

REIA #07-08 / 2017  
298 páginas  
ISSN: 2340-9851  
www.reia.es

---

Pablo Moreno Muñoz\*, Esther Redondo  
Martínez\*\*, José Fernández-Llebrez Muñoz\*\*\*

\* Universidad Europea de Valencia / pablo.moreno@universidadeuropea.es

\*\* Universidad Europea de Madrid / esther.redondo@universidadeuropea.es

\*\*\* Universidad Europea de Valencia / jose.fernandez@universidadeuropea.es

*Aportaciones empíricas al desarrollo de las estructuras.  
Diseño de puentes durante el siglo XIX / Empirical  
Contributions to the Development of Structures.  
Design of Bridges During the Nineteenth Century*

El presente artículo reflexiona sobre la teoría de que el desarrollo de las estructuras desde el siglo XIX se produce a partir de una doble vertiente analítica y experimental. Pese a la dificultad para trazar una línea clara que defina los logros alcanzados por cada una de estas vías, podría afirmarse que son más escasos los textos que tratan sobre las aportaciones empíricas al desarrollo de las estructuras. En este sentido, el presente texto plantea una aproximación al desarrollo de las estructuras durante el siglo XIX, abordando para ello asuntos clave como la introducción de la fundición como nuevo material estructural, la génesis y el desarrollo inicial de las nuevas tipologías de puentes colgantes y tubulares, o el reto de resolver infraestructuras aptas para el tráfico ferroviario. Ejemplos en todo caso de cómo la investigación empírica y la experimentación pudieron representar una influencia decisiva en el desarrollo de las estructuras, en momentos en que no era viable obtener soluciones concretas del conocimiento teórico.

This paper deals with the theory that the development of structures from XIX century is based on a double analytical and experimental side. Despite the difficulty to draw a clear line defining the achievements reached by these two ways, it could be stated that studies dealing with empirical contributions to the development of structures are more limited. In this sense, this research presents an approach to the development of structures along the XIX century, addressing thus some key issues such as the introduction of cast iron as the new structural material, the origin and early development of new types of suspension and tubular bridges, or the challenge to design infrastructures suitable for rail traffic. Examples in any case of how empirical research and experimentation could represent a crucial influence on the development of structures, at a time in which obtaining specific solutions from theoretical knowledge was not viable.

---

Estructuras; Diseño Estructural; Experimental; Ensayos; Puente Colgante; Puente Tubular  
/// Structures; Structural Design; Experimental; Tests; Suspension Bridge; Tubular Bridge

Fecha de envío: 17/10/16 | Fecha de aceptación: 27/12/2016

### **Introducción**

Resulta generalmente aceptado que, hasta el siglo XIX, las estructuras evolucionaron a partir de dos premisas fundamentales: el incremento de la cantidad y calidad de los materiales, y la concepción y desarrollo de nuevas tipologías y formas estructurales (o la combinación simultánea de ambas).<sup>1</sup>

Es por tanto a partir de este punto de inflexión (siglo XIX) y fruto en gran parte de los avances realizados desde el siglo XVI por parte de Galileo, Hooke, Bernoulli, Euler, Lagrange y Coulomb,<sup>2</sup> cuando se considera que se produce un gran avance en la tecnología de la construcción y de las estructuras, al sustituir las tradicionales 'reglas de proporción' sobre las construcciones por justificaciones teóricas con base científica.<sup>3</sup>

Esta transformación decimonónica se realizó en dos direcciones interrelacionadas: la primera es protagonizada por científicos-ingenieros como Navier, Castigliano, Mohr o Love, que cuantificaron el comportamiento resistente de las estructuras; mientras que la segunda vertiente la protagonizaron ingenieros que, con un talante más empírico, desarrollaron técnicas, métodos y tipologías en función de las demandas de la sociedad industrial, como es el caso de las celosías desarrolladas por Pratt, Warren o Polonceau, o la completa prefabricación desarrollada por Joseph Paxton en el *Crystal Palace*.<sup>4</sup>

Aunque resulta evidente que ambas vías (la investigación teórica y la experimental) han contribuido a la evolución de las estructuras, y pese a la dificultad de establecer una diferenciación clara entre los logros alcanzados por cada una de ellas, es un hecho constatable al observar la bibliografía específica que existe un cierto desequilibrio al respecto. Es decir,

