 o 4 horas de ensayo con los modelos, todo el mundo estuvo de acuerdo con él en que levantar la presa no era un problema tan sencillo como parecía al principio» (Baker 1904, 124).

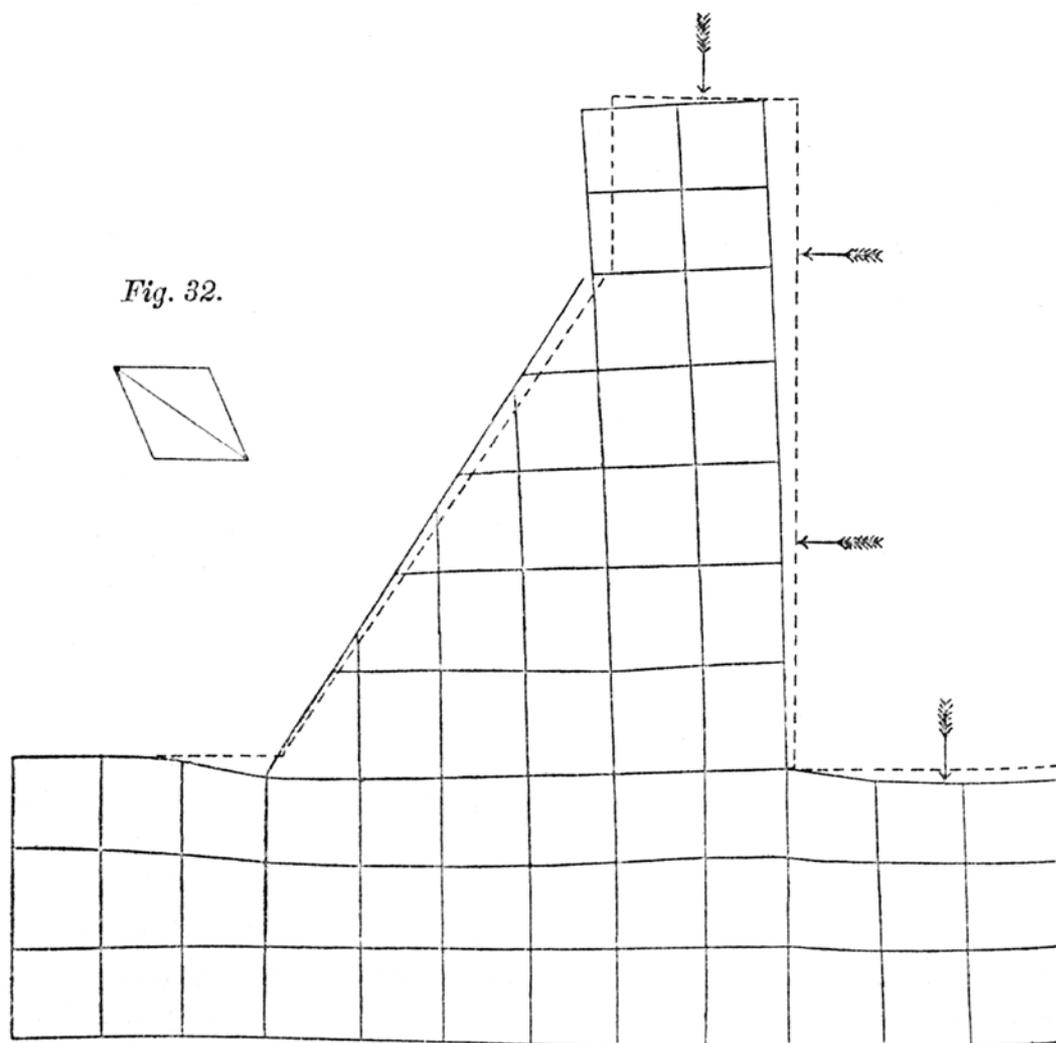


Figura 8. Diagrama de Baker que muestra la deformación del modelo de gelatina bajo carga. (Baker 1904, 122)

Otros experimentadores llevaron a cabo ensayos con modelos de gelatina y plastilina (arcilla para modelar), pero las pruebas más exitosas fueron las realizadas por Wilson y Gore con modelos de caucho de la India (Wilson y Gore 1905, 1908). Estos modelos mecánicos, de unos 175 mm de altura y 25 mm de grosor, utilizaban conjuntos de pesos que aplicaban cargas mediante cables y poleas para simular la presión del agua y el peso propio de la presa de fábrica (Figura 9, Figura 10). Tras muchos debates, las conclusiones de Wilson y Gore fueron generalmente aceptadas y los métodos de cálculo revisados para integrar sus resultados.

El enfoque experimental desarrollado por Wilson y Gore se adoptó de nuevo unos veinte años más tarde, cuando se emprendieron los estudios para el proyecto de la presa de Boulder, en el río Colorado, que sería la mayor presa del mundo cuando se inaugurara en 1935. Sin embargo, esta presa era de hormigón armado y hubo que realizar muchas más pruebas para apoyar los cálculos teóricos de las tensiones internas que se necesitaban para proyectar los armados (Fernández Casado 1932c). Se realizó un modelo a escala 1:120 de la sección de la presa en celita de yeso, de 91 cm de altura apoyada sobre cimientos de 91 cm de profundidad; la sección tenía 7,5 cm de espesor

