

Prólogo

Una nueva verdad científica no se impone porque sus oponentes se convenzan de ella y confiesen haber visto la luz, sino más bien porque poco a poco se van extinguiendo y a la generación siguiente se la familiariza de antemano con la verdad.

M. Planck. *Autobiografía científica*

Las nuevas teorías, avaladas por resultados experimentales, tardan en imponerse. Su entendimiento requiere un nuevo marco de pensamiento y, por consiguiente, un esfuerzo doble: primero hay que “desaprender” los postulados anteriores, que quedan obsoletos y, luego, hay que “aprehender”, asimilar el nuevo marco. Los antiguos profesores presentan, pues, una notable resistencia a aceptar las nuevas teorías. La historia de la ciencia suministra numerosos ejemplos. Para que las teorías de Planck y Einstein fueran universalmente aceptadas hizo falta el tiempo de una generación. Planck llegó a afirmar que para que una nueva teoría triunfe se debe extinguir la generación que apoya la antigua. En el campo de la técnica, la ciencia aplicada, el tiempo requerido para la aceptación de las nuevas teorías es aún mayor, en particular, si las antiguas daban buenos resultados prácticos. Así, la incorrecta teoría de arcos de La Hire/Béllidor, de 1729, perduró más de un siglo después que Danyzy demostrara en 1732 mediante ensayos indubitables su incorrección.

Le teoría clásica elástica, desarrollada principalmente en el siglo XIX, constituye hoy el marco habitual de pensamiento estructural. Las ecuaciones estructurales de equilibrio, material (elástico) y compatibilidad, escritas hace más de un siglo, pueden resolverse hoy con facilidad con ayuda de programas de ordenador estándares. Sin embargo, desde los años 1920, se sabe que la solución elástica puede no representar en absoluto el funcionamiento de la estructura. El equipo dirigido por John Baker demostró en aquel decenio, mediante ensayos sobre pórticos de tamaño real y edificios en construcción, que las imperfecciones inherentes al proceso de edificación, los pequeños asientos, la entrada en carga desigual, etc., podían producir enormes desviaciones sobre los valores de las fuerzas internas calculadas elásticamente, y que hasta entonces fueron consideradas el “estado real” de la estructura. El cálculo plástico, o análisis límite, la principal aportación del siglo XX a la teoría de estructuras, surge como respuesta a esta discrepancia. Por supuesto, el método elástico había demostrado ser seguro, pero no se sabía por qué, dado que quedó demostrado que la estructura podía estar en estados completamente distintos del previsto. Baker vio que había que cambiar el enfoque y tomó el camino iniciado en el primer cuarto del siglo XX por los teóricos de la plasticidad centroeuropeos.

Durante dos decenios, de 1930 a 1950, se trabajó intensamente en el desarrollo de la teoría plástica. El trabajo culminó con la demostración de los Teoremas Fundamentales que, finalmente, dieron una explicación racional a los resultados de los ensayos de los años 1920 y su relación con la seguridad de los edificios. En particular, el Teorema de la Seguridad arrojó una luz inesperada sobre todo el proceso de análisis y proyecto estructural. El Teorema dice que si (en una estructura dúctil) para unas cargas dadas existe una distribución de esfuerzos internos en equilibrio con dichas cargas que no viola la condición de

cedencia del material (una condición de resistencia), la estructura es segura, no se hundirá. La potencia del teorema es que esa distribución de esfuerzos internos no tiene por qué ser la “real”, basta con que pueda existir para que el edificio sea seguro. Hallando el máximo de estados de carga seguros se podía calcular la carga de colapso y esta fue la primera aplicación del citado teorema.

El profesor Heyman fue el primero en darse cuenta, a mediados de los años 1960, del verdadero alcance de esta afirmación que va mucho más allá del cálculo de cargas de colapso. En efecto, el Teorema de la Seguridad conduce a un “enfoque del equilibrio”: el analista puede trabajar con soluciones posibles de equilibrio, de entre las infinitas que admite una estructura hiperestática, y verificar que se cumple la condición de cedencia en cada sección. No es necesario, pues, hacer afirmaciones de compatibilidad y, en particular, sobre las condiciones de contorno, que tanto pueden afectar el estado de la estructura en un momento dado y que son imposibles de conocer. (Por supuesto, se están admitiendo las hipótesis estructurales básicas de pequeñas deformaciones y ausencia de inestabilidad, local o global: la estructura en su conjunto debe ser dúctil.)

