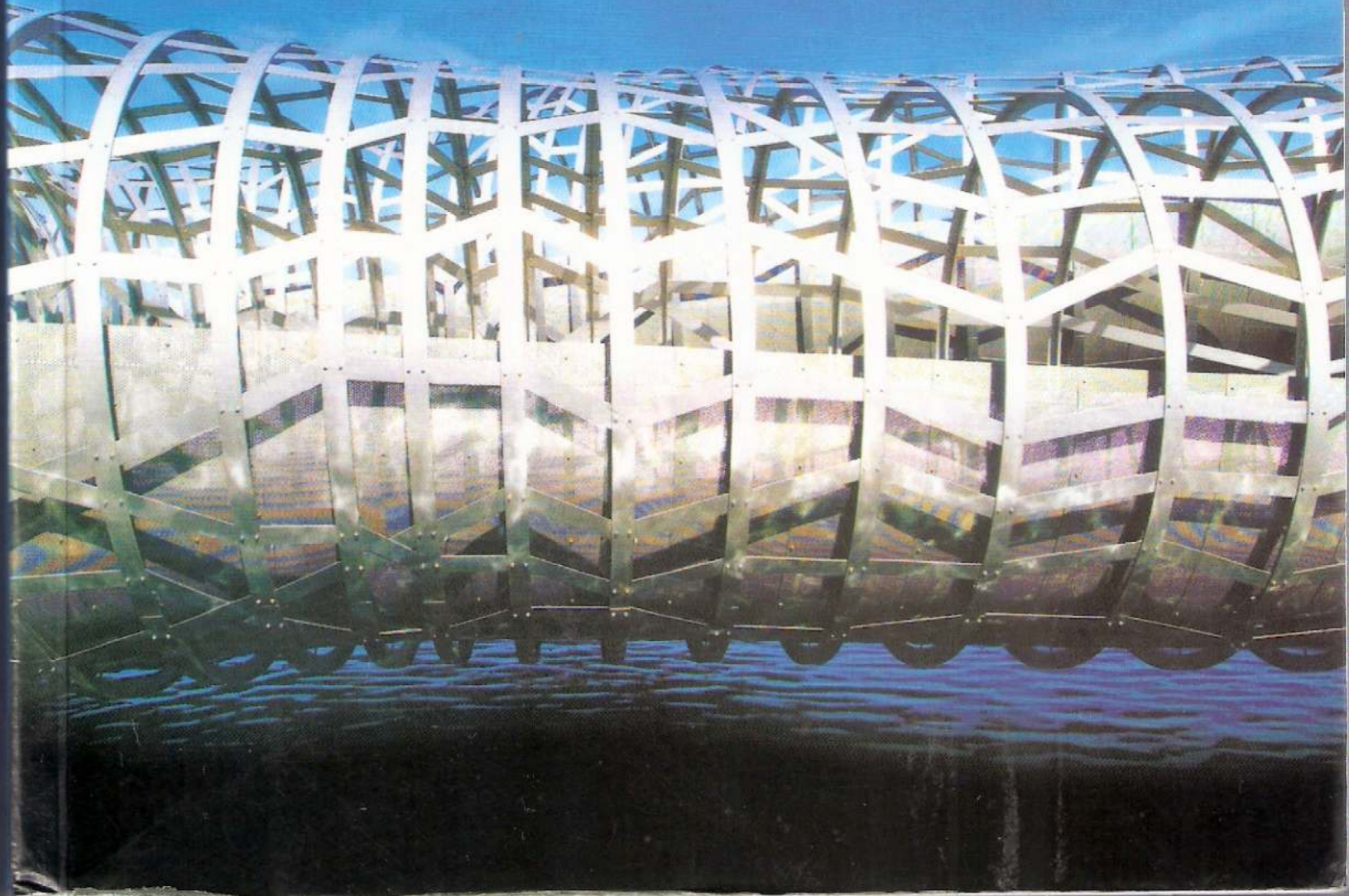


J. E. Gordon

Estructuras

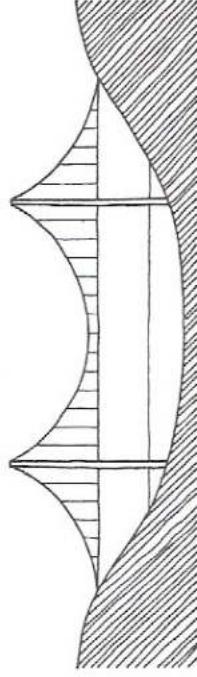
o por qué las cosas no se caen



J. E. Gordon

Estructuras

o por qué las cosas no se caen



CALAMAR EDICIONES

TÍTULO ORIGINAL:

Structures or Why things don't fall down

Copyright © J. E. Gordon, 1978
First published in the United Kingdom
by Penguin Books Ltd, 1978

COPYRIGHT DE ESTA EDICIÓN:

© 2004, Calamar Ediciones
C/ Gran Vía, 69. Oficina 412. 28013 Madrid
Tel: 91 548 77 47. Fax: 91 548 77 48.
E-mail: info@calamarediciones.com

Traducción: Valentín Quintas
Diseño gráfico: Calamar

Primera edición: noviembre 2004
Segunda edición: diciembre 2004

ISBN: 84-96235-06-8
Depósito legal: M-45470-2004

Quedan rigurosamente prohibidas,
sin la autorización escrita de los titulares
del «Copyright», bajo las sanciones
establecidas en las leyes, la reproducción
total o parcial de esta obra por cualquier
medio o procedimiento, comprendidas la
reprografía y el tratamiento informático,
y la distribución de ejemplares de ella
mediante alquiler o préstamos públicos.

Impreso en España - Printed in Spain

Índice

<i>Introducción</i>	9
CAPÍTULO 1	
Las estructuras en nuestras vidas o <i>cómo comunicarse con los ingenieros</i>	11
PRIMERA PARTE	
El difícil nacimiento de la ciencia de la elasticidad	25
CAPÍTULO 2	
Por qué las estructuras soportan cargas o <i>la elasticidad de los sólidos</i>	27
CAPÍTULO 3	
La invención de la tensión y la deformación unitaria o <i>el barón de Cauchy y el descubrimiento del módulo de Young</i>	39
CAPÍTULO 4	
Cómo proyectar con seguridad o <i>¿se puede realmente tener confianza en el cálculo de estructuras?</i>	55
CAPÍTULO 5	
La energía de deformación y la moderna mecánica de fracturas con <i>una digresión sobre arcos, catapultas y canguros</i>	67
SEGUNDA PARTE	
Estructuras a tracción	105
CAPÍTULO 6	
Estructuras a tracción y depósitos de presión con <i>algunas puntualizaciones sobre calderas, murciélagos y juncos chinos</i>	107

CAPÍTULO 7	
Los uniones, los atados y la gente también sobre fluencia y ruedas de carro	125
CAPÍTULO OCTAVO	
Los materiales blandos y las estructuras vivas o cómo proyectar un gusano	143
TERCERA PARTE	
Estructuras comprimidas y flectadas	165
CAPÍTULO 9	
Muros, arcos y presas o torres como rascacielos y la estabilidad de la fábrica	167
CAPÍTULO 10	
Algo sobre puentes o Saint Bénézet y Saint Isambard	195
CAPÍTULO 11	
Las ventajas de ser una viga con algunas observaciones sobre cubiertas, celosías y mástiles	209
CAPÍTULO 12	
Los misterios del cortante y la torsión o el Polaris y el monstruo cortado al bias	245
CAPÍTULO 13	
Las distintas formas de romper a compresión o sandwiches, cráneos y el Dr. Euler	273
CUARTA PARTE	
Y la consecuencia fue... ..	297
CAPÍTULO 14	
La filosofía del proyecto o la forma, el peso y el coste	299

CAPÍTULO 15	
Un capítulo sobre accidentes: un estudio sobre el pecado, el error y la fatiga de los materiales	321
CAPÍTULO 16	
Eficacia y estética o el mundo en el que nos ha tocado vivir	355
APÉNDICES	379
APÉNDICE 1	
Manuales y fórmulas	381
APÉNDICE 2	
Teoría de la flexión	385
APÉNDICE 3	
Torsión	391
APÉNDICE 4	
La eficacia de columnas y pantallas bajo cargas de compresión	393
<i>Algunas sugerencias para ampliar los temas estudiados</i>	395

Introducción

Soy muy consciente de que el escribir un libro elemental sobre estructuras es un acto de extrema temeridad. En realidad, solamente cuando se despoja a esta disciplina de su aparato matemático, se puede uno dar cuenta de lo difícil que es aislar y describir esos conceptos estructurales que a menudo se describen como "elementales"; aunque supongo que queremos decir "básicos" o "fundamentales". Algunas de las omisiones y sobresimplificaciones que se encontrarán aquí son intencionadas, pero no se dude de que otras se deben a mi propia obtusa ignorancia, y falta de comprensión del tema.

Aunque este volumen es más o menos una secuela de *La Nueva Ciencia de Materiales Fuertes* se puede leer como una obra completamente independiente. Por esta razón, una cierta cantidad de repeticiones ha sido inevitable en los primeros capítulos.

Debo agradecimiento a mucha gente por informaciones sobre el tema, sugerencias, estímulos y algunas acaloradas discusiones. Entre los vivos, a mis colegas de la Universidad de Reading generosos en su ayuda, especialmente el profesor W. D. Biggs (profesor de Tecnología de Edificación), el Dr. Richard Chaplin, el Dr. Giorgio Jeronimidis, el Dr. Julian Vincent y el Dr. Henry Blyth; el profesor Anthony Flew, profesor de Filosofía, me hizo útiles sugerencias sobre el último capítulo. También debo agradecimiento a John Bartlett, neurocirujano del Hospital Brook. El profesor T. P. Hugues de la Universidad de West Indies me ha sido de gran ayuda en el tema de los



cohetes y de muchas otras cosas relacionadas con ellos. Mi secretaria, Jean Collins, fue una gran ayuda en los momentos de crisis. La señora Nethercort de *Vogue* me ayudó amablemente en el tema de la alta costura. Gerald Leach y muchos otros del consejo editorial de Penguin Books, han derrochado su acostumbrada paciencia y capacidad de ayuda.

Entre los muertos, debo mucho al Dr. Mark Pryor —del Trinity College, Cambridge— especialmente por las discusiones sobre Biomecánica que mantuvimos a lo largo de treinta años. Finalmente, por razones que seguramente más adelante serán obvias, debo una humilde ofrenda a Herodoto, ciudadano que fue de Halicarnaso.

CAPÍTULO 1

Las estructuras en nuestras vidas o cómo comunicarse con los ingenieros

Cuando los hombres viajaron al Este, llegaron a una llanura en la tierra de Sennar y allí se asentaron. Se dijeron unos a otros: "Venid, hagamos ladrillos, hagámostos fuertes secándolos al sol", usaron ladrillos en lugar de piedras y betún en lugar de mortero. "Venid", dijeron, "construyémos una ciudad y una torre que llegue al cielo, démosnos un nombre, o seremos dispersados por la Tierra." Entonces el Señor bajó a ver la ciudad que los mortales habían construido, y dijo: "He aquí un pueblo con una sola lengua, y han empezado a hacer esto; en adelante nada de lo que se le ocurra estará fuera de su alcance. Bajemos y confundamos sus lenguas, de forma que no se entiendan entre sí". Así el Señor los dispersó por toda la Tierra, y dejaron sin construir la ciudad. Eso es la razón por la que se le llama Babel (es decir, Babilonia), porque el Señor produjo allí una gran confusión en el lenguaje de toda la tierra.

GÉNESIS 11, 2-9 (NUEVA BIBLIA INGLESA)

Una estructura puede definirse como "cualquier disposición de materiales realizada para soportar cargas", y el estudio de las estructuras ha sido tradicionalmente una de las ramas de la ciencia. Si una estructura se hunde, alguien puede morir, y por lo tanto los ingenieros hacen bien en investigar cuidadosamente el comportamiento de las estructuras. Pero, desgraciadamente, cuando quieren explicar a otros esta materia, algo va muy mal, porque hablan un extraño lenguaje, y muchos de nosotros llegamos a la convicción de que el estudio de las estructuras y de la forma en que soportan las cargas es incomprensible, irrelevante y realmente aburrido.

Sin embargo, las estructuras están tan implicadas en nuestras vidas y de tantas formas distintas que realmente no podemos permitirnos el ignorarlas: después de todo, todas las plantas, todos los animales y casi todo lo que fabrica el hombre debe soportar mayores o menores fuerzas estáticas sin romperse, y por lo tanto prácticamente cualquier cosa es una estructura de una clase u otra. Cuando tratamos de estructuras debemos preguntarnos no sólo por qué los edificios y los puentes se hunden y por qué la maquinaria o los aviones se rompen algunas veces, sino

también por qué los gusanos han adquirido la forma que tienen y por qué un murciélago puede volar dentro de un rosal sin rasgarse las alas. ¿Cómo funcionan los tendones? ¿Por qué padecemos de lumbago? ¿Cómo podían pesar tan poco los pterodáctilos? ¿Por qué los pájaros tienen plumas? ¿Cómo funcionan las arterias? ¿Qué podemos hacer por los niños inválidos? ¿Por qué los veleros tienen sus aparejos con la forma que los tienen? ¿Por qué el arco de Ulises era tan difícil de tensar? ¿Por qué los antiguos les quitaban las ruedas a sus carruajes por la noche? ¿Cómo funciona una catapulta griega? ¿Cómo se dobla un junco bajo el viento, o por qué el Partenón es tan hermoso? ¿Pueden aprender algo los ingenieros de las estructuras naturales? ¿Qué pueden enseñar los ingenieros a los médicos, biólogos, artistas y arqueólogos?

A medida que se ha ido progresando, la lucha por entender cómo funcionan las estructuras y por qué las cosas se rompen, se ha vuelto mucho más difícil y ha durado mucho más de lo que se podía esperar. Hasta hace muy poco tiempo, no hemos sido capaces de llenar suficientemente las lagunas en nuestros conocimientos, de forma que podamos responder a estas preguntas de una manera al menos útil e inteligente. Naturalmente, a medida que las piezas del rompecabezas empiezan a unirse, el panorama de nuestros conocimientos empieza a aclararse: la materia en conjunto está volviéndose cada vez menos el objeto del estudio de pocos especialistas, y más en algo que una persona normal pueda encontrar interesante y relevante para un gran número de aplicaciones prácticas.

Este libro trata de los modernos puntos de vista sobre los elementos estructurales en la naturaleza, la tecnología y la vida diaria. Estudiaremos las múltiples maneras en las que la necesidad de ser resistentes y de soportar una gran variedad de cargas impuestas ha influido en el desarrollo de muchos tipos de animales y artilugios —incluyendo al hombre—.

La estructura viviente

Las estructuras biológicas nacieron mucho antes que las artificiales. Antes de la aparición de la vida en el mundo, no existía ninguna estructura creada para un propósito, solamente las montañas y los

montones de arena o roca. Aun la forma más sencilla de vida es una reacción química delicadamente equilibrada y perpetuándose a sí misma que necesita estar separada y protegida de las formas sin vida. Cuando la naturaleza inventó la vida —y con ella el individualismo— fue necesario proporcionarle alguna clase de contenedor para guardarla. Una película o una membrana debe tener al menos un mínimo de resistencia mecánica, para guardar la materia viva y a la vez darle alguna protección contra las fuerzas exteriores.

Si, como parece posible, algunas de las primeras formas de vida consistían en pequeñas partículas flotando en el agua, bastaría para protegerlas una barrera muy débil y sencilla, quizá nada más que la tensión superficial que existe en los límites de dos líquidos distintos. Poco a poco, a medida que se multiplicaban los seres vivos, la vida se volvió más competitiva, y los animales débiles, globulares e inmóviles quedaron en desventaja. Las pieles se volvieron más elásticas y resistentes y se desarrollaron múltiples sistemas de locomoción. Aparecieron animales multicelulares mayores que podían morder y nadar deprisa. La supervivencia se convirtió en el problema de cazar o ser cazado, comer o ser comido. Aristóteles lo llamó *allelrophagia* —comerse mutuamente— Darwin lo llamó selección natural. En cualquier caso, el progreso en la evolución dependía del desarrollo de materiales biológicos más resistentes y de estructuras vivientes más ingeniosas.

Los primeros animales que aparecieron, y los más primitivos, estaban hechos con materiales blandos, no sólo porque así era más fácil doblarse y extenderse de muchas formas, sino porque los tejidos blandos son normalmente dúctiles (como veremos), mientras que los rígidos, como los huevos, son frágiles. En cualquier caso, el uso de materiales rígidos produjo toda clase de problemas en el crecimiento y la reproducción. Como saben las mujeres, el asunto de dar a luz implica una tecnología de altos alargamientos unitarios y grandes desplazamientos. De la misma manera, el desarrollo de un feto vertebrado desde la concepción, como en todas las estructuras naturales en general, es en ciertos aspectos el paso de lo blando a lo duro, y el proceso de endurecimiento continúa después de que el bebé haya nacido.

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

Uno tiene la impresión de que la Naturaleza ha aceptado el uso de materiales rígidos bastante a su pesar, pero a medida que los animales se volvieron mayores y salieron fuera del agua a tierra firme, desarrollaron y utilizaron en su mayor parte esqueletos rígidos, dientes y algunas veces cuernos y armaduras. De todas maneras, los animales no se transformaron en artilugios predominantemente rígidos como la mayoría de la maquinaria moderna. El esqueleto continuó siendo, en general, solamente una pequeña parte del conjunto y, como veremos, las partes blandas fueron a menudo utilizadas de forma muy inteligente para limitar las cargas que soportaba el esqueleto y así protegerlo de las consecuencias de su fragilidad.

Mientras que los cuerpos de casi todos los animales están realizados predominantemente con materiales flexibles, no siempre se puede decir lo mismo de las plantas. Las plantas pequeñas y más primitivas son normalmente blandas, pero una planta no puede cazar sus alimentos, ni tampoco puede huir de sus enemigos. Puede, sin embargo, protegerse hasta cierto punto haciéndose alta y, con ello, conseguir tomar algo más del sol o de la lluvia que le corresponde. Los árboles, en particular, parecen extraordinariamente ingeniosos en su forma de intentar recoger la difusa y adaptable energía solar y a la vez mantenerse en pie resistiendo las embestidas del viento, y todo de la manera más económica. Los árboles más altos alcanzan una altura de unos 110 metros, y son con diferencia las estructuras vivas más grandes y más duraderas. Para que una planta alcance la décima parte de esa altura, sin embargo, su estructura principal debe ser a la vez ligera y rígida; más tarde veremos que esto implica un buen número de lecciones importantes que deberían aprender los ingenieros.

Puede parecer obvio que temas como la resistencia, flexibilidad y ductilidad son importantes en medicina, zoología y botánica, sin embargo durante mucho tiempo los médicos y biólogos se han resistido a estas ideas con considerable éxito y con todo el poder de sus emociones. Por supuesto, esto es en parte un problema de temperamento y en parte un problema de lenguaje, y posiblemente algo tiene que ver con ello el desagrado y el miedo que producen los conceptos matemáticos del ingeniero. Con demasiada frecuencia los biólogos simplemente son incapaces de realizar un estudio suficientemente serio sobre los aspectos estructurales

LAS ESTRUCTURAS EN NUESTRAS VIDAS

de sus problemas. Sin embargo, no puede existir una razón para suponer que, mientras que la naturaleza usa métodos de infinita sutileza en sus mecanismos químicos y de control, utilice toscamente la tecnología de las estructuras.

La estructura tecnológica

Hay muchas maravillas, pero no hay maravilla./ Más ilustre que el hombre/ El hombre que hace que lo transporten los vientos del invierno/ A través del espesor de las alas que se levantan a su alrededor/ Cruzando verdes extensiones de mar./ El hombre que abate la Incansable, la Inmortal/ Tierra, la más vieja de las Diosas, año tras año./ Al ir y venir con las juntas de sus arados./ De las descuidadas bandadas de pájaros./ De las bestias del desierto, las tribus del mar/ Recoge con redes reticuladas./ Al más sutil.