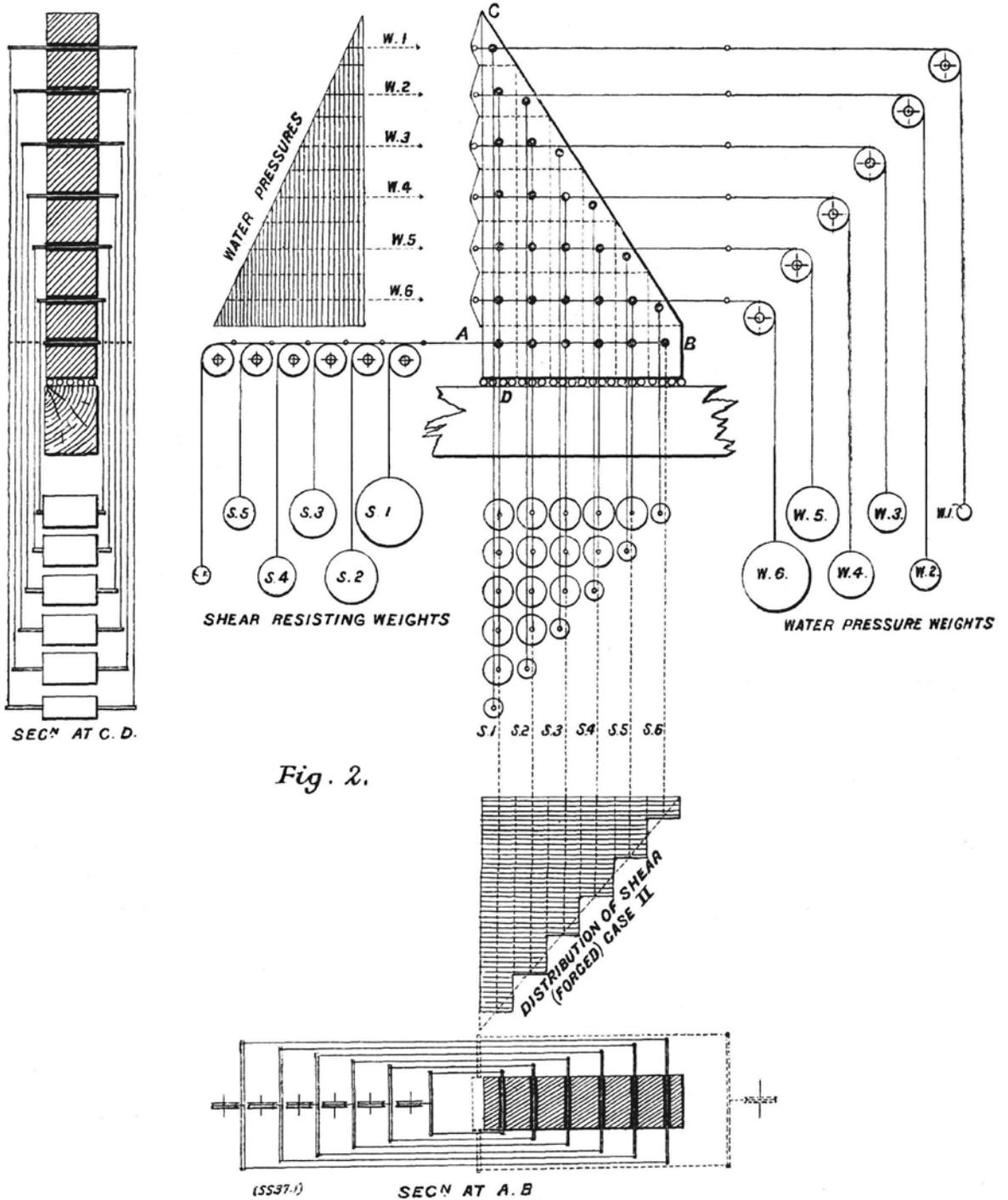


Fig. 2.

Figura 9. Dibujo del primer modelo de banco de pruebas de Wilson y Gore. (Wilson y Gore 1905)