La teoría se desarrolló en un principio para pórticos de acero, pero en un decenio se vio que podía ser aplicada a otros materiales no frágiles, como el hormigón armado o la madera. Sorprendentemente, la teoría podía también traducirse a estructuras de fábrica, un material unilateral que resiste compresiones y no tracciones. De nuevo el profesor Heyman fue quien realizó este descubrimiento que permite estudiar racionalmente una buena parte del patrimonio histórico construido. El material fábrica, sujeto a ciertas condiciones, permite que las estructuras presenten un comportamiento “dúctil” adaptándose a las diferentes situaciones a lo largo de su historia mediante la formación de grietas de articulación.

La potencia y bondad de una teoría se mide por lo que explica, por la luz que arroja sobre los fenómenos, por la capacidad de predecir resultados medibles. La teoría plástica o análisis límite, no sólo suministra un método de análisis y cálculo riguroso que permite proyectar y construir estructuras seguras. También permite entender la propia evolución de la disciplina. Tomemos, por ejemplo, los grandes rascacielos construidos a finales del siglo XIX y principios del XX. ¿Como pudieron ser calculados? Evidentemente, las estructuras eran, son, muy hiperestáticas, y en aquella época, sin ordenadores, era imposible siquiera intentar una solución de las ecuaciones estructurales. Las estructuras, no obstante, fueron calculadas y están en pie. El método empleado fue el de colocar rótulas virtuales, dividiendo los pórticos en “bloques” isostáticos que se analizaban independientemente. Luego la estructura “se montaba” y se obtenía de esa forma, una solución de equilibrio de entre las infinitamente muchas posibles. Posteriormente se calculaban las vigas y soportes con las fórmulas de la resistencia de materiales y se comprobaba la estabilidad con las fórmulas empíricas de la época. El método seguido es rigurosamente correcto dentro del marco del Teorema de la Seguridad; no es sino una aplicación del “enfoque del equilibrio” de Heyman y, por supuesto, todos los grandes ingenieros y arquitectos han aplicado este enfoque en sus proyectos; Gaudí, Maillart y Candela, entre otros, lo hicieron de manera explícita. En efecto, la tarea fundamental del proyectista es imaginar una solución razonable de equilibrio para el problema en cuestión.

En el campo de las estructuras de fábrica el enfoque del equilibrio conduce, en este tipo edificios donde las tensiones son muy bajas, a afirmaciones geométricas: no es un problema de resistencia, sino de estabilidad. Las reglas de proyecto estructural empleadas en la construcción del Panteón de Roma, Santa Sofía o las catedrales góticas eran, precisamente, de tipo geométrico. Es la forma del edificio lo que

determina su seguridad, independientemente del tamaño (aunque las tensiones crezcan linealmente al aumentar el tamaño, siguen siendo bajas). Este hecho explica el enorme éxito y el progreso de los antiguos constructores que edificaron monumentos que siguen en pie al cabo de siglos o milenios.

No obstante, a pesar de su importancia crucial, el cálculo plástico o análisis límite no se enseña con la debida profundidad en muchas escuelas de arquitectura e ingeniería (en algunas, simplemente, no se enseña). Muchos miembros de la profesión estructural desconocen el origen y el significado profundo de la nueva teoría. Una razón es, por supuesto, que los métodos elásticos son seguros en el caso de las estructuras porticadas. El analista elástico se cree que la solución obtenida es la “real”; esto no es así, la solución es una entre infinitas posibles, que cambiarán con variaciones pequeñísimas de las condiciones de contorno, errores de fabricación, etc., pero el proyecto resultante es seguro. Por otra parte, los métodos elásticos son más fáciles de programar pues conducen a soluciones únicas. Puede resultar “cómodo” utilizar un programa elástico estándar para llegar a una solución posible de equilibrio, aunque ésta sea, en general, más cara.

