

MANUEL SILVA SUÁREZ, ed.

**TÉCNICA E INGENIERÍA  
EN ESPAÑA**

**VI**

**EL OCHOCIENTOS**  
**De los lenguajes al patrimonio**

Enrique Alarcón Álvarez	José Ignacio Muro Morales
Carles Alayo i Manubens	Javier Ortega Vidal
José Vicente Aznar García	Stefan Pohl Valero
Emilio Bautista Paz	Francesc Rodríguez Ortiz
Vicente Casals Costa	Amaya Sáenz Sanz
Juan Ignacio Cuadrado Iglesias	Jesús Sánchez Miñana
Leonardo Fernández Troyano	Manuel Silva Suárez
Alberto Fraile de Lerma	Mercedes Tatjer Mir
Cecilio Garriga Escribano	Fernando Vea Muniesa
Josefina Gómez de Mendoza	M. <sup>a</sup> Ángeles Velamazán Gimeno
Guillermo Lusa Monforte	Patricia Zulueta Pérez
Javier Manterola Armisén	

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA  
INSTITUCIÓN «FERNANDO EL CATÓLICO»  
PRENSAS UNIVERSITARIAS DE ZARAGOZA

Publicación número 3.111  
de la  
Institución «Fernando el Católico»  
(Excma. Diputación de Zaragoza)  
Plaza de España, 2 · 50071 Zaragoza (España)  
Tels.: [34] 976 288878/79 · Fax [34] 976 288869  
ifc@dpz.es  
<http://ifc.dpz.es>

© Los autores, 2011.

© De la presente edición, Real Academia de Ingeniería, Institución «Fernando el Católico»,  
Prensas Universitarias de Zaragoza, 2011.

Cubierta: La motorización es una característica esencial de la Revolución Industrial. Se  
presentan motores de tres tipos, todos diseñados y construidos en el siglo XIX:  
Máquina de vapor semifuera vertical de Alexander Hermanos; motor horizontal de  
gas de tipo Otto, protegido por patente de invención, de Joaquín Torres; y dina-  
mo *Gramme* L5 construida por la Sociedad Española de Electricidad. Estos tres  
tipos de motores coexistían en el cambio de siglo.

Contracubierta: Dibujos en la patente depositada por los ingenieros militares Eusebio  
Molera Bros y Juan Cebrián Cervera el 20 de junio de 1880 en los Estados Unidos.  
Residentes en California, trabajaron en muy diversos temas. Esta patente con-  
cierne a una mejora para los microscopios.

ISBN: 978-84-7820-814-2 (obra completa)

ISBN: 978-84-9911-151-3 (volumen VI)

Depósito Legal: Z-3688-2011

Corrección ortotipográfica: Ana Bescós y Laura Ayala

Digitalización: María Regina Ramón, AHOEPM, Bibl. ETSICCP de Madrid y Fons Històric  
de la ETSEI de Barcelona

Tratamiento digital: Manuel Silva Suárez

Maquetación: Littera

Impresión: INO Reproducciones, Zaragoza

IMPRESO EN ESPAÑA - UNIÓN EUROPEA

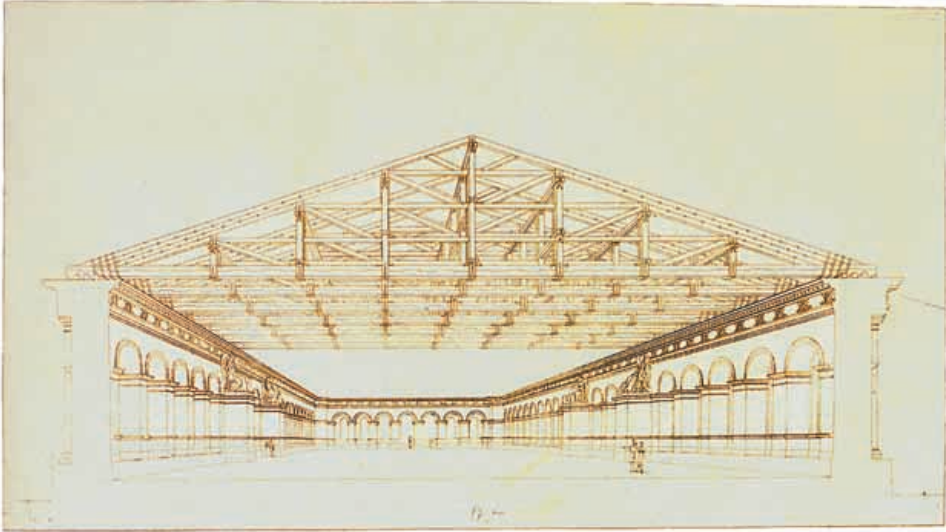
# Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras

Alberto Fraile y Enrique Alarcón  
Universidad Politécnica de Madrid

En este capítulo se reflexiona sobre la evolución en el siglo XIX de lo que en Italia solían llamar *scienza delle costruzioni*. En dos palabras: se trata de la aplicación de modelos de cálculo basados en la mecánica racional para determinar la seguridad de las construcciones. En este sentido, el XIX ofrece un cambio radical respecto al panorama de siglos anteriores, en los que lo fundamental era la experiencia constructiva y el proceso lento; lento tanto en la formación de técnicos como en la materialización de obras, donde la falta de herramientas de cálculo para prever comportamientos condujo en ocasiones al uso de modelos físicos a escala reducida para demostrar la seguridad de las construcciones o la factibilidad de su proceso edilicio.

El capítulo se refiere exclusivamente a modelos abstractos (ni siquiera a los ensayos de laboratorio que pusieron de manifiesto nuevos fenómenos), a pesar de lo cual conviene arrancar con cuatro ejemplos reales, uno por cada cuarto de siglo, que pongan de manifiesto los cambios de enfoque producidos en la construcción. El primero es una celebrada estructura de madera cuya seguridad fue comprobada mediante ensayos sobre elementos a escala real (fig. 8.1). Insuperable en la elegancia de su diseño, el segundo, el viaducto de las Cabrillas (1851) (véase la fig. 10.6, en este mismo volumen), fue proyectado y construido en piedra por Lucio del Valle en la cuesta de Contreras.

El tercer ejemplo podría ser un puente colgante o «colgado», como se denominaban en la época, de los numerosos que se construyeron en España en la segunda mitad de siglo, pero, por su envergadura y tipología, se ha decidido escoger un caso más tardío: el viaducto del Salado (fig. 8.2), en la línea de ferrocarril Linares-Almería, proyecto de José Olano (1897) llevado a cabo por la compañía Fives-Lille. El proceso de lanzamiento por empuje hasta entroncar con el túnel del estribo izquierdo fue presenciado en enero de 1899 por un grupo de alumnos de la Escuela de Caminos encabezados por su director, Rogelio Inchaurrendieta, y diferentes profesores, entre los que se encontraban Serafín Freart, encargado de Mecánica Aplicada, y Luis Gaztelu, profesor de Puentes. Con sus pilas de alrededor de 110 m de altura y sus vanos de otro tanto, es un buen ejemplo de lo que Javier Manterola llama «la gran invención de todo



**8.1. Construcción en madera:** Cubierta de la famosa sala de ejercicios ecuestres de Moscú (1818), diseñada por Agustín de Betancourt y descrita en BETANCOURT (1818).



**8.2. Construcción en hierro:** Viaducto del Salado, diseñado por José Olano (1897).

el siglo XIX: la viga en celosía, invención de tanta o mayor trascendencia que la bóveda de piedra para el arco» (MANTEROLA, 2006). Aunque las cerchas de bronce del Panteón de Roma, debidas a Apolodoro de Damasco, o los esquemas de Palladio y las cubiertas de las iglesias góticas son precursores de esta tipología (MAINSTONE, 1975), está claro que solo en el siglo XIX el cálculo permitió racionalizar los diseños y alcanzar la simplicidad y efectividad que Manterola reconoce como invención.

Finalmente, la fig. 8.3 representa la construcción del puente de Golbaro en Santander, uno de los primeros de hormigón armado en España (1900), cuyo autor fue J. Eugenio Ribera (COLEGIO ICCP, 1982). Este nuevo material llegará a su pleno desarrollo en el siglo XX, no sin vencer la desconfianza de sucesivas generaciones. Por ejemplo, Amós Salvador, en su contestación al discurso de ingreso de J. Manuel de Zafra en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ZAFRA, 1919), recoge el siguiente diálogo de Eduardo Saavedra, inspector de unas obras llevadas a cabo por Ricardo Bellsolá y otros: «¿Insisten ustedes en construir estos puentes de hormigón? —Sí, Don Eduardo. —¡Valor es!». Conviene advertir que esta desconfianza hacia el hormigón no hace más que repetir los mismos sentimientos, de vértigo ante lo nuevo, que se experimentaron años antes hacia los metales. Así, Bresse en 1859 dice:

L'avenir nous donnera la réponse; il montrera si les constructions en metal employées si fréquemment aujourd'hui dans les chemins de fer et les édifices publics ou privés finissent par cristalliser et perdre leur résistance après une certaine durée. (BRESSE, 1859).

En resumen, a los materiales clásicos, madera y piedra, se añaden en el siglo XIX los hierros y aceros, así como, finalmente, el hormigón. Ello motiva una reconsideración de la *tipología*, de las ideas sobre *seguridad estructural*, sobre los *métodos constructivos* y sobre el *cálculo* que produce la gran eclosión en la representación abstracta del comportamiento de las construcciones, lo cual solo es posible gracias al progreso de las ciencias.

Como decía Lucio del Valle en su ingreso en la RACEFN (VALLE, 1861),

Si se observan [...] los cortos progresos que han hecho las ciencias físicas hasta finales del s. XVI y el rápido vuelo que han tomado desde esta época, no se estrañará entonces la lentitud en los adelantos de las artes de la construcción que tienen su fundamento en aquellas ciencias [...]. No se suponía que las ciencias pudieran ejercerse sobre objetos comunes, que se ocupasen de las artes mecánicas, ni que descendieran a las minas, a los laboratorios, a los talleres...

Respecto a los conceptos contenidos en el título de este capítulo quizá las definiciones más sintéticas sean las de J. Manuel de Zafra en su discurso de ingreso en la RACEFN (ZAFRA, 1919):

La *mecánica interna* corresponde a [...] conocer [...] las cargas moleculares que soporta el material para proporcionar [...] la cantidad y distribución de este [...] La *mecánica externa*, [...] el cálculo de estructuras, es el estudio de las combinaciones de elementos constructivos para determinar las acciones que lo solicitan y las formas de agrupación más favorables.



**8.3. Construcción en hormigón armado:** *La construcción del puente de Golbaro, Santander, diseñado por J. Eugenio Ribera (1900).*

En lo que sigue se intentará, en un primer apartado, resumir la experiencia teórica hasta que Coulomb escribe su magistral ensayo. A continuación se tratarán someramente las diferentes líneas de trabajo generadas en países extranjeros, y finalmente se dará una visión personal de los esfuerzos llevados a cabo en España, que, aun disponiendo de centros docentes perfectamente conectados con lo que sucedía en el extranjero, no fue capaz de generar ninguna aportación original al debate internacional.

## I

### LA HERENCIA HISTÓRICA

Ya se han citado brevemente algunas realizaciones históricas del XIX, pero, en general, en siglos anteriores existe una falta de publicaciones achacable al secreto con que procedían las logias de constructores para mantener oculta la experiencia que solo se podía alcanzar en los gremios. Entre las obras que han llegado hasta nosotros cabe citar el *Cuaderno del s. XIII* (HONNECOURT, 2001) o el *Compendio de arquitectura* (SIMÓN GARCÍA, 1681), en el que se recoge la regla de Rodrigo Gil de Hontañón para dimensionar el espesor de los contrafuertes de un arco. También existe en español un curioso libro sobre bóvedas (TORIJA, 1661) y, desde luego, en el siglo XVIII comienzan a publicarse textos en que se recogen reglas geométricas semejantes (por ejemplo, BLONDEL, 1729). Abundantes estudios sobre estos temas se deben a HEYMAN (1972, 1982 y 1995).

Respecto a siglos previos cabe citar tres líneas originales de estudio que serán resueltas definitivamente en el XIX. La primera, planteada en GALILEO GALILEI (1638), se refiere a la *resistencia* de una viga en voladizo con carga en la punta, y fue resuelta recurriendo a un mecanismo hipotético de rotura y al establecimiento del equilibrio mediante la ley de la palanca. La segunda está relacionada con la *rigidez* de los muelles de reloj y de los *springing bodies* en general. Fue propuesta por Robert Hooke<sup>1</sup> al tratar sobre helioscopios, donde declaraba la ley «ut tensio sic vis» de proporcionalidad entre la extensión (*tensio*) y la fuerza (*vis*) aplicada a un cuerpo elástico. La tercera se trata de la *estabilidad* de los arcos y proviene también de una idea de Hooke de la misma época pero que solo fue descifrada treinta años después: «Ut pendet continuum flexile sic stabit contiguum rigidum inversum»<sup>2</sup>. Esta idea de antifunicular de las cargas junto con la de Gregory («an arch of any form can only be in equilibrium if we can draw a catenary curve wich passes trough it», 1697)<sup>3</sup>, referente a la seguridad que se consigue siempre que el antifunicular de cargas esté contenido dentro del espesor de las dovelas, fue utilizada en POLENI (1748) para demostrar la estabilidad de la cúpula de San Pedro. A lo largo del siglo XIX las comprobaciones de resistencia y estabilidad serán subsumidas en la de rigidez del cuerpo elástico siguiendo las ideas de Navier, como se verá más adelante.