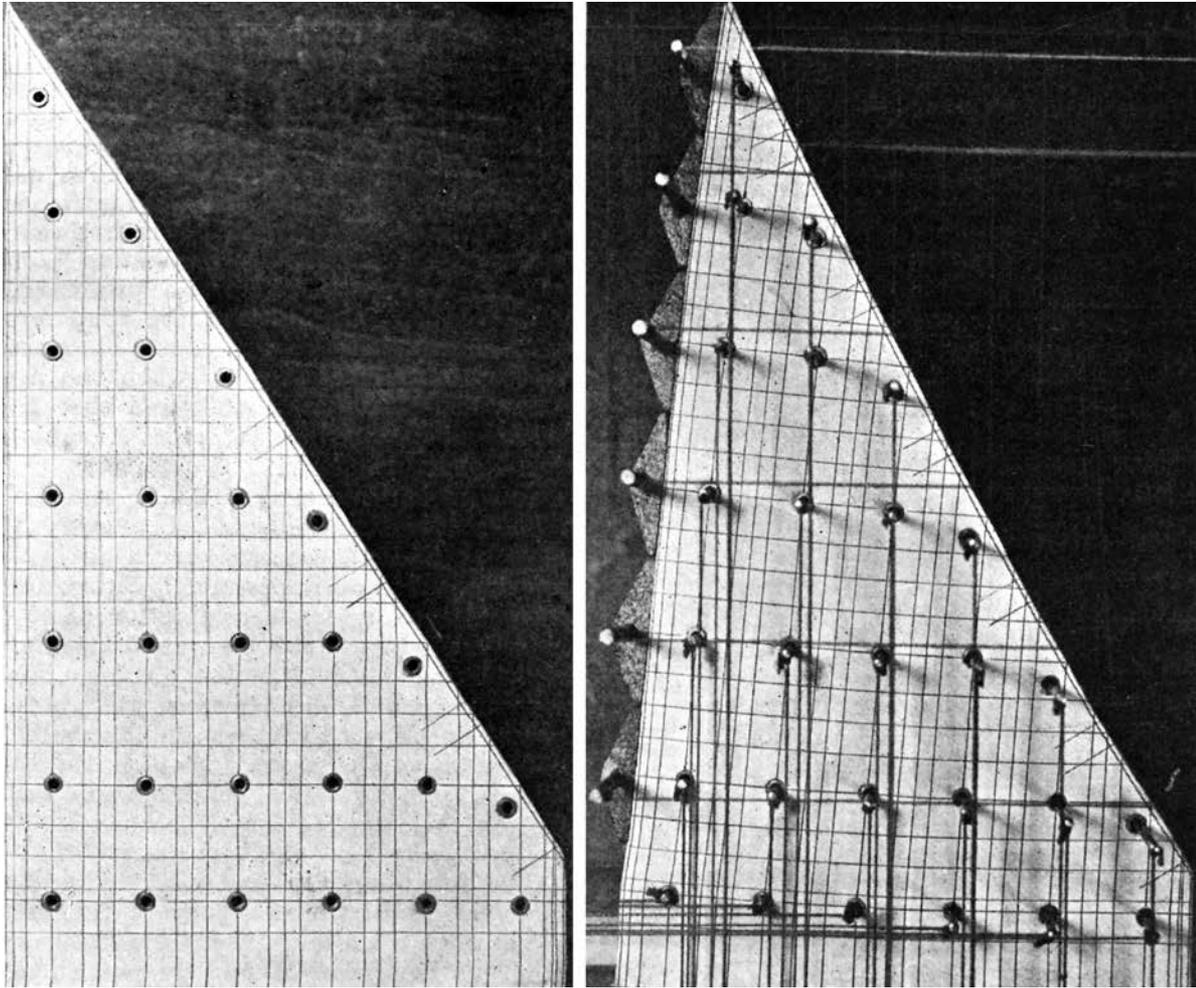


Figura 10. El primer modelo de Wilson y Gore marcado con una rejilla rayada (izquierda) y bajo carga mostrando los pernos y las placas de apoyo (derecha). (Wilson y Gore 1905)

(Figuras 11 y 12). Las cargas se aplicaron en el borde de aguas arriba de la sección y en las superficies superiores de los cimientos mediante mercurio contenido en una bolsa de goma. Se adaptó un medidor óptico de deformación para utilizarlo en el modelo de la sección transversal de la presa. Las galgas se dispusieron en forma de roseta y las lecturas se realizaron con un telescopio.

La presa de Boulder es una presa en arco por gravedad, por lo que era importante entender también la acción del arco en la presa. Para ello se utilizó un modelo a escala 1:180 hecho de goma rígida. Se realizaron cientos de pruebas para diferentes condiciones de carga y midiendo diferentes partes

de la estructura. La Figura 13 muestra el modelo equipado con rosetas mecánicas de medición de tensiones diseñadas para ser leídas bajo el agua, que se utilizó para aplicar la carga en la cara de aguas arriba de la presa. Las flechas de la parte superior de la presa en la cara de aguas abajo se midieron con galgas de reloj.

La presa de Boulder y otras dos presas construidas por el Bureau of Reclamation en el decenio de 1920 fueron probablemente los proyectos en los que más se avanzó en el desarrollo de la técnica de ensayo de modelos. En conjunto, contribuyeron a crear la presa más avanzada de su tipo en el mundo.

