

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XIX JORNADAS

VOLUMEN 15 (2009)

Diego Letzen
Penélope Lodeyro

Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



Contribuciones tempranas al estudio del fenómeno actualmente conocido como pandeo

Luis A. Godoy*

Introducción

En 1729, el holandés Petrus van Musschenbroek (PvM)¹, entonces profesor de la Universidad de Utrecht, publicó un voluminoso libro conteniendo disertaciones sobre varios tópicos diferentes, incluyendo magnetismo, tubos capilares, magnitudes terrestres y coherencia de cuerpos firmes. Al parecer, el libro contiene por primera vez el uso de la palabra "Física" en el sentido que le damos en la actualidad. Aquí nos interesa especialmente la sección titulada: "*Introductio ad cohaerentiam corporum firmorum*" (Introducción a la coherencia de cuerpos sólidos), que ocupa las páginas pp. 421-672, en las que PvM reportó experimentos llevados a cabo principalmente sobre piezas de madera, a las que sometió a esfuerzos de tracción, flexión y compresión. Para hacer los experimentos, el autor debió también desarrollar los aparatos de ensayo. Era la primera vez que se llevaban a cabo, de manera sistemática, ensayos destinados a determinar la resistencia de piezas en diversas condiciones de carga.

Ensayando piezas de madera de diferentes dimensiones en compresión, PvM identificó que, durante el proceso de carga y antes de alcanzar rotura, las columnas sufrían una curvatura lateral y postuló una ley general derivada de los experimentos, según la cual la resistencia de una columna es inversamente proporcional al cuadrado de su longitud. De acuerdo a los conocimientos de su época, el largo no tenía por qué jugar un papel en la resistencia a compresión, sino que solo debía depender de las dimensiones de la sección transversal; por lo que los hallazgos de PvM iban en contra del sentido común. Este es el primer antecedente de un estudio sistemático de un problema de pandeo.

En general, los resultados de sus ensayos constituyeron una gran novedad en su época y por mucho tiempo no fueron superados por ningún experimentalista. Quince años más tarde, un matemático (Leonhard Euler) llegó a la misma relación entre resistencia y longitud partiendo de las ecuaciones de una viga elástica con carga en la dirección del eje de la pieza, y prefirió ignorar los aportes previos de PvM, a pesar de que conocía perfectamente su libro.

PvM fue la primera persona en tratar el problema de falla de piezas en compresión como un nuevo fenómeno (separando los problemas de tensión y compresión) y cuantificar la resistencia en compresión frente a esa forma de falla. Sin embargo, en la actualidad su nombre no es conocido fuera de un círculo muy reducido de historiadores de la ciencia, a diferencia del de Euler, a quien se adjudica la paternidad de los estudios de pandeo. Para poner en perspectiva la crucial importancia de la contribución de PvM es necesario comprender los contextos personal, histórico y científico en los que el autor llevó a cabo sus estudios y ese es el tema del presente trabajo.

* FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba y CONICET

Antecedentes de estudios de columnas en compresión hacia finales del siglo XVII

Consideremos los aportes que habían sido realizados previamente al tiempo de PvM. En manuscritos de Leonardo da Vinci (1452-1519) hay anotaciones acerca de la deformación lateral de piezas comprimidas. Leonardo dibujó columnas apoyadas en la base que soportaban una carga de compresión en el sentido de su eje. En sus cuadernos dibujó esquemas de deformaciones y desarrolló proyectos de posibles ensayos para medir la resistencia de algunas piezas a rotura, pero en ningún lugar se ha encontrado evidencia que haya realizado tales experiencias. Tampoco hay evidencia que PvM conociera ni siquiera la existencia de tales cuadernos de Leonardo.

Cien años después de Leonardo, la rotura de piezas en compresión fue objeto de estudios por parte de Frere Marini Mersenne (1588-1648), el mismo que organizaba reuniones de filósofos naturales que culminaron con la creación de la Academia de París. En época de Mersenne, la incidencia del material sobre la resistencia no era tenida en cuenta dado que, en la tradición de Galileo, la resistencia de los sólidos estaba basada solamente en demostraciones geométricas. La novedad consistió en el ensayo de piezas metálicas de igual geometría pero diferentes materiales. En su libro, Mersenne reconoce que: "Entre todas las dificultades, la más seria es que casi todos los cuerpos se distinguen de una manera peculiar por los arreglos diferentes de las distintas fibras: mientras que algunos tienen muchas láminas, como por ejemplo un roble, otros presentan pocas o ninguna, como el hierro, mármol o vidrio. Puede añadirse que el hierro, cobre y otros metales, aun cuerpos aislados, sometidos a fuerzas o pesos, se curvan y flexionan a la forma de un arco antes de romperse. Esto produce una nueva dificultad que escapó a ser notada por Galileo. Si hubiera un físico-matemático capaz de encontrar una solución, merecería más reconocimiento que el inventor de la cuadratura" (Mersenne, 1647).