SÓFOCLES, ANTIGONA (440 A.C.)

Benjamin Franklin (1706-90) solía definir al hombre como "el animal que fabrica herramientas". En realidad muchos otros animales usan herramientas bastante primitivas, y por supuesto bastantes veces hacen cosas mejores que las que construyen muchos hombres sin civilizar. Es bastante difícil precisar el momento exacto del desarrollo humano en el que su tecnología sobrepasó la de los animales. Posiblemente más tarde de lo que pensamos, especialmente si los hombres primitivos eran arborícolas.

Sea como sea, el salto en tiempo y maestría técnica entre los palos y piedras de los primeros humanos —que no eran mucho mejores que las herramientas que utilizaban los animales avanzados— y los delicados y bellos artefactos de la última Edad de Piedra, es inmenso. Las culturas pre-metálicas han sobrevivido en lugares remotos hasta prácticamente ayer y pueden verse y admirarse en los museos muchos de sus instrumentos. Realizar estructuras resistentes sin la ayuda de los metales requiere una intuición sobre la distribución y dirección de las tensiones que no siempre poseen los ingenieros modernos; el uso de los metales, que son tan adecuadamente dúctiles y uniformes, se ha llevado consigo mucha de la intuición y también algo de la capacidad de razonar de los ingenieros. A

partir de la invención de la fibra de vidrio y de otros materiales compuestos artificiales, estamos volviendo al tipo de estructuras no metálicas y fibrosas que fueron desarrolladas por los polinesios y los esquimales. Debido a esto nos hemos vuelto más conscientes de nuestra incapacidad para visualizar sistemas de tensiones y, sólo posiblemente, más respetuosos con las tecnologías primitivas.

Debemos tener en cuenta que la introducción de la tecnología de los metales en el mundo civilizado —probablemente entre el 2000 y el 1000 a.C.— no produjo una modificación grande o inmediata en casi ninguna de las estructuras artificiales, porque los materiales eran escasos, caros y muy difíciles de dar forma. El uso de los metales para herramientas de corte, armas y, hasta cierto punto, para armaduras produjo su efecto, pero la mayoría de los artefactos que se utilizaron para soportar cargas continuaron estando hechos de fábrica y de madera, cuero, cuerdas y materiales textiles.

Manipulando las viejas construcciones mixtas, el constructor de molinos y de carruajes, y el de barcos y arboladuras, demostró una gran maestría, aunque por supuesto tenía lagunas y cometió el tipo de equivocaciones que se pueden esperar de alguien que no tiene una instrucción analítica. En general, la aparición del vapor y la maquinaria produjo la desaparición de muchas artesanías, y también limitó el conjunto de materiales utilizados en la "tecnología avanzada" a unas pocas, estandarizadas y rígidas sustancias como el acero y el hormigón.

La presión interna que sufrían muchas de las primeras máquinas no era mucho mayor que nuestra presión arterial pero, dado que los materiales como el cuero son incapaces de soportar el vapor caliente, el ingeniero no pudo concebir una máquina de vapor hecha con vejigas, membranas y tubos flexibles. Así fue empujado a desarrollar con metales, por medios mecánicos, movimientos que un animal hubiera realizado de forma más sencilla y utilizando menos peso¹. Tuvo que conseguir estos efectos a base de ruedas, cables, remaches y pistones deslizándose por cilindros.

Aunque estos artilugios un tanto estrafalarios le fueron originalmente impuestos por las limitaciones de los materiales, el ingeniero ha terminado por encontrar este tipo de tecnología como el único apropiado y respetable. Una vez ha tomado el camino de las ruedas dentadas y las correas, al ingeniero le ha cambiado su forma de ser. Además, esta actitud respecto a los materiales y la tecnología ha

¹ Compárense pistones y mangueras.

impregnado a la gente. No hace mucho, la bonita mujer de un científico americano me dijo: "Así que usted me dice que la gente hacía aviones de madera ¡de leña! No le creo, se está usted burlando de mí".

Hasta qué punto esta forma de ver las cosas está objetivamente justificada y qué parte está basada en prejuicios o una pasión morbosa por estar al día, es una de las cuestiones sobre las que vamos a reflexionar en este libro.

Debemos, sin embargo, intentar tener un punto de vista equilibrado. La tipología tradicional de estructuras construidas con ladrillos, piedras y hormigón, o con acero y aluminio, ha sido utilizada con gran éxito, y ciertamente debemos tomarlas en serio, por sí mismas y por lo que nos puede enseñar en un contexto más amplio. Debemos tener en cuenta, sin embargo, que los neumáticos, por ejemplo, han transformado la faz del transporte por tierra y son probablemente un invento más importante que el motor de combustión interna. Sin embargo, no damos a los estudiantes de ingeniería clases de neumáticos, y además ha existido una clara tendencia en las escuelas de ingeniería de esconder todo el tema de estructuras flexibles bajo la alfombra. Cuando examinamos este tema *sin prejuicios*, podemos tal vez darnos cuenta, por sólidas razones cuantitativas, de que debemos volver a estructurar parte de la ingeniería tradicional sobre modelos que en parte son de inspiración biológica.

Sea cual sea el punto de vista que tomemos al estudiar estas materias, no debemos dejar a un lado el hecho de que cualquier rama de la tecnología debe tener relación, en mayor o menor medida, con los problemas de resistencia y deformación; y debemos considerarnos afortunados si nuestras equivocaciones en estos temas son solamente molestas o caras y no matan o hieren a alguien. Los que se ocupan de asuntos de electricidad deben tener en cuenta que una gran proporción de los fallos de los instrumentos eléctricos o electrónicos son de origen mecánico.

Las estructuras pueden, y lo hacen, romperse, y esto puede ser importante y muchas veces dramático; pero, en la tecnología convencional, la rigidez y la deformabilidad de las estructuras antes del colapso pueden llegar a ser más importantes en la práctica. Una casa, un forjado o una mesa que se bambolea o flecha puede no ser aceptable, y podemos darnos cuenta de que la utili-

dad de, por ejemplo, un instrumento óptico como un microscopio o una cámara, depende no sólo de la calidad de sus lentes, sino también de la exactitud o la rigidez con la que están colocados. Defectos de este tipo son bastante corrientes.

Las estructuras y la estética

Si pudiese encontrar un lugar para estar solo con los cielos, / Hablaría con mi corazón abierto: el cielo es mi necesidad. / Cualquier árbol de la espesura se deshoja como el roble, como el álamo, / balanceándose como el sauce, centelleando. / Fluyendo como el carmesí del bosque de rables en Octubre / Deslizándose como el viento del sudoeste soplando sobre los sauces. / Centelleando como una ráfaga sobre un álamo súbitamente encendida / Todos parecen saber que es sólo para los cielos.

GEORGE MEREDITH, *AMOR EN EL VALLE*.

En nuestros días, lo queramos o no, estamos ligados a una forma u otra de tecnología avanzada y tenemos que hacerla funcionar de forma segura y eficaz: esto implica, entre otras cosas, la aplicación inteligente de la teoría de estructuras. Sin embargo, el hombre no vive sólo de la seguridad y la eficacia, y debemos encarar el hecho de que, visualmente, el mundo se está transformando en un lugar cada vez más deprimente. No, quizá, tanto por la existencia de lo que podríamos llamar "fealdad activa", como por el predominio de lo aburrido y lo mediocre. Demasiadas pocas veces el corazón se alegra o uno se encuentra algo mejor o más feliz contemplando las obras del hombre moderno.

Sin embargo, casi todos los artefactos del siglo XVIII, aún los más humildes y triviales, nos parecen a muchos de nosotros por lo menos agradables y algunas veces incomparablemente bellos. En ese sentido la gente —toda la gente— del siglo XVIII vivió vidas más ricas que muchos de nosotros. Esto se refleja en los precios que pagamos en nuestros días por casas de estilo o antigüedades. Una sociedad que fuera más creativa y tuviese más confianza en sí misma no sentiría una nostalgia tan fuerte por las viviendas o los muebles de nuestros tatarabuelos. Aunque un libro como éste no es el lugar adecuado para desarrollar elaboradas y quizá polémicas teorías sobre el arte aplicado, el pro-

blema no puede ser ignorado totalmente. Como hemos dicho, casi cualquier artefacto es una estructura de un tipo u otro, y aunque casi ningún artefacto está pensado de forma primordial para producir un efecto estético o una emoción, es altamente importante darse cuenta de que no existe algo así como una obra estéticamente neutra. Esto es verdad tanto si el medio de expresión es la palabra, como si es la escritura, la pintura o el diseño tecnológico. Lo entendamos o no, cualquier cosa que diseñemos o fabriquemos tiene algún impacto subjetivo, para bien o para mal, por encima o por debajo de su abierto propósito racional.

Creo que estamos topándonos con otro problema de comunicación. La mayoría de los ingenieros no tienen ninguna formación estética, y la tendencia en las escuelas de ingenieros es despreciar estas materias como frívolas. En cualquier caso, no hay tiempo suficiente para ello en sus cargados planes de estudios. Los arquitectos modernos me han hecho saber claramente que ellos no pueden perder el tiempo que utilizan para sus importantes objetivos sociológicos en tener en cuenta materias tan insignificantes como la resistencia de sus edificios ni, desde luego, pueden dedicar mucho tiempo a la estética, tema en el que tampoco sus clientes probablemente están muy interesados. Tampoco a los diseñadores de mobiliario, asombrosamente, les enseñan durante sus estudios cómo calcular las deformaciones de las estanterías cuando se las carga con los libros, y no es por ello muy sorprendente que muchos de ellos no tengan idea de cómo relacionar la apariencia con la estructura de sus productos.

La teoría de la elasticidad, o por qué las cosas se caen

Aquellos diezcietha, sobre los que cayó la torre de Siloam, / y los mató, ¿pensáis que eran más pecadores que los demás hombres que vivían en Jerusalén?

LUCAS, 13.4.

A mucha gente —en especial a los ingleses— no le gusta la teoría, y normalmente no se ocupan mucho de los teóricos. Esto parece especialmente aplicable a los temas de resistencia y elasticidad. Una cantidad realmente asombrosa de personas que no se aventurarían en los campos de, digamos,

la química o la medicina, se consideran competentes para producir una estructura de la que puede depender la vida de una persona. Si se les apura, pueden admitir que un gran puente o un aeroplano está algo por encima de sus posibilidades, pero ¿seguro que las estructuras normales y cotidianas presentan sólo problemas triviales?

Esto no quiere decir que la construcción de una casa normal sea el objeto de años de estudio: sin embargo, esta disciplina está ciertamente plagada de trampas para el inexperto, y muchas cosas no son tan sencillas como aparentan. Con demasiada frecuencia los ingenieros son llamados, profesionalmente, para vérselas con realizaciones estructurales de hombres "prácticos" al mismo tiempo que los abogados y los enterradores.

Sin embargo, durante largos siglos los hombres prácticos se las arreglaron a su modo —por lo menos en ciertos campos de la construcción—. Si se observa una catedral uno puede preguntarse qué es lo que le impresiona más profundamente: la maestría o la fe de los que la construyeron. Estos edificios no sólo eran muy grandes y muy altos; algunos parecen trascender la tosca y pesada naturaleza de sus materiales de construcción y elevarla a la categoría de arte y de poesía.

Ante esto parece obvio que los canteros medievales sabían mucho sobre cómo construir iglesias y catedrales, y por supuesto muchas veces lo hicieron de forma excelente y altamente satisfactoria. Sin embargo, si se tuviera la oportunidad de preguntar a un maestro cantero cómo lo hizo realmente y por qué se sostiene, la respuesta sería algo así como: "El edificio se sostiene gracias a las manos de Dios. Siempre que, cuando lo construyamos, sigamos fielmente las reglas y secretos tradicionales de nuestro oficio".

Naturalmente vemos y admiramos los edificios que han sobrevivido: a pesar de sus "secretos" y de su maestría y experiencia, no tenían de ninguna manera siempre éxito. Una buena proporción de sus más ambiciosos trabajos se hundieron poco después de ser construidos, y a veces durante su construcción. Sin embargo, estas catástrofes se consideraban enviadas por el Cielo, para castigar a los que no eran justos, o llevar a los pecadores al arrepentimiento, más que cómo una consecuencia de una mera ignorancia técnica —de ahí la necesidad de señalar lo de la torre de Siloam—¹.

¹ Existe una interesante disertación sobre los puntos de vista paganos sobre este tema en *Cinco Etapas de la Religión Griega* de Gilbert Murray (D. N. P., 1930). Todo el problema de la relación del animismo con las estructuras continúa siendo un buen tema de estudio.

Quizá porque estaban demasiado obsesionados con el significado moral de la buena artesanía, los antiguos constructores, carpinteros y armadores no parece que meditaran, en el sentido científico, sobre por qué una estructura soporta las cargas. El profesor Jacques Heyman ha demostrado concluyentemente que los canteros de las catedrales en ningún caso pensaban y proyectaban de la forma moderna. Aunque muchas de las realizaciones de los artesanos medievales son impresionantes, las bases intelectuales de sus "reglas" y "secretos" no eran muy diferentes de las de un libro de recetas de cocina. Lo que esta gente hacía era construir algo muy parecido a lo que se había hecho inmediatamente antes.

Cómo veremos en el capítulo 9, la fábrica es un caso más bien excepcional, y existe una serie de razones por las que algunas veces es seguro y práctico pasar de las iglesias pequeñas a las grandes catedrales, apoyándose sencillamente en la experiencia y en reglas de proporción tradicionales. En otros tipos de estructuras esta forma de hacer las cosas no funciona, y es bastante insegura. Ésta es la razón por la que, a pesar de que los edificios se volvieron cada vez más grandes, se mantuviera durante mucho tiempo virtualmente constante el tamaño máximo de los barcos. Mientras no existió un método científico de predecir la seguridad de las estructuras técnicas, cualquier intento de sacar adelante invenciones nuevas o radicalmente distintas, terminaba inevitablemente en el desastre.

Así, generación tras generación, los hombres volvieron las espaldas a un estudio racional de los problemas de resistencia. Sin embargo, si se adquiere la costumbre de ignorar problemas que, en el fondo del corazón, se sabe con seguridad que son importantes, las consecuencias psicológicas pueden ser desafortunadas. Ocurrió lo que podría esperarse. Todo el tema se convirtió en un campo abonado para la superstición y la crueldad. Cuando alguna noble matrona bautiza un barco con una botella de champán, o un grueso alcalde coloca la primera piedra en unos cimientos, se están desarrollando ceremonias que son los últimos vestigios de ciertos ritos de sacrificio repugnantes.

A lo largo de la Edad Media la Iglesia consiguió suprimir la mayoría de los sacrificios, pero no hizo nada para fomentar cualquier estudio científico. Alejarse totalmente de tales actitudes —o

aceptar que Dios puede actuar a través de las leyes de la ciencia— requiere un completo cambio de mentalidad, un esfuerzo intelectual que ahora difícilmente podemos comprender. Se necesitaba de una combinación bastante excepcional de imaginación y disciplina intelectual en un tiempo en el que el vocabulario científico prácticamente no existía.

Cuando las cosas empezaron a cambiar, los viejos artesanos se negaron a aceptar este reto, y es interesante señalar que el verdadero comienzo de los estudios serios sobre estructuras se debe a las persecuciones y al oscurantismo de la Inquisición.

En 1633, Galileo (1564-1642) fue procesado por la Iglesia debido a sus revolucionarios descubrimientos de astronomía, que se consideraron como una traición a las mismas bases de la autoridad civil y religiosa. Se le excluyó radicalmente del estudio de la astronomía, y después de su famosa retractación¹, pudo considerarse afortunado al permitirse retirarse a su villa de Arcetri, cerca de Florencia. Viviendo allí, virtualmente en arresto domiciliario, se ocupó del estudio de la resistencia de materiales pensando, supongo, que era una actividad más segura y menos subversiva.

Con estos antecedentes, la contribución de Galileo a nuestros conocimientos sobre resistencia de materiales fue sólo moderadamente apreciable, aunque debemos tener en cuenta que tenía casi setenta años cuando empezó estos trabajos, que había sufrido muchas penalidades y que continuaba siendo más o menos un prisionero. Sin embargo, le fue permitido mantener correspondencia con intelectuales de muchos lugares de Europa, y su gran reputación daba prestigio y publicidad a cualquier materia por la que se interesara.

Entre las muchas cartas que se han conservado, hay varias sobre estructuras, y su correspondencia con Mersenne, que trabajó en Francia, fue particularmente fructífera. Marin Mersenne (1588-1648) era jesuita, pero presumiblemente nadie podría poder objeciones a sus investigaciones sobre la resistencia de cables metálicos. Edmé Mariotte (1620-84), un hombre mucho más joven, también era clérigo, llegó a prior de Saint Martin-sous-Beaune, cerca de Dijon, en la comarca del vino. Se dedicó casi toda su vida al estudio de las leyes de la mecánica terrestre y a la resistencia a flexión y a tracción de las barras. Durante el reinado de Luis XIV contribuyó a fundar la Academia

¹ Cuando se le forzó a negar que la Tierra giraba alrededor del Sol. Giordano Bruno había sido quemado por hereje en 1600.

Francesa de Ciencias, y gozó del favor de la Iglesia y del Estado. Ninguna de estas personas, debe señalarse, eran constructores profesionales de edificios o barcos.

— En los tiempos de Mariotte, toda la disciplina que abarca el comportamiento de materiales y estructuras que soportan cargas empezó a llamarse teoría de la elasticidad —por razones que se aclararán en el próximo capítulo— y utilizaremos este nombre frecuentemente a lo largo de esta obra. Cuando este tema empezó a ser conocido por los matemáticos de hace 150 años, se escribió un número realmente formidable de libros sobre elasticidad, me temo que ilegibles e incomprensibles, y generaciones de estudiantes han tenido que soportar agonías de aburrimiento en clases sobre materiales y estructuras. En mi opinión, se ha sido excesivamente místico e idólatra, muchas veces para no llegar a nada. Es verdad que los más altos vuelos de la elasticidad son matemáticos y muy difíciles, pero sólo en muy pocas ocasiones, probablemente, este tipo de teorías es utilizada por los grandes ingenieros.

Lo que realmente es útil, en la mayoría de los casos puede ser entendido con bastante facilidad por cualquier persona inteligente que quiera concentrarse en la materia.

El hombre de la calle, o del taller, cree que no necesita ningún conocimiento teórico. Los doctores de la ingeniería pueden pretender que sin las altas matemáticas no solo es imposible que alguien haga algo útil, sino que si alguien lo consiguiera, sería vagamente inmoral. A mí me parece que los ordinarios mortales como usted o como yo se las pueden arreglar sorprendentemente bien con un cierto bagaje de conocimientos intermedios y espero que más interesantes.

En cualquier caso, no podemos evadir totalmente el tema de las matemáticas, de las que se dice que fueron originarias de Babilonia —posiblemente en la época del incidente de la Torre de Babel—. Las matemáticas son para el ingeniero y el científico una herramienta, para el matemático profesional, una religión, para una persona cualquiera, un ladrillo. Sin embargo, todos utilizamos las matemáticas en algún momento de nuestra existencia. Cuando jugamos al tenis, o bajamos escaleras, estamos resolviendo folios de ecuaciones diferenciales, deprisa, fácilmente y sin pensar, utilizando el ordenador analógico que se aloja en nuestras mentes. Lo que encontramos difi-

cil de las matemáticas es la presentación formal y simbólica del tema por pedagogos con gusto por el dogma, sadismo y latiguillos incomprensibles.