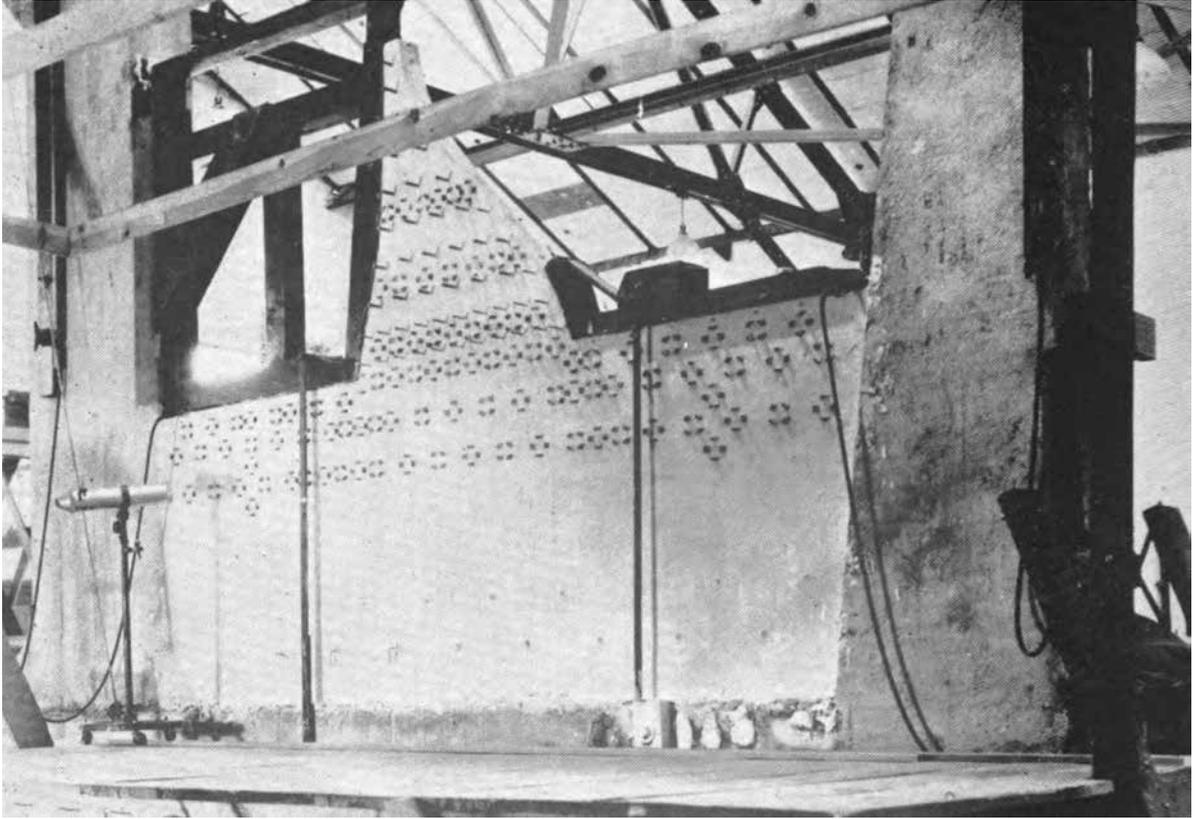


Figura 11. Modelo a escala 1:120 de la sección transversal de la presa de Boulder preparado para la aplicación de cargas de mercurio en el borde de aguas arriba de la sección, y a lo largo de las superficies superiores de los cimientos. Las lecturas de las rosetas de las galgas extensométricas ópticas se tomaron con un telescopio (a la izquierda de la imagen). (Bureau of Reclamation 1940, 46)

### Ingeniería hidráulica: estuarios

Un problema habitual en los estuarios de los ríos navegables ha sido siempre el encenagamiento del canal de navegación. El único remedio era el dragado regular y costoso del canal para permitir el paso de grandes buques de guerra y de carga. El primer intento de resolver el problema utilizando los conocimientos de hidráulica se llevó a cabo en 1875. El ingeniero francés Louis Fargue (1827-1910) construyó un modelo de un río serpenteante a escala horizontal de 1:100 y vertical de 1:20, con el flujo de agua reducido por un factor de 1:1,6. El modelo de río tenía aproximadamente 1 m de ancho y un lecho móvil de arena. Tras dejar fluir el agua durante un tiempo, se observó la creación de bancos de arena submarinos similares a los del río real. Probando el efecto de cambiar el radio de curvatura de

las curvas del río, pudo demostrar cómo se podía reducir la altura de los bancos de arena y mantener el canal principal libre de sedimentos.

Un decenio más tarde, se pidió al ingeniero británico Osborne Reynolds (1842-1912) que estudiara los posibles efectos del agua que salía del proyecto de canal Manchester Ship en el estuario del río Mersey, especialmente cuando el mar empezaba a entrar en el estuario después de la marea baja. Construyó en su laboratorio de la Universidad de Manchester un modelo de todo el estuario de unos 60 cm de longitud a escala horizontal de 1:31.800 y vertical de 1:960. Mediante un análisis de las dimensiones del sistema, demostró que la relación ( $\sqrt{v} / h$ ) seguía siendo independiente de la escala (donde  $v$  es la velocidad de las olas y  $h$  su altura), lo que permitía predecir que el periodo local de las mareas, de 11,25 horas, debía redu-

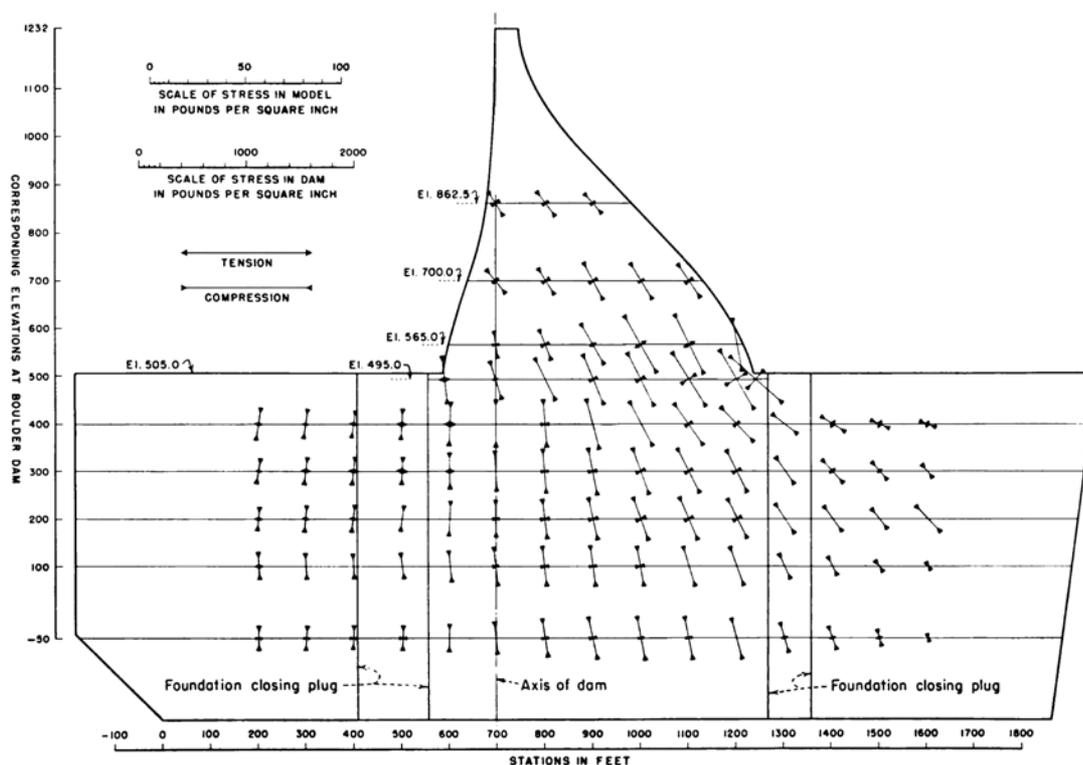


Figura 12. Tensiones principales en el voladizo y los cimientos bajo carga viva más carga muerta. (Bureau of Reclamation 1940, 50)

cirse a 42 segundos para conseguir un flujo de agua similar en el modelo del estuario. Creó las mareas inclinando suavemente todo el modelo para que el agua, de unos 15 mm de profundidad, se deslizara por el lecho arenoso para reproducir el efecto de las mareas. A continuación, sometió el modelo a 2.000 mareas y demostró que el lecho de la ría modelo había generado contornos en el lecho muy similares a los de la ría real. Una vez probada su técnica de modelización, construyó un modelo más preciso a escala horizontal de 1:10.800 y vertical de 1:396, para el que el periodo de marea era de 80 segundos (Figura 14). Su estudio pudo demostrar a las autoridades del puerto de Liverpool que el agua del nuevo canal propuesto no tendría un efecto desfavorable en los canales navegables.