En el XVIII los Bernoulli y el propio Euler desarrollan una aproximación magistral al problema de las piezas monodimensionales utilizando la proporcionalidad entre momentos flectores y curvaturas. El primer planteamiento es de Santiago Bernoulli, y se prolonga en los análisis de Daniel y en el definitivo estudio de Euler de 1744, con su asombrosa capacidad para resolver, de una vez por todas, el problema de la elástica (TRUESDELL, 1960). También en 1725 Varignon da a conocer la comunicación que, sobre el principio de los trabajos virtuales, le había enviado Juan Bernoulli en una carta. Esta «escuela suiza» fracasa cuando intenta atacar cuerpos laminares, como las campanas, mediante una red de elementos monodimensionales. Como dice Truesdell: «It was the brilliant successes of the special theories that blocked the way to the general theory, for nothing is harder to surmount than a corpus of true but too special knowledge» (TRUESDELL, 1960). Así, cuando Chladni, en sus experimentos de vibración de placas, comprobó la falta de concordancia con la teoría de Euler, acertadamente concluyó que el problema provenía de una falta de representatividad de los modelos matemáticos y de la ignorancia existente en geometría de superficies. Ello dio lugar al famoso concurso de la Academia de Ciencias francesa con que arranca el siglo XIX, según se verá.

<sup>1</sup> R. HOOKE: *A Description of Helioscopes, and some other Instruments*, Londres, John Martyn, 1676. Véase también HOOKE, 1678.

<sup>2</sup> Es decir: «Al igual que cuelga la línea flexible, pero de forma invertida, permanecerá rígido el arco».

<sup>3</sup> D. GREGORY: «Catenaria», *The Philosophical Transactions of the Royal Society*, 19 (231): 637-652, 1697.

Una idea de los problemas que se consideraban dignos de estudio en el siglo XVIII viene expresada por el ingeniero militar Henri Gautier en una obra de 1717 (HEYMAN, 1972). Son los siguientes:

1. Cómo determinar el espesor de los estribos de un puente.
2. Cómo fijar el tamaño de las pilas intermedias en función de la luz de los vanos.
3. Cómo fijar el espesor de las dovelas vecinas a la clave del arco.
4. Cómo dimensionar los muros de contención.

Este programa recoge los temas clásicos de la construcción: la superación de un vano, el soporte de una carga o la resistencia a un empuje, y está lógicamente limitado al arco, tipología indiscutida de los puentes de la época.

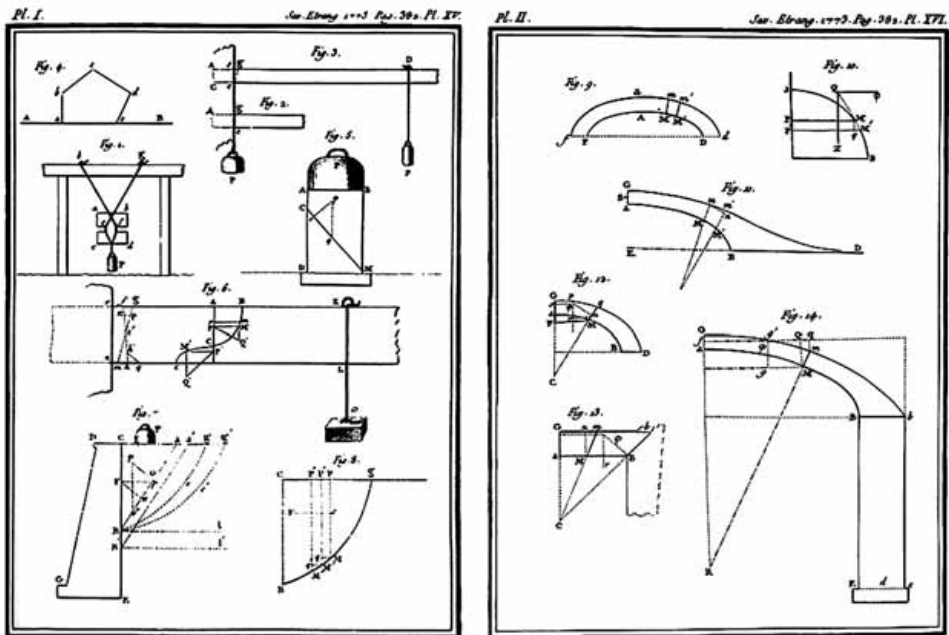
A lo largo de los siglos XVIII y XIX habrá un deseo continuo de analizar estos problemas siguiendo los pasos de La Hire, que en 1712 observó que los arcos se inestabilizaban por creación de fisuras, lo que obligaba a la línea de presiones a pasar a través de los «puntos» de contacto que restaban. Este esquema fue desarrollado por Couplet (1730), que habla de la rotura en cuatro piezas por formación de rótulas. La idea fue utilizada por Lesseur, Jacquier y Boscovich para, empleando el principio de los trabajos virtuales (LE SEUR, JACQUIER y BOSCOVICH, 1743; STRAUB, 1952) de Santiago Bernoulli, analizar la cúpula del Vaticano y proponer cadenas circunferenciales para su refuerzo. Puede decirse que el siglo XVII se cierra con la memoria presentada en 1773 por Coulomb, «Ingenieur du Roi», a la Academia de Ciencias: *Essai sur une application des règles de maximis & minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture* (HERMAN, 1972). Aunque la parte más célebre es la relativa al empuje de tierras (hasta el punto de que la revista inglesa *Geotechnique* decidió usar el *cul de lampe* que figura al final de la memoria como dibujo identificativo), son igualmente importantes el análisis de vigas, el cálculo de pilares y el estudio de bóvedas, lo que, según lo dicho antes, significa que, en 40 páginas, Coulomb contesta de forma rigurosa a los tres problemas típicos de la construcción.

En la fig. 8.4 se recogen dos láminas del *Essai*. En ella, la llamada *figura 1* se refiere a experimentos relativos a rotura por tracción, mientras que la 2 y la 3 muestran la diferencia de comportamiento de la sección de empotramiento de una barra dependiendo de si la carga que sostiene está alejada o es vecina al empotramiento (fallo de cohesión por flexión, comparado con rotura por cortante). La *figura 5* muestra la rotura de un pilar a compresión debida al fallo a lo largo de una línea *CM*, que se obtiene con la condición de mínimo de la carga aplicada. La fórmula se compara con los ensayos de Musschenbroek. SAINT-VENANT (1864) es crítico con esta hipótesis: «Il cherche même à donner, de l'écrasement d'un pilier, une explication fondée sur un effet de cette espèce; explication que nous ne croyon pas être véritable». La *figura 6* ha sido muy reproducida: con gran rigor y claridad de ideas, se establece que las fibras longitudinales de la viga, en una sección transversal, están sometidas a tracciones y compresiones cuyos volúmenes deben anularse, pues no hay esfuerzo axial; las componentes verticales *QM* (el esfuerzo cortante) deben igualar el peso, y además, «par les



principles de statique, l'on a encore la somme des momentum autour du point C de toutes les forces, soit de traction, soit de pression, égale au momentum des poids Y autour du même point». Obsérvese que el equilibrio estático está perfectamente descrito, pero Coulomb, a pesar de tener en la mano el concepto de tensión, no llega a identificar su trascendencia y finalmente, como Galileo, formula la hipótesis de giro alrededor de la fibra inferior, aunque, notando que la presión en  $h$  debería ser infinita al tratarse de un área nula, habla de subir la resultante de las compresiones a  $h^1$ . Finalmente, la *figura 9* y siguientes de Coulomb, en especial la *14*, muestran el estudio de bóvedas suponiendo su rotura, como habían indicado La Hire y Bossut, pero clarificando la posición de la línea *Mm*. Como se indica en HEYMAN (1972), Coulomb no aporta aquí ideas nuevas, pero sí un rigor y una claridad mayores.

Realmente, la memoria de Coulomb representa el punto clave de la transición al XIX, tanto por tratarse de una obra precursora como por la cantidad de ideas que contiene. Ello no solamente se reconoce ahora, sino que este trabajo fue admirado desde su publicación; Poncelet y Saint-Venant lo alababan sin reservas, cosa que hacen también todos los autores que lo estudiaron, incluidos los españoles del siglo XIX. Sirvan de ejemplo las siguientes citas (SAINT-VEANT, 1864):



8.4. Essai sur une application des règles de maximis & minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture, por Charles-Augustin de Coulomb (presentación realizada en 1773), *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, vol. 7, París, 1776.

La mémoire de Coulomb comprend tant de choses dans peu de pages que, pendant plus de quarante ans, l'attention des ingénieurs et des savants ne s'était fixée sur aucune, ainsi que M. Poncelet l'a remarqué pour ce qui est relatif à la théorie des voûtes [...].

Où on se trouvent posées presque toutes les bases de la théorie de la stabilité des constructions.

## II

### LA EVOLUCIÓN EN EUROPA

El siglo XIX empieza con la rivalidad entre dos puntos de vista que tratan de explicar la estructura de los cuerpos: la «mecánica analítica» de Lagrange (con su planteamiento variacional y las hipótesis de enlaces entre elementos diferenciales del continuo) y la «mecánica física» de Laplace, que imagina que la materia está formada por partículas aisladas que se atraen o se repelen según una ley de fuerzas centrales semejantes a la patrocinada para la mecánica celeste por Newton o Boscovich.

En el primer cuarto de siglo se plantean los nuevos conceptos sobre elasticidad y cálculo de estructuras que van a ser desarrollados a lo largo de la centuria. Aunque los protagonistas principales son Navier, Poncelet, Poisson y, sobre todo, Cauchy, la primera batalla entre escuelas de pensamiento se produce a raíz del concurso de la Academia de Ciencias francesa para intentar obtener las ecuaciones que rigen el comportamiento dinámico de las placas y dar de esa forma soporte teórico a los experimentos que Chladni (1756-1827) había convertido en apasionantes *happenings* sociales.

Como es sabido, el premio, tras varios intentos, se entregó a Sophie Germain (BUCCIARELLI y DOWORSKY, 1980), quien propuso una generalización de los métodos de Euler para barras suponiendo que la energía elástica era proporcional al cuadrado de la suma de las curvaturas principales. Lo erróneo de su planteamiento variacional fue puesto de manifiesto por uno de los revisores, Lagrange, que dejó escrita la ecuación a la que conducía la hipótesis anterior, ecuación que, a pesar de lo equivocado de la hipótesis, es exacta por las razones expuestas por SAINT-VENANT (1864). Lagrange nunca volvió a ocuparse de este tema, pero el conocimiento de la solución impulsó un estudio de Poisson basado en la «mecánica física», forzando groseramente los límites del modelo para llegar a la conclusión deseada. En este momento Navier plantea sus trabajos clave. En primer lugar, la *Memoria sobre la flexión de planos elásticos*, leída ante la Academia en 1820, así como la obtención de las *Ecuaciones generales de equilibrio de los cuerpos elásticos*, en una memoria de 1821 (SAINT-VENANT, 1864; TODHUNTER y PEARSON, 1960). Ante la reconsideración de ideas provocada por Navier, tanto Poisson como Cauchy reaccionaron con sus propias teorías, y en particular este último a partir de 1822 generalizó los resultados poniendo la elasticidad en una firme base deductiva e introduciendo el concepto de tensión que ha perdurado desde entonces.

Aunque Navier es determinante en el desarrollo de la teoría de la elasticidad, su gran influencia en España se debe a sus *Lecciones de mecánica aplicada a las cons-*

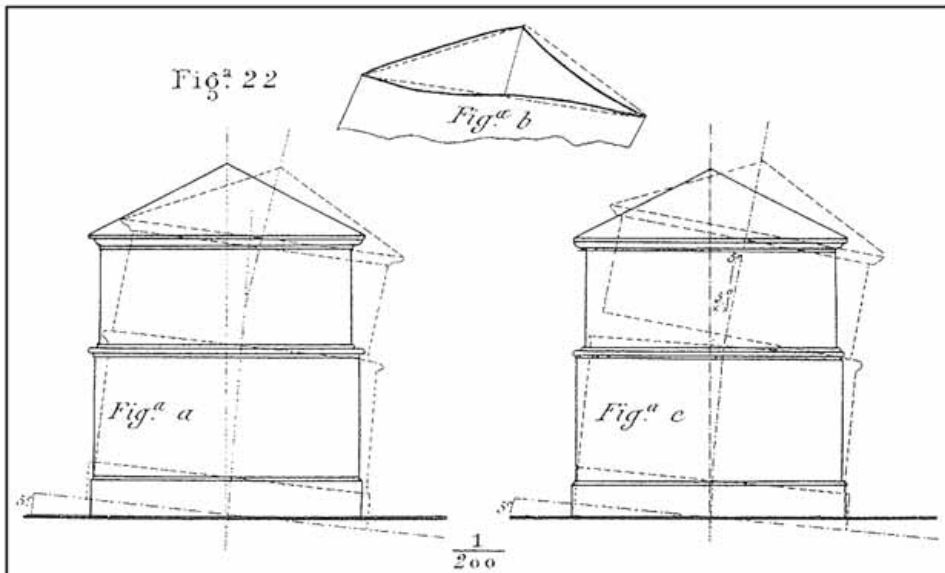
*trucciones y las máquinas*. En ella afronta la resistencia de materiales de una forma que será seguida por los ingenieros españoles hasta finales del siglo XIX, cuando empiezan a asimilarse los logros de la escuela alemana. Navier comprende la necesidad de recurrir a los principios de compatibilidad y a la ley de comportamiento para resolver en régimen elástico los problemas hiperestáticos y los aplica a la resolución de los arcos, con lo que rompe con la tradición de La Hire y Coulomb, orientados al equilibrio en estado de rotura. Introduce, de forma congruente, el concepto de seguridad basándose en la tensión máxima en la estructura (Poncelet y Saint-Venant preferirán la idea de deformación máxima), y con ello cambia el enfoque en resistencia que había arrancado con Galileo al de flexibilidad y limitación de las flechas. Plantea además los dos métodos que conocemos en la actualidad: el de flexibilidad y el de rigidez. Este último, generador de enormes sistemas de ecuaciones, reaparecerá en la obra de Clebsch y fue dejado de lado hasta la segunda mitad del siglo XX, cuando los computadores permitieron la resolución de ecuaciones algebraicas lineales con comodidad.