En la mayor parte de este libro, cuando se necesite un razonamiento "matemático", intentaré utilizar gráficas y diagramas sencillos. Necesitaremos, sin embargo, alguna aritmética y un poco de álgebra muy, muy elemental, que —por muy rudos que seamos con los matemáticos— es, después de todo, una forma de pensar sencilla, potente y conveniente. Aun si ha nacido, o piensa que ha nacido, con alergia al álgebra, no se asuste. Sin embargo, si realmente debe evitarla, sigue siendo posible entender los razonamientos de este libro de forma cualitativa sin que se pierda mucho del argumento.

Otra advertencia: las estructuras están hechas de materiales y hablaremos de estructuras y también de materiales; pero en realidad no existe una línea divisoria clara entre estructuras y materiales. El acero es indudablemente un material y el Puente de Forth, indudablemente una estructura, pero el hormigón armado, la madera y la carne humana —todas ellas con una constitución bastante complicada— pueden considerarse a la vez como materiales o como estructuras. Me temo que cuando utilicemos la palabra "material" en este libro, pueda significar cualquier cosa que queramos que signifique. Que el significado de la palabra no es siempre el mismo para la gente, me fue aclarado por otra señora en otro *cocktail*:

"¿A qué se dedica usted?"

"Soy profesor de materiales."

"¿Qué divertido debe de ser manejar todos esos tejidos de alta costura!"

PRIMERA PARTE:

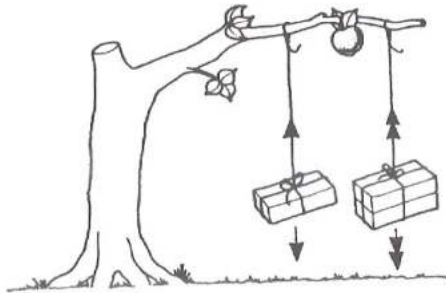
El difícil nacimiento de la ciencia de la elasticidad

En otras palabras, una fuerza no puede ser perdida. Siempre, pase lo que pase, en todos los puntos de una estructura cualquier fuerza debe ser equilibrada y contrarrestada por otra igual y opuesta. Esto es cierto para cualquier tipo de estructura, sea simple y sencilla o grande y complicada. Es cierto no sólo para forjados y catedrales, sino para puentes y aeroplanos y para globos, muebles, leones, tigres, berzas y gusanos de tierra.

Si no se cumple esta condición, es decir, si el conjunto de las fuerzas no están en equilibrio o no se equilibran entre sí, o bien la estructura rompe o bien todo el conjunto despega, como un cohete, y termina en algún punto del espacio exterior. Este último resultado está frecuentemente implícito en las contestaciones a preguntas de exámenes de los estudiantes de ingeniería y arquitectura.

Empecemos de momento por examinar una forma estructural lo más sencilla posible. Supongamos que colgamos un peso, como un simple ladrillo, de algún soporte —podría ser la

Figura 1. El peso del ladrillo, actuando hacia abajo, debe ser soportado por una tracción o fuerza hacia arriba, igual y opuesta actuando en la cuerda.



rama de un árbol — con un trozo de cuerda (figura 1). El peso del ladrillo, como el peso de la manzana de Newton, se debe al efecto del campo gravitacional de la Tierra sobre su masa y actúa continuamente hacia abajo. Si el ladrillo no cae, debe ser mantenido en su posición en medio del aire por una fuerza constante, igual y opuesta actuando hacia arriba a lo largo de la cuerda. Si la cuer-

da es demasiado débil, de forma que no puede producir una fuerza hacia arriba igual al peso del ladrillo, la cuerda se romperá y el ladrillo se caerá al suelo —otra vez la manzana de Newton—.

Sin embargo, si nuestra cuerda es fuerte, de forma que podamos colgar no uno, sino dos ladrillos de ella, deberá producir ahora una fuerza doble, es decir, suficiente para resistir los dos ladrillos. Y así sucesivamente, por supuesto, para cualquier otra variación de las cargas. Aún más, la carga no tiene por qué ser un peso como el ladrillo; las fuerzas producidas por cualquier otra causa, como la presión del viento, deben ser resistidas por la misma clase de reacciones.

En el caso del ladrillo que cuelga de un árbol, la carga es soportada por una tracción de la cuerda, en otras palabras, tirando. En muchas estructuras, como los edificios, la carga se soporta a compresión, esto es, empujando. Los principios generales son los mismos en ambos casos. Así, si un sistema estructural trabaja bien —es decir, si la carga se soporta de forma satisfactoria de manera que no ocurra nada fuera de lo normal— quiere decir que de alguna manera se las ha ingeniado para empujar o tirar con fuerzas que son exactamente iguales y opuestas a las fuerzas que actúan sobre ella. Esto es, tiene que resistir todos los empujes y tirones que le lleguen, empujando y tirando contra ellos en la proporción adecuada. Todo esto está muy bien y en general es muy fácil darse cuenta de cómo una carga empuja o tira de una estructura. Lo difícil es darse cuenta de por qué la estructura debe tirar o empujar contra la carga. Como suele ocurrir, los niños pequeños han tenido a veces alguna intuición del problema:

“Deja de tirar de la cola del gato, cariño.”

“Yo no estoy tirando, mamá, es Pussy el que está tirando.”

En el caso de la cola del gato la reacción está producida por la actividad biológica viva de los músculos del gato tirando contra los músculos de la niña, pero por supuesto, muchas veces no es posible realizar este tipo de reacción activa muscular, ni tampoco necesario.

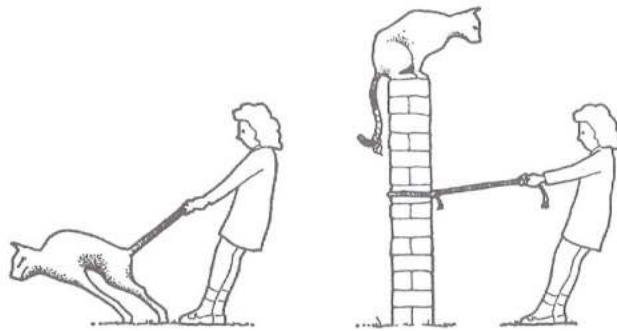
Si la cola del gato se hubiese fijado, no al gato, sino a algo inerte, como un muro, sería el muro el que estaría “tirando”; el hecho de que la resistencia al tirón de la niña esté generada activamente por el gato o pasivamente por el muro no tendría ningún efecto sobre la niña o sobre la cola.

¿Cómo puede entonces algo pasivo como un muro o una cuerda —o, puestos en ello, un hueso, una correa de acero o una catedral— producir las necesarias fuerzas pasivas?

Figura 2. "Deja de tirar de la cola del gato, cariño."

"Yo no estoy tirando, mamá, es Pussy el que está tirando."

Figura 3. No hay ninguna diferencia en el hecho de que Pussy tire o no tire.



La Ley de Hooke o la elasticidad de los sólidos

La potencia de cualquier cable está en la misma proporción que la tensión¹ que sufre. Esto es, si una potencia alarga o flexa en una longitud, dos lo flexarán en dos, tres lo flexarán en tres, y así sucesivamente. Ésta es la regla o ley de la Naturaleza, bajo la que debe actuar cualquier forma de movimiento de restitución o alargamiento.

ROBERT HOOKE

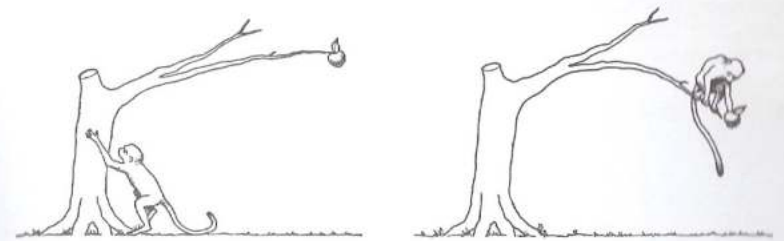
Hacia 1676 Hooke se dio cuenta claramente de que no solo los sólidos resisten el peso y otras cargas mecánicas empujando contra ellas, sino que también:

1. Cualquier sólido cambia su forma —alargándose o contrayéndose— cuando se le aplica una fuerza mecánica.
2. El cambio de forma se produce cuando el sólido contrarresta la carga.

¹ En la época de Hooke tensión significaba lo que podríamos llamar alargamiento, igual que ocurre con *tensio* en latín.

Así, cuando colgamos el ladrillo del extremo de la cuerda, la cuerda se vuelve más larga, y este alargamiento se produce porque la cuerda está tirando contra el ladrillo, y por tanto impidiéndole caer. Todos los materiales y estructuras se deforman, aunque con valores muy variables, cuando se les somete a una carga (figuras 4 y 5).

Es importante darse cuenta de que es perfectamente normal que todas y cada una de las estructuras se deformen como respuesta a la aplicación de una carga. A no ser que la deformación sea demasiado grande para los fines útiles de la estructura, no es de ninguna manera un "fallo",



sino más bien una característica esencial que indica que la estructura trabaja. La teoría de la elasticidad trata de las relaciones entre fuerzas y desplazamientos en materiales y estructuras.

Aunque cualquier tipo de sólido cambia su forma en alguna medida cuando se le aplica el peso u otra fuerza mecánica, las deformaciones que aparecen en la práctica varían enormemente. En objetos como una planta o un trozo de goma las deformaciones son a menudo muy grandes y se pueden observar fácilmente, pero cuando aplicamos cargas normales en sustancias duras como el hierro, el acero o el hueso, las deformaciones son realmente muy pequeñas. Aunque estos movimientos son a menudo demasiado pequeños para percibirlos a simple vista, existen siempre y son perfectamente reales, aunque necesitemos aparatos especiales para medirlas. Cuando se sube alguien a la torre de una catedral, la torre se hace más corta, como resultado del

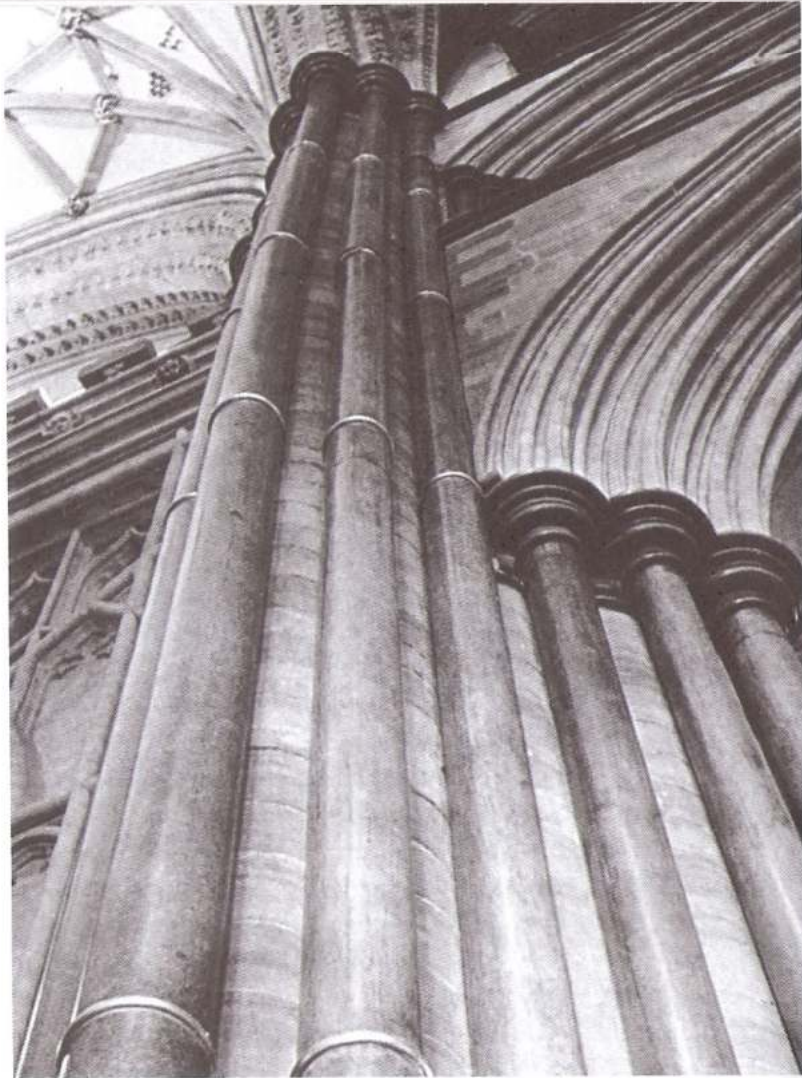


Lámina 1. Cada una de las columnas que soportan la torre de 120 metros de altura de la Catedral de Salisbury está muy visiblemente flectada. La fábrica es mucho más deformable de lo que generalmente se supone.

POR QUÉ LAS ESTRUCTURAS SOPORTAN CARGAS

peso que se le ha añadido, en una proporción extremadamente pequeña, pero en cualquier caso se ha acortado. De hecho, la fábrica es realmente más flexible de lo que podría pensarse, como puede verse examinando las cuatro columnas principales que soportan la torre de la Catedral de Salisbury: están visiblemente flectadas (lámina 1).

Hooke dio además un importante paso más en estos razonamientos que, aun ahora, algunas personas encuentran difícil seguir. Se dio cuenta de que, cuando una estructura se deforma bajo una carga de la forma en que hemos hablado, el material de la que está hecha también se alarga o se contrae, internamente, a lo largo de todas sus partes y en la misma proporción, hasta una escala muy pequeña —como sabemos ahora—, hasta la escala molecular. Así, cuando deformamos un palo o un cable de acero —doblándolo, por ejemplo— los átomos y las moléculas que componen el material tienen que alejarse entre sí, o apretarse entre sí, cuando el conjunto del material se alarga o se comprime.

Como sabemos ahora, los enlaces químicos que unen los átomos entre sí, y así mantienen al sólido unido, son muy fuertes y rígidos. Así, el conjunto del material sólo puede alargarse o comprimirse si se alargan o comprimen muchos millones de fuertes enlaces químicos que se resisten vigorosamente a ser deformados, aun en una cantidad muy pequeña. Por tanto, son estos enlaces los que producen las grandes fuerzas de reacción necesarias.

Aunque Hooke nunca supo nada sobre los detalles de los enlaces químicos y no demasiado sobre átomos y moléculas, entendió perfectamente bien que algo parecido estaba ocurriendo dentro de la fina estructura del material, y se puso a definir cuál debía ser la verdadera naturaleza de la relación macroscópica entre fuerzas y desplazamientos en los sólidos.

Más aún, con la exactitud de las mediciones que hizo Hooke —que no era muy buena— la mayoría de estos sólidos recobraron su forma original cuando la carga que estaba produciendo la deformación fue retirada. De hecho, pudo continuar cargando y descargando estructuras de este tipo indefinidamente sin producir ningún cambio de forma permanente. A este comportamiento se le llama “elástico” y es muy habitual. La palabra se asocia frecuentemente a las gomas

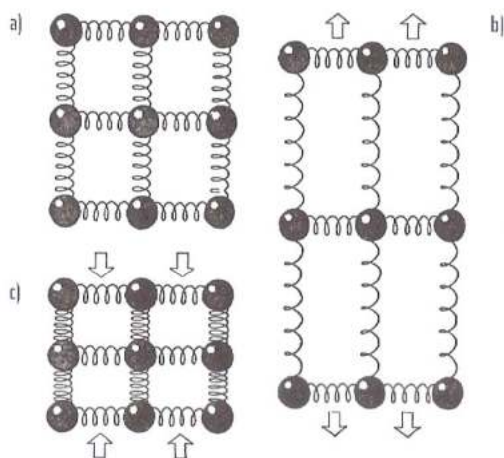
y la ropa interior, pero es igualmente aplicable al acero, la piedra, el ladrillo y las sustancias biológicas como la madera, los huesos o los tendones. Los ingenieros lo usan generalmente en ese sentido más amplio. A propósito, el zumbido de los mosquitos, por ejemplo, se debe al comportamiento altamente elástico de los tendones que mueven sus alas.

Figura 6. Modelo simplificado de la distorsión de los enlaces interatómicos bajo una deformación unitaria mecánica.

a) Posición relajada, neutral o sin deformación unitaria.

b) El material deformado a tracción, los átomos se alejan, el material aumenta su longitud.

c) El material deformado a compresión, los átomos más juntos, el material disminuye su longitud.



Sin embargo, cierto número de sólidos o semi-sólidos, como la masilla o la plastilina, no recobran completamente su forma y se mantienen deformadas, cuando se retira la carga. Esta clase de comportamiento se describe como "plástico". La palabra no está de ninguna manera confinada a los materiales con los que se suelen hacer los cubos de basura, sino que se aplica también a la arcilla y a los metales blandos. Estas sustancias plásticas se amoldan a las cosas como la mantequilla, el puré o el merengue. Más aún, muchos de los materiales que Hooke creía que

eran "elásticos", se vuelven imperfectamente elásticos cuando son ensayados con métodos modernos más exactos.

Sin embargo, como generalización amplia, las observaciones de Hooke siguen siendo ciertas y todavía dan las bases de la moderna teoría de la elasticidad. En nuestros días, y volviendo hacia atrás, la idea de que la mayoría de los materiales y de las estructuras, no sólo la maquinaria, los puentes y los edificios sino también los árboles, los animales, las rocas, las montañas y el mismo orondo mundo, se comportan en gran medida como cables, puede parecer muy sencilla —quizá estúpidamente obvia— pero, leyendo su diario, está claro que llegar a esto le costó a Hooke un gran esfuerzo mental y muchas dudas. Es quizá uno de los grandes logros intelectuales de la historia.

Después de haber contrastado sus ideas en una serie de discusiones privadas con Sir Christopher Wren, Hooke publicó sus experimentos en 1679 en un trabajo titulado *De Potentia restitutiva o sobre cables*. Este trabajo contenía la famosa sentencia *ut tensio sic vis* ("como el alargamiento, así es la fuerza"). Este principio se ha conocido durante trescientos años como "Ley de Hooke".

De cómo la elasticidad quedó sumergida

Pero hacerse enemigo de Newton fue fatal. Porque Newton, tuviese razón o no, era implacable.

MARGARET ESPINASSE, ROBERT HOOKE (HEINEMAN, 1956)

Aunque en los tiempos modernos la ley de Hooke ha hecho un gran servicio a los ingenieros, en la forma en la que la enunció Hooke originalmente su eficacia práctica era bastante limitada. Hooke estaba hablando de los desplazamientos del conjunto de la estructura —un cable, un puente o un árbol— cuando se le aplica una carga.

Si lo pensamos por un momento, es obvio que el desplazamiento de una estructura depende a la vez de su tamaño y de su forma geométrica y también de la clase de material que la compone.

La rigidez intrínseca de los materiales varía muchísimo. Las cosas hechas de goma o de carne pueden ser fácilmente distorsionadas por fuerzas pequeñas, que pueden incluso ser producidas por nuestros dedos. Otras sustancias como la madera, el hueso, la piedra y la mayoría de los metales son considerablemente más rígidas, y aunque no hay material absolutamente "rígido", existen un pequeño número de sólidos como el zafiro y el diamante que son realmente muy rígidos.

Podemos fabricar objetos del mismo tamaño y de la misma forma, como las arandelas que usan los fontaneros, de acero o de goma. Está claro que la de acero es mucho más rígida (de hecho unas 30.000 veces más rígida) que la de goma. De nuevo, si hacemos un muelle y una gran viga del mismo material —como el acero— el muelle será naturalmente mucho más flexible que la viga. Debemos ser capaces de separar y cuantificar estos efectos, porque en ingeniería, igual que en biología, estamos manejando siempre cambios de variables y necesitamos de un método seguro para poder llevarlo a cabo.