Este trabajo sobre el Mersey tuvo una enorme repercusión. Otras autoridades fluviales de Alemania y Francia se pusieron en contacto con la Universidad

de Manchester y pronto se llevaron a cabo muchos estudios similares en toda Europa, lo que redundó en amplios beneficios para la navegación fluvial y en los estuarios. Durante el siglo XX se crearon muchos laboratorios para estudiar los estuarios, por ejemplo en la Estación de Investigación Hidráulica de Gran Bretaña (ahora HR Wallingford), que construyó y probó varios modelos del estuario del río Támesis para estudiar las inundaciones, la eficacia de la presa del Támesis y los efectos del emplazamiento de un nuevo aeropuerto en terrenos ganados al mar en Maplin Sands, en el estuario (Figura 15).

La ingeniería hidráulica de superficies libres se ha beneficiado enormemente del uso de modelos físicos porque el flujo del agua es muy difícil de captar en modelos teóricos, incluso hoy en día. El uso de estos modelos ha ayudado a los ingenieros a adquirir una valiosa experiencia que ha contribuido a mejorar innumerables proyectos fluviales y maríti-

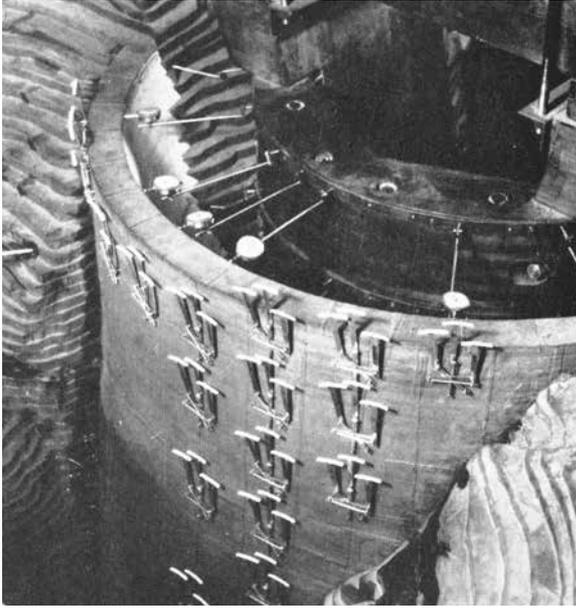


Figura 13. Rosetas de galgas extensométricas mecánicas fijadas a la cara de aguas arriba del modelo a escala 1:180 en goma rígida. El modelo se cargaba con agua y las lecturas de la deformación se tomaban a través del agua utilizando un telescopio (Bureau of Reclamation 1939, 325).

mos, ya que ha permitido comparar muchos esquemas alternativos antes de comprometerse a realizar obras extremadamente costosas. Sin ellos, los avances logrados durante el siglo XX habrían sido mucho menores y mucho más gravosas. Hoy en día, los resultados de este tipo de modelización física se ven muy reforzados al combinar los resultados obtenidos con los obtenidos mediante sofisticadas modelizaciones de Dinámica de Fluidos Computacional.

## INGENIERÍA ACÚSTICA

Wallace Sabine (1868-1919) es el padre reconocido de la ciencia moderna de la acústica. Fue el primero en definir y medir parámetros como la reverberación, la intensidad del sonido y la absorción en la ciencia acústica de las salas. Sin embargo, el estudio de las ondas sonoras es especialmente difícil porque son invisibles. Para superarlo, Sabine utilizó en 1913 una técnica desarrollada hacia 1910 que generaba un pulso sonoro mediante una gran chispa eléctrica y utilizaba la fotografía *schlieren* de alta velocidad para hacer visibles las ondas sonoras. Esta técnica aprovecha el cambio de densidad del