El primer enfoque de Cauchy se basaba en la relación lineal entre los tensores de tensión y deformación, así como en la concordancia de las direcciones principales de ambos, aunque en desarrollos posteriores recurrió a los métodos de la «mecánica física». No obstante, fue en el segundo cuarto de siglo cuando, a través de sus *Exercices de mathématiques* (1827) se divulgaron las ideas de Cauchy, así como las de Poisson (1828). También se produjo la gran alternativa de Green al admitir un potencial de las deformaciones (1839), y en 1852 se publicó el primer tratado sobre elasticidad siguiendo las lecciones de Lamé (1870) en la Facultad de Ciencias de París (LAMÉ, 1852). Tanto Lamé como Clapeyron, durante sus primeros años de profesionales, habían acudido a San Petersburgo, llamados por Betancourt, para calcular la cúpula de San Isaac y dar clase en el Instituto de Vías de Comunicación.

En esta época comenzó la evolución de Poncelet desde la geometría proyectiva hacia la mecánica del continuo, y en su *Cours de mécanique industrielle, fait aux artistes et ouvriers messins* (1827) aparecía por primera vez la representación de una curva de tracción-alargamiento, como premonición del uso de la de tensión-deformación (TODHUNTER y PEARSON, 1960). La *Mecánica aplicada* de Poncelet fue texto, en versión original, en la Escuela de Caminos de Madrid. Por su parte, Barré de Saint-Venant (1797-1886) y J. A. Bresse (1822-1883) escribieron las mejores páginas sobre elasticidad y resistencia de materiales mientras eran profesores en la École des Ponts et Chaussées. La obra clásica del primero fue la relativa a la torsión, donde introducía su método semiinverso, en el que demostraba el ingenio y la maestría matemática que lo pondría a la cabeza de los investigadores de su tiempo, mientras que sus ediciones de NAVIER (1825) y CLEBSCH (1883), llenas de comentarios profundos, contribuirían a hacer todavía más populares estos libros. Tanto la obra de BRESSE (1859) como la del general MORIN (1857), amigo y admirador de Poncelet, tendrían una profunda influencia en España, donde llegaron a ser justamente apreciadas. En su *Résistance*, Bresse se queja: «On peut regretter qu'elle [la elasticidad] ne forme point la base de notre enseignement».

A partir de la segunda mitad del siglo la preeminencia de la escuela francesa cede ante las contribuciones de autores de otros países, entre los que es imposible dejar de citar a Clebsch en Alemania, con su magistral obra, y Rankine o Maxwell en el Reino Unido (CHARLTON, 1982), este último con contribuciones geniales sobre el cálculo de estructuras formadas por barras que anticipan estudios posteriores de MÖHR (1868) y CULMANN (1875).

Si los métodos gráficos de Culmann son un desarrollo lógico de la geometría proyectiva de Monge y Poncelet, su nivel teórico «había asustado [...] a muchos ingenieros que habían desistido de estudiarla» (MÖHR, 1868), por lo que Möhr defendía el uso de «la vieja geometría» y del principio de los trabajos virtuales. Ambos puntos de vista serían seguidos por los tratadistas españoles, que tardaron cierto tiempo en asimilar los métodos de Castigliano, expuestos en una obra de la misma época (CASTIGLIANO, 1879). No es hasta el último cuarto de siglo cuando se escriben los libros definitivos del cálculo de estructuras, gracias a Müller-Breslau, quien en un par de años publica dos obras que tendrán un tremendo impacto entre los ingenieros españoles: los *Nuevos métodos* (MÜLLER, 1886), donde defiende a Castigliano, y la *Estática gráfica* (MÜLLER, 1887), que es realmente una enciclopedia sobre todos los métodos, gráficos o no, disponibles. En este final de siglo son numerosas las aportaciones importantes que tendrán repercusión en el futuro, como la *Teoría del sonido* de Lord Rayleigh (STRUTT, 1877), donde todavía se puede leer con aprovechamiento el enfoque de la dinámica de estructuras, o el tratado de LOVE (1892).



**8.5. Estudio sobre la resistencia y estabilidad de los edificios sometidos a huracanes y terremotos, obra de Rafael Cerero (1890), general de brigada comandante general subinspector de Ingenieros del Archipiélago Filipino.**

La escuela francesa influye en España principalmente a través de dos tratados: uno de SARRAU (1889) y otro de POINCARÉ (1892). Ambos serán utilizados por Echegaray en la Facultad de Ciencias. El primero es un breve curso en la Polytechnique que utiliza sistemáticamente la palabra *tensión* para designar tanto las compresiones como las tracciones, mientras que el segundo es un libro recopilatorio que arranca con las ideas de Green.

En los primeros años del siglo XX también influyen en España las investigaciones de VOLTERRA (1907) y las de los hermanos COSSERAT (1909), que tanta influencia tendrán en el XX, y comienzan a extenderse las primeras aplicaciones del método de Rayleigh-Ritz, llevadas a cabo por un joven TIMOSHENKO (1913), para los problemas dinámicos y de inestabilidad. En esta segunda mitad del siglo XIX se sientan las bases de la respuesta sísmica de estructuras con el tratado de MALLET (1862), la aparición de los primeros sismógrafos debidos a Milne (1880) y la organización de una red de observatorios con estos sismógrafos tipificados (1895), entre los que estaría el Observatorio de la Marina en San Fernando. De esta época es una interesantísima contribución española del general CERERO (1890) tras su estancia en Filipinas (fig. 8.5).

### III

#### EL CASO ESPAÑOL

Es imposible evitar la sensación de melancolía cuando se estudia la posición española en la evolución de la mecánica de medios continuos y la teoría de estructuras en el siglo XIX. Aunque se dispone de centros docentes punteros y de personas de calidad intelectual, los continuos conflictos bélicos e ideológicos hacen que, como en el telar de Penélope, constantemente haya que ir reconstruyendo lo previamente destruido. Además, las élites se ven obligadas a participar en el día a día político, administrativo y profesional, por lo que no tienen tiempo de publicar aportaciones originales en su área de especialidad, e incluso las que podrían serlo desaparecen en el olvido por falta de participación en la discusión internacional activa, cuya experiencia, paradójicamente, era bien conocida y aplicada, como atestiguan, por ejemplo, los fondos de la Biblioteca de la Escuela de Caminos de Madrid o los artículos en la *Revista de Obras Públicas*.

A ello habría que añadir la ausencia de una Academia de Ciencias, que había sido el dinamizador de la investigación en otros países, y de la propia Facultad de Ciencias hasta una época tardía. En efecto, aunque la resistencia de materiales y el cálculo de estructuras responden a necesidades de tipo profesional, la elasticidad surge inicialmente como rama de la física matemática:

La Physique mathématique [...] est une création toute moderne qui [...] ne comprend en réalité que trois chapitres [...]: la théorie de l'électricité [...]; la théorie analytique de la chaleur; enfin la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides. Le dernier est le plus difficile, le moins complet; il est aussi le plus utile, à une époque où l'on veut

apprécier l'importance d'une théorie mathématique par les résultats qu'elle peut fournir immédiatement à la pratique industrielle. (LAMÉ, 1852).

En cualquier caso, la etapa inicial tiene su origen en la creación de las escuelas militares en el siglo XVIII y en la reacción ante el tipo de enseñanza impartida en la Real Academia de Bellas Artes o en la ignorancia de los constructores que motivaron la filípica de BETANCOURT y LÓPEZ DE PEÑALVER (1791):

En España no ha habido donde aprender, no solo cómo se clava una estaca para fundar un puente, pero ni aun cómo se construye una pared. En la Academia de las Bellas Artes no se enseña más que el ornato de la arquitectura. El arquitecto se forma copiando unas cuantas columnas y, agregándose a la casa de alguno de la profesión, donde suele ver y oír cuatro cosas de rutina. Y con esta educación y estos principios y examinado por otros que tienen los mismos, queda aprobado y se le da la patente para cometer cuantos desaciertos le ocurran en edificios, puentes, caminos y canales.

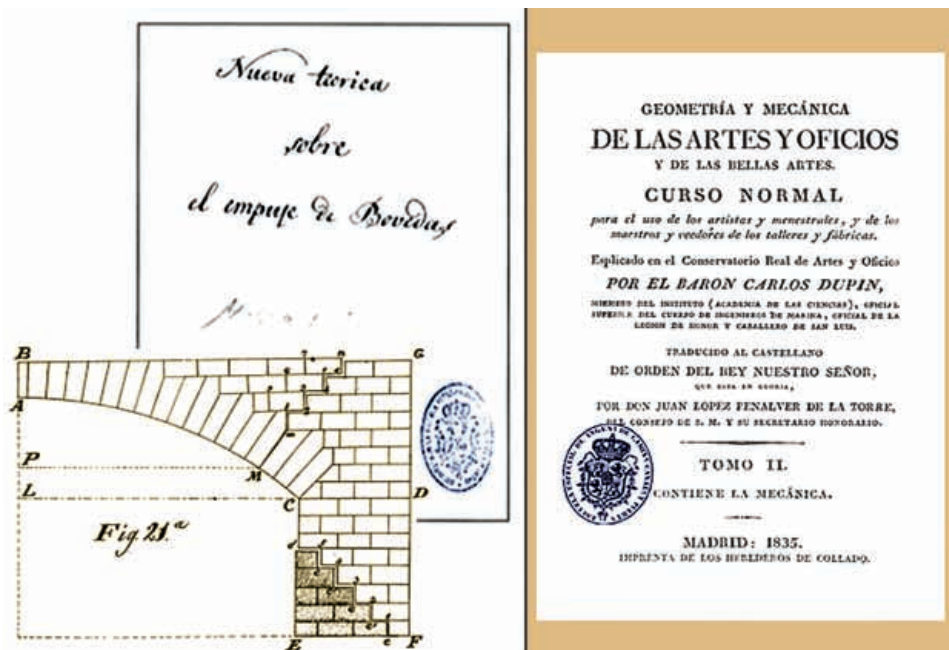
Una muestra del tipo de literatura que se hacía es la obra de BAILS (1796) («grafómano mediocre», como le hubiese llamado Marañón), de extensión descomunal y compuesta, según reconocía el propio autor, como condensación de todo el material escrito que estuvo a su alcance, iniciando una costumbre que un siglo después criticaría Rey Pastor al decir que en España «matemático se llama a quien de dos manuales sabe sacar un tercero» (REY PASTOR, 1915).

El siglo XIX español está absolutamente influido por la cultura francesa, que llega a través de los sucesivos grupos de becarios que, arrancando con Betancourt, Lanz y López Peñalver, se prolongan posteriormente con los alumnos de la recién creada Escuela de Caminos, como Antonio Gutiérrez, que va a la École Polytechnique, o los que acuden a la también parisiense École Centrale des Arts et Manufactures, modelo para la ingeniería industrial, como Joaquín Alfonso (pensionado en 1834-1838), Cipriano S. Montesino o Juan Cortázar.

Es curioso comprobar que en la famosa polémica entre Lanz y Betancourt a propósito de quién debe sustituir como profesor a aquel en su ausencia de la Escuela de Caminos, los dos recomendados de Lanz, Joaquín Monasterio, de la promoción de 1804, y José Azas, de la siguiente, serán, en el futuro, los encargados de explicar las asignaturas relacionadas con nuestro tema. Así, Monasterio se ocupará de la asignatura denominada *Empujes de Tierra y Bóvedas* del primer curso, mientras que Azas será el encargado de la llamada *Mecánica Aplicada* en el intento de restauración de 1822 y en la definitiva Escuela de 1834 (de ella será director brevemente en la segunda mitad de 1856), donde prácticamente monopolizará la asignatura hasta 1848, año en que, tras la protesta estudiantil capitaneada por Sagasta, se producirá la dimisión del director Subercase y con él la del claustro de profesores, Azas entre ellos. El sustituto provisional será Santiago Bausá (1823-1884), hasta que en 1853 se ocupará de ella Eduardo Saavedra, al que seguirán los hermanos Echegaray.

En el primer cuarto del siglo hay pocas publicaciones notables. Existe una traducción (1805) del libro de Prony (1802) sobre empuje de tierras que será utilizado en

el primer curso. Prony expone la teoría de Coulomb, cambiando como variable a determinar una longitud por el ángulo de la cuña de empuje, lo que ha sido costumbre tipificada desde entonces. *Nueva teórica sobre el empuje de bóvedas* (¿1808?) es una curiosísima obra manuscrita de Joaquín Monasterio. Figura en el catálogo de la Escuela de Caminos y ha llegado a nosotros a través de Saavedra. Como dice SÁENZ RIDRUEJO (2006), se trata de una obra que merecería un estudio especial<sup>4</sup>. En ella se busca el fallo crítico del arco aplicando la teoría de permutaciones a las diferentes formas de rotura mediante un planteamiento original que hace lamentar el aislamiento de su autor y la consiguiente falta de difusión, limitada incluso dentro de nuestro propio país. Según KURRER (2008), la obra fue redescubierta por Santiago Huerta en 1991 y, posteriormente, analizada<sup>5</sup>.