Esta cita ilustra el asombro de Mersenne frente al fenómeno de deformación lateral de una pieza comprimida antes de romperse. Mersenne especuló que sus resultados iban a asombrar a mucha gente. Para su época, éste era uno más de los interrogantes que rodeaban la resistencia de materiales. Como afirma Benvenuto, "[Mersenne] y sus contemporáneos no tenían ni idea de cual podía ser la raíz de la causa de la resistencia. Las razones físicas de la resistencia estaban aun envueltas en el misterio más profundo. Pero esto no excluía la posibilidad de reunir información útil acerca de la medida de resistencia —una descripción puramente fenomenológica, pero de ninguna manera trivial" (Benvenuto, 1991, pp. 205).

PvM trató con gran respeto los resultados de Mersenne, citándolos cuidadosamente. Su propio enfoque fue similar al de Mersenne, en el sentido de su convicción que los resultados deben ser derivados por vía de experimentación, dado que "la doctrina de la resistencia es siempre demasiado problemática para la mirada de los matemáticos" (Musschenbroek, 1729, pp. 622).

Los estudios experimentales de PvM bajo compresión

El énfasis en los estudios de mecánica en la obra de 1729 está puesto en las diferencias entre el comportamiento de materiales a tracción, compresión y flexión. En su tiempo se hacía distinción entre "resistencia absoluta" (determinada bajo tracción) y "resistencia relativa o transversal" (determinada bajo flexión). La sección "Introducción a la coherencia de cuerpos sólidos" contiene gran cantidad de experimentos, llevados a cabo de manera sumamente cuidadosa, en los que se registraba la carga de rotura de la pieza ensayada.

Para llevar a cabo los experimentos, PvM tuvo que desarrollar máquinas de ensayo totalmente originales, para lo que contó con la ayuda de fabricantes de instrumentos especializados. No nos ha sido posible ubicar el paradero de esos aparatos, pero están claramente dibujados en perspectiva en el texto de 1729 y en otro de 1762. Esos artefactos estaban destinados a ensayar piezas de pequeño tamaño, principalmente de madera, precisándose aparatos de ensayo diferentes para cada situación de carga.

Los estudios bajo compresión comienzan en la página 652, bajo el título: "*Caput Nonum: De cohaerentia corpore compressorum*" (Capítulo 9: De la coherencia de cuerpos en compresión). Aquí aparecen los experimentos identificados como 222 a 248. Las descripciones de cada experimento son sumamente breves, entre dos y tres líneas que sirven para reseñar las dimensiones y resultados en términos de la carga alcanzada y la forma de rotura. Como conclusión de estos experimentos, PvM presentó la siguiente proposición:

Proposición 119: Paralelepípedos de la misma madera, comprimidos a lo largo de su longitud, desarrollan fuerzas de resistencia que varían inversamente con el cuadrado de la longitud, directamente con el espesor del lado que no está curvado y directamente con el cuadrado del lado que está curvado (Musschenbroek, 1729, pp. 660).

Nótese que PvM no pudo establecer una igualdad para la relación que postulaba debido a la falta de conocimiento de las variables que caracterizaban al material². Pero la forma de su proposición de Musschenbroek es asombrosamente similar a la que usamos en la actualidad.

Truesdell (1960) resalta que PvM se dio cuenta que la rotura en compresión era totalmente diferente de la rotura en tracción. Además, fue el primero en establecer una relación no trivial en la resistencia de materiales descubierta por vía experimental. Finalmente, fue el primero que pudo separar los fenómenos de curvatura bajo compresión (lo que hoy llamamos pandeo) de la rotura en compresión.