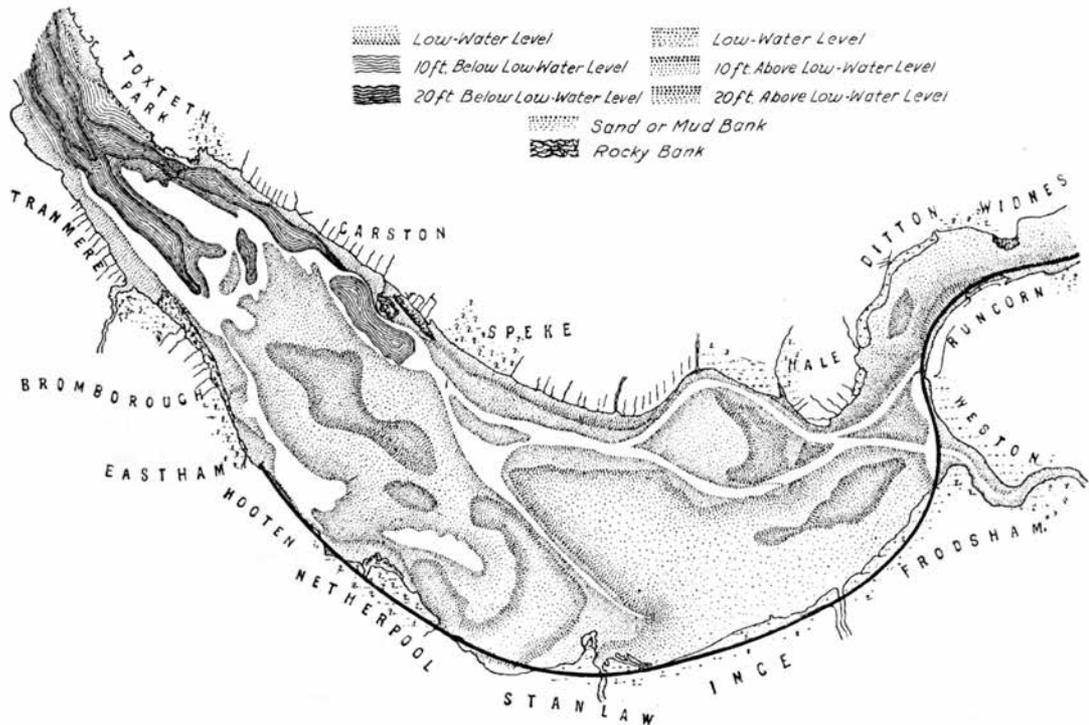


Figura 14. Mapa de contorno del lecho del modelo a escala horizontal 1:10.800 del estuario del río Mersey después de varios miles de mareas; esto demostró que el agua del propuesto Manchester Ship Canal (la línea negra en el lado sur del estuario) no perjudicaría los canales de navegación en el estuario. (Reynolds 1888)



Figura 15. Modelo a escala horizontal 1:1000 y vertical 1:100 del estuario exterior del Támesis para estudiar los impactos de un aeropuerto que se propone construir en Maplin Sands. El edificio de 75×32 metros no tiene pilares. Las docenas de pequeños cilindros del fondo marino de la maqueta se utilizaron para introducir turbulencias en el flujo. (Imagen: cortesía de HR Wallingford)

aire al paso del pulso sonoro para refractar un haz de luz y crear sombras. Utilizó la técnica de los impulsos sonoros para demostrar las ventajas de añadir una marquesina reflectante en una gran sala para reducir los desagradables ecos en el auditorio (Figura 16).

En el decenio de 1920, el acústico y arquitecto japonés Takeo Satow (1899-1972) desarrolló una técnica de modelado que se basaba en el uso de los rayos de luz como análogo de los «rayos de sonido», las líneas perpendiculares a una onda sonora. Se colocó un modelo metálico pulido de la sección transversal de un auditorio en una caja con tapa de cristal. Los rayos de luz irradiaban desde la posición del escenario y se hacían visibles mediante la introducción de humo en la caja (Figura 17). Satow también utilizó un pequeño prisma cilíndrico colocado

en el auditorio modelo donde podría estar un oyente. El prisma reflejaba la luz que llegaba desde todas las direcciones perpendicularmente a los rayos incidentes, de modo que se podía hacer visible la intensidad de la luz (es decir, del sonido) que llegaba desde diferentes direcciones. Satow consideraba que su método era especialmente ventajoso porque permitía fabricar y modificar fácilmente diferentes secciones de auditorios, requería poca formación especializada para utilizarlo, y también podía utilizarse para convencer a personas con pocos conocimientos de acústica. De este modo, podía proyectar auditorios con mayor confianza en que sus propiedades acústicas resultantes serían satisfactorias.

Después de la Segunda Guerra Mundial, el desarrollo de pequeños altavoces, micrófonos y la graba-

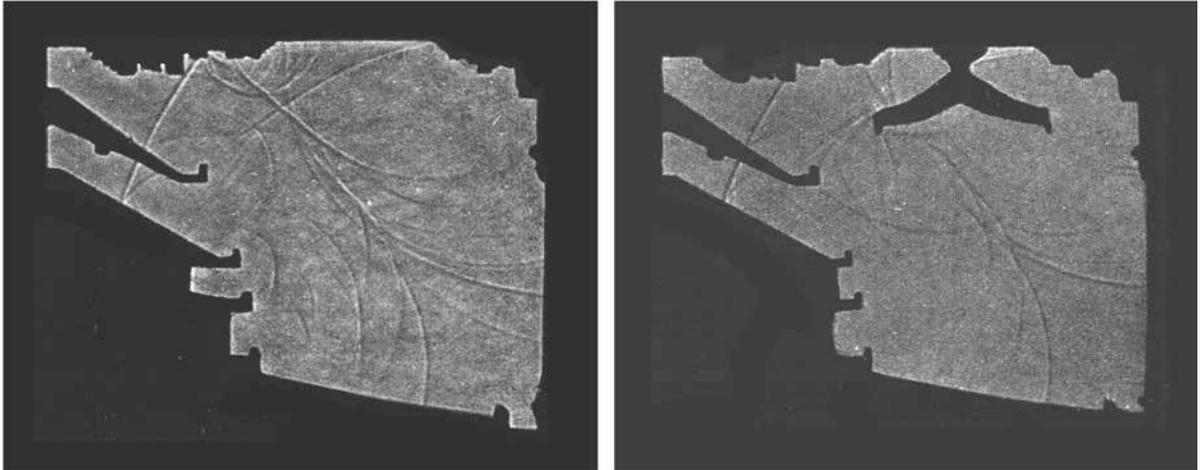


Figura 16. Fotografías de impulsos sonoros de Sabine que muestran el efecto de la modificación del techo de un teatro. (Sabine 1913)

dora de cinta permitió crear sonidos en un modelo a escala reducida de una sala de conciertos y medir las intensidades sonoras en todo un auditorio. Para el proyecto del Bridgewater Hall, una sala de conciertos de 2.400 plazas situada en Manchester en los años 1970, se utilizó un modelo acústico a escala 1:50 (Figura 18). Además de ensayar el modelo completo del auditorio, fue útil probar ciertas superficies del espacio, como las paredes y el techo. El proyecto original del techo comprendía una serie de escalones unifor-

mes de hormigón y se temía que esto pudiera provocar un efecto acústico molesto causado por las repeticiones de las reflexiones con un ligero retraso entre cada una de ellas; esto habría provocado la distorsión del sonido. Las pruebas realizadas en el techo demostraron que este efecto podía producirse y el proyecto se modificó inclinando los escalones alternativamente para que las reflexiones se dispersaran. Otro uso no acústico de la maqueta a escala 1:50 fue medir el volumen del auditorio, importante para calcular el