**8.6. Dos publicaciones notables:** 1) J. Monasterio: *Nueva Teórica sobre el empuje de la bóvedas*, Madrid, 1808; 2) Ch. Dupin: *Geometría y mecánica de las artes y oficios*, Madrid, 1835 (traducido del francés por Juan López Peñalver de la Torre, 1825, para su uso en el Real Conservatorio de Artes, Madrid).

<sup>4</sup> En el momento de redactar este capítulo llega a nuestro conocimiento que el profesor Samartín Quiroga está llevando a acabo el análisis del manuscrito de Monasterio.

<sup>5</sup> S. HUERTA y F. FOCE: «Vault theory in Spain between XVIIIth and XIXth century: Monasterio's unpublished manuscript "Nueva teórica de las bóvedas"», en *First International Congress on Construction History*, Madrid, 2003.

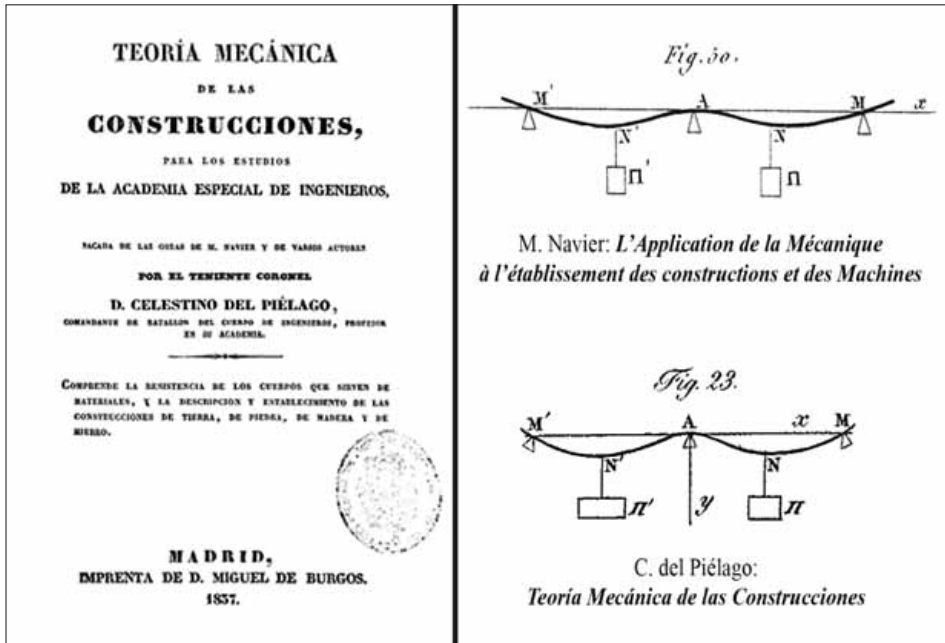
En la segunda mitad del siglo repercuten en España los hallazgos llevados a cabo en Francia en la época anterior. Como obra de transición es de notar que López Peñalver (hijo) realiza en 1830 una traducción de la Geometría y Mecánica que Dupin explicaba en el Conservatoire d'Arts et Métiers y en cuyo segundo tomo, lección XIV, aparece el estudio «De las presiones, de las tensiones y de la elasticidad en general», así como el tratamiento de vigas a flexión. Se trata de una obra que había sido editada por Dupin en tres volúmenes unos diez años antes (1825), como resultado de su experiencia en las clases gratuitas impartidas en el Conservatoire, y, por tanto, no incluye los avances fundamentales de Navier, Cauchy o Poisson. Su traducción coincide con dos tránsitos a mejor vida. El primero de ellos fue el de Juan López Peñalver (padre), ya que el segundo volumen se publicó el mismo año de su muerte (1835). López Peñalver constituyó el nexo de conexión con el esfuerzo ilustrado en el siglo XVIII, fue capaz de sobrevivir a guerras y revoluciones, mantuvo siempre su prestigio científico y recibió responsabilidades tanto durante la Administración josefina (director general del cuerpo de Ingenieros Civiles) como durante el reinado de Fernando VII. Por ejemplo, cuando el ministro López Ballesteros consiguió en 1824 la creación del Conservatorio de Artes y Oficios, inicialmente situado en la calle del Turco, López Peñalver fue nombrado director y, para uso de sus alumnos, copiando literalmente el esquema francés, encargó a su hijo Juan López de Peñalver y de La Torre la traducción de la obra «De orden del Rey nuestro Señor», como indica el tomo I, publicado en 1830.

El segundo tránsito al que se ha aludido es el de Fernando VII, fallecido en 1833, lo que se refleja en la portada del tomo II, donde se indica que «está en gloria». Cabe recordar que Dupin, ingeniero naval y *polytechnicien*, llegó a ser ministro de la Marina en 1834, lo que refleja el compromiso político de los «intelectuales», ejemplo que será también asumido por los técnicos españoles.

Uno de los más ilustres de estos últimos fue Celestino del Piélagos y Fernández de Castro (1792-1880), que terminó siendo general de Ingenieros, director general de Obras Públicas con el ministro Moyano y primer poseedor de la medalla número 13 de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, de la que fue fundador electo el 3 de abril de 1847 (también fue académico de la de Nobles Artes de San Fernando).

Diez años antes, en 1837, siendo comandante y profesor de la Academia Especial de Ingenieros, publicó la *Teoría mecánica de las construcciones* (PIÉLAGOS, 1839), que, según indica en portada y reafirma en el prólogo, «está sacada de las obras de Navier y de varios autores». Efectivamente, el futuro académico en la sección de «Ciencias exactas», traduce textos y calca figuras de las obras realizadas en los años veinte por Navier, a quien profesa una admiración incondicional y reconoce como punto de inflexión. «Sin volver los ojos muy lejos de nuestro tiempo [...], sin contar con la teoría de Rondelet que da lástima ver inserta en su apreciable obra del arte de construir», dice en el prólogo, donde aclara que «las más de las veces traduzco», aunque también asegura que omite, simplifica y adapta a unidades españolas cuando lo cree oportuno.





8.7. Débito a Claude Louis Navier: Celestino del PiéLAGO, Teoría Mecánica de las construcciones, Madrid, 1837.

Es muy curiosa la justificación que da el comité de aceptación de la Escuela Militar, pues, según ellos, todos los ingenieros trabajaban en todos los temas con independencia de su especialidad, por lo que, para cubrir esa amplia demanda, era necesario traducir la obra.

El servicio público entre nosotros relativamente a los objetos de construcciones está subdividido en menor número de manos [que en Francia y otros pueblos]; de donde resulta que el arquitecto ha tenido y tiene muchas veces que ocuparse de trabajos de caminos o puentes; el ingeniero militar, de proyectos de arquitectura civil; el hidráulico, en obras militares; y todos, en objetos muy distantes del fin para el que debieron educarse. De esto resulta que un libro escrito fuera de España difícilmente se acomodará a nuestras necesidades, y que es muy digno de aprecio el trabajo que el Autor de esta obra se ha tomado de ordenarla convenientemente, reunir en ellas el mayor número de doctrinas útiles y entresacar con este objeto de diversos tratados lo más importante a la ciencia del ingeniero, cualquiera que sea la denominación bajo la que se le considere. (PiéLAGO, 1839).

Quizá esta finalidad no se cumpliera estrictamente, pues en algunos lugares, como la Escuela de Caminos, se prefería trabajar con las versiones originales, y, así, en 1839 Cerdá escribe a su hermano una carta donde pondera lo exigente que era la Escuela (SÁENZ RIDRUEJO, 2006) e indica la dificultad añadida de que ningún texto de los que deben estudiar esté en español. También, años después, en sus *Recuerdos*, ECHEGARAY (1917, t. II, p. 74) dirá:

dentro de la Escuela, siempre obras francesas, no las traducidas, sino las originales; los cálculos de Navier y Duhamel, la Mecánica de Poisson, la Descriptiva de Leroy, el corte de piedras de Adhemar, la *Mecánica aplicada* de Poncelet [... añadiendo:] bien es verdad que me refiero a mis tiempos, a los años 48 al 54; después se han ido escribiendo obras españolas de mérito y de importancia. ¡No se olvide que estos son mis recuerdos!

Desde un punto de vista de lenguaje, puesto que solo trata elementos monodimensionales, Piélagó no tiene necesidad más que de las resultantes de fuerzas y momentos en las secciones de las barras. Y así, en el título del capítulo II se lee «Resistencia de los cuerpos a un *esfuerzo* dirigido en el sentido de su longitud que tiende a estirarles y romperles», y acto seguido habla de la «fuerza Q»; es decir, claramente la primera obra en español, que sirvió de texto en un centro público, dedicada a la resistencia de materiales y al cálculo de estructuras utiliza el término *esfuerzo*, que se mantiene actualmente en la mayoría de los ambientes técnicos para designar a las fuerzas internas o resultantes de tensiones. Según atestigua la *Gaceta*, la obra era texto en la Escuela de Arquitectura para la asignatura de Mecánica Aplicada incluso en 1861.

Otra de las publicaciones dignas de mención es debida a Manuel María de Azofra (1813-1879), arquitecto y profesor de Matemáticas en Valencia y de Mecánica Aplicada en la Escuela de Arquitectura de Madrid. En 1855 formó parte del cuadro inicial de profesores del Real Instituto Industrial, de donde pasó a ser director general de Agricultura, Industria y Comercio con el ministro de Fomento Francisco Luxán, que tenía como director general de Obras Públicas al *centralien* Cipriano S. Montesino. Al crearse la carrera de Ingeniería Industrial convalidó en ella su título y fue miembro y presidente de la primera Asociación de Ingenieros Industriales. En la Academia de Ciencias, sección de Ciencias Exactas, fue el tercer poseedor de la medalla número 14 (1863), en la que le precedieron el ingeniero de caminos García Otero y el *centralien* Juan de Cortázar. Su *Curso industrial* (AZOFRA, 1838) recoge las clases patrocinadas por la Real Sociedad Económica de Valencia.

Es una obra instructiva por varios motivos. En particular, se mueve por el mismo criterio que el Conservatorio: la extensión desinteresada del conocimiento. Al respecto son interesantes las palabras del autor:

solo pediré se me permita recordar que yo la compuse [esta obra] no en tiempos tranquilos y bonancibles, sino en los turbulentos y desgraciados, en los que ni estímulo, ni recompensa, ni honor de su publicación esperaba, en que solo anhelaba por premio de mis desvelos proporcionar alguna utilidad a las clases laboriosas, premio, a la verdad, el más linsogero y el que más cumplidamente pueda llenar mi corazón.

Es curioso observar en el discurso de entrada al libro las continuas alusiones a la separación entre lo que se enseña, «la ciencia de los cuerpos», y «la ciencia de Dios, teología, profecía, evangelio, religión, etc.», y las confesiones tales como «solo Dios es sabio», que parecen dedicadas a calmar las posibles sospechas de los poderes religiosos y ponen de manifiesto el opresivo ambiente en el que se vivía entonces.

La lección 28 (y última) de mecánica se titula «De la solidez», concepto que, según se deduce luego, se refiere a la resistencia de los cuerpos. Habla de fórmulas elemen-

tales «de tracción, compresión, flexión y torsión» en barras, pero lo más interesante son las remisiones a las obras de «Mariotte, La Hire, Parent, Varignon, Buffon, Coulomb, Girard, Perronet, Rondelet, Genieys, Gautheys, Dubuat, Boistard, *D. Jorge Juan*, Bossut, Buchanan, Dupin, Navier, *Vallejo*, Poncelet y otros»; más adelante se refiere a resultados de Tredgold. Incluye una cita extensa de Coulomb al tratar sobre el empuje de tierras y «el prisma de mayor empuje», y hace referencia también a Prony. De nuevo menciona al «infatigable Coulomb» al determinar la rotura de las bóvedas y a Navier para «fijar los espesores de los machones o pies derechos». Los desarrollos son someros, como corresponde a su intención:

llamar la atención sobre su importancia, indicar los principios generales en que se fundan, y citar las obras especiales que tratan con mayor extensión, claridad y exactitud, a mi parecer, cada asunto particular.

De nuevo se está ante un hombre perfectamente informado, capaz de identificar y de seleccionar las buenas ideas, pero arrastrado «por los tiempos turbulentos y desgraciados» a una actividad distinta que le impedirá producir resultados originales.

Por otro lado, los conceptos de cuerpo flexible se incluyen también como apartados en obras dedicadas a la mecánica, como la del coronel de infantería Fernando GARCÍA SAN PEDRO (1840) (compuesta para la Academia Especial de Ingenieros del Ejército) o el *Tratado de mecánica* de Poisson, traducido por Jerónimo del Campo (1802-1861) (POISSON, 1845), que, según la *Gaceta*, eran textos obligados en las Escuelas Industriales y de Arquitectura en 1861.

Del Campo era profesor en la Escuela de Caminos, astrónomo y académico fundacional de Ciencias en la sección de Ciencias Exactas con la primera medalla número 20. La obra citada traduce la segunda edición de Poisson, escrita en 1833, es decir, de nuevo un libro interesante, pero anticuado en relación con lo que en aquel momento estaba pasando en Europa, donde ya se habían publicado los *Exercices* de Cauchy (1830) y donde Green en 1839 había revolucionado la forma de afrontar el planteamiento de la elasticidad desde un enfoque energético. Es interesante citar que la autorización para publicar el libro está dada por el director general de Obras Públicas Pedro Miranda, que también habría de ser académico de Ciencias, cuya intervención en el impulso dado a la construcción de puentes «colgados» en España está magistralmente expuesta en *Arquitectura e ingeniería del hierro en España* (NAVASCUÉS, 2007).