La tradición experimentalista en la que trabajó PvM

En la literatura de la historia de la ciencia se reconoce el papel fundamental de PvM y Willem J. s'Gravesande (1688-1742) en difundir las ideas de Newton en el continente. Sin embargo, la práctica misma de las investigaciones de PvM, por ejemplo las reportadas en 1729, no son fácilmente reconocibles como pertenecientes a la misma corriente Newtoniana.

El sentido en el cual PvM y s'Gravesande se encolumnaban detrás de Newton puede entenderse mejor en relación a su oposición a las ideas de Rene Descartes. Descartes afirmaba que los únicos conceptos de cosas materiales que encontraba en su mente eran la forma, el tamaño y el movimiento, y esperaba usar su método hipotético deductivo para obtener conocimientos confiables a partir de la mente. PvM destinó muchos pasajes de sus obras a atacar de manera abierta las ideas de Descartes, mientras que s'Gravesande lo hacía de manera más moderada y velada. De manera que PvM se oponía fuertemente a la metodología de derivar sistemas partiendo de principios generales, sosteniendo que solo podemos conocer las leyes de la naturaleza mediante la experiencia, y no a priori, como pretendía Descartes.

La herencia de Newton que recibieron los científicos del Siglo XVIII no era tan clara y por lo menos generó dos corrientes de seguidores: aquellos que enfatizaban la naturaleza analítica de

sus *Principia Mathematica* (de 1680, sobre la mecánica) y la corriente inductivista y experimental expresada en su *Optica* (de 1704).

Considerando los físicos experimentales del Siglo XVIII, Guijarro-Mora (2002) distingue entre experimentalistas en sentido estricto y los experimentalistas físico-matemáticos, como Cavendish y Coulomb, quienes realizaban experimentos con la expectativa de encontrar propiedades que pudieran usar en modelos matemáticos. Este autor defiende la tesis que los físicos experimentales en sentido estricto, como PvM, no seguían estrictamente a Newton en aspectos metodológicos, sino que se enfocaban en el estudio de “fenómenos cuya explicación no se ajustaba a modelos basados exclusivamente en las leyes mecánicas generales”. Estos científicos esperaban obtener conocimientos sobre los fenómenos fundamentalmente mediante la experiencia y “sus propósitos tenían otras finalidades, que pueden sintetizarse en comprobar los constructor teóricos provisionales (hipótesis), detectar el efecto de propiedades, visualizar los fenómenos inaccesibles... y descubrir rasgos y peculiaridades de los fenómenos” (Guijarro-Mora, 2001, pp. 212).

En este contexto, PvM afirmaba que no quería quedar pegado a ninguna secta científica particular, sino que su meta era la búsqueda de la verdad. Para ello confiaba en resultados de la experimentación llevados a cabo en condiciones muy cuidadosas y realizadas de manera repetida como modo de producir resultados confiables. Dentro de este panorama, el énfasis en PvM estaba puesto en la recolección de datos, a través de lo cual alcanzó a formalizar conocimientos nuevos (como la resistencia de piezas a tracción, compresión y flexión). Consideraba que todo cambio que vemos en la naturaleza era el producto de un movimiento, que era expresable por una cantidad, y el lenguaje más apropiado para expresar ese cambio era el de las matemáticas. De los experimentos intentaba conseguir leyes que relacionaran sus observaciones con los fenómenos de los cuales pensaba que se derivaban. S'Gravesande, por otra parte, enfatizaba más el tratamiento matemático surgido de las observaciones experimentales. Pero de ninguna manera debe pensarse que había una coherencia total entre las reflexiones de estos autores holandeses y su práctica en la investigación. Su enfoque era fuertemente fenomenológico y condujo a avances importantes, pero como metodología carecía de generalidad y estaba sujeta a muchas limitaciones.

Lo anterior relacionado con experimentación no habría sido posible sin el apoyo de aparatos e instrumentos adecuados (Clerq, 1989, 1997). La fabricación de instrumentos científicos tuvo una expansión extraordinaria en el Siglo XVIII, inicialmente en Londres, seguida de Leiden y posteriormente de Munich (Daumas, 1972).

El impacto del trabajo de PvM

Los resultados experimentales de PvM sobre columnas en compresión fueron citados repetidamente en revisiones de experimentos. Una de las primeras citas aparece en 1752 en una disertación de un profesor de física y matemáticas, de la Universidad Tubingae, G. W. Krafft. El primero en identificar la falta de acuerdo entre los resultados experimentales y la teoría de columnas de Euler-Lagrange fue Coulomb. En 1817, George Rennie discutió el trabajo experimental de varios autores, incluyendo a PvM, para resaltar las contradicciones entre ellos y con la teoría. Los experimentos de PvM también aparecen discutidos en un libro de Thomas Tredgold de 1820, pero llega a afirmaciones absurdas acerca de la mejor forma de hacer una columna.