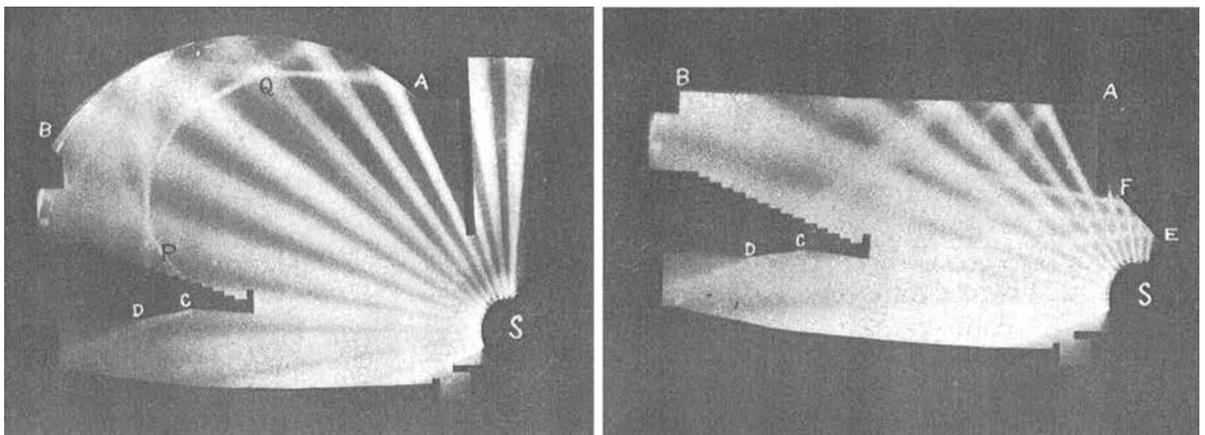


Figura 17. Modelo de rayos luminosos para estudiar el rendimiento acústico de un auditorio. (Izquierda) Un auditorio con un techo curvo, que muestra múltiples reflexiones hacia la galería de asientos. (Derecha) Un auditorio con un techo plano (AB) y un reflector (EF) sobre el escenario, que muestra menos reflexiones de largo recorrido y mejores propiedades acústicas. (Satow 1929)



Figura 18. Modelo a escala 1:50 del Bridgewater Hall, Birmingham, Reino Unido. Los puntos blancos están hechos de un material absorbente para simular a las personas sentadas en sus asientos. (Imagen: Sobre Arup & Partners)

tiempo de reverberación. Para ello, se llenó la maqueta con miles de bolitas de poliestireno que luego se vaciaron y se midieron en una probeta.

Los modelos físicos utilizados para el proyecto acústico a partir del decenio de 1920 permitieron introducir importantes mejoras en el proyecto de auditorios. En concreto, permitió predecir por primera vez la acústica del auditorio terminado. El ingeniero acústico pudo identificar los problemas acústicos y reconstruir el modelo para superar estos problemas y probar el resultado. Antes de la utilización de los modelos, la acústica de las salas de conciertos y los teatros era en gran medida una cuestión de azar, a veces excelente, pero más a menudo mala o incluso desastrosa.

#### OBSERVACIONES FINALES

Entre los muchos factores que han influido en el progreso de la ingeniería civil y estructural, el desarrollo de la ciencia y la teoría de la ingeniería suele consi-

derarse el más importante. En este artículo se ha argumentado que el uso de modelos físicos, especialmente de modelos de medición, sobre todo por parte de los ingenieros proyectistas, ha desempeñado un papel igualmente significativo. Esto ha ocurrido a menudo cuando se han afrontado retos de construcción nuevos y sin precedentes; por ejemplo, por nombrar algunos, el puente tubular de hierro forjado Britannia (decenio de 1840), el Manchester Ship Canal (decenio de 1870), la presa de Asuán (ca.1900), la cubierta de hormigón para el mercado de Leipzig de Dischinger (años 1920), así como la presa de Boulder, el Frontón Recoletos de Eduardo Torroja, con una bóveda de cañón de hormigón armado muy delgada, y los grandes hangares para aviones de Nervi con una cubierta de celosía (todos ellos de los años 1930), los estadios olímpicos de Múnich (1968) de Frei Otto, y la cubierta de madera para el Multihalle de Mannheim (1973), también de Otto, con Ove Arup and Partners.

Estos proyectos llevaban a los ingenieros a un territorio desconocido y era necesario utilizar métodos experimentales para explorar estos nuevos dominios. En cada caso, los modelos de medición a escala reducida proporcionaron un conjunto de datos vital. Se hizo todo lo posible para garantizar que el comportamiento del modelo fuera una representación fiel del proyecto propuesto a tamaño real y proporcionara datos de un ensayo real para dar cierta corroboración a los datos de los modelos teóricos.

Los modelos de medición física han sido con frecuencia el único medio de comprobar la exactitud de la teoría de la ingeniería utilizada por los proyectistas y, cuando los ensayos de los modelos han puesto de manifiesto deficiencias, han ayudado a los ingenieros tanto a mejorar sus modelos teóricos como a mejorar el proyecto y la construcción de grandes obras. El éxito del proyecto de ingeniería consiste fundamentalmente en crear la confianza suficiente para iniciar la construcción. Los modelos físicos han desempeñado un papel importante para ayudar a generar esa confianza.