Es bastante sorprendente, después de un comienzo tan prometedor, que no apareciese ninguna forma científica de soslayar esta dificultad hasta 120 años después de la muerte de Hooke. De hecho, a lo largo de todo el siglo XVIII se hicieron progresos en la teoría de la elasticidad notablemente pequeños. Las razones de esta falta de progreso son sin duda complejas, mientras que los científicos del siglo XVII tenían una visión de la ciencia imbricada con el progreso de la tecnología —una visión sobre los objetivos de la ciencia que era entonces prácticamente una novedad en la historia de la humanidad— muchos de los científicos del siglo XVIII se tenían a sí mismos como filósofos que trabajaban en un plano muy superior al de los sórdidos problemas de la manufactura y el comercio. Esto fue, por supuesto, una vuelta a la forma griega de considerar la ciencia. La ley de Hooke era una amplia y filosófica explicación a algunos fenómenos habituales, que era bastante adecuada para un caballero que no estuviese muy interesado en detalles técnicos.

Aun teniendo en cuenta todo esto, no debemos dejar de lado la influencia personal del mismo Newton (1642-1727) y los efectos que tuvo la enconada enemistad que existía entre Newton y Hooke. Intelectualmente, Hooke era probablemente casi tan capaz como Newton, y era

ciertamente aun más quisquilloso y vano; pero en otros aspectos, estos dos hombres tenían temperamentos y ambiciones totalmente distintas. Básicamente, aunque los dos tuvieron orígenes bastante modestos, Newton era un esnob mientras que Hooke, aunque era amigo personal de Carlos II de Inglaterra, no lo era.

Al contrario que Newton, Hooke era una persona con los pies en la tierra que se ocupaba de multitud de temas prácticos sobre elasticidad, cables, relojes, edificios, microscopios, y la anatomía de la pulga común. De entre las invenciones de Hooke todavía está en uso la junta universal, en las transmisiones de los coches, y los diafragmas, en la mayoría de las cámaras. La lámpara de carruajes de Hooke, en la que, aunque la candela se consumiese, se mantenía su llama en el centro del sistema óptico mediante un cabo elástico, continuó siendo usada hasta los años veinte. Estas lámparas pueden verse todavía en los portales de muchas casas. Por otra parte, la vida privada de Hooke hacía parecer virtuosa la de su amigo Samuel Pepys: no sólo mostraba un vivo interés por todas las criadas jóvenes, sino que vivió durante muchos años *perfecte intime omne*¹ con su atractiva sobrina.

Puede que la visión del Universo de Newton haya sido más amplia, pero sus aportaciones a la Ciencia eran mucho menos prácticas. De hecho, como las de muchos docentes menores, se podrían muchas veces describir como anti-prácticas. Es cierto que Newton fue el Director de la Casa de la Moneda y lo hizo bien, pero parece que aceptó el puesto por razones que no tenían nada que ver con el deseo de aplicar la Ciencia y mucho que ver con el hecho de que era un "cargo del Gobierno" que, en aquellos tiempos, daba una posición social mucho más alta que ser miembro del Trinity College, por no hablar de un salario más alto.

Una gran parte del tiempo de Newton, sin embargo, fue dedicado a un curioso mundo propio en el que especulaba sobre algunos problemas teológicos tan intrigantes como el Número de la Bestia. No creo que tuviese mucho tiempo o inclinación para mirar con indulgencia los pecados de la carne.

Resumiendo, Newton tenía la forma de ser necesaria para detestar a Hooke como hombre y para abominar de todo lo que Hooke hiciera, incluyendo la teoría de la elasticidad. Además,

Newton tuvo la buena suerte de vivir veinticinco años más que Hooke, y dedicó una gran parte de su tiempo a denigrar la memoria de Hooke y la importancia de la Ciencia aplicada. Como Newton tenía, entonces, una posición casi de Dios en el mundo científico, y como todo esto tendía a reforzar las tendencias sociales e intelectuales de la época, los temas como las estructuras sufrieron una brusca bajada de popularidad, aun muchos años después de la muerte de Newton.

La situación se mantuvo, pues, así durante todo el siglo XVIII. Aunque Hooke había descrito el comportamiento de las estructuras de forma amplia y general, su trabajo ni se continuó ni se aplicó, y el tema se mantuvo de forma que siguió siendo prácticamente imposible realizar cálculos precisos y detallados.

Mientras se mantuvo este estado de cosas, la utilidad de la teoría de la elasticidad para las estructuras fue limitada. Los ingenieros franceses del siglo XVIII eran conscientes de este hecho, pero lamentándolo intentaron construir estructuras (que se caían con bastante frecuencia) haciendo uso de lo que podían conocer de dicha teoría. Los ingenieros ingleses, que también eran conscientes de esto, eran habitualmente indiferentes a la "teoría" y construyeron las estructuras de la Revolución Industrial con métodos "prácticos" basados en la experiencia y el sentido común. Estas estructuras se caían probablemente al poco tiempo, pero no tanto ni tan a menudo.

CAPÍTULO 3

La invención de la tensión y la deformación o el barón de Cauchy y el desciframiento del módulo de Young

¿Qué sería de la vida sin aritmética, sino un mundo de horrores?

REVERENDO SYDNEY SMITH, CARTA A UNA JOVEN, 22 DE JULIO DE 1835

Aparte de Newton y de los prejuicios del siglo XVIII, la razón principal por la que la teoría de la elasticidad quedó estancada por tanto tiempo es que los pocos científicos que la estudiaron intentaron manejar fuerzas y deformaciones considerando el conjunto de la estructura —como había hecho Hooke— más que las fuerzas y los desplazamientos que podía demostrarse que existían en cualquier punto dentro del material. A lo largo del siglo XVIII y también en el XIX, muchas personas inteligentes, como Leonhard Euler (1707-83) y Thomas Young (1773-1829), realizaron lo que a un ingeniero moderno parecen increíbles acrobacias intelectuales al intentar resolver lo que a nosotros nos parecen problemas elementales.

Si aplicamos los conceptos elásticos a un punto cualquiera dentro del material, obtenemos precisamente lo que conocemos como tensión y deformación unitaria. Estos conceptos fueron descritos en su forma más general por Augustin Cauchy (1789-1857) en un trabajo dirigido a la Academia Francesa de Ciencias en 1822. Este trabajo es quizá el acontecimiento más importante de la historia de la elasticidad desde Hooke. A partir de entonces, esta ciencia empezó a prometer ser una herramienta práctica para los ingenieros más que un alegre terreno de caza para algunos filósofos algo excéntricos. Del retrato pintado en su época, Cauchy parece un joven algo engreído, pero era sin duda un científico que manejaba las matemáticas aplicadas con gran habilidad.

Cuando, casualmente, los ingenieros ingleses del siglo XIX se molestaron en leer lo que Cauchy había dicho sobre el tema, se encontraron con que no sólo los conceptos básicos de tensión y de deformación unitaria eran muy fáciles de entender, sino que, una vez entendidos, simplificaban mucho todo el estudio de las estructuras. En nuestros días estas ideas las puede comprender cualquiera¹, y es difícil encontrar la actitud confusa y a veces resentida que toman algunos legos en el tema cuando se menciona "tensiones y deformaciones unitarias". Una vez tuve una becaria con un bonito título recién estrenado de zoología, a la que sobrepasó de tal manera el concepto de tensión y deformación unitaria, que huyó de la universidad y se escondió. Todavía no entiendo por qué.

Tensión, que no debe ser confundida con deformación unitaria

Tal y como ocurrieron las cosas, el mismo Galileo estuvo a punto de descubrir el concepto de tensión. En sus *Dos Ciencias Nuevas*, el libro que escribió en su vejez en Arcetri, enuncia muy claramente que, siendo todo lo demás igual, una barra que trabaja a tracción tiene una resistencia que es proporcional al área de su sección. Así, si una barra de 2 cm² de sección rompe con una fuerza de 1.000 kilogramos, una de 4 centímetros cuadrados necesitará una fuerza de 2.000 kg para romperse, y así sucesivamente. El que se hayan necesitado cerca de doscientos años para dividir la carga de rotura por el área de la sección rota, y obtener lo que ahora podríamos llamar "tensión de rotura" (en este caso 500 kilogramos por centímetro cuadrado) que puede ser aplicada a todas las barras semejantes, hechas del mismo material, es algo que sobrepasa nuestra comprensión.

Cauchy se dio cuenta de que este concepto de tensión puede usarse, no solamente para predecir cuándo va a romper un material, sino también para describir el estado en que se encuentra cualquier punto dentro del sólido de una forma mucho más generalizada. En otras palabras "tensión" en un sólido es como "presión" en un líquido o un gas. Es una medida de con cuánta intensidad los átomos y las moléculas que forman el material están siendo apretados o siendo alejados entre sí, debido a las fuerzas exteriores.

¹ Excepto, aparentemente, el *Oxford Dictionary*. La palabra puede usarse, por supuesto, en la conversación normal para describir un estado mental como si significase lo mismo. En Física el significado de la palabra es claro y definido.

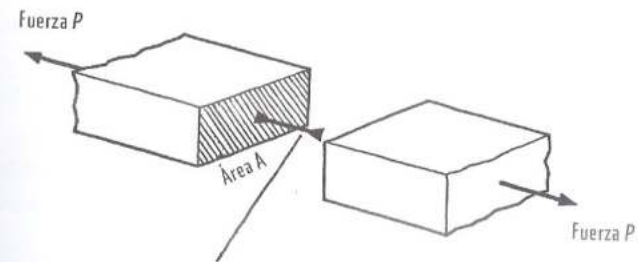
O lo que es lo mismo, decir "la tensión en ese punto de esta pieza de acero es de 500 kilogramos por centímetro cuadrado" no es más incomprendible o misterioso que decir "la presión del aire de los neumáticos de mi coche es de 2 kilogramos por centímetro cuadrado".

Sin embargo, aunque los conceptos de presión y de tensión son muy estrechamente comparables, debemos tener en la cabeza que la presión actúa en tres direcciones dentro de un fluido mientras que la tensión dentro de un sólido es un tema de una dirección, o de una dimensión o, en cualquier caso, así lo hemos considerado hasta ahora.

Numéricamente, las tensiones en un punto dado de un material es simplemente la fuerza, carga o esfuerzo que actúa en esa dirección y en ese punto, dividida por el área contra la que actúa la fuerza². Si llamamos a la tensión en un cierto punto S , entonces

$$\text{Tensión} = S = \frac{\text{carga}}{\text{área}} = \frac{P}{A}$$

Donde P = carga, fuerza o esfuerzo y A es el área contra la que actúa P .



$$\text{Tensión aquí} = S = \frac{\text{carga (fuerza)}}{\text{área de la sección}} = \frac{P}{A}$$

² ¿Cómo puede tener "área" un "punto"? Estudiemos la analogía: la velocidad: expresamos la velocidad como la distancia recorrida en una cierta cantidad de tiempo, p.e. metros por hora, aun cuando estamos hablando solamente de la velocidad en cualquier momento, típicamente breve.

Figura 1. Tensión en una barra a tracción (tensión de compresión exactamente análoga)

Volviendo a nuestro ladrillo, que dejamos en el último capítulo colgando de una cuerda. Si el ladrillo pesa 5 kilogramos y la cuerda tiene un área de 2 milímetros cuadrados, el ladrillo tira de la cuerda con una fuerza de 5 kilogramos y la tensión de la cuerda será:

$$S = \frac{\text{carga}}{\text{área}} = \frac{P}{A} = \frac{5 \text{ kg-fuerza}}{2 \text{ mm cuadrado}} = \frac{2,5 \text{ kg-fuerza}}{\text{mm}^2}$$

o, si lo preferimos, 250 kilogramos fuerza por centímetro cuadrado o kg/cm^2 .

Unidades de tensión

Todo esto pone en pie la irritante cuestión de las unidades de tensión. La tensión puede ser expresada con cualquier unidad de fuerza dividida por cualquier unidad de área —y así ocurre frecuentemente—. Para reducir la confusión en lo posible, nos limitaremos en este libro a las siguientes unidades: MEGANEWTONS POR METRO CUADRADO: MN/m^2 . Ésta es la unidad en el S. I. Como todo el mundo sabe, el S. I. (Sistema Internacional) hace del newton la unidad de fuerza.

1 newton = 0,102 kilogramos-fuerza = 0,225 libras-fuerza (más o menos el peso de una manzana).

1 meganewton = un millón de newtons, que es casi exactamente 100 toneladas.

LIBRAS (FUERZA) POR PULGADA CUADRADA (p. s. i.)

Ésta es la unidad tradicional de los países de lengua inglesa, y se usa todavía ampliamente por los ingenieros, especialmente en América. Es de uso común en muchas tablas y libros de consulta.

KILOGRAMOS (FUERZA) POR CENTÍMETRO CUADRADO:
 kg/cm^2 . Es la unidad de uso común en toda Europa.

PARA TRANSFORMAR

$$1 \text{ MN/m}^2 = 10,2 \text{ kg/cm}^2 = 146 \text{ p. s. i.}$$

$$1 \text{ p. s. i.} = 0,00685 \text{ MN/m}^2 = 0,07 \text{ kg/cm}^2.$$

$$1 \text{ kg/cm}^2 = 0,098 \text{ MN/m}^2 = 14,2 \text{ p. s. i.}$$

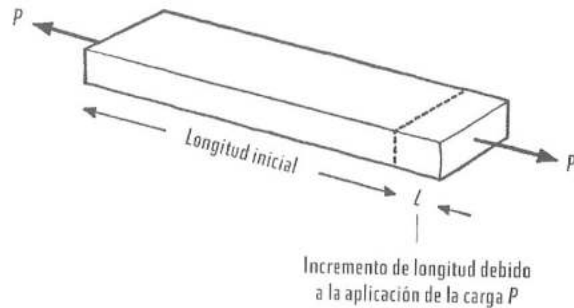
Así, la tensión de nuestro trozo de cuerda, que obtuvimos como 250 kg/cm^2 , es también igual a $24,5 \text{ MN/m}^2$ o 3.600 p. s. i. Como el cálculo de tensiones no es muy exacto, no tiene sentido afanarse demasiado con los factores de conversión exactos.

Es necesario repetir que es importante darse cuenta de que la tensión de un material, como la presión de un fluido, es una condición que existe en un punto y que no está especialmente asociada a ningún área de sección en particular, tal como la pulgada cuadrada, el centímetro cuadrado o el metro cuadrado.

Deformación unitaria, que no es lo mismo que tensión

Así como la tensión nos dice con qué intensidad —es decir, con cuánta fuerza— los átomos de cualquier punto de un sólido son apartados entre sí, la deformación unitaria nos dice cuán lejos han sido apartados. Esto es, en qué proporción los enlaces entre átomos han sido alargados.

Figura 2. Deformación unitaria de una barra a tracción (la deformación unitaria a compresión es exactamente análoga).



$$\text{Deformación unitaria} = \frac{\text{incremento de la longitud}}{\text{longitud inicial}} = \frac{P}{A} = e$$

Así, si una barra que tiene una longitud inicial L se alarga una cantidad ΔL debido a la fuerza que actúa sobre ella, la *deformación unitaria*, o cambio de longitud proporcional de la barra, será:

$$\left(e = \frac{\Delta L}{L} \right)$$

Volviendo a nuestra cuerda, si la longitud inicial de la cuerda era, digamos, 2 metros (o 200 cm) y el peso del ladrillo ha producido en ella un alargamiento de 1 cm, la deformación unitaria de la cuerda es:

$$e = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{200} = 0,005 \text{ o } 0,5\%$$

Las deformaciones unitarias de las estructuras son normalmente muy pequeñas, y por tanto los ingenieros las expresan en porcentajes, lo que reduce las oportunidades de confundirse con ceros y comas.

Como la tensión, la deformación unitaria no está asociada a ninguna longitud, sección o forma en particular del material. Es también la condición de un punto. De nuevo, como calculamos la deformación unitaria dividiendo una longitud por otra longitud—es decir, alargamiento por longitud inicial— la deformación unitaria es una proporción, o un número, y no tiene unidades S.I., británicas o cualquiera otra. Todo esto se aplica, por supuesto, tanto a compresión como a tracción.

El módulo de Young o ¿cómo es de rígido un material?

Como hemos dicho, la ley de Hooke en su forma original, aunque edificante, daba como resultado un lío bastante innoble entre la propiedades de los materiales y el comportamiento de las estructuras. Este lío se produjo principalmente por la no existencia de los conceptos de tensión y deformación unitaria, pero debemos tener en cuenta además las dificultades que habrían existido en el pasado si se hubiesen ensayado materiales en laboratorio.

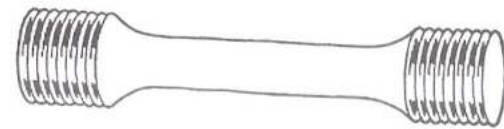
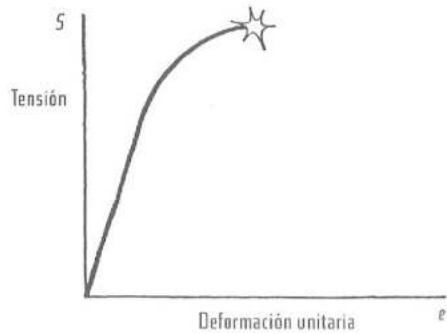


Figura 3. Una probeta

En nuestros días, cuando queremos ensayar un material como cosa aparte de una estructura, generalmente fabricamos lo que se llama una *probeta*. Las formas de estas piezas pueden variar bastante, pero normalmente tienen un tronco recto, sobre el que se pueden hacer las medidas, al que se añaden dos extremos más gruesos de forma que puedan ser fijados a la máquina de ensayos. Una probeta normal suele tener el aspecto de la figura 3.

Las máquinas de ensayo varían mucho de tamaño y forma, pero básicamente todas son instrumentos mecánicos para aplicar una carga medible a tracción o compresión. El valor de la tensión en la pieza cargada se obtiene simplemente en cada situación de carga dividiendo la carga medida en el contador de la máquina por el área de la sección de la pieza. El alargamiento de la pieza cargada —y, por lo tanto, la deformación unitaria del material— se mide normalmente mediante un instrumento llamado extensómetro, que está fijado a dos puntos del tronco de la probeta.



Con este equipo generalmente es bastante fácil medir la tensión y la deformación unitaria que existe en un material cualquiera a medida que aumentemos la carga que se le aplica. La relación entre tensión y deformación unitaria del material viene dada por un gráfico en el que se colocan en ordenadas las tensiones y en abscisas las deformaciones unitarias, y que se conoce como *diagrama tensión-deformación*. Este diagrama puede tener el aspecto de la figura 4, es muy característico de cada material, y su forma normalmente no depende de la de la pieza de ensayo que ha sido usada.

Cuando dibujamos el diagrama tensión-deformación para materiales y para un cierto número de otros sólidos de uso común solemos obtener —al menos para tensiones moderadas— una línea

recta. Cuando esto ocurre solemos decir que el material "obedece a la ley de Hooke" o algunas veces que es un "material hookeano".

También podemos observar, sin embargo, que la pendiente de la parte recta de la gráfica varía mucho para los distintos materiales (figura 5). Está claro que la pendiente del diagrama tensión-deformación representa la resistencia que presenta cada material a alargarse elásticamente bajo una tensión dada. En otras palabras, mide la rigidez o la resistencia a deformarse de un sólido.

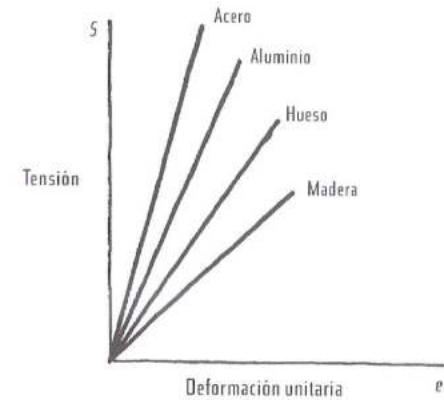


Figura 5. La pendiente de cada diagrama tensión-deformación es característica para cada material. E , el módulo de elasticidad de Young, representa esta pendiente.