En el tercer cuarto de siglo el impulso general a las obras públicas implica la multiplicación de libros destinados tanto a la instrucción como a la práctica. Generalmente se trata de publicaciones dedicadas a la resistencia de materiales y el cálculo de estructuras, pues la elasticidad se consideraba una parte de la física matemática, y su estudio, incluso en Francia, donde ya vimos las quejas de Lamé y Bresse, no se impulsaba en las Escuelas de Ingenieros. Por otro lado, se editan también numerosos manuales de aplicación para los proyectistas o constructores, en algunos de los cuales se puede sondear el nivel de la tecnología utilizada.

En uno de estos manuales, el curiosísimo de Marcial de la Cámara, se traslucen «los males de la patria» (CÁMARA, 1871). En la introducción de la cuarta edición dice su autor:

El anuncio en nuestro desgraciado país de la CUARTA EDICIÓN de una obra, y de una obra de consulta de alguna importancia, es un acontecimiento; y lo es doblemente en las obras que no halagan las pasiones, que se exponen sencillamente y sin la menor protección oficial; antes por el contrario contra el veto de pobres intrigas, llegando hasta el extremo de conminar...

Además de las quejas sobre la contrapropaganda que debía soportar su autor, llaman la atención en esta obra diferentes aspectos: primero, el lugar de publicación, Valladolid, que muestra la difusión del conocimiento en todo el país; además, la amplitud del conjunto (su subtítulo es *Tratado teórico-práctico de agrimensura y arquitectura legal*).

En la parte «científica», además del catálogo con propiedades de materiales se incluye un resumen de resistencia de materiales que viene a ser el 60 % de la sección y el 30 % del total, si se excluye la «Sección bibliográfica», de la que luego se hablará. En aquella los valores resultantes de las tensiones internas en cada rebanada son llamadas «esfuerzos» y se distingue la «Presión», por lo que hoy llamamos *compresión*, la «Tensión o Extensión», por lo que ahora se llama *tracción*, y la «Flexión y Torsión», con los mismos nombres actuales. El esfuerzo cortante brilla por su ausencia. Al final se cita a Poncelet, Navier, Rennie y otros, así como un breve resumen sobre el tratamiento de los muros de contención donde la referencia mencionada es nada menos que Vauban. Finalmente es interesantísima la «Sección bibliográfica», donde se reseñan tanto revistas como libros en curso de publicación o «especiales» y donde se dedica la misma extensión a las revistas francesas que a las españolas.

De otro nivel mucho más elevado y ambicioso es el *Manual del ingeniero* del teniente coronel Nicolás VALDÉS (1859), quien en 1865 llegó a ser académico correspondiente de la RACEFN. La obra está dedicada a Zarco del Valle (1758-1866), cuyas múltiples condecoraciones y títulos se resumen en la dedicatoria. Entre estos cabe citar los de teniente general e ingeniero general de los Ejércitos. Destaca igualmente su nombramiento como académico fundador de la RACEFN en 1847 y primer presidente de la misma en 1851.

Es sorprendente que la obra de Valdés fuese publicada en París y el prólogo esté redactado en francés y firmado en un lugar de Alemania. El libro contiene aspectos de resistencia de materiales, pero no se limita a temas relacionados con la construcción y la ingeniería civil, sino que abarca también cuestiones de ingeniería mecánica, entre otros relativos a las máquinas herramientas y los mecanismos. Como el autor dice en su prólogo de 1870, la segunda edición muestra un tremendo esfuerzo de readaptación y puesta al día, y en su tiempo fue apreciada en todo su valor. Eduardo Saavedra, por ejemplo, alabó la documentación sobre materiales incluida. Además, la obra fue texto obligado, como consta en la *Gaceta* de 1861<sup>6</sup>, para las Escuelas de Ingenieros

<sup>6</sup> MINISTERIO DE GRACIA Y JUSTICIA: *Colección legislativa de España*, t. 86, 2.º semestre de 1861, pp. 371-375.

Industriales nada menos que en cinco asignaturas (Estereotomía, Mecánica Industrial, Construcciones Industriales, Máquinas de Vapor y Construcción de Máquinas), lo que da idea de la amplitud del empeño. También fue utilizada en la Escuela de Arquitectura (en las asignaturas de Estereotomía y Construcción).

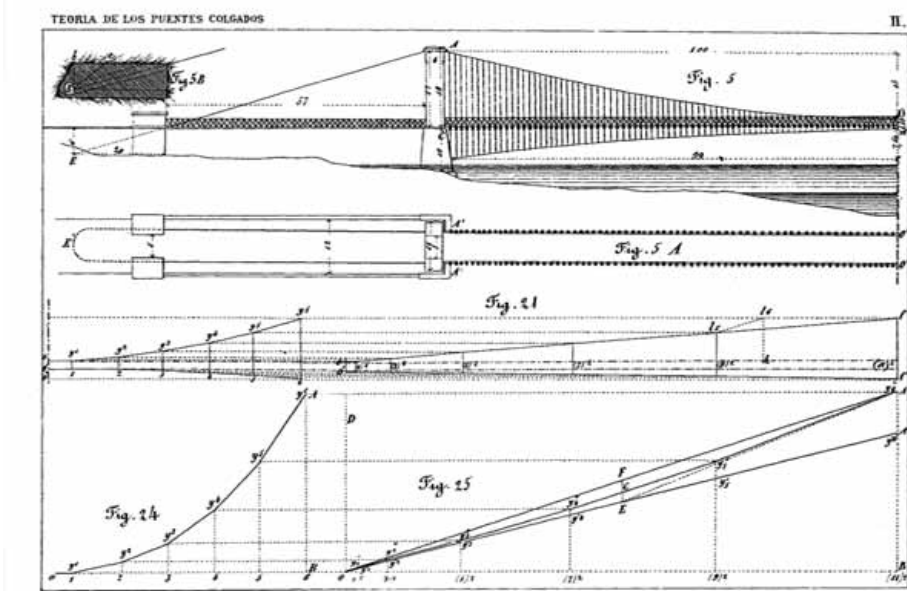
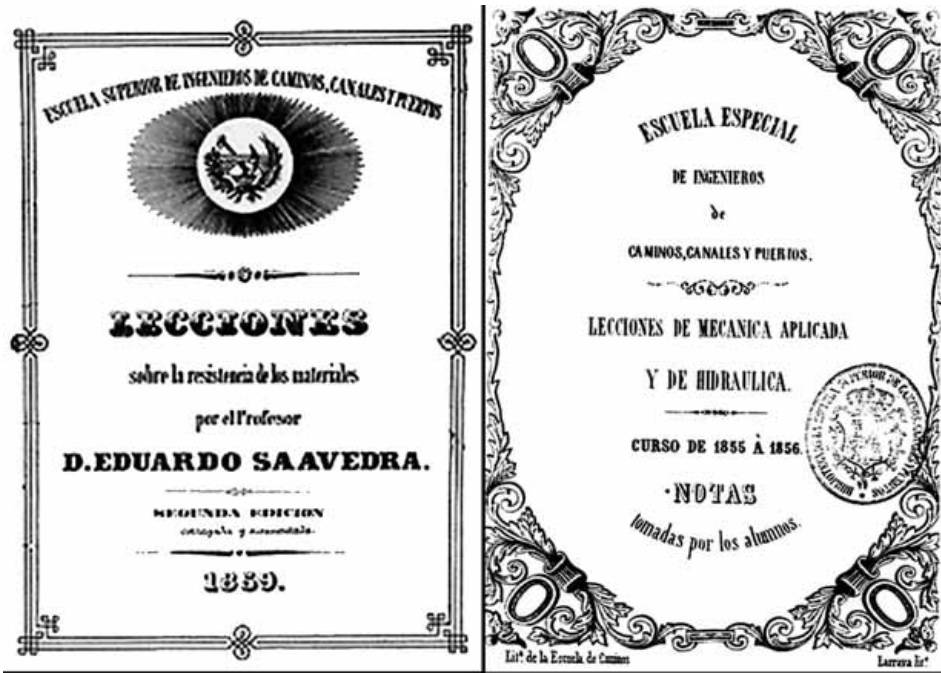
Respecto a las obras de teoría de este período, la más celebrada ha sido la manuscrita por Eduardo Saavedra (1829-1912), personalidad extraordinaria y respetadísima en su tiempo en todos los ambientes culturales y científicos, como se describe en una magnífica monografía (MAÑAS, 1983)<sup>7</sup>. Encargado de la asignatura de Mecánica Aplicada desde el curso 1853-1854 hasta el 1861-1862, sus predecesores Azas y Bausá, que, como se ha dicho, acabarían dirigiendo la Escuela de Caminos (Azas en 1856 y Bausá en 1880), no dejaron ninguna aportación escrita a la materia. Quizá por contraste, brillan más las contribuciones del joven ingeniero, que en todas ellas demuestra estar al corriente de la cultura estructural de su época, tanto en sus textos docentes como en sus traducciones y artículos.

MAÑAS (1983) incluye una bibliografía completa de Saavedra, de la que, en relación con nuestro tema, cabe destacar las *Lecciones sobre la resistencia de los materiales* (1859) y la *Teoría de puentes colgados* (1856), además de la traducción con comentarios de la *Instrucción sobre la estabilidad de las construcciones* de M. Michon (1860). Todas ellas, complementadas por el *Résumé* de Navier, formaban el conjunto de las obras recomendadas a los alumnos de la asignatura, según indica el propio autor en un artículo publicado en 1857 en la *Revista de Obras Públicas*, lo que hace suponer (aunque, como se decía más arriba, Echegaray habla de la *Mecánica* de Poncelet) que la obra de Navier era el texto impuesto por los profesores anteriores.

Entre sus artículos no pueden dejar de citarse el dedicado al «Viaducto de Crumlin» en la *ROP* (1857), pues en él aparece una de las primeras aplicaciones del sistema Warren-Kennard, o la «Note sur la théorie des voûtes de M. Yvon Villarceau et sur les applications de cette théorie en Espagne» (1868), presentada a la asociación de antiguos alumnos de la École Centrale; el primero porque reconoce la importancia de la tipología Warren (a la que Carlos Browning dedicó algo después un estudio muy completo en la *ROP* de 1859) como estructura fiable, y el segundo por la perspicacia al detectar que la obra de Villarceau era el método definitivo de ataque a los problemas de bóvedas. El prestigio técnico alcanzado por Saavedra queda reflejado en el respeto con que eran acogidas sus opiniones y en las peticiones de redacción de prólogos para obras de la especialidad, como sucedió, por ejemplo, con la de MARVÁ (1902), de la que se hablará más adelante.

---

<sup>7</sup> Tras Echegaray, que pasó a ostentar la medalla número 15, Saavedra recibió la número 6 de la RACEFN (1868) en la sección de Ciencias Exactas. Saavedra era el número 1 de la promoción de 1851, de modo que cuando en 1853 se incorporó como profesor a la Escuela de Caminos apenas disponía de experiencia profesional.



8.8. Tres documentos relativos a cursos de Eduardo Saavedra en la Escuela Especial de Caminos: 1) portada del texto manuscrito y litografiado Lecciones de resistencia de materiales, 1859; 2) portada de las notas de sus clases, Lecciones de Mecánica Aplicada y de Hidráulica, redactadas por varios alumnos de la promoción de 1859; y 3) lámina de Teoría de los puentes colgados, Madrid, Imprenta Nacional, 1864 (2.ª ed.).

*Lecciones sobre la resistencia de los materiales* es una publicación litografiada, con un planteamiento tipo Navier, en la que, salvo un capítulo inicial sobre el concepto de fuerzas elásticas, el conjunto se dedica al estudio de barras sometidas a esfuerzos longitudinales y de flexión, incluyendo problemas hiperestáticos, de pandeo, sollicitación compuesta y piezas curvas, así como esfuerzos de torsión. Aunque la aproximación es teórica, existen referencias a la obra de Morin, que fue muy popular tanto en Francia como en España, y un interesante apéndice sobre el aparato de Chevandier y Wertheim para ensayos de resistencia, autores que eran conocidos sobre todo por su obra de 1848 acerca de las propiedades mecánicas de la madera.

Las notas no poseen planteamientos originales, pero se observa un enfoque unificado, una asimilación y selección de temas y una claridad que hacen que esta obra sea incomparable con las traducciones desorganizadas de épocas anteriores. Quizá por ello algunos la consideran como la primera obra «española» sobre resistencia de materiales. No obstante, es imposible evitar la comparación con las publicaciones de Bresse (que en la misma época se ocupaba de la asignatura en Ponts et Chaussées), que cuesta imaginar pasasen desapercibidas a Saavedra. Se dispone también de apuntes de sus clases, *Lecciones de Mecánica Aplicada y de Hidráulica*, tomados por alumnos de la Escuela de Caminos en el curso de 1855 a 1856, redactados por componentes de la promoción de 1859: Javier Sanz (número 1 de la promoción), Joaquín Bellido (número 3), Enrique de León (4) y Jaime Font (5), que prepararon respectivamente los temas de «Armaduras de hierro», «Teoría de los contrafuertes y armaduras de tejado», «Espesor de muros de revestimiento», «Sistemas de puentes de Town, How y Palladio» y «Teoría de la resistencia de carriles». Es curioso observar la ausencia en este empeño del número 2 de la promoción, Rogelio Inchaurrendieta, considerado por SAENZ RIDRUEJO (1990) como «el más completo entre los Ingenieros de Caminos del último tercio del siglo XIX», quien, cuando llegó a ser director de la Escuela de Caminos, defendió con apasionamiento los fundamentos científicos de la enseñanza y los trabajos prácticos. En su nota a la publicación de la *ROP* conmemorativa del centenario del cuerpo de ingenieros de Caminos indica, entre otras acertadísimas observaciones (que paradójicamente podrían ser de aplicación en la actualidad):

consigno mi protesta contra la tendencia que he visto en algunos, pocos por fortuna, que quisieran sacrificar la teoría a una práctica que, entendiéndose bien, jamás sería completa, y que transformaría nuestra Escuela de Ingenieros verdaderamente tales en una Escuela de Artes y Oficios.