En el caso de las estructuras de fábrica, el análisis clásico tradicional, con su énfasis en los estados tensionales y la verificación de la seguridad por comparación con tensiones admisibles, no tiene por qué ser seguro. Un posible estado de equilibrio con tensiones muy bajas puede ser peligroso si no cumple con la necesaria seguridad geométrica. La falta de comprensión del funcionamiento de las fábricas está ocasionando análisis erróneos que conducen a intervenciones caras e innecesarias, y en ocasiones peligrosas.

Pero quizá la razón fundamental de la aversión a los métodos plásticos dependa del marco generalmente aceptado todavía hoy día: la teoría clásica elástica. El empleo de los ordenadores no debería ocultar la

realidad de que se están resolviendo las ecuaciones del siglo XIX y que el sistema de ecuaciones estructurales es muy sensible a pequeñas variaciones de las condiciones de contorno. Pero los métodos elásticos fueron los estudiados en la universidad por muchos profesionales y académicos actuales. Esta es la verdadera razón de la feroz resistencia que presentan algunos profesores de estructuras a aceptar las consecuencias últimas de la teoría plástica. La teoría plástica desmonta el hermoso edificio matemático edificado en el siglo XIX con una convicción absoluta en la veracidad de los resultados del análisis. En el fondo se trata del mismo fenómeno comentado al principio: la resistencia a abandonar las antiguas teorías que se perciben como algo propio, y su puesta en cuestión se percibe como un ataque personal.

Pasadas ya tres generaciones (sesenta años) de la formulación y verificación experimental de la teoría, parece llegado el momento de acometer la tarea de integrarla debidamente en las enseñanzas universitarias de estructuras. Esto es especialmente necesario en España. Como se ha dicho, si bien un cálculo elástico es seguro en el caso de los pórticos de acero u hormigón armado, no tiene por qué serlo en el caso de las estructuras de fábrica. Pero nadie debería dudar de la necesidad de poseer el conocimiento más completo de los problemas, en particular cuando la responsabilidad asumida atañe a la vida de las personas.

* * *

Este último libro del profesor Heyman se dirige al núcleo de la teoría estructural. A pesar de su brevedad, en él se estudia la teoría básica, el fundamento de la teoría estructural con un rigor teórico extremo. Así, el estudiante, profesional o profesor podrá, tras estudiar el libro, tener una idea clara de la situación actual, y podrá encuadrar cada uno de

los enfoques particulares (recogidos quizá en distintos programas de ordenador) dentro del marco teórico general. Sólo desde una suficiente seguridad teórica se podrá elegir la herramienta adecuada. Además de la teoría, el libro contiene una selección de ejemplos y cálculos explicativos. Pero no es un libro “práctico”, en el sentido restringido que este término ha adquirido hoy día. En latín, a la práctica diestra de una disciplina se le denomina *ars*, y eso conlleva también el dominio de la teoría. La famosa frase de Mignot, tantas veces mal traducida, resuena hoy con viveza tras seis siglos: *Ars since scientia nihil est*, la práctica no es nada sin la teoría.

Madrid, enero de 2011

Santiago Huerta

AGRADECIMIENTOS: Agradezco al profesor José Luis de Miguel la lectura atenta del manuscrito de la traducción revisada, y sus críticas y sugerencias en cuanto a la terminología estructural. La cita del principio se ha tomado de M. Planck *Wissenschaftliche Selbstbiographie*. (Leipzig 1984). Traducción de José Manuel Lozano-Gotor (*Autobiografía científica*, Madrid, Nivola 200).

Teoría básica de estructuras

Jacques Heyman

traducción de:
Alejandra Albuerne

revisión y prólogo de:
Santiago Huerta

INSTITUTO JUAN DE HERRERA
Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Madrid

Edición y traducción íntegra de la edición original: Jacques Heyman,
Basic structural theory. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

© Instituto Juan de Herrera, 2011

Todos los derechos reservados

ISBN: 978-84-9728-345-8 (rústica)

ISBN: 978-84-9728-346-5 (tapa dura)

Depósito Legal: M. 5.999-2011

Cubierta: Edificio Baker (departamento de ingeniería de la Universidad de Cambridge) en construcción durante 1963. La estructura se calculó por métodos plásticos.

Fotocomposición e impresión:

EFCA, S. A. Parque Industrial "Las Monjas"

28850 Torrejón de Ardoz (Madrid)