1. BELLÉS, Patricia, et al. Generación de formas de estructuras laminares empleando modelos físicos y numéricos. En: 20º Jornadas argentinas de ingeniería estructural. 15 a 17 de octubre. Buenos Aires, 2008.
2. CERVERA BRAVO, Jaime. Cálculo de estructuras y resistencia de materiales: origen y desarrollo histórico de los conceptos utilizados. 1983. Tesis Doctoral. Arquitectura.
3. HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago. Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Instituto Juan de Herrera, 2004.
4. MANTEROLA ARMISEN, Javier. Structural engineering philosophy and technology. Revista de Obras Publicas., 1999, vol. 146, no 3388.

Figura 1. Puente sobre el río Severn, Coalbrookdale (Inglaterra). Abraham Darby 1779



mientras que resulta sencillo encontrar ejemplos de cómo se estudia y reconoce la contribución de la teoría de estructuras y la investigación teórica al desarrollo moderno de las estructuras, no son tan frecuentes los textos que aborden el papel de las aportaciones empíricas en el avance de las estructuras, a pesar de que en muchos casos la experimentación fue previa y operó de forma fundamental, tanto en el desarrollo de formas más eficientes, como en la introducción de nuevos materiales estructurales.

#### La fundición, nuevo material estructural

Es a finales del siglo XVIII cuando se comienza a emplear la fundición<sup>5</sup> en estructuras completas, fecha hasta la que los principales materiales de construcción habían venido siendo la piedra y la madera. No obstante, y como ha sido habitual históricamente con la introducción de los nuevos materiales, cabe remarcar que, si bien a la larga la situación evolucionaría progresivamente, en un principio la utilización de la fundición no implicó un cambio inmediato en el diseño y la concepción de las estructuras que venían construyéndose con los materiales tradicionales.

La primera construcción conocida en la que se empleó la fundición en su totalidad fue un puente sobre el río Severn, en Coalbrookdale (Inglaterra), año 1779, conocido como *Iron Bridge*, con su vano de mayor luz de 30 metros [fig. 1]. Su autor, Abraham Darby III (1750-1791), utilizó los mismos principios y diseño estructural que se venían utilizando en los puentes de arco de piedra de la época, mientras que las uniones entre sus elementos recuerdan a las empleadas en las estructuras de madera.<sup>6</sup> No obstante, pese a que el esquema estructural era el mismo que el utilizado con puentes construidos con aquellos materiales, la utilización de fundición permitió recurrir a secciones menores y lograr una gran rapidez de ejecución.<sup>7</sup>

5. La fundición es una aleación de hierro y carbón con un porcentaje de este entre 2,14% y 6,67%, funde a temperatura más baja que el acero y tiene mayor resistencia a compresión que a tracción.

6. COSSONS, N.; TRINDER, B. *The Iron Bridge* (Bradford-on-Avon, 1979).

7. CILENTO, A. Puentes y puentes colgantes. *Tecnología y construcción* n°16, 2000.

Figura 2. Puente Bonar. Thomas Telford 1810-12



En 1795 una crecida del río Severn asoló toda su ribera, siendo el Iron Bridge el único puente que quedó en pie.<sup>8</sup> Se mantuvo intacto gracias a que la resistencia de la fundición era aproximadamente cinco veces mayor a la de la madera (por lo que se precisaba de aproximadamente la quinta parte de material), motivo por el que asimismo los puentes de piedra no resistieron el empuje de agua, al funcionar como presas que facilitaban la acumulación y presión. Es decir, frente al diseño con materiales tradicionales (madera y piedra), el puente de fundición conseguía liberar mayor paso de agua bajo el tablero.

Todo esto llamó la atención de Thomas Telford (1757-1834), un reputado ingeniero británico, llevándole a interesarse por el hierro fundido. De hecho, fue a partir de ese momento cuando comenzó a utilizarlo para sustituir a la piedra en la construcción de sus puentes. En 1796 termina el puente Buildwas, construido completamente con fundición, si bien en sus propios escritos manifestó que todavía estaba inspirado en las formas y soluciones de los puentes de madera.