Por todo ello cuesta imaginar que en su etapa discente no se sintiera atraído por participar en la labor de inmortalizar las lecciones de un profesor joven y entusiasta admiradísimo en la Escuela incluso cuando era alumno, en una época en la que cursaban en ella personajes extraordinarios como Sagasta o Echegaray. Saavedra es el único estructuralista español cuya imagen está incluida en KURRER (2008).

En esta época comenzó a publicar también José Antonio Rebolledo (1833-1910). Desde el punto de vista de cálculo de estructuras es interesante su traducción del libro

de J. W. Sheilds sobre *Fuerzas que actúan en las obras de hierro* (SHEILDS, 1866), así como el *Manual del constructor práctico* (REBOLLEDO, 1910), que, destinado en origen a la Escuela de Ayudantes de Obras Públicas, alcanzó numerosas ediciones que llegaron el siglo siguiente con un nombre más general. La quinta edición tiene un suplemento de J. E. Ribera sobre hormigón armado que «es lo más interesante del libro» (SÁENZ RIDRUEJO, 1990).

Para la Escuela de Obras Públicas fueron escritos también dos manuales que, sin aportaciones originales, marcan, sin embargo, el nivel habitual de conocimientos: *Cálculos sobre la determinación del espesor que deben tener los muros de sostenimiento* (REDONDO, 1867) y la traducción de la *Teoría general de construcción de puentes*, de Herman Haupt, ingeniero excepcional, patriarca de la ingeniería de puentes en EE. UU., llevada a cabo por Mariano Esquirol (HAUPT, 1869). Aunque existían también publicaciones del mismo estilo práctico, tanto civiles como militares (BÁRCENA, 1870; CAMPO-REDONDO, 1854; GAZTELU, 1904; GER Y LÓBEZ, 1869; MÁRQUEZ VILLARROEL, 1865; MUÑOZ, 1864; y TONS, 1909), al final del período considerado (1841-1912) aparece una publicación de Pablo Alzola que, en nuestra opinión, es, junto con las *Bóvedas* de Joaquín Monasterio, lo único destacable en cuanto a originalidad de planteamiento de la



8.9. Pablo de ALZOLA: Teoría del cálculo de las vigas rectas, Madrid, 1870.



investigación española del siglo XIX. Nos referimos a la *Teoría del cálculo de las vigas rectas* (fig. 8.9; ALZOLA, 1870), que, al parecer, fue escrita tras su proyecto de puente sobre el Guadalhorce.

La obra tiene una finalidad última de aplicación, pero ello no impide una pesquisa sistemática de las propiedades de las leyes de flectores para cargas concentradas y repartidas, así como de sus puntos característicos, en un claro precedente de los *characteristic points* que Claxton Fidler propondrá catorce años más tarde, idea que será posteriormente desarrollada por Müller-Breslau (1891). Por desgracia, no consta que Alzola diese a conocer su obra internacionalmente. Antes al contrario, en el mismo año de su publicación el autor se trasladó a Bilbao, donde inició una labor pública bien conocida, dedicado primero a la Administración local y luego a la nacional, ya que en 1900 fue nombrado director general de Obras Públicas. Previamente, en 1897, había sido elegido académico correspondiente de la RACEFN. En su empeño de desarrollo de Bilbao le acompañó el famoso ingeniero portuario Evaristo Churrua, compañero de una interesante promoción (la de 1863) de ingenieros de caminos a la que también pertenecía Pelayo Clairac, autor de un ambicioso *Diccionario general de arquitectura e ingeniería* cuyo tomo II (CLAIRAC, 1879) fue prologado por Saavedra.

En el último cuarto del siglo XIX la situación tampoco es muy boyante en cuanto a publicaciones originales. Llegan los desarrollos de Culmann y Müller-Breslau, y, a través de este último, los primeros ecos de la obra de Castigliano.

El grito «¡Basta de matemáticas!» con el que Machimbarrena iniciará treinta años después uno de sus discursos más sonados en la Asociación de Ingenieros Civiles se gesta en esta época, en la que ese convencimiento permea todos los ambientes y el deseo de aumentar los llamados «conocimientos prácticos» hace que aparezcan obras que llegan a la caricatura, como la *Resistencia de materiales sin necesidad de cálculo diferencial e integral*, de FRANCISCO NACENTE (1887), que tiene la osadía de escribir lo siguiente:

Mucho se ha escrito sobre la resistencia de materiales; pero en el gran número de obras que han tratado este asunto no hay ninguna que lleve las condiciones necesarias para ser útil o provechosa en la práctica.

El autor, por cierto, da el nombre de «esfuerzos» a los cortantes, flectores, axiles y torsores, pero es uno de los primeros que tiene la desdichada ocurrencia de llamar «fatigas» a las tensiones.

El pintoresquismo llega a su extremo con las monografías de Federico Villarreal, de la Escuela de Ingenieros de Lima, que, bajo el lema «progresado estás vivo, restado estás muerto», decide publicar ediciones bilingües en castellano y... esperanto o volapuk (VILLARREAL, 1901).

Se produjo también un relajamiento en la enseñanza. Vicente Machimbarrena, que fue número 3 de la promoción de 1888 en la Escuela de Caminos, y, por tanto, debió de estudiar la Mecánica Aplicada cuando estaba a cargo de Eduardo Echeagaray, cuenta en sus *Memorias* (MACHIMBARRENA, 1940):

Una de las asignaturas más importantes de la carrera ha sido y es la Mecánica Aplicada a las Construcciones, que nos explicaba un profesor de apellido glorioso en nuestra Escuela y fuera de ella, que por lo mismo se le conocía, para diferenciarlo, con un sobrenombre de lo más despectivo y maloliente [...]. Tanto en la Resistencia de Materiales como en la Hidráulica teórica, nos limitábamos a recitar la obra de Collignon, que el profesor escuchaba medio dormido [...]. La subordinación de la enseñanza técnica española a la francesa resultaba en nuestro tiempo de estudiantes harto depresiva y era signo de decadencia.

Existen, sin embargo, algunos libros que mantienen, por lo menos, la dignidad, ya que no las aportaciones originales. Uno de ellos es la *Resistencia de materiales y estabilidad de las construcciones*, del ingeniero agrónomo y profesor en el Instituto Agrícola Alfonso XII José de ARCE (1898). La segunda edición es de 1898 y está formada por dos enormes tomos, el primero de 368 páginas y el segundo de 800, que contiene no solo la teoría de piezas rectas, sino desarrollos relativos a muros de contención, bóvedas, cerchas y entramados de hierro. En la teoría se apoya en la estática gráfica, donde demuestra estar al tanto de los desarrollos de Culmann, con el que reconoce su deuda intelectual, aunque cita también a clásicos como Weyrauch o Levy. Al estudiar las vigas continuas, su análisis de leyes de esfuerzos hace recordar los métodos de Alzola, pero es imposible conocer sus fuentes, que no cita explícitamente. Es una obra muy bien editada, con figuras claras y muchos ejemplos, que mereció un informe positivo de Eduardo Saavedra a la RACEFN. En nuestra opinión, y salvando la falta de material original, se trata de uno de los mejores libros de texto escritos en el siglo XIX.

Se publica también el tratado más completo sobre construcciones de mampostería (BOIX, 1889), cuyas reglas prácticas de dimensionamiento tendrían gran influencia entre sus sucesores. Igualmente interesante es la *Mecánica aplicada a las construcciones* del coronel MARVÁ (1902), que llegó a ser miembro de la RACEFN.

Otra obra de gran dignidad es el *Curso de mecánica aplicada a las construcciones* de GRANDA Y CALLEJAS (1909). Ingeniero de caminos de la promoción de 1894, Bernardo Granda representa la transición al siglo XX. La edición de 1909 tiene dos tomos: el primero, de unas 500 páginas, está dedicado a la elasticidad y a las piezas rectas; en el segundo, de más de 1.000 páginas, se estudian las piezas curvas, las estructuras laminares, los muros de contención, las bóvedas, las chimeneas, etc. Poncelet, Navier, Saint-Venant, Rankine son citados en la primera parte, donde las tensiones son llamadas «fuerzas» o «acciones moleculares», y, así, se habla del «elipsoide de acciones moleculares» y de «acciones moleculares principales». Distingue claramente el fenómeno de fatiga y cita a Whöler y Weyrauch, y trata extensamente los métodos gráficos, haciendo referencia a sus creadores, Culmann y Ritter, así como al uso de la «elipse central» para piezas curvas.

Uno de los puntos fuertes que debían «sufrir» los alumnos eran las vigas continuas. Ahí Granda menciona a «Clapeyron» (sic) y el teorema de los tres momentos «de Bertot»<sup>8</sup>, lo que demuestra un conocimiento profundo de la literatura. Su maltrato al

---

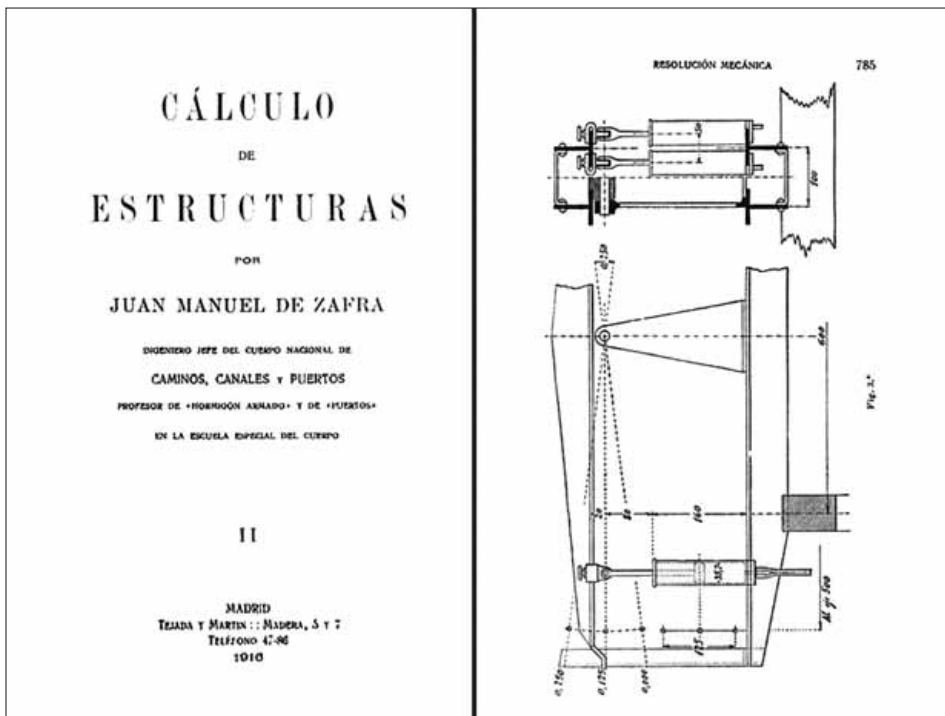
<sup>8</sup> Al parecer, Clapeyron explicó a Bertot su teorema de los tres momentos y este último lo publicó inmediatamente sin permiso; en las obras posteriores de Clapeyron no hay ni una sola cita a Bertot.

alumnado provocaba el rechazo hacia la asignatura, como deja traslucir discretamente Fernández Casado en su primera lección como catedrático (1958):

No disponíamos (1924) de métodos de cálculo eficaces para las estructuras más frecuentes y otros como el de la viga de varios tramos o el de las presas de gravedad estaban tarados por el sello de una inútil crueldad.

(En los años sesenta, uno de nosotros pudo escuchar el mismo tipo de reproches dirigidos a Granda, directamente de labios de varios profesores de la Escuela de Caminos).

En esta época de transición al siglo xx se dispone, por fin, de textos españoles modernos de cálculo de estructuras y de elasticidad, y aparecen los primeros tratados para cálculo de hormigón armado, el material destinado a renovar las técnicas de construcción y las tipologías en el xx. El primero es el abrumador *Cálculo de estructuras* de Juan Manuel de Zafra (1869-1923), publicado en 1915 pero basado en artículos suyos de la *ROP* de años anteriores. Son dos tomos con un total de unas 1.400 páginas, cuyo objetivo, según confiesa el autor en el prólogo, es



**8.10. Juan Manuel de Zafra (1869-1923)**, titulado en 1892, no es propiamente ingeniero decimonónico, sino significado representante de las generaciones con las que comienza el nuevo siglo. En particular inició en España el desarrollo del cálculo de obras de hormigón armado, en paralelo con las realizaciones de José Eugenio Ribera. Su *Cálculo de estructuras* data ya de 1916.

divulgar los métodos de cálculo de estructuras basadas en el trabajo elástico que, pese a sus cuarenta años de fecha, eran poco menos que desconocidos en España como en Francia.

Zafra da la impresión de haberlo leído todo, «en libros y revistas, casi exclusivamente en lengua tudesca», pero su asimilación, criterio de selección, y planteamiento y desarrollo de los problemas convierten su obra en una de las mejores escritas en español. Aunque su foco de inspiración son Möhr y Müller-Breslau, el autor deja claro que

ni traducimos ni copiamos; pretendemos exponer para españoles y a la española, como nuestra raza y lengua requieren, lo que aprendido en muy diversos orígenes, seleccionado y madurado después, ha llegado a formar nuestro criterio, nuestro conocimiento personal.