Para un material dado que obedece la ley de Hooke, la pendiente del diagrama o la relación entre tensión y deformación unitaria será constante. Así, en cualquier material

$$\frac{\text{Tensión}}{\text{Deformación unitaria}} = \frac{S}{\ell} = \text{Módulo de elasticidad de Young, que llamaremos: } E = \text{constante para ese material}$$

Al módulo de Young se le llama a veces *módulo de Elasticidad* y también E , y se llama coloquialmente "rigidez". La palabra *módulo*, a propósito, es latina y significa *medida pequeña*.

Nuestra cuerda, recordemos, se había alargado un 0,5% o 0,005 debido al peso del ladrillo, que produjo una tensión de 24,5 MN/m². El módulo de Young de la cuerda es por tanto:

$$\frac{\text{Tensión}}{\text{Deformación unitaria}} = \frac{24,5}{0,005} = 4.900 \text{ MN/m}^2 = E$$

Unidades de rigidez o módulo de Young

Como hemos dividido una tensión por una proporción, es decir, un simple número que no tiene dimensiones, el módulo de Young tiene las mismas dimensiones que la tensión y se expresa en unidades de tensión, es decir, en MN/m², p.s.i., o kg/cm². Así, el módulo de Young puede definirse como la tensión necesaria para duplicar la longitud del material (es decir, la tensión que aparece con el 100 por ciento de deformación unitaria) —si el material no se rompe antes—; los valores numéricos que se obtienen son frecuentemente grandes, y algunas personas encuentran difícil visualizarlos.

Valores prácticos del módulo de Young

En la tabla 1 se dan los módulos de Young de varios materiales biológicos y estructurales comunes. Empezando por el de la cutícula de una langosta preñada (que es bajo, pero no excepcionalmente bajo para los materiales biológicos; por cierto, la cutícula de la langosta macho y la de la hembra virgen son mucho más rígidas) los módulos de Young están ordenados de menor a mayor hasta llegar al diamante. Se puede ver que el orden de rigideces oscila entre uno y 6.000.000, lo que es mucho. Intentaremos explicar por qué ocurre esto en el capítulo 8.

Debe notarse que no aparecen en esta tabla un buen número de materiales biológicos blandos. Esto se debe a que el comportamiento elástico no obedece la ley de Hooke, siquiera de forma aproximada, por lo que es realmente imposible definir el módulo de Young en cualquier caso en los términos en los que nos hemos expresado. Volveremos a esta forma de comportamiento elástico más adelante.

Material	Módulo de Young MN/m ²
Cutícula blanda de la langosta preñada ¹	0,2
Goma	7
Membrana de huevo	8
Cartilago humano	24
Tendón humano	600
Plásticos sin armar, polietileno, nailon	1.400
Madera laminada	7.000
Madera (en el sentido de la libra)	14.000
Hueso fresco	21.000
Metal de magnesio	42.000
Vidrio ordinario	70.000
Aleaciones de aluminio	70.000
Bronces	120.000
Hierro y acero	210.000
Óxido de aluminio (zafiro)	420.000

Tabla 1. Módulo de Young aproximado de varios sólidos.

El módulo de Young está considerado en nuestros días como un concepto realmente fundamental; impregna la ciencia de los materiales y de las estructuras y está empezando a invadir la biología. Sin embargo, tuvo que pasar todo el siglo XIX para que pudiese entrar en la cabeza de los ingenieros. Esto se debió en parte a puro conservadurismo y en parte a la tardía llegada de cualquier concepto útil sobre tensión o deformación unitaria.

¹ Cortesía del Dr. Julian Vincent, Departamento de Zoología, Universidad de Reading.

Conocidos estos conceptos, pocas cosas son tan sencillas y obvias como el módulo de Young; sin ellos, todo el tema debería parecer de una dificultad casi imposible. Young, que había de desempeñar un papel importante en el desciframiento de los jeroglíficos egipcios y que era una de las mejores cabezas de su generación, obviamente tuvo que mantener una dura batalla intelectual.

Como trabajó alrededor del año 1800, tuvo que aproximarse al problema por un camino bastante distinto del que acabamos de seguir, y abordó el tema en términos de lo que ahora llamaríamos "módulo específico", esto es, cuánto debe acortarse una columna del mismo material bajo su propio peso. La definición que hizo el mismo Young de su módulo en 1807 es como sigue: *El módulo de elasticidad de una sustancia, es una columna de la misma sustancia, capaz de producir una presión en su base que es al peso que produce cierto grado de compresión, lo que la longitud de la sustancia es a la disminución de su longitud.*⁴

Después de lo cual, los jeroglíficos egipcios deben haber parecido sencillos. De Young fue dicho por uno de sus contemporáneos que: "sus palabras no eran aquéllas de uso familiar, y la disposición de sus ideas raramente coincidía con las del que conversaba con él. Estaba por tanto peor dotado que cualquier otra persona que yo conozca para la comunicación y el lenguaje". En cualquier caso, debemos reconocer que Young tuvo que habérselas con una idea que era casi imposible de expresar sin los conceptos de tensión y de deformación unitaria, que no se empezaron a utilizar hasta quince o veinte años después. La definición moderna del módulo de Young ($E = \text{tensión} / \text{deformación unitaria}$) fue enunciada en 1826 —tres años después de la muerte de Young— por el ingeniero francés Navier (1785-1836). Al mismo tiempo, el inventor de tensión y deformación unitaria, Cauchy, fue nombrado barón por el gobierno francés. Tenía todo el aspecto de habérselo merecido.

Resistencia

Es necesario evitar la confusión entre la resistencia de la estructura y la resistencia del material. La resistencia de una estructura es sencillamente la carga (en libras, newtons o kilogramos fuer-

⁴ "Aunque sus Señorías respetan mucho la ciencia y su trabajo es tenido en gran estima, les parece demasiado elaborado... en resumen, no ha sido entendido." (carta del Almirantazgo a Young)

za) que rompería la estructura. Este concepto se conoce como "carga de rotura" y, naturalmente, sólo puede aplicarse a una estructura individual y específica.

La resistencia de un material es la tensión (en p.s.i., MN/m², o kg/m²) que se necesita para romper una pieza de ese material. Debe ser generalmente la misma para todos los especímenes de un sólido dado. Solemos ocuparnos más a menudo de la resistencia a tracción de los materiales, que se suele llamar *tensión última del material* o *tensión de rotura*. Se suele obtener rompiendo probetas en una máquina de ensayos. Naturalmente, el objeto de muchos de los cálculos de resistencia es predecir la resistencia de la estructura conocida la resistencia de los materiales que la componen.

Material	Resistencia a tracción MN/m ²
NO METALES	
Tejido muscular (fresco pero muerto)	0,1
Pared de vejiga (" " ")	0,2
Pared de estómago (" " ")	0,4
Intestino (" " ")	0,5
Pared arterial (" " ")	1,7
Cartilago (" " ")	3,0
Cemento y hormigón	4,1
Ladrillo ordinario	5,5
Piel fresca	10,3
Cuero curado	41,1
Tendón fresco	82,0
Cuerda de esparto	82,0
Madera (secada) a lo largo de la fibra	103,0
Madera (secada) a través de la fibra	3,5
Hueso fresco	110,0
Vidrio ordinario	35-175

Tabla 2. Tensiones de rotura a tracción de varios sólidos.

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

Cabello humano	192
Tela de araña	240
Buena cerámica	35-350
Seda	350
Fibra de algodón	350
Tejido de tripa	350
Lino	700
Plásticos con fibra de vidrio	350-1.050
Plásticos con fibra de carbono	350-1.050
Hilo de plástico	1.050

METALES

ACEROS

Cable de acero de piano (muy frágil)	3.100
Acero de alta resistencia	1.550
Acero dulce comercial	400

HIERRO COLADO

Tradicional	100-300
-------------	---------

FUNDICION

Tradicional (muy frágil)	70-140
Moderna	140-300

OTROS METALES

Aluminio	70
Con aleaciones	140-600
Cobre	140
Bronces	100-600
Aleaciones de magnesio	200-300
Aleaciones de titanio	700-1.400

Las tensiones de rotura a tracción de una buena cantidad de materiales se dan en la tabla 2. Como ocurría con la rigidez, puede observarse que el rango de resistencias de sólidos biológicos o estructurales es realmente muy amplio. Por ejemplo, el contraste entre la debilidad del músculo y la fortaleza del tendón es llamativo, y esto pasa con todas las formas de sección muy distintas entre sí de los músculos y sus correspondientes tendones. Así, el grueso y algunas veces abultado músculo de nuestras rodillas transmite su tracción al hueso de nuestros tobillos, para que podamos andar y saltar, mediante el tendón de Aquiles, que, aunque es delgado como un lápiz, está perfectamente adaptado a su trabajo. De nuevo podemos darnos cuenta de por qué los ingenieros actuarían equivocadamente haciendo trabajar a tracción el hormigón a no ser que este débil material esté suficientemente reforzado con fuertes armaduras de acero.

Los metales resistentes son bastante más fuertes, en conjunto, que los no metales resistentes. Sin embargo, casi todos los metales son considerablemente más densos que muchos materiales biológicos [el acero tiene un peso específico de 7,8, casi todos los tejidos zoológicos, alrededor de 1,1]. Así, resistencia por peso, los metales no son tan impresionantes cuando se les compara con las plantas.

Debemos ahora resumir lo que hemos dicho en este capítulo:

$$Tensión = \frac{\text{carga}}{\text{área}}$$

define cuánta resistencia oponen los átomos en un punto del sólido a ser separados o unidos entre sí por una carga.

$$Deformación\ unitaria = \frac{\text{desplazamiento bajo la carga}}{\text{longitud inicial}}$$

define cuánta longitud recorren los átomos de un punto de un sólido al ser separados o unidos entre sí.

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

La tensión no es lo mismo que la deformación unitaria.

Tensión de rotura. Por *Tensión de rotura* de un material se quiere expresar normalmente qué tensión se necesita para romperlo.

$$\text{Módulo de Young} = \frac{\text{tensión}}{\text{deformación unitaria}} = E$$

expresa lo rígido o lo blando que es el material.

Resistencia no es lo mismo que rigidez

Citaremos de *La Nueva Ciencia de Materiales Fuertes*: "Una galleta es rígida pero débil, el acero es rígido y fuerte, el nailon es flexible (bajo E) y fuerte, la gelatina de fresa es flexible (bajo E) y débil. Las dos propiedades juntas describen al sólido casi tan bien como dos gráficos".

En caso de que alguien sienta algún resquicio de duda o confusión sobre estos puntos, debe producirle algún consuelo saber que, no hace tanto, me pasé una tarde entera en Cambridge intentando explicar a dos científicos de eminencia realmente elevada y fama mundial, la diferencia básica entre tensión y deformación unitaria y entre resistencia y rigidez, para un proyecto muy costoso del Gobierno del que tenían que informar. Todavía no estoy muy seguro de haber tenido éxito.

CAPÍTULO 4

Cómo proyectar con seguridad o ¿se puede realmente tener confianza en el cálculo de estructuras?

Con música alta y larga/ Construiré esa cúpula en el aire/ ¡Esa cúpula soledad! ¡Esas cuevas de hielo! Todos los que oigan las verán allí/ Y gritarán, ¡Cuidado! ¡Cuidado!

S. T. COLERIDGE, *KUBLA-KHAN*

Naturalmente, todo este asunto de las tensiones y las deformaciones unitarias tiene sólo un fin, hacer posible que podamos construir estructuras más seguras y eficientes o instrumentos de una u otra forma y además hacernos comprender mejor cómo funcionan estas cosas.

Aparentemente, la naturaleza no tiene que afanarse. Los lirios del campo no se afanan ni trabajan, ni tampoco calculan, y sin embargo son probablemente excelentes estructuras, y ciertamente la naturaleza es mucho mejor ingeniero que el hombre. Por un lado tiene más paciencia y, por otro, su forma de llevar a cabo el proceso de diseño es bastante diferente.

En los seres vivos la disposición general de las partes está controlada durante su crecimiento por el mecanismo del ARN-ADN: la famosa "doble hélice" de Wilkins, Crick y Watson¹. Sin embargo, en cada planta o animal individual, una vez la disposición de sus partes está terminada, existe una gran permisividad en los detalles estructurales. No sólo el espesor, sino también la composición de cada componente que soporta la carga, se dimensiona en una considerable medida, por el uso que se le va a dar y por las fuerzas que debe resistir a lo largo de su existencia². Así, las proporciones de las estructuras vivas están diseñadas para optimizar su resistencia. La naturaleza parece un proyectista pragmático más que matemático y, después de todo, los diseños malos pueden siempre ser comidos por los buenos.

¹ Véase, por ejemplo, *La doble hélice*, de James D. Watson. Plaza & Janés 1978.

² El proceso también funciona a la inversa: los huesos de los astronautas pierden calcio y se vuelven más débiles después de un periodo de falta de peso en el espacio.

Desgraciadamente, estos métodos de proyecto no están, todavía, al alcance de los ingenieros humanos, que están abocados a utilizar o bien la intuición o bien el cálculo, o, más a menudo, alguna combinación de los dos. Está claro que es deseable, por seguridad y por economía, ser capaz de predecir cómo van a soportar la carga las distintas partes de una estructura y por tanto determinar lo gruesas o delgadas que deben ser. De nuevo, generalmente queremos saber qué deformaciones va a tener la estructura cuando entre en carga, porque puede ser tan malo que una estructura sea demasiado flexible como que sea demasiado débil.

La teoría francesa frente al pragmatismo británico

Una vez fueron definidos y extendidos los conceptos básicos de resistencia y rigidez, un considerable número de matemáticos se pusieron a buscar técnicas para analizar sistemas elásticos trabajando en dos o tres dimensiones, y empezaron a usar estos métodos para estudiar el comportamiento de distintas formas estructurales sometidas a cargas. El hecho fue que, durante la primera mitad del siglo XIX, la mayoría de estos teóricos de la elasticidad eran franceses. Aunque posiblemente hay algo en la elasticidad que se adapta peculiarmente al temperamento francés³, el estímulo práctico para estas investigaciones parece deberse, directa o indirectamente a Napoleón I y su École Polytechnique, que fue fundada en 1794.

Como gran parte de estos trabajos eran abstractos y matemáticos, no fueron entendidos o aceptados en general por los ingenieros en activo hasta alrededor del año 1850. Esto ocurrió especialmente en Inglaterra y Estados Unidos, donde la gente práctica era considerada muy superior a los "meros teóricos". Y además, un inglés siempre ha vencido sin problemas a tres franceses. Se cuenta del ingeniero escocés Thomas Telford (1757-1834), cuyos magníficos puentes todavía podemos admirar, que:

"Estaba singularmente distante de los estudios matemáticos, y ni siquiera estaba familiarizado con los elementos de geometría; era tan notable esta peculiaridad que cuando en una oca-

³ Prácticamente la única mujer que obtuvo una distinción con la elasticidad, Mademoiselle Sophie Germain (1776-1831), era francesa. Debe hacerse notar que dos de los ingenieros más cultos y mejor dotados para la teoría durante este periodo, sir Marc Brunel (1769-1849) y su hijo, Isambard Kingdom Brunel (1806-1859), eran de origen francés.

sión le recomendamos a un joven amigo como neófito en su oficio, y basamos nuestra recomendación en haber destacado en matemáticas, no dudó en decir que consideraba que estos méritos, más que capacitarle, le descalificaban para esta práctica".

Telford, sin embargo, era realmente un gran hombre y, como Nelson, atemperaba su confianza en sí mismo con una atractiva humildad. Cuando las pesadas cadenas del puente colgante de Menai (lámina 11), fueron tendidas con éxito delante de una gran multitud, se encontró a Telford, lejos de los espectadores que le aclamaban, dando gracias de rodillas⁴.

No todos los ingenieros eran tan profundamente humildes como Telford, y el comportamiento anglosajón de esa época estaba teñido, no sólo de falta de capacitación intelectual, sino también de arrogancia. Debemos sin embargo tener en cuenta que Telford y sus colegas se oponían no a los métodos numéricos como tales —sentían más que nadie la necesidad de conocer cómo actuaban las fuerzas en sus materiales— sino a las bases de los mismos. Creían que los teóricos estaban con demasiada frecuencia tan cegados por la elegancia de sus métodos que descuidaban la exactitud de sus hipótesis de partida, por lo que daban una respuesta exacta a un planteamiento equivocado. En otras palabras, temían que la arrogancia de los matemáticos fuese más peligrosa que la de los practicantes, que, después de todo, habían sido castigados por la experiencia práctica.

Los ingenieros consultores de la Comarca Norte de Shrewd llegaron a la conclusión, a la que deben llegar todos los ingenieros ilustres, de que cuando analizamos un fenómeno matemáticamente, estamos construyendo en realidad un modelo matemático de lo que queremos estudiar. Más adelante, esperamos que esta analogía algebraica o modelo se parezca lo suficiente al objeto real como para poder aumentar nuestro conocimiento del fenómeno estructural y para poder permitirnos predecir su comportamiento.

En disciplinas tan universalmente conocidas como la Física y la Astronomía, la correspondencia entre modelo y realidad es tan perfecta, que muchas personas tienden a creer que la Naturaleza es un Divino Matemático. Por atractiva que resulte esta doctrina a los matemáticos terrestres, existen algunos fenómenos para los que es prudente utilizar las analogías matemáti-

⁴ La tradición inglesa de ignorar absolutamente las matemáticas ha sido mantenida en nuestros días por muchos ilustres ingenieros, notablemente por sir Henry Royce, que creó, después de todo, el "mejor coche del mundo".

cas con mucha precaución. El viaje de un águila a través del aire, el camino de una serpiente a lo largo de una roca; el de un barco en medio del mar y el que sigue el cortejo a una doncella, son todos difíciles de predecir matemáticamente. Uno se pregunta a veces sobre cómo se las arreglan los matemáticos para casarse. Una vez el rey Salomón hubo terminado de construir un templo, tuvo probablemente que comentar que el camino que recorre una carga a lo largo de una estructura tiene bastante en común con el de los barcos y las águilas.

El problema de este tipo de cosas es que muchas de las situaciones reales son tan complicadas que no pueden ser representadas completamente por un modelo matemático. De la misma manera, en las estructuras existen a menudo varias posibles formas de rotura. Naturalmente, la estructura rompe con la forma para la que es más débil, que es demasiado frecuentemente aquella en la que a nadie se le había ocurrido pensar, por muchos números que se hayan hecho.

Un profundo, intuitivo conocimiento de la inherente perversidad de los materiales y las estructuras, es una de las más valiosas cualidades que puede tener un ingeniero. No hay ninguna cualidad puramente intelectual que pueda sustituirla. Puentes proyectados según las mejores teorías "modernas" por politécnicos como Navier, se hundieron algunas veces. Que yo sepa, ninguno de los cientos de puentes y otras obras de ingeniería que construyó Telford a lo largo de su carrera profesional tuvieron jamás ningún percance serio. De esta forma, mientras se desarrollaba la teoría francesa, una gran proporción de los ferrocarriles y puentes de Europa fueron contruidos por ásperos y taciturnos ingenieros ingleses y escoceses, que tenían poco respeto por el cálculo.

Coefficientes de seguridad y coeficientes de ignorancia

En cualquier caso, a partir de 1850 incluso los ingenieros británicos y americanos empezaron a calcular la resistencia de estructuras importantes, como los grandes puentes. Calculaban la ten-

sión de tracción probablemente más alta, con los métodos de la época, y comprobaban que estas tensiones eran menores que la "tensión admisible a tracción" oficial del material. Para estar seguros, hacían que la tensión más alta que aparecía en los cálculos fuese mucho menor —tres, cuatro o incluso siete y ocho veces menor— que la tensión de material obtenida rompiendo una probeta sencilla, lisa y de caras perfectamente paralelas⁵. Esto se denominó "aplicar el coeficiente de seguridad". Cualquier tentativa de ahorrar peso o coste reduciendo el coeficiente de seguridad, podría aparentemente conducir al desastre.