Thomas Telford fue probablemente el primero en ver las nuevas posibilidades que ofrecía la fundición dejando atrás los esquemas estructurales propios de la madera y la piedra. Así, en 1802 construyó el Puente sobre el río Bonar (Escocia), de 45,5 metros de luz, desarrollando un nuevo tipo de puente de hierro fundido mediante un diseño que optimizaba las propiedades del material [fig. 2]. Desprovisto de referencias a la tradición constructiva en madera o piedra, el puente estaba formado por dos barras principales unidas entre sí con montantes y cruces de San Andrés (que le dota de mayor resistencia a flexión) uniéndose después arco y tablero con una celosía más ligera [fig. 3]. El resultado es un puente de mayor resistencia con además una solución elegante y económica.<sup>9</sup>

8. TRINDER, Barrie. *The First Iron Bridges*. *Industrial Archaeology Review*, 2013.

9. PAXTON, Roland. Thomas Telford's cast-iron bridges. En *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*. Thomas Telford Ltd, 2007.

Figura 3. Puente Mythe en Tewkesbury.  
Telford 1826



El puente Bonar fue prototipo de otros puentes posteriores como el puente Craigellachie sobre el río Spey (1815) o el Mythe (1826) y el Holt Fleet (1827) ambos sobre el río Severn y el puente Galton en Smethwick (1829). Thomas Telford fue haciendo evolucionar sus ideas y diseño estructural, comprendiendo y perfeccionando el funcionamiento de sus puentes a través de un proceso de experimentación empírico continuo.

Thomas Telford realizó pocos cálculos en sus proyectos. No tenía formación en las teorías y formulaciones matemáticas de la época, carecía de conocimientos rigurosos de geometría y desconocía el cálculo infinitesimal inventado por Newton en el siglo XVII.<sup>10</sup> A Telford, al igual que a la mayoría de los ingenieros de la época, le interesaba más la forma estructural y la economía de la construcción que las teorías matemáticas. Eso era así porque en aquellos momentos el análisis estructural aún no se había desligado de las matemáticas, caracterizadas por tratar de conocer el comportamiento exacto; es decir, debido a la complejidad inherente de las estructuras, la aplicación práctica de las matemáticas resultaba muy compleja,<sup>11</sup> dejando de lado la mayoría de los problemas prácticos. De hecho, aunque los ingenieros franceses disponían de mejor formación científica, seguían utilizando las soluciones clásicas de piedra y madera en sus construcciones, siendo en cambio los constructores e ingenieros ingleses, con una formación más empírica, los que empezaron a utilizar los nuevos materiales y las nuevas formas estructurales.

### El puente colgante

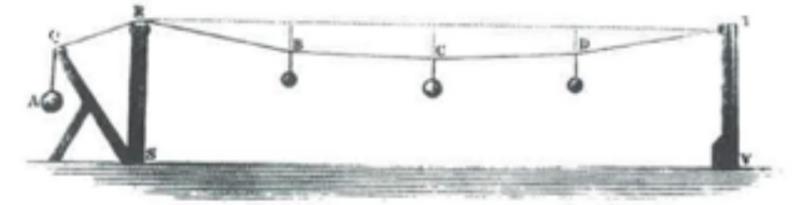
A modo de breve reseña, los primeros puentes colgantes de los que se tiene constancia se construyeron en China, India y Tibet, para salvar torrentes profundos usando cuerdas. El primer puente colgante de cadenas en occidente se construyó en Inglaterra sobre el río Tees aproximadamente en 1741, para el paso de peatones y con sólo unos 60 centímetros de ancho. El primero para el paso de vehículos lo construyó el ingeniero de origen irlandés James Finley (1756-1828) en Pennsylvania (1801) sobre el río Jacob (entre Uniontown y Greenburgh), representando un impulso a la construcción de este tipo de puentes a pesar de sus reducidos 21 metros de luz. En 1815 Thomas Telford proyectó el puente de Menai (Gales) [fig. 5], con un tramo central de 176,47 metros y dos

10. RUDDOCK, Ted. Arch bridges and their builders 1735-1835. Cambridge University Press, 1979.

11. BILLINGTON, David P. The tower and the bridge: the new art of structural engineering. Princeton University Press, 1985.