#### LISTA DE REFERENCIAS

- Addis, W. 1988. Models in Engineering Science and Engineering Design. In: *Report of IABSE Congress, Helsinki*, 32: 769-774. Helsinki: IABSE.
- Addis, W. 1990. *Structural Engineering - the Nature of Theory and Design*. Chichester: Ellis Horwood.
- Addis, W. (Ed.). 1999. *Structural and Civil Engineering Design*. Vol.12 of the series 'Studies in the History of Civil Engineering'. Aldershot: Ashgate (Variorum).
- Addis, Bill. 2003. The nature of progress in construction engineering history. In: *Proceedings of the First International Congress on Construction History, Madrid* edited by S. Huerta, et. al., 123-129. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Addis, Bill. 2005. A history of using models to inform the design of structures. In: *Essays in the History of the Theory of Structures: In honour of Jacques Heyman*, edited by Santiago Huerta, pp-pp. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Addis, Bill. 2007. *Building: 3000 years of Design, Engineering and Construction*. London & New York: Phaidon.
- Addis, Bill. 2013. «Toys that save millions»: a history of using physical models in structural design. *The Structural Engineer*, 91 (4 April): 11-27.
- Addis, Bill. 2014. Physical modelling and form finding. In: *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*, edited by, S. Adriaenssens, P. Block, D. Veenendaal and C. Williams, 32-43. Abingdon: Routledge.
- Addis, Bill. (Ed.). 2021a. *Physical models: Their historical and current use in civil and building engineering design*. Berlin: Ernst und Sohn.
- Addis, Bill. 2021b. Physical Models and Innovation in Architectural and Civil Engineering. *Nexus Network Journal*. <https://doi.org/10.1007/s00004-021-00560-1>
- Baker, B. 1904. Discussion on Coolgardie water supply. *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 162: 120-126.
- Bureau of Reclamation. 1939. Model tests of Boulder Dam. *Boulder Canyon Project, Final reports. Part V (Technical Investigations), Bulletin 3*. Denver, Colorado: Bureau of Reclamation.
- Bureau of Reclamation. 1940. Model tests of arch and cantilever elements. *Boulder Canyon Project, Final reports. Part V (Technical Investigations), Bulletin 6*. Denver, Colorado: Bureau of Reclamation.
- Euler, Leonard. 1776. Regula facilis pro diiudicanda firmitate pontis aliusve corporis similis excognita firmitate moduli (A simple rule to determine the strength of a bridge or similar structure, on the basis of the known strength of a model). *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae*, 20: 271-285.
- Fernández Casado, C. 1931. Teoría del Arco: II – Para una caracterización sistemática de las estructuras. *Revista de Obras Públicas* 79 (2580): 354-358.
- Fernández Casado, C. 1932a. Teoría del Arco: III – Lo experimental. *Revista de Obras Públicas* 80 (2607): 470-477.
- Fernández Casado, C. 1932b. Teoría del Arco: IV – Esperencias en el puente de Yadkin River. *Revista de Obras Públicas* 80 (2608): 497-503.
- Fernández Casado, C. 1932c. Teoría del Arco: V – Lo experimental. *Revista de Obras Públicas* 80 (2610): 530-540.
- Fernández Casado, C. 1933. Teoría del Arco: VI – Esperencias en arcos de puentes. *Revista de Obras Públicas* 81 (2612): 3-9.
- Frigg, Roman & Hartmann, Stephan. 2006 (rev. 2020). Models in Science. In: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2020 Edition), edited by Edward N. Zalta. (URL = <https://plato.stanford.edu/archives/spr2020/entries/models-science/>).
- Galileo Galilei. 1638. *Two new sciences*. (Translated Henry Crew & Alfonso de Salvio, 1914) New York: Dover Publications.
- Hall, A.R. 1978. On Knowing, and Knowing how to ... *History of Technology*, 3: 91-103.
- Hesse, Mary. 1963. *Models and Analogies in Science*. London: Sheed and Ward.
- Niiniluoto, Ilkka. 2019. Scientific Progress. In: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2019 Edition), edited by Edward N. Zalta. (URL = <https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/scientific-progress/>).
- Reynolds, Osborne. 1888. On certain laws relating to the regime of rivers and estuaries, and on the possibility of

- experiments on a small scale. In: *Report of the 57th Meeting of the British Association for the Advancement of Science held in Manchester in 1887*, 555-562. London: John Murray. (Also, including the illustration, *Third International Navigation Congress*, Frankfurt-am-Main, 1888 (*Der III. internationale Binnenschiffahrts Kongress zu Frankfurt a. M.*).
- Sabine, Wallace C. 1913. Theatre Acoustics. *American Architect* 104: 256-278. Reprinted in Sabine, W.C. (1922) *Collected papers on acoustics*. Cambridge. Mass.: Harvard University Press.
- Satow, Takeo. 1929. Acoustics of auditorium ascertained by optical treatment in models. *Proceedings of the World Engineering Congress. Tokyo*. Paper 118.
- Wilson, J.S. y W. Gore. 1905. Stresses in dams: an experimental method of investigating the distribution of stresses in dams. *Engineering*, 80 (4 Aug.): 134-135.
- Wilson, J.S. y W. Gore. 1908. Stresses in dams: an experimental investigation by means of India rubber models, *Min. Procs. ICE.*, 172, 107-133. Discussion 143-194.

---

Bill Addis. Profesor Jubilado. Anteriormente, profesor visitante en August Wilhelm Scheer, Technical University, Munich, Germany. Buro Happold Consulting Engineers, London, UK.