Cuando ocurría un accidente se suponía que podía deberse a materiales defectuosos, y en algunos pocos casos así debió de ser. Los metales, por supuesto, varían de resistencia de un espécimen a otro, y existe siempre el riesgo de que aparezca material malo dentro de la estructura; sin embargo, el acero y el hierro sólo tienen variaciones de resistencia de un pequeño tanto por ciento, muy, muy pocas veces con un factor de tres o cuatro, no digamos siete u ocho. Prácticamente siempre unas discrepancias tan grandes como ésta entre las resistencias teóricas y las prácticas se deben a otras causas; en algún desconocido lugar de la estructura la tensión real debe ser mucho mayor que la tensión calculada, y por tanto en lugar de "coeficiente de seguridad" deberíamos hablar de "coeficiente de ignorancia".

Los ingenieros del siglo XIX hicieron con frecuencia cosas que estaban sometidas a tensiones de tracción, como calderas, vigas y barcos, y construidas con hierro colado o acero dulce, que tenían, con alguna justicia, reputación de ser materiales "seguros". Cuando se aplicaba un "coeficiente de ignorancia" grande a los cálculos de estructuras, éstas podían comportarse de manera bastante satisfactoria, aunque de hecho los accidentes continuaron ocurriendo con bastante frecuencia.

Las desgracias se volvieron crecientemente frecuentes en los barcos. La necesidad de velocidad y ligereza condujo al Almirantazgo y a los armadores a situaciones difíciles, al tender los barcos a partirse en dos en el mar aunque las tensiones más altas que se obtenían en los cálculos parecieran ser muy seguras y moderadas. En 1901, por ejemplo, el destructor de turbina recién

⁵ Se llegaron a utilizar coeficientes de seguridad de hasta dieciocho en el dimensionado de los remaches de las locomotoras hasta 1910, por lo menos.

botado, *H.M.S. Cobra*, uno de los barcos más rápidos del mundo, de repente se partió en dos y se hundió en el Mar del Norte, en un día con tiempo bastante normal. Se perdieron treinta y seis vidas. Ni el subsiguiente juicio militar ni el Comité de investigación del Almirantazgo arrojaron mucha luz sobre las causas técnicas del accidente.

En 1903, a consecuencia de esto, el Almirantazgo hizo, y publicó, una serie de experimentos en un destructor similar, el *H.M.S. Wolf*, en el mar y con mal tiempo. Todo esto demostró que las tensiones deducidas de la medición de las deformaciones en el casco del barco bajo condiciones reales eran bastante más pequeñas que las que habían calculado los proyectistas antes de construir el barco. Dado que las dos series de tensiones estaban muy por debajo de las "resistencias" que se conocían del acero con el que se había construido el barco —el coeficiente de seguridad estaba entre cinco y seis— difícilmente podían calificarse estos experimentos como algo más que moderadamente esclarecedores.

Concentraciones de tensiones o cómo empezar una grieta

El primer paso para comprender este problema no fue dado con costosos experimentos prácticos sobre estructuras a escala natural, sino con análisis teóricos. En 1913 C. E. Inglis, que fue más tarde profesor de ingeniería en Cambridge y era lo opuesto a un "remoto y estéril docente", publicó un artículo en *Transactions of the Institution of Naval Architects*, cuyas consecuencias y aplicaciones abarcaban mucho más que la resistencia de los barcos.

Lo que Inglis dijo sobre los teóricos de la elasticidad se parece realmente mucho a lo que se supone que Lord Salisbury dijo de los políticos, es decir, que es un gran error utilizar mapas de gran escala. Durante cerca de un siglo los teóricos de la elasticidad se habían contentado con trazar la distribución de tensiones en términos amplios, generales o napoleónicos. Inglis demostró que esto sólo da resultados reales cuando el material y la estructura tienen superficies lisas y no tienen cambios bruscos de forma.

Las irregularidades geométricas, como los agujeros, las grietas o las esquinas agudas, que antes se habían ignorado, podían hacer crecer las tensiones locales —con frecuencia en zonas muy pequeñas— de forma realmente dramática. Así, los agujeros o los bordes dentados pueden hacer que la tensión en su vecindad inmediata sean mucho más altas que la tensión de rotura del material, aunque el nivel de las tensiones en sus alrededores sea bajo y, a partir de los cálculos generales, pueda parecer que la estructura es perfectamente segura.

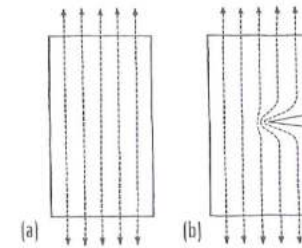


Figura 1. Trayectorias con tensiones en una barra uniformemente cargada a tracción sin (a) y con (b) grieta.

Este hecho era conocido, por supuesto, de forma general, por los que hacen entalladuras en las tabletas de chocolate y por los que perforan los sellos de correos y otras clases de papel. Un sastre hace una incisión en los bordes de un rollo de tela antes de rasgarla. Los ingenieros serios, sin embargo, no mostraron mucho interés en estos fenómenos de fractura, que no eran considerados como pertenecientes a la ingeniería "correcta".

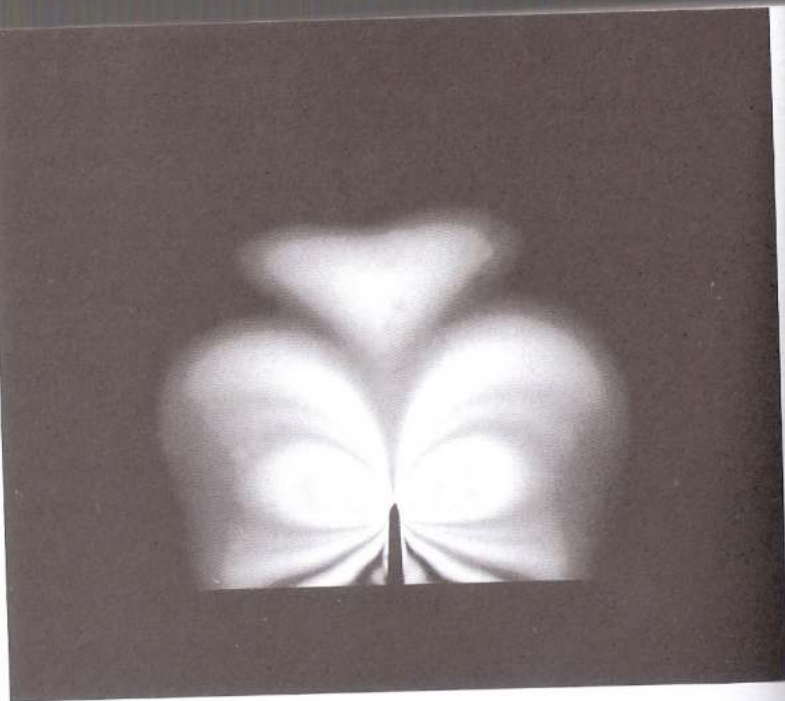
El que casi cualquier agujero o grieta o entrante en un sólido continuo produzca un incremento local de tensiones, puede explicarse fácilmente.

La figura 1 muestra una barra o placa de material uniforme, sometida a una tensión uniforme, S .

Las líneas que cruzan el material, representan las trayectorias de tensiones o "isostáticas", es decir, los típicos caminos por los que las tensiones pasan de una molécula a otra. En este caso, por supuesto, son líneas rectas y paralelas, separadas entre sí uniformemente.

Lámina 2.

Concentración de tensiones en el extremo de una grieta. La tensión tangencial de un material transparente se hace visible con luz polarizada. Las bandas de esta fotografía son, en efecto, las líneas de igual tensión tangencial.



Si ahora interrumpimos una serie de esas trayectorias de tensiones haciendo un corte, una grieta o un agujero en el material, las fuerzas que discurren por esas trayectorias deben ser equilibradas de alguna manera. Lo que realmente pasa es más o menos lo que uno puede imaginarse; las fuerzas deben dar la vuelta al corte, y al hacerlo las trayectorias de tensiones se aprietan entre sí más o menos dependiendo principalmente de la forma del agujero (figura 16). En el caso en que la grieta sea larga, por ejemplo, el amontonamiento alrededor de su extremo, es frecuentemente muy fuerte. Por lo tanto, en la zona inmediata hay más fuerzas por unidad de superficie y las tensiones locales pueden llegar a ser altas (lámina 2).

Inglis fue capaz de calcular el incremento de tensión que aparece en los extremos de un orificio elíptico, en un sólido que obedece la ley de Hooke⁴.

⁴ De hecho, el efecto de un orificio circular en una placa trabajando a tracción había sido calculado por Kirsch en Alemania en 1898, y el de un orificio elíptico por Kolosoff en Rusia en 1910, pero, que yo sepa, se tuvieron pocas noticias de estos resultados en los círculos ingleses de constructores de barcos.

CÓMO PROYECTAR CON SEGURIDAD

Aunque sus cálculos son sólo estrictamente ciertos para agujeros elípticos, se pueden aplicar con exactitud suficiente a aperturas con otras formas. Así, se pueden aplicar no sólo a ojos de buey, puertas y escotillas de barcos, aviones o estructuras similares, sino a grietas, rasgaduras y orificios de toda clase de otros materiales e instrumentos, los empastes de las muelas, por ejemplo.

En términos de álgebra elemental, lo que afirmó Inglis es que si tenemos una pieza de material que está sometida a una tensión S , y le producimos un corte en diente de sierra, una grieta o una entalladura de cualquier tipo, de longitud o profundidad L , y si esa grieta o entalladura tiene un radio en su extremos r , la tensión en su extremo ya no es S , sino que ha crecido hasta convertirse en:

$$S \left(1 + 2 \sqrt{\frac{L}{r}} \right)$$

En una entalladura semicircular o un orificio circular (cuando $r = L$) la tensión sube entonces a $3S$, pero en aperturas como puertas o escotillas, que tienen rincones rectos, r puede ser pequeño y L grande, y las tensiones en las esquinas, por tanto, pueden ser muy altas, tan altas que pueden partir un barco en dos.

En los experimentos del *Wolf*, los extensómetros, o medidores de deformación, fueron fijados en varias posiciones en el casco del barco. Así pudieron medirse los alargamientos o los movimientos elásticos de las chapas de acero. A partir de esto pudieron calcularse fácilmente las deformaciones unitarias —y por tanto las tensiones— del acero. Sin embargo, ninguno de los extensómetros fueron colocados cerca de las esquinas de las escotillas y de otras aperturas. Si se hubiera hecho, se hubieran obtenido ciertamente espantosas lecturas cuando el barco estaba bajo un golpe de mar en la corriente de Portland.

Cuando pasamos de escotillas a grietas, la situación se vuelve aún peor, porque las grietas tienen de longitud con frecuencia centímetros y aun metros, el radio del extremo puede ser de dimensiones moleculares —menos de una millonésima parte de centímetro— y por tanto puede

ser muy grande; así la tensión en el extremo de la grieta puede llegar a ser cien veces o aun mil veces mayor que la del resto de la pieza.

Si tomamos los valores de Inglis literalmente, sería casi imposible realizar una estructura que tuviera alguna seguridad. De hecho, los materiales que realmente se utilizan para trabajar a tracción, metales, madera, cuerda, fibra de vidrio, tejidos y casi todos los materiales biológicos, son "dúctiles", lo que significa, como veremos en el siguiente capítulo, que poseen defensas más o menos complicadas contra los efectos de la concentración de tensiones. Sin embargo, aun con el mejor y el más dúctil de los materiales, esta protección sólo es relativa, y todas las estructuras tensadas son en cierta medida susceptibles a ese efecto.

Los sólidos frágiles, sin embargo, que se usan en las tecnologías, como el vidrio, la piedra o el hormigón, no tienen esas defensas. En otras palabras, se corresponden muy estrechamente con las hipótesis en las que se basaron los cálculos de Inglis. Aún más, no necesitamos colocar artificialmente entalladuras que concentren las tensiones para debilitar estos materiales. La naturaleza las ha producido ya liberalmente, y los sólidos reales están casi siempre llenos de todo tipo de pequeños agujeros, grietas y rasgaduras, aun antes de que empecemos a utilizarlos como estructura.

Por todas estas razones es arriesgado utilizar sólidos frágiles en estructuras que van a estar sometidas a tensiones de tracción apreciables. Se han usado, por supuesto, muy extensamente para construcciones de fábrica, para carreteras y construcciones que trabajan, por lo menos de forma oficial, a compresión. Donde no podemos evitar un cierto grado de tracción, por ejemplo en las ventanas de cristal, debemos tener cuidado en mantener las tracciones bajas y usar un coeficiente grande de seguridad.

Hablando de concentración de tensiones, debemos hacer notar que los efectos debilitantes no están producidos exclusivamente por agujeros, grietas u otras deficiencias del material. Se pueden también producir concentraciones de tensiones añadiendo material, si esto induce un súbito aumento de rigidez. Así, si colocamos un parche nuevo en la ropa vieja o una placa gruesa para reforzar el fino costado de un barco de guerra, no conseguiremos nada bueno⁷.

⁷ La resistencia parcial produce debilidad general [sir Robert Seppings (1767-1840) Inspector de la Armada (1813-1832)].

La razón de esto es que las trayectorias de tensiones divergen igual en una zona que deforma poco, como un parche rígido, que en una zona que deforma demasiado, como un agujero. Cualquier cosa que esté, por decirlo así, elásticamente fuera de escala con el resto de la estructura produce concentraciones de tensiones y puede por tanto ser peligrosa.

Cuando intentamos "reforzar" algo añadiendo material, debemos tener cuidado de no hacerlo en realidad más débil. Los inspectores de las compañías de seguros y los departamentos de gobiernos que insisten en que sean "reforzados" depósitos y otras estructuras añadiendo chapas y cartabones son a veces responsables, según mi experiencia, de los mismos accidentes que pretenden evitar.

La naturaleza evita las concentraciones de tensiones de este tipo y otras, bastante bien. Sin embargo, se podría pensar que las concentraciones de tensiones deben ser importantes en la cirugía ortopédica, especialmente cuando el cirujano fija una rígida prótesis metálica a un hueso relativamente flexible.

nota: En la fórmula de Inglis (p.63) L es la longitud de una grieta que comienza en la superficie del sólido, es decir, la mitad de la longitud de una grieta interior.

CAPÍTULO 5

La energía de deformación y la moderna mecánica de fractura, con una digresión sobre arcos, catapultas y canguros

No conoce esto el hombre necio, no entiende esto el insensato.

SALMO 92

tal y como hemos descrito en el capítulo anterior, el gran logro de los matemáticos del siglo XIX fue encontrar métodos para calcular la distribución y la magnitud de las tensiones en casi todos los tipos estructurales, de una manera bastante amplia, generalizada o académica.

Sin embargo, cuando muchos ingenieros en activo no habían terminado de familiarizarse con este tipo de cálculos, Inglis sembró la semilla de la duda en sus cabezas. Usando los mismos métodos algebraicos que los teóricos de la elasticidad, señaló que la existencia de siquiera un minúsculo e inesperado defecto o irregularidad en una estructura aparentemente segura puede producir un incremento de tensiones locales que puede ser mayor que la tensión de rotura del material y por tanto, cabe esperar que la estructura rompa prematuramente.

De hecho, si se usa la fórmula de Inglis (p. 63), es fácil calcular que, si se rasca una jácena del puente de ferrocarril de Forth, con moderado vigor, con una aguja corriente afilada, la concentración de tensiones resultante puede ser suficiente para que el puente se rompa y se caiga al mar. No sólo rara vez los puentes se caen cuando son rascados con agujas, sino que todas las estructuras de uso corriente como la maquinaria, los barcos y los aviones están infectados de concentraciones de tensión producidas por agujeros, grietas y entrantes que, en la vida real, son pocas veces peligrosos. En realidad no producen ningún daño. De vez en cuando, sin embargo, la estructura rompe, en cuyo caso puede ocurrir un accidente peligroso.

Cuando las implicaciones de los cálculos de Inglis empezaron a ser conocidas por los ingenieros de hace unos cincuenta o sesenta años, se sintieron capaces de minimizar la totalidad del problema invocando la "ductilidad" de los metales que solían usar. La mayoría de los metales dúctiles tienen una curva tensión-deformación que adopta más o menos la forma de la figura 9 de la página 92, y solían decir que el metal sobredimensionado en el extremo de la fisura, sencillamente fluía plásticamente y por tanto se libraba de cualquier exceso serio de tensiones. Así, en efecto, podía suponerse que el extremo agudo de la grieta se "redondeaba" de forma que se reducía la concentración de tensiones y se recuperaba la seguridad.

A diferencia de muchas explicaciones oficiales, ésta tiene el mérito de ser al menos parcialmente cierta, aunque en realidad está muy lejos de explicarlo todo. En muchos casos, la ductilidad del metal no elimina totalmente la concentración de tensiones, y las tensiones locales, en realidad, se mantienen con bastante frecuencia por encima del valor comúnmente aceptado de "tensión de rotura" del material, como se ha comprobado en pequeñas muestras de laboratorio cuyos resultados se han incorporado a tablas y libros publicados sobre este tema.

Durante muchos años, sin embargo, no fueron bien recibidas especulaciones embarazosas que podían socavar la fe del pueblo en los métodos aceptados de calcular estructuras. Cuando yo era estudiante, el nombre de Inglis no se mencionaba prácticamente nunca, y no se hablaba demasiado de estas dudas y dificultades en la sociedad civilizada de los ingenieros. Hablando pragmáticamente, esta actitud podría justificarse parcialmente, ya que, dado un coeficiente de seguridad juiciosamente elegido, la forma tradicional de calcular estructuras —que ignora virtualmente las concentraciones de tensiones— puede utilizarse para predecir la resistencia de estructuras metálicas convencionales. De hecho, ésta es la base de prácticamente todas las normas de seguridad que imponen hoy en día los gobiernos y las compañías de seguros.

Sin embargo, aun en los mejores ambientes de la ingeniería estallaban escándalos de tanto en tanto. En 1928, por ejemplo, al crucero de la White Star, *Majestic* de 56.551 toneladas, que era entonces el barco mejor y más grande del mundo, se le añadió un ascensor de pasajeros. Durante

su instalación se cortaron orificios rectangulares, con esquinas agudas, a través de varios puentes del barco. En algún punto entre Southampton y Nueva York, cuando el barco estaba transportando casi 3.000 personas, apareció una grieta en una de las aperturas del ascensor, corrió hasta las barandillas, y empezó a bajar por el costado del barco durante muchos metros hasta que se paró, de forma fortuita, al atravesar un ojo de buey. El crucero llegó a Southampton a salvo y ni los pasajeros ni la prensa se enteraron del accidente. Por una extraordinaria coincidencia, le ocurrió prácticamente lo mismo al segundo barco más grande del mundo, el trasatlántico americano *Leviathan*, y al mismo tiempo. De nuevo el barco pudo llegar a salvo a puerto y se evitó la publicidad. Si las grietas hubiesen llegado un poco más lejos, y los barcos se hubiesen partido en dos en alta mar, las pérdidas en vidas humanas hubieran sido enormes.

Durante la última guerra y en los años siguientes, empezaron a volverse habituales los accidentes en estructuras realmente grandes como barcos, puentes y oleoductos, y más tarde se han vuelto más, no menos, frecuentes. Lo que ha salido a la luz de una manera bastante pavorosa a lo largo de una serie de años —con un enorme costo de vidas y propiedades— es que, aunque la visión de las cosas que nos da la elasticidad que desarrollaron Hooke, Young, Navier y los matemáticos del siglo XIX es bastante útil y ciertamente no debe ser despreciada o rechazada, no es realmente suficiente, en sí misma, para predecir el colapso de estructuras —sobre todo las grandes— con suficiente certidumbre.