Figura 4. Ensayo de Telford para establecer la geometría de la catenaria (Smith 1977)

Figura 5. Puente colgante de Menai.  
Thomas Telford 1819-26



laterales de 79,24 metros cada uno. Si bien no se comenzó a construir hasta 1819, quedando finalizado en 1826,<sup>12</sup> este puente supuso el prototipo y el origen del desarrollo de los puentes colgantes.<sup>13</sup>

A pesar de que —como se ha comentado anteriormente—, Thomas Telford no realizaba cálculos ni análisis matemáticos en sus construcciones, logró salvar con su puente de Menai una luz central sin precedentes de 176,47 metros, algo completamente impensable en aquella época. Al igual que con sus puentes anteriores, para lograrlo, Thomas Telford se basó en la experimentación con modelos a escala [fig. 4] de los elementos estructurales que proyectó, además de en la observación y estudio del comportamiento de estructuras previamente construidas.<sup>14</sup>

En cualquier caso, el hecho de que Thomas Telford no se apoyase directamente en las matemáticas para dimensionar sus puentes no implica que despreciase sus posibilidades. De hecho, cuando en 1820 presentó sus planos a Davies Gilbert (que en ese momento era miembro de la comisión que financiaba el proyecto) éste, a partir de una serie de cálculos, le recomendó aumentar el perfil de las cadenas para reducir la tensión sobre

12. Samuel Brown imitó a Telford y construyó entre 1819 y 1820 un puente para paso de carruajes sobre el río Tweed con un tramo central de 136,85 m de luz, finalizado por tanto antes que el de Menai.

13. MALBERG, A., Historisch-kritische Bemerkungen uber Kettenbrucken. Zeitschrift fur Bauwesen, vol. 7, 1857

14. SMITH, Denis. The use of models in nineteenth century British suspension bridge design. History of technology, 1977, vol. 2.



Figs. 6 y 7. Fotografía de la sección transversal del Puente Britannia. Robert Stephenson 1850

ellas.<sup>15</sup> Así, basándose en las estimaciones de Gilbert, Telford aumentó la flecha de las cadenas de los 10 metros previstos en un principio a los 15 metros definitivos.<sup>16</sup> Posteriormente, en 1826, Davies Gilbert desarrolló y publicó su análisis de forma y tensión de la catenaria,<sup>17</sup> de modo que se podría colegir que fue el diseño de Telford lo que estimuló la investigación y el desarrollo matemático de Gilbert y no a la inversa.<sup>18</sup>

#### Nuevas necesidades, nuevas tipologías: puente tubular y colgante

A mediados del siglo XIX la revolución que supuso la industria del transporte en Europa y Estados Unidos precisaba de trazados ferroviarios, estaciones, puentes, túneles, almacenes, puertos y sus edificios asociados, etc. Las nuevas necesidades constructivas en la industria del ferrocarril y la necesidad económica de un mejor aprovechamiento de los materiales hicieron que poco a poco la teoría de estructuras (elástica) fuera ganando importancia sobre la práctica de la construcción. Además, los avances de Gottfried Leibniz en el cálculo diferencial e integral supusieron un fuerte impulso al análisis estructural, en detrimento del método de Newton de aplicación menos práctica.

Pero ahora los puentes tenían otras necesidades, si anteriormente la principal carga de un puente era su peso propio, con la revolución industrial y la industria del ferrocarril los puentes tendrían que soportar una sobrecarga pesada y, peor aún, de carácter dinámico, lo que precisaba de soluciones diferentes a las de Telford. No en vano, en 1847 la vibración del ferrocarril hizo colapsar el puente sobre el río Dee en Chester,

15. CALLADINE, C. R. An amateur's contribution to the design of Telford's Menai Suspension Bridge: a commentary on Gilbert (1826)'On the mathematical theory of suspension bridges'. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2015, vol. 373, no 2039,

16. PAXTON, Roland. *Menai Bridge 1818-26, Evolution of design*. Thomas Telford, Engineer., 1980,

17. GILBERT, Davies. On the mathematical theory of suspension bridges, with tables for facilitating their construction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1826, vol. 116.

18. BILLINGTON, David P. *The tower and the bridge: the new art of structural engineering*. Princeton University Press, 1985.