Como hemos indicado en otro lugar (ALARCÓN, 2000), la puesta al día de la obra es impresionante y procede del foco de conocimiento que en el último cuarto del siglo XIX había pasado de Francia a Alemania, según indica Timoshenko, que visitó los principales centros de ambos países y decidió escoger los laboratorios del segundo por su actividad y dinamismo.

I went around also to the Arts et Métiers laboratory. They were running test there, recording the elongations of a specimen under impact. My visit to the laboratory showed me that, in the area of strength of materials, France was far behind Germany, that I had nothing to learn from the French. This conviction remained with me always, all that happened later only confirming that first impression.

The days of Navier and Saint Venant were long gone. In the twentieth century France has produced little of any significance in the area of structural mechanics. (TIMOSHENKO, 1968).

Además, Zafra incluye al final los planos de una máquina para resolver sistemas de ecuaciones lineales y facilitar el cálculo de estructuras.

Juan Manuel de Zafra es autor también del primer libro de texto en español sobre cálculo del hormigón armado (1911) y de numerosos artículos sobre el tema, entre los que existe una sonada polémica con Hennebique y sus patentes. Cuando en 1919 ingresó en la RACEFN (ZAFRA, 1919), defendió la tesis del planteamiento abstracto de los fenómenos naturales: «el progreso de la Construcción exige cada día más imperiosamente el progreso de la Mecánica aplicada». Quizá por ello, al crear fama de «excesivamente teórico» en un medio donde el grito de guerra, bajo la bandera ideológica de Machimbarrena, era «¡Basta de matemáticas!» (y se componían libros de texto como el de Gaztelu, donde deliberadamente se reducían al mínimo los desarrollos «teóricos»), ha acabado desapareciendo del «santoral» más popular de los ingenieros de caminos. No obstante, figuras como Eduardo Torroja o Carlos Fernández Casado no dejaron nunca de ponderarlo:

Este libro, en fecha de su publicación, era uno de los tratados más completos de la teoría de estructuras y [...] modelo de exposición clara y rigurosa [...]. Zafra llegó a conseguir ese difícil equilibrio entre ciencia y arte de la construcción que consideramos

como meta a la que debe aspirar todo ingeniero constructor. Creemos que ha sido injustamente relegado al olvido. (FERNÁNDEZ CASADO, 1957-1958).

[...] cuando se siente el influjo de la savia matemática que Echegaray y Zafra vierten con sus teorías de Elasticidad y de las Estructuras, respectivamente. (TORROJA, 1953).

No conviene hacerse ilusiones sobre la repercusión de estos trabajos en el acervo intelectual de la profesión. Cuando Eduardo Torroja, en 1953, escribe en el número especial de la *Revista de Obras Públicas*, nos deja ver la lentitud del progreso:

Las teorías elásticas de Echegaray o de Zafra son hoy el pan nuestro de cada día en la redacción de los proyectos de construcción; y entonces, cuando salieron a la luz, parecían vanas elucubraciones ideadas a espaldas de la realidad; y muchos ingenieros consideraban una locura el pretender que los materiales se ajustaran a ellas.

Aunque el primer curso de elasticidad como tal no fue impartido hasta 1923 en la Escuela de Caminos (bajo lo que hoy sería el paradójico título de *Elasticidad y Hormigón Armado*) a cargo de Alfonso Peña Boeuf, en español se dispuso previamente

CONFERENCIAS


1909

FÍSICA MATEMÁTICA

POR

JOSÉ ECHEGARAY

Profesor de Física Matemática en la Universidad Central de Madrid



Curso de 1908 á 1909.

MADRID

IMPRIMERIA DE LA GAZETA DE MADRID

CALLE DE PORTALES 10

1909

— 176 —

mero de éstos, y aplicando la ley de continuidad para todos ellos, será nula.

De donde resulta que en estas hipótesis se comprende que la falta de fuerzas exteriores puede traer consigo la anulación de las tensiones.

Pero el problema es aún más complejo.

En las lecciones profesadas en Stokolmo, en Febrero y Marzo del año 1906, sobre integración de ecuaciones diferenciales parciales, lecciones explicadas á invitación del Rey de Suecia, por el eminente profesor de la Universidad de Roma, Sr. Volterra, se presenta un ejemplo sumamente sugestivo.

Supongamos, figura 43, un anillo, O, de una substancia elástica.

Supongamos que no está sujeto á fuerzas exteriores y que las tensiones interiores sean nulas.

Cortemos en este anillo una parte radial  $AA' BB'$ .

Y forzando lo que sea necesario el anillo, que será poquísimo, si el ángulo es muy pequeño, imaginemos que se unen, digámoslo así, por una soldadura molecular, las caras  $A A' B B'$ .

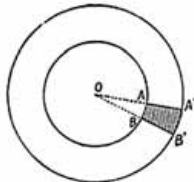


Figura 43.

Se comprende intuitivamente, que en el interior del anillo se establecerán tensiones, que tenderán á darle su forma primitiva ó una forma aproximada.

Luego tendremos un sólido elástico, que no estará sujeto á fuerzas exteriores y en el que las tensiones interiores no serán nulas, contra la hipótesis que admiten muchos autores.

El ilustre profesor estudia matemáticamente este problema, distingue la forma cíclica de la forma acélica, y en el primer caso deduce que, aun siendo nulas las fuerzas exteriores y

**8.11. José Echegaray:** Conferencias sobre física matemática, Madrid, 1909: Casi septuagenario, Echegaray fue designado para regentar la cátedra de Física Matemática de la Universidad Central (1905-1915).

de tres bloques de conferencias debidas a José Echegaray presentadas en la Universidad Central, las cuales fueron transcritas por los profesores auxiliares Antonio Vela y Pedro Carrasco.

Echegaray había pasado a la Universidad Central en 1905 como catedrático de Física Matemática, sucediendo a Francisco de Paula Rojas, de cuyo tribunal de cátedra, por cierto, había sido presidente Echegaray en 1871. Allí explica Teoría de la Elasticidad en tres cursos consecutivos (1906-1907, 1907-1908 y 1908-1909) mediante lo que él llama «Métodos de Cauchy, Lamé y Poincaré», respectivamente. Con ello indica que el primer año es la hipótesis de acciones moleculares a distancia la que lleva a las ecuaciones de equilibrio en desplazamientos; el segundo, donde hay referencias a Navier, Poisson y Clebsch, sigue, como Lamé, el equilibrio del paralelepípedo y del tetraedro (original, por cierto, de Cauchy), y finalmente, con el enfoque llamado «de Poincaré», utiliza la teoría de la energía potencial ideada por Green. El conjunto son 1.185 páginas (424 + 363 + 398), que podrían haberse reducido de no haber mediado las continuas repeticiones o la retórica desbordada típica de Echegaray.

La elasticidad de Poincaré es de 1892, pero en sus conferencias (1907-1908, p. 176) Echegaray habla de temas como las dislocaciones del anillo de Volterra «en las lecciones profesadas en Stokolmo [sic] en febrero y marzo de 1906 por el eminente profesor de la Universidad de Roma, Sr. Volterra», y en la de 1906-1907 introduce «los trabajos de Cosserat», publicados en esos años, lo que de una idea de lo actualizado de sus lecturas.

Además de estas obras sobresalientes es digna de citarse la *Resistencia de materiales* del capitán de artillería SÁNCHEZ PASTORFIDO (1906), obra muy correcta que intenta no limitarse a las aplicaciones a la construcción y que indica aplicaciones al diseño de maquinaria. De nuevo aparece en ocasiones el deseo de dar una versión personal, lo que puede verse en los apuntes de LASARTE (1906), que no están a la altura de lo que podría esperarse de la fecha en la que fueron publicados y del centro en el que se impartían las clases (Escuela de Ingenieros Industriales de Barcelona). Frente a ello, otro ilustre ingeniero industrial, VELASCO DE PANDO (1924), enuncia muy pronto su preparación en una obra interesantísima que precederá una serie de publicaciones prodigiosas por su extensión y por la previsión de su futura aplicabilidad.

En cualquier caso, la creciente influencia de la mecánica aplicada puede ejemplificarse con el cambio del plan de estudios de las Escuelas de Ingenieros Industriales. Si en el de 1868 todo se concentraba en la asignatura de Construcciones Industriales, en el de 1902 esta se subdividió nada menos que en cuatro: Mecánica Industrial, Arquitectura Industrial, Organización de Talleres y Mecánica Aplicada a la Construcción, que abarcaba conocimiento de materiales, resistencia de materiales y estática gráfica (CARDELLACH, 1909-1910).

Realmente, en esta época aparece una cosecha extraordinaria de personalidades como Terradas, Torroja o Fernández Casado, que, junto al citado Velasco y a Arangoa, Lorente de No, Valdés Patac, Goded, etc., serán los artífices de los progresos de esta rama del conocimiento durante el siglo xx.

**Agradecimientos.** Fernando Sáenz Ridruejo ha contribuido a corregir algunos errores e imprecisiones que se habían deslizado en la primera versión de este capítulo. También han colaborado con sus informaciones e ideas Jesús Fraile (catedrático de la ETSICCP de la UPM), el coronel Carlos Vega (EPS del Ejército), Concepción García Viñuela (directora de la biblioteca de la ETSICCP de la UPM), María Dolores Campaña e Isabel Inés Mendoza (sucesivas directoras de la biblioteca de la ETSII de la UPM) y Mercedes Martín (directora de la biblioteca de la EPS del Ejército en Madrid). A todos ellos, nuestro más sincero agradecimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALARCÓN, E.: «Los métodos de cálculo», en E. Alarcón *et al.*: *De la construcción a la ciencia: ayer y hoy de Eduardo Torroja*, Madrid, Real Academia de Ingeniería, 2000, pp. 207-236.
- ALONSO VIGUERA, J. M.<sup>º</sup>: *La ingeniería industrial española en el siglo XIX*, Madrid, s. n., 1944.
- ALZOLA, P.: *Teoría del cálculo de las vigas rectas*, Madrid, Rivadeneyra, 1870.
- ARCE, J. de: *Resistencia de materiales y estabilidad de las construcciones*, Madrid, 1898, 2.<sup>ª</sup> ed.
- AZOFRA, M. M.<sup>º</sup> de: *Curso industrial o lecciones de aritmética, geometría y mecánica, aplicadas a las artes*, Valencia, Oficina de Manuel López, 1838.
- BAILS, B.: *Elementos de matemática*, t. IX, parte I: «Arquitectura civil», Madrid, s. n., 1796, 2.<sup>ª</sup> ed.
- BÁRCENA, L. de la: *Formulario del constructor*, Madrid, s. n., 1870.
- BELHOSTE, B.: *Augustin-Louis Cauchy*, Nueva York / Berlín, Springer, 1991.
- BELLUZZI, O.: *Scienza delle costruzioni*, Bolonia, Zanichelli, 1946.
- BETANCOURT, A. de: *Description de la salle d'exercice de Moscou*, San Petersburgo, s. n., 1818.
- y J. LÓPEZ DE PEÑALVER: *Memoria sobre los medios de facilitar el comercio interior*, 1791.
- BLONDEL, F.: «Résolution des quatre principaux problèmes d'architecture», en *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, 1666-1699, París, Compagnie des Librairies, 1729.
- BOIX, E.: *Estabilidad de las construcciones de mampostería*, Madrid, s. n., 1889.
- BOUSSINESQ, J.: *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques*, París, Gauthier-Villars, 1885 (reed., Albert Blanchard, 1969).
- BRESSE, J. A.: *Cours de mécanique appliquée. Première partie: résistance des matériaux et stabilité des constructions*, París, Mallet-Bachelier, 1859.
- BRICAS, M.: *La théorie de l'élasticité bidimensionnelle*, París, Gauthier-Villars, 1936.
- BRILLOUIN, L.: *Les tenseurs en mécanique et élasticité*, París, Masson, 1938.