El análisis de estructuras a través del concepto de energía

He visto las distintas cosas que has hecho/Pero siempre te has escondido/He sentido que me empujas, te he oído llamar/Pero nunca te he podido ver.

R. L. STEVENSON, JARDÍN DE POEMAS PARA UN NIÑO.

Hasta hace muy poco, se ha estudiado y enseñado la elasticidad en términos de tensiones y deformaciones unitarias y de resistencia y rigidez, es decir, esencialmente en términos de fuer-

zas y distancias. Ésta es la forma en la que la hemos expuesto hasta ahora, y realmente creo que a la mayoría de nosotros nos resulta más fácil estudiar el tema de esta manera. Sin embargo, cuanto más se observa la naturaleza y la tecnología, más se da uno cuenta de que debe estudiarla utilizando el concepto de energía. Esta forma de estudiarla puede ser muy reveladora, y es la base de los modernos análisis de resistencia de materiales y de comportamiento de las estructuras, esto es, de la muy popular ciencia de la *mecánica de fractura*. Esta forma de ver las cosas nos explica mucho, no sólo de por qué las estructuras rompen, sino sobre muchos otros tipos de comportamiento en historia y en biología, por ejemplo.

Es una pena, por tanto, que la idea en conjunto de energía se haya confundido en la mente de la gente con el significado que tiene la palabra coloquialmente. Como "tensión" y "deformación", "energía" se utiliza para describir una cualidad de los seres humanos: en este caso algo que podría ser una tendencia a lanzarse a hacer cosas molestando a los demás.

Este significado de la palabra sólo tiene una tenue conexión con la precisa y objetiva cualidad física que estamos describiendo.

La clase científica de energía que estamos describiendo se define oficialmente como la "capacidad de realizar trabajo", y éste tiene las dimensiones de "fuerza multiplicada por distancia". Así, si se levanta un peso de 10 kilogramos a una altura de cinco metros, se ha realizado un trabajo de 50 metros por kilogramo, de lo que resulta un almacenamiento de energía adicional o "energía potencial", en el peso que se ha levantado, de 50 metros x kilogramo. Esta energía potencial queda guardada, durante el tiempo que se quiera, en el sistema, pero puede liberarse si se deja bajar el peso otra vez. Si se hace esto, la energía liberada puede ser utilizada en realizar tareas útiles por valor de 50 metros-kilogramo, tales como mover el mecanismo de un reloj o romper el hielo de un estanque.

La energía puede existir en gran variedad de formas — como energía potencial, como energía calorífica, como energía química, como energía eléctrica — y así sucesivamente. En nuestro mundo material, cualquier simple suceso o acontecimiento de cualquier tipo supone la transfor-

mación de las distintas formas de energía de un tipo a otro. En sentido físico es precisamente éste el significado de "suceso" o "acontecimiento". Estas transformaciones de energía acontecen sólo de acuerdo con ciertas reglas muy estrechamente definidas, la más importante de las cuales es que no se puede obtener algo por nada.

La energía no puede ser ni creada ni destruida, y por tanto la cantidad total de energía que existe antes y después de cualquier transacción física es siempre la misma. A este principio se llama de la "conservación de la energía".

Así, la energía puede ser contemplada como la concurrencia universal de las ciencias, y puede ser seguida a través de sus transformaciones por medio de un sistema de contabilidad, que puede ser altamente instructivo. Para hacerlo, necesitamos utilizar un sistema correcto de unidades; y, de forma bastante predecible, las unidades tradicionales de energía están en un excelente, rico, estado de embrollo. Los ingenieros ingleses han tendido a usar pies x libras, los físicos son adictos a los ergios y los voltios, los químicos y los dietistas gustan de usar las calorías, pero en cambio nuestras facturas de electricidad vienen en kilovatios x hora. Naturalmente, todas pueden convertirse entre sí, pero en la actualidad existen buenas razones para utilizar la unidad S.I. de energía, que es el julio, es decir, el trabajo que realiza un newton al recorrer un metro¹.

Aunque se puede medir de forma muy precisa, mucha gente encuentra que el concepto de energía es más difícil de entender que, digamos, el de fuerza o el de distancia. Al igual que el canto del poema de Stevenson sólo podemos sentirlo a través de sus efectos. Posiblemente por esta razón el concepto de energía apareció bastante tarde en el mundo científico: fue introducido en su forma moderna por Thomas Young en 1807. La conservación de la energía no fue aceptada universalmente hasta muy adelantado el siglo XIX, y realmente sólo fue suficientemente apreciada la enorme importancia de la energía como concepto unificador y realidad básica hasta Einstein y la bomba atómica.

Existen, por supuesto, muchas formas de almacenar la energía hasta que se la necesite, de forma química, eléctrica y así sucesivamente. Si vamos a utilizar métodos mecánicos, debemos

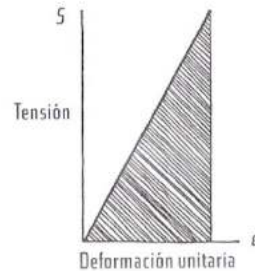
¹ 1 julio (1 J) = 107 ergios = 0,734 pies-libra = 0,239 calorías. Nótese que un julio es más o menos la energía con la que una manzana normal golpea el suelo si se cae de una mesa normal

entonces usar el análisis del que hemos estado hablando, es decir, la energía potencial derivada de elevar un peso. Sin embargo, esta forma de almacenar energía es bastante tosca y, en la práctica, la energía de deformación, la energía de un cable, ha sido generalmente mucho más útil y de uso más universal en biología y en ingeniería.

Es obvio que la energía se puede almacenar en un cable sometido a un alargamiento, pero, como indicó Hooke, los cables teóricos no son más que un caso particular del comportamiento de cualquier sólido cuando se le somete a una carga. Por tanto, cualquier material elástico que esté tensionado contiene energía de deformación, y no existe mucha diferencia en que las tensiones sean de tracción o de compresión.

Si el material obedece la ley de Hooke, las tensiones empiezan en cero y llegan a un máximo cuando el material se va alargando gradualmente, es decir, sin pérdidas de energía por vibraciones o cambios bruscos de forma, la energía de deformación almacenada en el material por unidad de volumen será:

Figura 1. Energía de deformación = superficie bajo la curva tensión-deformación = $\frac{1}{2} \cdot S \cdot e$



El área sombreada bajo el diagrama tensión-deformación (figura 1) que es:

$$1/2 \times \text{tensión} \times \text{deformación unitaria} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot e$$

Coches, esquiadores y canguros

Todos nosotros estamos familiarizados con la energía de deformación de los amortiguadores de nuestros coches. Un vehículo sin amortiguadores estaría sometido a violentas transformaciones de energía potencial en energía cinética (la energía del movimiento) cada vez que la rueda pasase por un bache. Estos cambios de naturaleza de energía son malos para los pasajeros y malos para el vehículo. Hace mucho tiempo un genio inventó el amortiguador, que es simplemente un depósito de energía que permite almacenar temporalmente los cambios en la energía potencial en forma de energía de deformación para hacer su conducción suave y evitar que el vehículo y sus ocupantes sean partidos en pedazos.

Más tarde, los ingenieros han invertido una gran cantidad de tiempo y trabajo en mejorar las suspensiones de los coches, y no hay duda de que lo han hecho muy inteligentemente. Sin embargo, los coches y los remolques van por carreteras, en las que se procura, después de todo, que ofrezcan una superficie lisa. La suspensión de los coches sólo tiene que soportar baches pequeños o residuales. El problema de proyectar la suspensión de un coche que tuviese que ir deprisa sobre un suelo muy accidentado sería muy difícil de resolver. Para almacenar la energía que se necesita para controlar esa serie de acontecimientos, los muelles de acero de los amortiguadores tendrían que ser muy grandes y muy pesados y se transformarían en un "peso muerto" de tal magnitud que harían impracticable el proyecto.

Estudemos ahora el problema de un esquiador. A pesar de la capa de nieve, la mayoría de las pistas de esquí tienen muchos más baches que una carretera.

Aunque se cubriese la pista con un material antideslizante, como la arena, para que el coche pudiese pasar sin resbalar, cualquier intento de conducir un coche por una pista de esquí a la velocidad de un esquiador rápido —digamos 50 km/hora— sería suicida, porque la suspensión del coche sería totalmente inadecuada para absorber los golpes. Pero, por supuesto, esto es exactamente lo que debe hacer el cuerpo del esquiador. De hecho, gran parte

de la energía parece ser absorbida por los tendones de nuestras piernas, que, en conjunto probablemente pesan menos de veinte kilos². Así, si esquiarnos deprisa sin ir al desastre, o realizamos otras actividades atléticas, es porque nuestros tendones son capaces de almacenar grandes cantidades de energía y después disiparla con facilidad. Esto es en parte, para lo que están hechos.

Tabla 3. Capacidad aproximada de almacenar energía en varios sólidos.

Material	Deformación unitaria de trabajo (%)	Tensión de trabajo MN/m ²	Energía de deformación almacenada (Julio x 10 ³ x m ³)
Hierro antiguo	0,03	70	0,01
Acero moderno	0,3	700	1,0
Bronce	0,003	400	0,6
Madera de haya	0,90	120	0,5
Tendón	0,0	70	2,8
Cuerno	4,0	90	1,8
Goma	300,0	7	10,0

En la tabla 3 se dan algunos valores de la capacidad de almacenar energía de deformación de varios materiales. Puede llegar a ser una sorpresa para los ingenieros, la relación entre la eficiencia de los materiales naturales y los metales, y los valores para los tendones y el acero pueden arrojar alguna luz sobre las cualidades de los esquiadores y también de otros animales. Puede verse que la capacidad de almacenar energía por unidad de peso, es alrededor de veinte veces mayor en un tendón que en los modernos muelles metálicos. Aunque, considerados como aparatos de almacenar energía, los esquiadores son más eficientes que la mayoría de las máquinas, ni siquiera un atleta entrenado sería incapaz de competir con un ciervo bajando por una cuesta o con una ardilla o un mono subiendo un árbol. Sería interesante conocer qué porcentaje de peso de tendón sobre el peso total de su cuerpo tienen estos animales, comparados con el hombre.

² Como el consumo de oxígeno del cuerpo parece ser mayor en un descenso esquiando que en cualquier otra actividad humana, los músculos pueden hacerse cargo de mucha energía. Sin embargo, la mayoría de la energía almacenada por los músculos es irrecuperable, y por lo tanto continúa siendo básica la energía de deformación almacenada por los tendones.

Existen animales, como los canguros, que avanzan a saltos. Cada vez que ponen los pies en la tierra se debe acumular energía en los tendones del animal, y un corresponsal australiano me ha contado que las características del tendón del canguro en cuanto a energía de deformación son excepcionalmente buenas: pero desgraciadamente no puedo aportar ninguna cifra exacta. Se me ocurre, sin embargo, que si alguien quisiera volver a hacer un bastón saltador más eficiente, habría mucho que hablar sobre fabricar el muelle del artefacto con tendón de canguro, o realmente con cualquier tipo de tendón.

Los aviones ligeros, que deben proyectarse para realizar malos aterrizajes en terrenos accidentados, tienen muchas veces los trenes de aterrizaje sujetos con tirantes de goma que tienen una capacidad de almacenar energía de deformación mucho mayor que los de acero, y también mayor que la de un tendón, aunque son menos duraderos.

La energía de deformación, además del papel que desempeña en las suspensiones de techos, aeroplanos y animales, tiene otro aún más importante en la resistencia y la fractura de todo tipo de estructuras. Sin embargo, antes de entrar en el tema de la mecánica de fractura puede ser bueno invertir un poco de tiempo en analizar aún otra aplicación de la energía de deformación, la que se encuentra en armas como los arcos y las catapultas.

Arcos

Si te trairé el gran arco del Divino Odiseo, y quienquiera que sea capaz de tensor con facilidad el arco con sus manos, y disparar a través de los doce postes, con él irá y compartiré esta casa, esta casa de mi dote, tan hermosa y llena de bellas cosas, que creo que tú sólo recordarás, ay, en un sueño.

PENÉLOPE, ODISEA XXI, HOMERO.

El arco es uno de los medios más eficaces de almacenar la energía de los músculos humanos, y dispara después con objeto de lanzar un arma arrojadiza. El arco inglés, que se utilizó tanto en Troya (1186) y Agincourt (1415), estaba casi siempre fabricado de madera de tejo. Como no tiene

mucho valor comercial en nuestros días, hasta hace poco no se han realizado prácticamente trabajos científicos sobre este material. Sin embargo, mi colega el Dr. Henry Blyth, que está investigando sobre armas antiguas, ha descubierto que el tejo (*Taxus beccara*) tiene una morfología a pequeña escala que es bastante distinta de las otras maderas y parece especialmente apropiada para almacenar energía de deformación. Por tanto, el tejo es más apropiado que otras maderas para la fabricación de arcos.

En contra de la creencia popular, los arcos ingleses no están habitualmente hechos de tejos ingleses, crezcan en los patios o donde sea. La mayoría de los arcos ingleses están fabricados con tejo español y se obligaba por ley a importar palos para arcos en todos los cargamentos de vino español que se traían por barco. En realidad, el tejo crece bien no sólo en España, sino en todo el área mediterránea. Crece espontáneamente en las ruinas de Pompeya, por ejemplo. A pesar de esto, rara vez se oye hablar del uso de arcos de tejo en España o en los países mediterráneos, en la Edad Media o en la Antigüedad. Su uso estaba prácticamente limitado a Inglaterra y Francia y, en alguna medida, a Alemania y los Países Bajos. Las depredaciones inglesas terminaban alrededor de Borgoña, y prácticamente nunca se extendieron por el sur de los Alpes o los Pirineos.

Por esta razón, en estos países se desarrolló lo que fue llamado "arco mixto". Estos arcos tenían un corazón de madera que, al estar en el centro del espesor del arco, estaba sometido a tensiones bajas. A este corazón se pegaba una superficie de tracción hecha de tendón secado y una cara de compresión hecha de cuerno. Estos dos materiales son todavía mejores para almacenar energía que el tejo. Además mantienen mejor sus propiedades mecánicas que el tejo cuando el clima es caluroso. Después de todo, los animales funcionan a alrededor de 37°C. En la práctica, los tendones no se deterioran de forma apreciable hasta los 55°C. Por el contrario, dos tendones secados se aflojan y se comportan mal con tiempo húmedo.

Se usaron arcos mixtos de este tipo en Turquía y otros países hasta épocas relativamente recientes. Lord Aberdeen (1784-1860), contaba que, mientras viajaba al Congreso de Viena, lo utilizaban las tropas tártaras, armadas con lo que parecen haber sido arcos mixtos, contra las tro-

pas de Napoleón cuando se estaban retirando a través de Europa Oriental. Existe una buena cantidad de hechos que prueban que los arcos mixtos eran mucho mejores que los grandes arcos ingleses. Sin embargo, los arcos ingleses eran armas esencialmente baratas y sencillas de fabricar, mientras que los arcos mixtos eran mucho más complicados de construir, y probablemente más caros. Los arcos griegos eran arcos mixtos y el arco de Ulises, como el de Filoctenes, parece haber sido un delicado trabajo de artesanía.

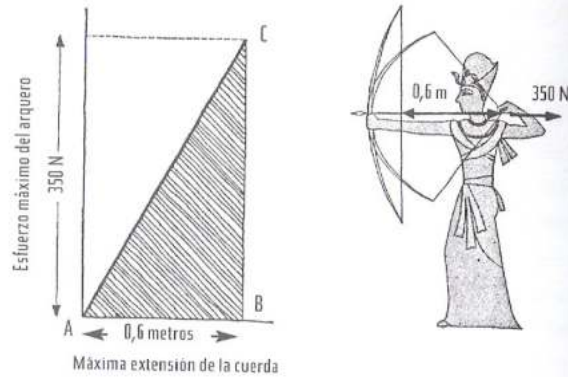
Lo que nos hace volver a la desgraciada Penélope y al trabajo que propuso a sus pretendientes de tensar el arco de Ulises. Como todos sabemos, estuvo por encima de las fuerzas de cualquiera de ellos, aun para el técnicamente dotado Eurímaco: "Y ahora Eurímaco había tomado el arco, calentándolo a un lado y al otro con el calor del fuego; aun así no pudo tensarlo, y su gran corazón gimió grandemente". Pero después de todo, ¿por qué preocuparse? ¿Por qué no usaron simplemente una cuerda más larga los pretendientes, Ulises o cualquier otro? La respuesta a esto es "una buena razón científica" —que es la que sigue—. La energía que puede transmitir una persona al arco, está limitada por las características del cuerpo humano. En la práctica, uno puede doblar un arco hasta alrededor de 0,6 metros, y aun un hombre fuerte no puede tirar de la cuerda del arco con una fuerza mayor de 350 newtons. De esto se sigue que la energía muscular de la que disponemos debe estar alrededor de 0,6 metros x 350 newtons, es decir 210 julios. Éste es el máximo, y lo que queremos es acumular el máximo de energía de deformación posible, en el arco.

Si suponemos que el arco inicialmente está sin tensar y la cuerda inicialmente floja, el arquero empieza a tirar de la flecha con un esfuerzo prácticamente nulo, y sólo trabaja con el esfuerzo máximo cuando se ha alcanzado la máxima extensión de la cuerda. Esto puede expresarse con el diagrama de la figura 2. En tal caso, la energía que se transmite al arco es el área del triángulo ABC, que no puede ser mayor de la mitad de la energía disponible, es decir, 105 julios.

En la práctica, la acumulación de energía que se ha medido en un gran arco inglés es un poco menor de la obtenida en la figura. Sin embargo, Homero dice específicamente que el arco de

Ulises era *palintonos*, es decir, "doblado o alargado hacia adentro". En otras palabras el arco estaba inicialmente doblado en la dirección opuesta o "equivocada", de forma que había que aplicarle una fuerza considerable desde el principio.

Figura 2. Energía almacenada en el arco = $\frac{1}{2} \cdot 0,6 \cdot 350 = 105$ julios¹.



Cuando ha sido tensado el arco de esta forma el arquero ya no empezaba a tirar del mismo en condiciones de nula tensión y deformación y, debido a un diseño inteligente, era entonces posible modificar el diagrama fuerza-extensión de forma semejante a la figura 4.

El área ABCD debajo del diagrama es una parte mucho mayor de la energía disponible total y puede llegar hasta el 80 por ciento de ésta. Ahora es posible almacenar en el arco alrededor de 170 julios, contra los 105 julios de un arco que no ha sido *palintonos*.

Esto representa claramente un gran progreso para el arquero —aparte de las ventajas que pudo tener para Penélope—.

De hecho, todos los arcos están pretensados en mayor o menor medida, en el sentido de que siempre se necesita un esfuerzo para empezar a tirar de él. Sin embargo, como los grandes arcos ingleses, son "arcos propios", es decir, hechos con una plancha cortada de un palo de

¹ Las figuras 2 y 4 son, por supuesto, esquemáticas. Generalmente el diagrama fuerza-extensión no será una línea recta; pero es de aplicación el mismo principio.

madera y, por consiguiente, con forma inicial casi recta, el efecto del pretensado en este caso es pequeño. Es mucho más fácil darle la forma apropiada a un arco compuesto, y esta forma era normalmente muy característica, la del "arco de Cupido" (figura 5).

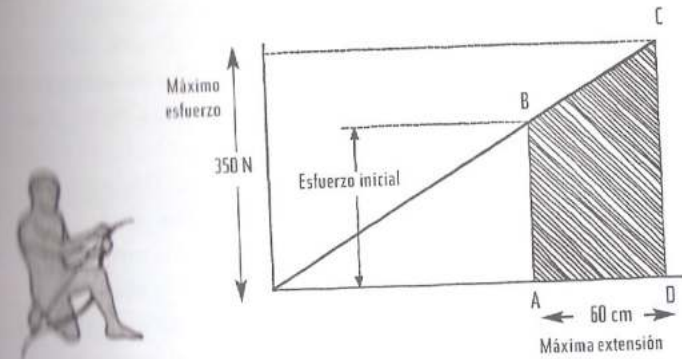


Figura 3. Un griego tensando un arco (pintura en un jarrón).