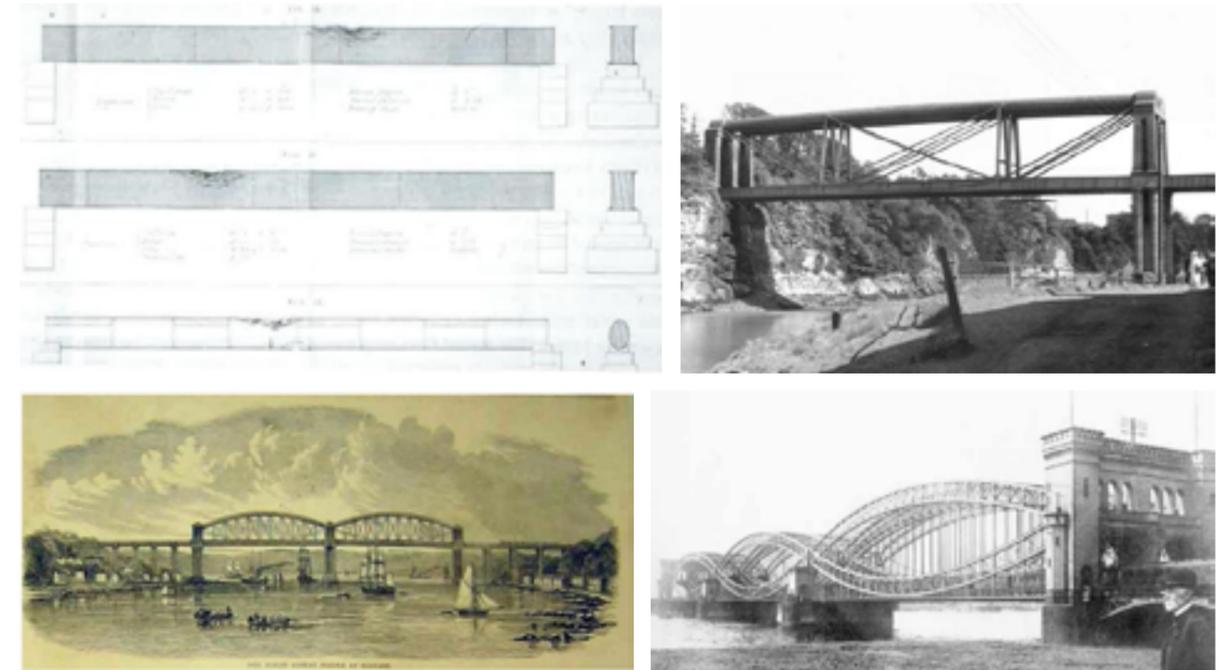


Figura 8. Resultados de las pruebas de flexión sobre modelo reducido del puente Britannia (Addis2005)

Figura 9. Puente Chepstow. Isambard Kingdom Brunel 1852 (John Morris 2006)

Figura 10. Puente Royal Albert sobre el río Tamar en Saltash. Isambard Kingdom Brunel 1859

Figura 11. Puente sobre el río Elba en Hamburgo. Lohse 1872 (Fernandez 2015)

Inglaterra, proyectado por Stephenson,<sup>19</sup> acelerando la búsqueda de nuevas formas mucho más rígidas para los puentes. En 1849 Robert Stephenson (1803-1859) construyó en Conway, al norte de Gales, un puente con un innovador diseño tubular y al año siguiente, en 1850, mejoró su diseño en el puente Britannia para cubrir una luz de 141 metros [fig. 7]. Se realizaron grandes ensayos y modelos a escala 1:6 con diferentes tipos de sección tubular que ayudaron a determinar, tanto la forma más eficiente, como las dimensiones finales del puente y dieron información general del comportamiento estructural de las vigas [fig. 8]. La solución dada a la sección del puente es precursora de las vigas cajón, en este caso con dos almas metálicas conectadas tanto superior como inferiormente a un entramado de vigas [fig. 6].

En un primer momento Robert Stephenson pensó en hacer un puente colgante con un tablero rígido que permitiera absorber las cargas dinámicas de viento y la vibración debida al paso del ferrocarril, de allí la presencia de las torres de piedra. Pero finalmente las pruebas y ensayos realizados daban tanta capacidad de carga a la sección tubular, y el tablero resultó tan rígido, que no necesitó del apoyo de las cadenas.<sup>20</sup>

Esta nueva solución estructural inspiró a George Biddell Airy (1801-1892) para elaborar la teoría de las placas elásticas y publicar sus hallazgos en 1863.<sup>21</sup> Al igual que en los trabajos de Telford y Gilbert, parece que nuevamente el diseño apoyado mediante ensayos sobre modelos

19. BLOCKLEY, David I. *The nature of structural design and safety*. Halsted Press, 1980.

20. FAIRBAIRN, William. *An account of the construction of the Britannia and Conway tubular bridges*. 1849.

21. AIRY, George Biddell. On the strains in the interior of beams. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, 1863, vol. 153.