Para comprender la importancia que tuvo el trabajo de PvM vale la pena mencionar también su impacto en Francia (Brunet, 1926) y en un lugar tan alejado como Japón. Yajima (1964) describe la influencia europea sobre el desarrollo de las ciencias físicas en Japón, mencionando que a partir de 1639 y hasta 1853 se prohibió el ingreso de extranjeros a Japón, con la excepción de holandeses y chinos. Así, hacia mediados del Siglo XVIII, la ciencia europea llegó a Japón en libros holandeses. El papel tan crucial de Holanda en Japón hizo que la cultura extranjera se denominara “aprendizaje holandés”, identificando que todo conocimiento extranjero llegaba a través de holandeses. Algunos estudiosos japoneses aprendieron la lengua holandesa y era posible estudiar la obra de PvM en edición en holandés. Por ejemplo, Oashi Bauri (1778-1852) notó la importancia de las ciencias europeas, especialmente en astronomía y física, se dedicó al estudio de la física, para lo cual aprendió holandés después de sus 40 años. Después de varios años, pudo leer el libro de PvM en holandés titulado “*Beginsels...*” de 1736.

Georges Louis Le Clerc, conde de Buffon (1707-1788), originalmente había estudiado derecho, tuvo incursiones en las matemáticas, pero alcanzó fama como naturalista por su imponente obra *Historia Natural*, publicada en 36 volúmenes. En 1739 fue nombrado intendente de *Jardin du Roi*, con la función de catalogar las colecciones reales francesas de historia natural. El ministro francés de Marina estaba interesado en conocer mejor la madera adecuada para fines navales y, para estudiar su resistencia, Buffon siguió a PvM iniciándose con ensayos sobre piezas de tamaño pequeño pero encontró resistencias diferentes. Para una misma especie de árbol, tomando ejemplares de diferente tamaño y, a su vez, cortando muestras de posiciones diferentes dentro de un mismo tronco, Buffon no logró resultados consistentes y quedó perplejo frente a la variabilidad de sus propios resultados. Teniendo a su disposición los recursos y el tiempo necesarios, decidió llevar a cabo investigaciones en escala natural, cortando largos similares a los usados en la construcción. Así ensayó robles de 2.5 a 5 pies de largo, siguiendo un riguroso protocolo de carga.

Los resultados de Buffon para cargas de flexión fueron comunicados en artículos en *Memoires de l'Academie Royal des Sciences* de 1740 y 1741. Así encontró que el tiempo era una variable importante: una carga mucho más pequeña que la que produciría la falla en forma inmediata causaba una deflexión que aumentaba con el tiempo hasta que ocurría la rotura, quizás algunas horas más tarde. Esa carga nunca era menor de 2/3 de la carga última de aplicación instantánea, y la falla ocurría con aviso de un sonido, excepto para especímenes pequeños. Buffon reportó esos hallazgos en el trabajo de 1741.

En el contexto de piezas a compresión que estamos viendo, los resultados a flexión de Buffon fueron importantes porque eran comparables a los de flexión de PvM y diferían de ellos, con lo que quitaban credibilidad a los hallazgos de PvM en general. Ocurría que sus ensayos reflejaban la incidencia de nuevos factores en el problema, que Buffon no lograba diferenciar: por una parte, variabilidad en las propiedades de la madera (anisotropía), y por otra, las deformaciones diferidas. Es probable que muchos científicos de la época hayan accedido a los trabajos de PvM de 1729 y de Buffon de 1740 y concluido que el primero representaba un trabajo en condiciones especiales mientras que el segundo estaba más próximo a la realidad. Esto tiene que haber reducido el impacto de las investigaciones de PvM en compresión en el mundo de quienes buscaban verdades a partir de evidencia empírica.