- BUCCIARELLI, L. L., y N. DWORSKY: *Sophie Germain*, Dordrecht, Reidel, 1980.
- CÁMARA, M. de la: *Agenda del constructor*, Valladolid, 1871.
- CAMPOREDONDO, P.: *Estracto [sic] de las lecciones de mecánica y construcción*, Madrid, Francisco del Castillo, 1854, 2 vols.
- CARDELLACH, F.: «La enseñanza de la construcción en las Escuelas de Ingenieros», *Anuario de la Universidad de Barcelona*, Imprenta Jaime Jepús, curso 1909-1910, pp. 229-347.
- CASTIGLIANO, C. A. P.: *Théorie de l'équilibre des systems élastiques et applications*, Turín, Negro, 1879 (versión inglesa, Nueva York, Dover, 1966).
- CAUCHY, A. L.: *Exercices de mathématique*, París, 1827, vol. 2.
- CERERO, R.: *Estudio sobre la resistencia y estabilidad de los edificios sometidos a huracanes y terremotos*, Madrid, s. n., 1890 (ed. facs., Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1992).
- CHARLTON, T. M.: *A history of the theory of structures in the nineteenth century*, Cambridge UP, 1982.
- CLAIRAC, P.: *Diccionario general de arquitectura e ingeniería*, Madrid, Zaragoza y Jayme, 1879, t. II.
- CLAXTON FIDLER, T.: «Continuous girder bridges», *Proceed. Inst. Civil Eng.* 74 (1883), pp. 196-214.
- CLEBSCH, A.: *Théorie de l'élasticité des corps solides*, trad. de Saint-Venant y Flamant, París, Dunod, 1883.
- COLEGIO ICCP: *J. Eugenio Ribera, ingeniero de caminos, 1864-1936*, Madrid, ICCP, 1982.
- COSSERAT, E. y F.: *Théorie des corps déformables*, París, Hermann, 1909.  
— *Sur la théorie de l'élasticité*, Faculté des Sciences de Toulouse, t. x, 1896.
- CULMANN, C.: *Die graphische Statik*, Zúrich, Meyer & Zeller, 1875, 2.<sup>a</sup> ed.
- DUPIN, C.: *Geometría y mecánica de las artes y oficios y de las bellas artes*, trad. de Juan López Peñalver de la Torre, Madrid, José del Collado; vol. I, 1830; vol. II, 1835.
- DUVAUT, G.: *Mécanique des milieux continus*, París, Masson, 1990.
- ECHEGARAY, J.: *Conferencias sobre física matemática*, Madrid, s. n., 1907, 1908 y 1909.  
— *Recuerdos*, t. II, Madrid, Ruiz Hermanos, 1917.
- FERNÁNDEZ CASADO, C.: «Construcción, proyecto y cálculos», *ROP* (febrero de 1957), pp. 51-54; (mayo de 1957), pp. 234-238.
- FERNÁNDEZ CASADO, C.: «Caracterización profesional del ingeniero», *ROP* (marzo de 1958), pp. 133-136.
- FERNÁNDEZ TROYANO, L.: *Cálculo del pretensado en puentes*, Madrid, Patronato Juan de la Cierva de Investigación Técnica (Monografías del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, 243), 1964.
- GALILEO GALILEI, *Discursi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica ed i movimenti locali*, Leiden, Elsevier, 1638 (existe trad. esp. en Editora Nacional).



- GARCÍA, S.: «Compendio de arquitectura y simetría de los templos conforme a la medida del cuerpo humano con algunas demostraciones. Año de 1681. Recoxido de diversos Autores Naturales y Extranjeros».
- GARCÍA SAN PEDRO, F.: *Tratado completo de mecánica, destinado a la enseñanza en la Academia Especial de Ingenieros del Ejército*, Madrid, Imprenta Nacional, 1840.
- GAZTELU, L.: *Práctica usual de los cálculos de estabilidad de los puentes: exposición elemental*, Madrid, Eduardo Arias, 1904, 2.<sup>a</sup> ed.
- GER Y LÓBEZ, F.: *Manual de construcción civil*, Badajoz, s. n., 1869.
- GRANDA Y CALLEJAS, B. de: *Curso de mecánica aplicada a las construcciones*, Madrid, V. Tordesillas, 1909.
- HAUPT, H.: *Teoría general de construcción de puentes*, trad. de M. Esquirol, Madrid, Imprenta de R. Labajos, 1869.
- HEYMAN, J.: *Coulomb's memoir on statics*, Cambridge UP, 1972.
- *The masonry arch*, Chichester, Ellis Horwood, 1982.
- *The stone skeleton*, Cambridge UP, 1995.
- HONNECOURT, Villard de: *Cuaderno del s. XIII*, Madrid, Akal, 2001.
- HOOKE, R.: *Lectures de potentia restitutiva, or of springs explaining the power of springing bodies*, Londres, John Martín, 1678 (reimpr. en R. T. Gunther: *Early science in Oxford*, Royal Society, 1931).
- KURRER, K. E.: *The history of the theory of structures*, Berlín, Ernst & Sohn, 2008.
- LAMÉ, M. G.: *Leçons de la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides*, París, Bachelier, 1852.
- LANDAU, L. D., y E. M. LIFSHITZ: *Curso de física teórica*, vol. 7: *Teoría de la elasticidad*, trad. de J. T. D'Alessio, Barcelona, Reverté, 1969.
- LASARTE, J. M.<sup>a</sup>: *Resumen de las lecciones de mecánica aplicada a las construcciones*, Barcelona, s. n., 1906.
- LE BOITEUX, H., y R. BOSSARD: *Élasticité et photoélasticimétrie*, París, Hermann, 1940.
- LE SEUR, T., F. JACQUIER y R. G. BOSCOVICH: *Parere di tre matematici sopra i danni che si sono trovati nella cupola di S. Pietro sul fine dell'anno 1742*, Roma, s. n., 1743.
- LOVE, E. H.: *A treatise on the mathematical theory of elasticity*, Cambridge UP, 1892 (Nueva York, Dover, 1944).
- MACHIMBARRENA, V.: *Memorias de la Escuela de Caminos*, Madrid, s. n., 1940.
- MAINSTONE, R. J.: *Developments in structural form*, Cambridge (Ma), MIT, 1975.
- MALLET, R.: *The great napolitan earthquake of 1857: the first principles of observational seismology*, Londres, Chapman and Hall, 1862.
- MANTEROLA, J.: *Relación entre la estructura resistente y la forma*, discurso de recepción en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, Madrid, 2006.
- MAÑAS, J.: *Eduardo Saavedra, ingeniero y humanista*, Madrid, Turner, 1983.
- MÁRQUEZ VILLARROEL, E.: *Tratado de mecánica industrial*, Sevilla, s. n., 1865.

- MARVÁ, J.: *Mecánica aplicada a las construcciones*, Madrid, Julian Palacios, 1902, 3.<sup>a</sup> ed. aum.
- MINISTERIO DE GRACIA Y JUSTICIA: *Colección legislativa de España*, t. 86, 2.º semestre de 1861, pp. 371-375.
- MÖHR, O. C.: «Beitrag zur Theorie der elastischen Bogenträger», Hannover, *Zeitschrift des Architekten und Ingenieur*, 27 (1868), col. 243.
- MONASTERIO, J.: *Nueva teórica sobre el empuje de bóvedas*, manuscrito, Madrid, Biblioteca ETS Ingenieros Caminos, ¿1808?
- MORIN, A.: *Résistance des matériaux*, París, Hachette, 1857, 2.<sup>a</sup> ed.
- MÜLLER-BRESLAU, H. F. B.: *Die neueren methoden der Festigkeitslehre und der Statik der Baukonstruktionen*, Leipzig, Baumgartner, 1886.
- *Die graphische Statik der Baukonstruktionen*, Stuttgart, Kröner, 1887, 1892.
- MUÑOZ, A.: *Manual de construcción de puentes o resumen de consideraciones y reglas generales indispensables para su establecimiento y construcción*, Madrid, Imprenta Memorial de Ingenieros, 1864.
- NACENTE Y SOLER, F.: *Resistencia de materiales sin necesidad de cálculo diferencial e integral*, Barcelona, ed. del autor, 1887.
- NAVASCUÉS, P.: *Arquitectura e ingeniería del hierro en España (1814-1936)*, Madrid, El Viso, 2007.
- NAVIER, C.-L.-M.-H.: *Résumé des leçons données à l'École Royale des Ponts et Chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines*, París, Firmin Didot, 1826.
- PARÍS, F.: *Teoría de la elasticidad*, Sevilla, GERM, 2000, 3.<sup>a</sup> ed.
- PEÑA BOEUF, A.: *Mecánica elástica*, Madrid, s. n., 1930, 2.<sup>a</sup> ed.
- PERRY, J.: *Mécanique appliquée*, París, Hermann, 1913.
- PIÉLAGO, C. del: *Teoría mecánica de las construcciones*, Madrid, s. n., 1839.
- POINCARÉ, H.: *Leçons sur la théorie de l'élasticité*, París, G. Carré, 1892.
- POISSON, S. D.: *Tratado de mecánica*, trad. de J. del Campo, Madrid, Imprenta Nacional, 1845, 2 vols.
- POLINI, G.: *Memorie istoriche della Gran Cupola del Tempio Vaticano*, Padua, Stamperia del Seminario, 1748.
- PONCELET, J.-V.: *Cours de mécanique industriel, fait aux artistes et ouvriers messins*, Metz, 1827 (también, París, 1839 y 1870).
- REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES: *Vocabulario científico y técnico*, Madrid, RACEFN, 1983.
- *Diccionario esencial de las ciencias*, Madrid, Espasa-Calpe, 1999.
- Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación, *BOE*, n.º 74 (28 de marzo de 2006).
- REBOLLEDO, J. A.: *Construcción general*, Madrid, s. n., 1875 (5.<sup>a</sup> ed., 1910).

- REDONDO, J.: *Cálculos sobre la determinación del espesor que deben tener los muros de sostenimiento*, Madrid, Imprenta de R. Labajos, 1867.
- REY PASTOR, J.: *El progreso de España en las ciencias y el progreso de las ciencias en España*, discurso inaugural del III Congreso de Valladolid de la Asociación para el Progreso de las Ciencias, Madrid, 1915.
- y J. BABINI: *Historia de la matemática*, Barcelona, Gedisa, 1985, t. 2.
- ROCA, A., y J. M. SÁNCHEZ RON, *Esteban Terradas: ciencia y técnica en la España contemporánea (1883-1950)*, Madrid / Barcelona, INTA / Ediciones del Serbal, 1990.
- SÁENZ RIDRUEJO, F.: *Ingenieros de caminos del siglo XIX*, Madrid, Colegio ICCP (Colección de Ciencias, Humanidades e Ingeniería), 3, 1990.
- *Una historia de la Escuela de Caminos*, Madrid, Fundación Agustín de Betancourt, 2006.
- SAINT-VENANT, B. de: *De la torsion des prismes avec considération sur leur flexion ainsi que sur l'équilibre des solides élastiques en général et des formules pratiques pour le calcul de leur résistance à divers efforts s'exerçant simultanément*, París, Imprimerie Impériale, 1855.
- *Historique abrégé des recherches sur la résistance et sur l'élasticité des corps solides* [introducción a las lecciones de Navier sobre construcciones y máquinas], París, Dunod, 1864.
- SÁNCHEZ PASTORFIDO, C.: *Resistencia de materiales y sus aplicaciones a la construcción de máquinas*, Madrid, Imprenta de Eduardo Arias, 2.ª ed., 1906.
- SANDRINELLI, G.: *Manual de resistencia de materiales*, Madrid, Romo, 1907.
- SARRAU, E.: *Notions sur la théorie de l'élasticité*, París, Gauthier-Villars 1889.
- SEARS, F. W., y M. W. ZEMANSKY: *Física general*, trad. de Albino Yusta, Madrid, Aguilar, 1957, 4.ª ed.
- SHEILDS, J. W.: *Memoria sobre las fuerzas que actúan en las obras de hierro con observaciones prácticas acerca de su construcción*, trad. de J. A. Rebolledo, Madrid, Francisco Roig, 1866.
- STRAUB, H.: *A history of civil engineering*, Manchester, Leonard Hill, 1952.
- STRUTT, J. W., barón Rayleigh: *Theory of sound*, Londres, Macmillan, 1877 (Nueva York, Dover, 1945), 2 vols.
- TÉLÉZ, J., y D. MUÑOZ: *Temas en geofísica. Dedicado al profesor Udías*, Madrid, UCM, 2006.
- TERRADAS, E.: *De la estabilidad geométrica en estructuras elásticas*, Madrid, Talleres Voluntad, 1927.
- TIMOSHENKO, S.: «Sur la stabilité des systèmes élastiques», *Ann. des Ponts et Chaussées*, 17 (1913), t. III, pp. 496-566, y t. IV, pp. 73-134.
- *History of strength of materials*, Nueva York, McGraw-Hill, 1953 (Dover, 1983).
- *Resistencia de materiales*, trad. de Tomás Delgado, Madrid, Espasa-Calpe, 1961, 9.ª ed.
- *As I remember*, Princeton, Van Nostrand, 1968.

- TODHUNTER, A., y K. PEARSON: *A history of the theory of elasticity and of the strength of materials*, Cambridge UP, 1886 (reimpr., Nueva York, Dover, 1960).
- TORIJA, J. de: *Breve tratado de todo género de bóvedas, así regulares como irregulares, ejecución de obrarlas y medirlas con singularidad y modo moderno, observando los preceptos canteriles de los maestros de arquitectura*, Madrid, 1661.
- TORROJA, E.: *Determinación de esfuerzos de vigas rectas*, Madrid, ITCC, 1949.  
— «Laboratorios», *ROP* (número del centenario) (mayo de 1953), pp. 19-22.
- TOUS, N.: *Puentes metálicos*, Barcelona, Borrás y Mestres, 1909.
- TRUESDELL, C. A.: *The rational mechanics of flexible or elastic bodies (1638-1788): introduction to Leonhardi Euleri opera omnia, vol. x et xi, seriei secundae*, Turici, Orell Füssli, 1960.
- VALDÉS, N.: *Manual del ingeniero*, París, J. Dumaine, 1859.
- VALLE, L. del: *Influencia que han tenido los progresos de las ciencias exactas en las artes de construcción y más especialmente en las que entra el hierro por principal elemento*, discurso de recepción en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, 1861.
- VELASCO DE PANDO, M.: *Elasticidad y resistencia de materiales*, Sevilla, A. Ruiz-Toranzo, 1924.
- VILLARREAL, F.: *Flekso da l'traboj*, Lima, Imprenta de la Escuela de Ingenieros, 1901.
- VOLTERRA, V.: «Sur l'équilibre des corps élastiques multiplement connexes», *Ann. Sci. Éc. Norm.*, 3/24 (1907) , pp. 401-517.
- ZAFRA Y ESTEBAN, J. M. de: *Cálculo de estructuras*, Madrid, Tejada y Martín, 1915, 2 vols.  
— *Los progresos de la construcción y de la mecánica aplicada*, discurso de recepción en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, 1919.