Figura 12. Puente sobre el río Niágara. John A. Roebling 1855



Figura 13. Puente de Brooklyn. John A. Roebling 1883

estimuló la investigación científica y el posterior desarrollo teórico. Es decir, no se trató de la aplicación práctica de una teoría existente, sino que el conocimiento partió de un desarrollo empírico y fue la base para nuevos desarrollos de conocimiento.<sup>22</sup>

Dos años más tarde, en 1852, el ingeniero británico Isambard Kingdom Brunel (1806-1859) construyó también un puente tubular en Chepstow [fig. 9], pero esta vez utilizando celosías mucho más livianas para reducir el gran coste y peso de la solución del Britannia.<sup>23</sup> En Chepstow Brunel utiliza dos tubos de hierro fundido para absorber las compresiones mientras que unas cadenas de suspensión soportan el tablero y las tracciones. Así, en 1859, siguiendo el mismo sistema que en Chepstow, Brunel construyó el puente Royal Albert en Saltash [fig. 10], para una luz casi idéntica al Britannia, pero con una gran reducción en peso y utilización de material. Este esquema de funcionamiento se utilizaría con frecuencia posteriormente, como en el puente sobre el río Elba de Lohse (Hamburgo 1872) [fig. 11].

#### Puentes colgantes para ferrocarril

Pese a la creencia mayoritaria de que un puente colgante no podría soportar el tráfico ferroviario,<sup>24</sup> el ingeniero John Augustus Roebling (1806-1869), estadounidense de origen alemán, realizó numerosas pruebas empíricas para llegar a una solución que evitase las oscilaciones de los puentes provocadas por el paso de un ferrocarril y por el viento. Roebling consiguió rigidizar el tablero frente a cargas no simétricas y viento mediante una segunda familia de tirantes inclinados. Así, en 1855, sólo cinco años después del puente Britannia de Stephenson, Roebling construyó sobre el río Niágara un puente colgante de aproximadamente 250 metros de luz capaz de soportar el paso del ferrocarril, y además con un segundo tablero por debajo que permitía el paso de peatones y

22. ROSENBERG, Nathan; VINCENTI, Walter Guido. *The Britannia bridge: The generation and diffusion of technical knowledge*. Cambridge MIT Press, 1978.

23. CILENTO, A. Puentes y puentes colgantes. *Tecnología y construcción* n°16, 2000.

24. En 1830 Samuel Brown, proyectó un puente colgante para el ferrocarril, sobre el río Tees en Stockton, Inglaterra, pero la flecha producida durante la prueba de carga era tan grande que se tuvo que apuntalar y sustituir el puente. Llegando a extenderse la creencia que la tipología de puente colgante no era adecuada para el ferrocarril.

carruajes, todo ello con un peso de tan sólo una tonelada de hierro forjado por metro lineal frente a las 3.2 toneladas por metro lineal del puente Britannia [fig. 12].

El puente sobre el Niágara fue prototipo para sus siguientes puentes. Así en 1866, Roebling finalizó en Cincinnati un puente sobre el río Ohio con 321 metros de luz, convirtiéndose en el vano de mayor luz del mundo. En este puente Roebling reutilizó y mejoró su sistema de rigidización del tablero mediante tirantes inclinados, para en 1883 finalizar el puente de Brooklyn, con 478 metros, siendo de nuevo record de luz y convirtiéndose en como símbolo de progreso, donde empleó de nuevo los tirantes inclinados para rigidizar el tablero y evitar que se colapsara por las oscilaciones del viento [fig. 13].