Comentarios finales

PvM no comenzó desde cero sus investigaciones de columnas en compresión, sino que trabajó el problema de compresión de piezas prismáticas en conocimiento de algunos aportes previos que se basaban en observaciones. La importancia de su contribución radicó en diseñar un estudio experimental sistemático en condiciones diversas, a partir del cual pudiera aislar la incidencia de los diversos factores que entraban en el fenómeno. A partir de esos datos colectados mediante sus dispositivos originales, PvM pudo expresar de qué manera específica incidía cada factor sobre la resistencia de las piezas en compresión. Si bien las relaciones que obtuvo no explicitaban la naturaleza del factor de proporcionalidad, resultaron muy próximas a las relaciones aceptadas durante los siglos siguientes.

No solo pudo establecer la dependencia de la resistencia con la geometría de la pieza, sino que logró diferenciar el fenómeno de curvatura de la pieza en compresión (lo que hoy llamamos pandeo) de la rotura subsiguiente. Y logró dejar claramente diferenciadas las resistencias en compresión y en tracción.

Frente a tales logros, cabe preguntarse por qué el nombre de PvM permanece ignorado en este campo a partir del Siglo XIX, mientras que Euler es identificado como el “descubridor” del fenómeno de pandeo. La respuesta no es simple, pero puede verse desde diferentes perspectivas. Desde la propia perspectiva de los experimentalistas, otros investigadores (como Buffon) se encontraron con aspectos específicos de los materiales que incidían, a tal punto que terminaron desconfiando de los hallazgos de PvM sobre piezas pequeñas en general. En otras palabras, la confusión generada por la ampliación de la información disponible generó una desconfianza hacia la existencia de relaciones generales. Pero hay una segunda perspectiva, que fue la valoración de los geómetras por encima de los experimentalistas, como representantes de dos tradiciones en competencia. En este sentido, los aportes de Euler fueron vistos como universales y solo fueron cuestionados por los ingenieros prácticos ingleses en el Siglo XIX.

Notas

¹ PvM nació en el seno de una familia muy reconocida de fundidores de bronce y fabricantes de instrumentos de precisión (Clerq, 1997). La familia era de origen flamenco (proveniente de un lugar cercano a la comuna de Tournai en la provincia de Hainaut). En tiempos de la Reforma (hacia la segunda mitad del Siglo XVI) se refugiaron en Leiden para huir de la inquisición de Felipe II implementada localmente por el Duque de Alba. Una biografía de PvM puede encontrarse, por ejemplo, en Struik (1975).

² El concepto de módulo de elasticidad fue posterior a su época. Algo similar ocurrió a Euler, quien debió usar un factor de proporcionalidad para el que solo podía establecer sus unidades.

Bibliografía

- Benvenuto E., *An Introduction to the History of Structural Mechanics*, vol. 1, Springer-Verlag, New York, 1991.
- Brunet, Pierre (1926), *Les physiciens hollandais et la methode experimentale en France au XVIIIe Siecle*, Blanchard, Paris.
- Clerq, Peter de (1989), *Leiden Cabinet of Physics*, Museum Boerhaave, Leiden.
- Clerq, Peter de (1997), *At the Sign of the Oriental Lamp: The Musschenbroek workshop in Leiden 1660-1750*, Erasmus Publishing, Rotterdam.
- Daumas, Maurice (1972), *Scientific Instruments in the Seventeenth and Eighteenth Centuries*, Praeger, New York.
- Guijarro-Mora, Víctor (2001), Petrus van Musschenbroek y la física experimental del Siglo XVIII, *Asclepio*, vol. 53, pp. 191-212.
- Mersenne, Marin (1647), *Minimi Tractatus Mechanicus Theoricus et Practicus*, París, libro III.

-
- Musschenbroek, Petrus van (1729), *Physicæ experimentales, et geometricæ, de magnete, tuborum capillarum vitreorumque speculorum attractione, magnitudine térræ, cohaerentia corporum firmorum. Dissertationes, ut et Ephemerides meteorologicae Ultrajectinae*, Samuel Luchtmans, Leiden.
- Struik, D. J. (1975), Musschenbrek, Petrus van, en: *Dictionary of Scientific Biography*, Ed. Charles C. Gillispie, Charles Scribner's Son, New York, vol. 9, pp. 594-597.
- Truesdell C. (1960), *The Rational Mechanics of Flexible or Elastic Bodies 1638-1788. Introduction to Leonhardi Euleri Opera Omnia, Series II, Volume II, Part 2*, Fussli, Zurich.
- Yajima, Suketoshi (1964), European influence on Physical Sciences in Japan, *Monumenta Nipponica*, vol. 19 (3/4), pp. 340-351.