#### Conclusiones

En definitiva, los diferentes ejemplos descritos a lo largo de esta aproximación sobre el desarrollo de las estructuras civiles durante el siglo XIX ilustran esa mencionada interpretación alternativa acerca del modo de construir conocimiento a partir de la observación y experimentación. Basadas en una comprensión profunda del comportamiento estructural a partir de estos principios empíricos, las obras expuestas de autores como Thomas Telford, Robert Stephenson o John Roebling —tan innovadores como valientes— comparten no ser el resultado de la aplicación directa de teorías generales de diseño o cálculo estructural. Es decir, no sólo no se pueden explicar o justificar a partir de los conocimientos teóricos manejados en la época, sino que paradójicamente inspiraron el desarrollo de métodos de análisis estructural más precisos.<sup>25</sup>

De hecho, no fue hasta 1858 cuando Rankine publicó la primera teoría sobre puentes colgantes, completada en 1888 por Melan;<sup>26</sup> esto es, más de treinta años después de que Telford levantara su puente en Menai superando los 176 metros de luz. Inspiración asimismo para Gilbert en el análisis de la forma y tensión de la catenaria de puentes colgantes, también los ensayos para la construcción del puente Britannia iluminaron a George Bidell Airy en su teoría de placas elásticas, rubricando la contribución del enfoque empírico al desarrollo de las estructuras.

25. BUONOPANE, Stephen G. *The Technical Writings of John A. Roebling and His Contributions to Suspension Bridge Design*. En *Proceedings of the Conference: The Technical Writings of John A. Roebling and His Contributions to Suspension Bridge Design*. 2006.

26. CHEN, Wai-Fah; DUAN, Lian (ed.). *Bridge Engineering Handbook: Construction and Maintenance*. CRC press, 2014.

## Referencias

- AIRY, George Biddell. On the strains in the interior of beams. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, 1863, vol. 153.
- BELLÉS, Patricia, et al. Generación de formas de estructuras laminares empleando modelos físicos y numéricos. En: *20º Jornadas argentinas de ingeniería estructural. 15 a 17 de octubre*. Buenos Aires, 2008.
- BILLINGTON, David P. *The tower and the bridge: the new art of structural engineering*. Princeton University Press, 1985.
- BLOCKLEY, David I. *The nature of structural design and safety*. Halsted Press, 1980.
- BUONOPANE, Stephen G. The Technical Writings of John A. Roebling and His Contributions to Suspension Bridge Design. En *Proceedings of the Conference: The Technical Writings of John A. Roebling and His Contributions to Suspension Bridge Design*. 2006.
- CALLADINE, C. R. An amateur's contribution to the design of Telford's Menai Suspension Bridge: a commentary on Gilbert (1826)'On the mathematical theory of suspension bridges'. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2015, vol. 373, no 2039,
- CERVERA BRAVO, Jaime. *Cálculo de estructuras y resistencia de materiales: origen y desarrollo histórico de los conceptos utilizados*. 1983. Tesis Doctoral. Arquitectura.
- CHEN, Wai-Fah; DUAN, Lian (ed.). *Bridge Engineering Handbook: Construction and Maintenance*. CRC press, 2014.
- CILENTO, A. Puentes y puentes colgantes. *Tecnología y construcción nº16*, 2000.
- COSSONS, N.; TRINDER, B. *The Iron Bridge (Bradford-on-Avon, 1979)*.
- FAIRBAIRN, William. *An account of the construction of the Britannia and Conway tubular bridges*. 1849.
- GILBERT, Davies. On the mathematical theory of suspension bridges, with tables for facilitating their construction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1826, vol. 116.
- HUERTA FERNÁNDEZ, Santiago. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera, 2004.
- MALBERG, A., Historisch-kritische Bemerkungen über Kettenbrücken. *Zeitschrift für Bauwesen*, vol. 7, 1857
- MANTEROLA ARMISEN, Javier. Structural engineering philosophy and technology [Filosofía y técnica estructural]. *Revista de Obras Públicas*, 1999, vol. 146, no 3388.
- PAXTON, Roland. Menai Bridge 1818-26, Evolution of design. *Thomas Telford, Engineer*, 1980,
- PAXTON, Roland. Thomas Telford's cast-iron bridges. En *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*. Thomas Telford Ltd, 2007.
- SMITH, Denis. The use of models in nineteenth century British suspension bridge design'. *History of technology*, 1977, vol. 2.
- ROSENBERG, Nathan; VINCENTI, Walter Guido. *The Britannia bridge: The generation and diffusion of technical knowledge*. Cambridge MIT Press, 1978.
- RUDDOCK, Ted. *Arch bridges and their builders 1735-1835*. Cambridge University Press, 1979.
- TRINDER, Barrie. The First Iron Bridges. *Industrial Archaeology Review*, 2013.