Figura 4. Por qué un arco debe ser "doblado hacia adentro" o *palintonos*. La energía almacenada en el arco es ahora el área ABCD = 170 Julios.

Como la capacidad de almacenar energía de deformación del cuerno y el tendón, como materia-
lia, es mayor que la del tejo, se pueden hacer arcos mixtos más cortos y más ligeros que los de
madera. Por eso, cuando hablamos de arcos de madera hablamos de "grandes" arcos. Los arcos mix-
tos pudieron hacerse tan pequeños que se podían utilizar a caballo, y ciertamente es lo que hicieron
los partos y tártaros. El arco parto fue tan manejable que el jinete pudo disparar hacia atrás, cuando
se retiraba, contra sus perseguidores romanos; de ahí viene la frase "un disparo parto".

Catapultas

El gran periodo de la Grecia Clásica llegó a su fin con la caída de Atenas el 404 antes de Cristo, y durante el siglo IV muchos gobiernos democráticos griegos fueron sustituidos por dictaduras

Figura 5. Arco compuesto, sin tensar o tensado.



o "tiránias" cuyos principales intereses eran militares. La tecnología de la guerra estaba entonces cambiando en sus usos marítimos y terrestres, y los dictadores se dieron cuenta que necesitaban armas más modernas y más mecanizadas. Además, como los dictadores eran los dueños absolutos de sus Estados, podían permitirse pagar altas facturas.

Este estado de cosas se desarrolló sobre todo en la Sicilia Griega. Dionisio I era un hombre notable que había pasado de ser un funcionario sin importancia en una oficina del gobierno a ser el Tirano de Siracusa. Durante casi todo su reinado, que duró del 405 al 367 a.C., hizo de su país uno de los más poderosos de Europa. Fundó lo que probablemente fue el primer laboratorio estatal de investigación de armamento, como parte de su política militar, y para ese establecimiento reclutó a los mejores matemáticos y artesanos del mundo griego.

El punto de partida de los expertos de Dionisio fue el tradicional arco mixto de mano. Si se monta uno de estos arcos en un armazón, y se consigue tirar de la cuerda con aparatos mecánicos o palancas, puede hacerse mucho más rígido el arco y, por tanto, capaz de almacenar y disipar una energía varias veces mayor. Así llegamos a la ballesta, cuyo proyectil puede atravesar cualquier espesor posible de armadura⁴. La ballesta se ha seguido usando, con sólo pequeñas variaciones, hasta nuestros días. Se dice que se utiliza hoy en día en el Ulster. Sin embargo, es curioso que, como arma, no parezca que haya desempeñado ningún papel decisivo.

Además, la ballesta es esencialmente un arma de infantería, o antipersonal y nunca tuvo las cualidades que necesita un arma para producir daños notables en el casco de un barco o en fortificaciones estables. Aunque los siracusanos aumentaron el tamaño de la ballestas hasta transformarlas en una catapulta, y las colocaron sobre el armazón apropiado, como el de un cañón, parece ser que existían limitaciones físicas para continuar por este camino, y las catapultas tipo ballesta no parecen haber sido nunca lo suficientemente fuertes para producir una brecha en la pesada fábrica de una fortaleza⁵.

El siguiente paso fue, por consiguiente, abandonar la construcción de armas tipo arco, y almacenar la energía de deformación en cuerdas trenzadas de tendones⁶, muy parecidos a las

⁴ Por otro lado, la capacidad de producir disparos de una ballesta no puede competir con la de un arco. El gran arco inglés, por ejemplo, podía descargar catorce flechas por minuto y, por tanto, cuando se usaba en *masse*, podía producir una formidable nube o barrera de proyectiles. Se calcula que se dispersaron alrededor de seis millones de flechas en Agincourt.

⁵ Recientes hallazgos en Kuklia, Chipre, indican la existencia de catapultas de uso militar en el siglo v.a.C., aunque no se sabe nada de ellas. En cualquier caso, el primer planteamiento "científico" del problema parece deberse a Dionisio.

⁶ Probablemente proceden del cabrestante que se usó en los barcos antiguos. Véase capítulo 11, pág. 223.

cuerdas de goma que se utilizan para conducir modelos de aeroplanos. En tales cuerdas, todos los cables que la componen, es decir, todo el material hecho de tendones, se alargan a tracción a medida que se aprietan entre sí al estirar la cuerda, es por tanto un instrumento de almacenar energía realmente efectivo.

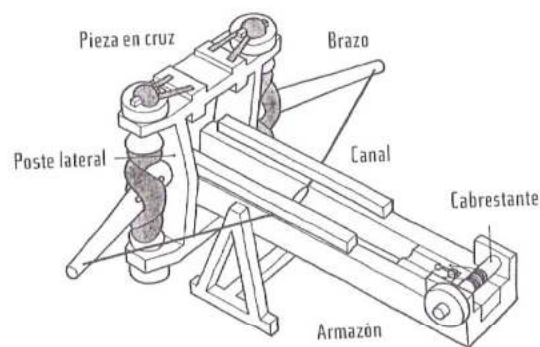


Figura 6. Un aspecto del mecanismo que se utilizó en las catapultas.

Hay varias formas de usar las cuerdas trenzadas de tendones en la industria del armamento, pero la mejor con diferencia es la del instrumento conocido por los griegos como *palintonon* y por los romanos como *ballista*. En esta muy letal pieza de artillería, existían dos muelles verticales formados por tendones, cada uno de ellos tensados mediante un brazo o palanca rígida, algo parecido a la barra de un cabrestante (figura 6). Los extremos de los dos brazos se unían entre sí mediante una pesada cuerda de arco, y todo el instrumento trabajaba de forma muy parecida al de un arco. En realidad, obtuvo su nombre griego del hecho de que, en su posición de reposo, los dos brazos apuntaban hacia fuera, como los brazos de un arco mixto; y de que se tensaba la catapulta (mediante una poderosa rueda) de forma muy parecida a la de un arco. El proyectil, que era muy frecuentemente una bala de piedra, era lanzado a través de un canal que servía también para

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

montar el cabrestante que se necesitaba para manejar el arma. Su capacidad de lanzamiento parece haber sido del orden de las 10 toneladas.

Los romanos copiaron las catapultas griegas y Vitrubio, que fue oficial de artillería a los órdenes de Julio César, nos ha dejado un manual de *ballistae*, muy interesante de leer. Estas armas se fabricaban en tamaños que oscilaban entre las que eran capaces de lanzar proyectiles de 2 kg, y las que los lanzaban de 150 kg. La longitud de tiro de todas ellas estaba alrededor de los 400 metros. La *ballista* tipo romana parece ser capaz de lanzar una bala de 40 kg de peso.

En el último, dramático, sitio de Cartago en el 146 a.C., los romanos rellenaron en parte la somera laguna que se encuentra frente a la muralla de la ciudad y procedieron a hacer brechas en sus defensas mediante catapultas. Los arqueólogos han recobrado no menos de 6.000 balas de piedra, de unos 90 kg de peso, en el lugar.

Aunque Julio César y Claudio utilizaron catapultas montadas en barcos, para limpiar las playas de antiguos bretones, durante sus desembarcos en Gran Bretaña, la catapulta nunca fue un arma peligrosa en los combates entre barcos. Parece ser que una *ballista* lo suficientemente grande como para hundir un barco de un disparo, tenía una velocidad de tiro excesivamente baja, por lo que tenía pocas posibilidades de alcanzar un barco en movimiento.

Algunas veces se lanzaron con catapultas proyectiles incendiados, pero los fuegos podían ser apagados muy fácilmente en barcos que estaban llenos de gente. Un ingenioso almirante ganó una batalla marítima en el año 184 a.C., lanzando al enemigo ánforas frías llenas de serpientes venenosas, pero este camino no parece haberse seguido más adelante. En general, las catapultas no tenían un gran éxito en el agua.

En cualquier caso, el *palintonon* o *ballista* era un instrumento muy eficaz para la guerra por tierra, aunque su construcción y su mantenimiento era un tema realmente complicado, los oficiales de artillería, profesionales y de reemplazo, romanos deben haber sido gente muy competente. Cuando acabó el Imperio Romano, y la tecnología romana, estas armas dejaron de ser posibles de utilizar y fueron olvidadas. Las armas de sitio medievales se redujeron a la catapulta de palanca o "trebuchet".

LA ENERGÍA DE DEFORMACIÓN Y LA MODERNA MECÁNICA DE FRACTURA

Esta era un instrumento con forma de péndulo en el que se utilizaba la energía potencial producida al levantar un peso. Aún una catapulta grande de este tipo no parece que fuese capaz de levantar más de una tonelada (o 10.000 newtons) a unos 3 metros. Por tanto el máximo de energía potencial que se podría almacenar probablemente no pasaría de los 30.000 julios.

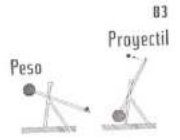
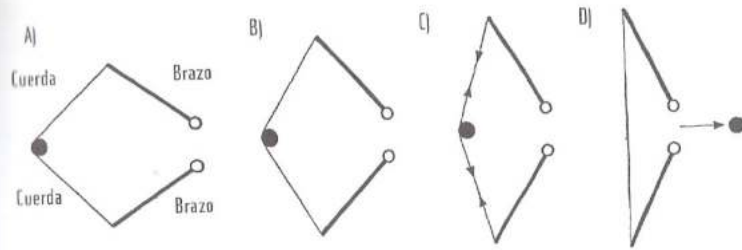


Figura 7. Catapulta de palanca medieval, o trebuchet.

Figura 8. Diagrama del mecanismo del palintonon o ballista.

- a) Preparado para disparar. Toda la energía está almacenada en las cuerdas de tendón.
- b) Primer estado en la operación de disparo. Los pesados brazos están siendo acelerados y por tanto tomando mucha de la energía de las cuerdas.
- c) Estado final de la operación de disparo. Los pesados brazos están siendo desacelerados debido al incremento de tracción en la cuerda, y por tanto su energía cinética está siendo transmitida al proyectil.
- d) Proyectil siguiendo su trayectoria, conteniendo virtualmente toda la energía que fue almacenada en el sistema.

Esa misma cantidad de energía potencial podría almacenarse en diez o doce kilogramos de tendón. Es decir, incluso una gran *trebuchet* sólo podía usar alrededor de una décima parte de la energía de un *palintonon*. Aún más, la eficiencia para la transformación de energía potencial en energía cinética parece haber sido aún menor. En el mejor de los casos estas catapultas podían considerarse satisfactorias si eran capaz de lanzar piedras grandes por encima de una muralla; cualquier intento de atacar su pesada fábrica hubiera fracasado.

Estudiadas desde el punto de vista de máquinas de transformar energía, el arco y el *palintonon* trabajan según principios similares: no se tiene idea muchas veces de cuál es la eficacia para intercambiar energía que posee un mecanismo. En máquinas toscas como la catapulta medieval, gran parte de la energía disponible se perdía, cuando se disparaba el arma, en acelerar la pesada balanza o brazo lanzador del instrumento, y se perdía finalmente en parar el sistema de lanzamiento.

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

En un arco o un *palintonon*, cuando se suelta la cuerda, parte de la energía almacenada se transmite directamente al proyectil como energía cinética. Mucha de la energía disponible, sin embargo, se ha utilizado para acelerar los brazos del arco o la catapulta romana, donde se había almacenado como energía potencial, casi de la misma forma que la catapulta medieval.

En este caso, sin embargo, a medida que el mecanismo de descarga lanza el peso, el movimiento de los brazos se va parando, no por un tope fijo, sino por la propia cuerda a medida que se va volviendo recta y queda tensada en su posición inicial. Esto aumenta la tracción de la cuerda, permitiéndole empujar aún más fuerte al proyectil y por tanto lanzarlo a su trayectoria. Así se recobra mucha de la energía cinética almacenada en los brazos.

Los cálculos matemáticos necesarios para describir arcos y catapultas son difíciles y, aunque se sea capaz de escribir las ecuaciones del movimiento, no pueden resolverse analíticamente.

Afortunadamente, sin embargo, otro colega mío, el Dr. Tony Pretlove, ha estado lo suficientemente interesado en el tema para meter todo en un ordenador. Esto nos ha mostrado, de forma bastante sorprendente, que el proceso de transferencia de energía tiene en teoría una eficacia de virtualmente el cien por cien. En otras palabras, prácticamente toda la energía de deformación que se había almacenado en el instrumento se ha transformado en energía cinética. Por lo tanto, poca energía se desperdicia, o se deja atrás para recalentar o dañar el arma. En este sentido, los arcos o la catapultas suponen un gran progreso frente a los cañones.

Una consecuencia de todos estos hechos es, creo, conocida por muchos arqueros, al menos de forma práctica. Es que uno no debe nunca jamás disparar con un arco o una catapulta sin la flecha o el proyectil adecuado. Si esto no se hace, no existe medio seguro de liberar la energía almacenada, y no sólo puede romperse el arco, sino que el arquero puede quedar dañado.

LA ENERGÍA DE DEFORMACIÓN Y LA MODERNA MECÁNICA DE FRACTURA

Resiliencia

*Una lámina mojada y un mar fluyente/Un viento que le sigue velozmente/Y llena la blanca y reluciente vela/
Y dobla el apusto mástil.*

ALLAN CUNNINGHAM, UNA LÁMINA MOJADA Y UN MAR FLUYENTE.

Cuando Galileo se instaló en Arcetri en 1633 para estudiar la elasticidad, una de las primeras preguntas que se hizo fue: "¿Cuáles son los factores que condicionan la resistencia de una cuerda o una barra cuando se tira de ella? ¿Depende la resistencia, por ejemplo, de la longitud de la cuerda?".

Con una serie de experimentos elementales se demostró que la fuerza o el peso que se necesita para romper una cuerda de sección uniforme tirando de ella establemente no depende de su longitud. Es el resultado que podemos esperar con sentido común, pero estas noticias han tardado en llegar a muchos sitios, porque todavía se puede encontrar bastante gente que está convencida de que una cuerda larga es "más fuerte" que una corta.

Por supuesto, esta gente no se ha vuelto loca, porque todo esto depende de lo que se quiera decir por "más fuerte". La fuerza estable que se necesita para romper una cuerda larga tirando de ella es desde luego la misma que se necesita para romper una corta, pero una cuerda larga se alargará más antes de romperse y por tanto se necesitará más energía para romperla, aunque la fuerza que se ha aplicado y la tensión que sufre el material sean las mismas. Dicho de una manera ligeramente distinta, una cuerda larga amortiguará una rotura súbita alargándose elásticamente bajo la carga, de forma que el efecto de las fuerzas y las tensiones no esperadas que aparezcan transitoriamente durante el proceso de carga, quede amortiguado. En otras palabras, actúa de forma parecida a la suspensión de un coche.

Así, en una situación en la que la carga actúe de forma súbita y variable, una cuerda larga puede ser "más fuerte" que una cuerda corta. Ésta es la razón por la que las carrocerías de los vehículos del siglo XVIII estaban frecuentemente suspendidas del chasis mediante tiras de cuero

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

muy largas, que eran más efectivas que las cortas para resistir los tirones que producían las carreteras de la época. Aún más, las cadenas de las anclas, y los cabos de amarre de los barcos se rompen generalmente, no bajo una carga estable, sino por tirones súbitos, y por ello es mejor intentar que sean lo más largos posible. Todos los que se ven en la necesidad de toparse con grandes diques secos o petroleros amarrados en el mar de noche o con la niebla, deben tener bien en cuenta que cada uno de los amarres puede estar hecho con casi kilómetro y medio de cable de acero. Estos obstáculos náuticos pueden cubrir una superficie enorme y ser terribles para el navegante descuidado⁴.

A la capacidad de almacenar energía de deformación y deformarse elásticamente bajo una carga sin romperse se le llama "resiliencia" y es una característica muy apreciable para una estructura. La resiliencia puede ser definida como "la cantidad de energía de deformación que puede almacenar una estructura sin sufrir daños permanentes".

Por supuesto, para conseguir resiliencia, no es necesario utilizar una cuerda muy larga, como un tendido eléctrico. Es conveniente muchas veces utilizar piezas más cortas, como los muelles helicoidales que se usan en los topes de los ferrocarriles, o los bloques de material blando que se utilizan en los puertos para amortiguar el choque de los barcos, o materiales con módulo de Young bajo, como las gomas acolchadas o los plásticos que se usan a menudo para empaquetar aparatos delicados. Este tipo de cosas son con frecuencia capaces de alargarse o contraerse mucho más en relación a su longitud y almacenar más energía de deformación por unidad de volumen. La excelencia de las suspensiones de los esquiadores y los animales se debe, en parte, al comparativamente bajo módulo de elasticidad y a los grandes alargamientos que pueden realizar los tendones y otros tejidos.

Por otro lado, aunque baja rigidez y alta capacidad de alargamiento proporcionan absorción de energía, y por tanto hacen más difícil que la estructura se rompa debido a un golpe brusco, su exceso puede llevarnos a hacer una estructura demasiado deformable para el propósito con el que se proyectó. Esto normalmente limita la cantidad de resiliencia con la que debe ser proyecta-

⁴ Realmente mucha de la resiliencia de las cadenas de ancla y de los cabos de amarre proviene de su propio peso, que les hace flechar. Esta es una de las razones para preferir cadenas o cables pesados de hierro a cuerdas orgánicas, mucho más ligeras.

LA ENERGÍA DE DEFORMACIÓN Y LA MODERNA MECÁNICA DE FRACTURA

da una estructura. Objetos como los aviones, los edificios, los instrumentos y las armas deben ser muy rígidos para poderlos utilizar. En este sentido, la mayoría de las estructuras tienen que ser un compromiso entre rigidez, resistencia y resiliencia, y conseguir llevar a cabo este compromiso es la prueba más severa para la habilidad del proyectista.

Los factores que producen el óptimo pueden variar, no sólo entre los distintos tipos y las distintas clases de estructuras, sino entre las distintas partes que componen la estructura. En ese sentido, la naturaleza está en ventaja, porque tiene a su disposición una enorme variedad de propiedades elásticas en los distintos tejidos biológicos. Un ejemplo sencillo e interesante es la tela de araña. La tela está sometida a impactos producidos por las moscas que quedan atrapadas en ella, y la energía de estos golpes debe ser absorbida por la resistencia de los hilos. Así ocurre que los largos hilos radiales, que son los que soportan la estructura, son tres veces más rígidos que los hilos circunferenciales más cortos que son los que se utilizan para atrapar las moscas.

Naturalmente, hay otras formas de almacenar energía de deformación y obtener resiliencia que no son usar piezas de tracción, como las cuerdas, los hilos de las arañas, o piezas a compresión como los topes de los ferrocarriles y los amortiguadores de los barcos. Cualquier forma estructural que sea capaz de deformarse elásticamente, puede llegar a tener el mismo efecto. Probablemente, el hacer trabajar una pieza a flexión sea la forma más común de absorber energía, como se hace en los arcos y en los apuestos mástiles. Así trabajan las plantas, los árboles y la mayoría de los amortiguadores de los coches. Las espadas son consideradas de alta calidad cuando son capaces de recobrar su forma elásticamente, después de haberlas doblado hasta que su punta toque la empuñadura.

La energía de deformación y la causa de la rotura a tracción

Poseer una cantidad razonable de resiliencia, es una cualidad esencial para cualquier estructura: de otra forma sería incapaz de absorber la energía de un golpe. Hasta cierto nivel, la estructura

mejor es la que tiene más resiliencia. Unos artefactos tan elaborados como los barcos vikingos o como algunos coches de caballos americanos, eran realmente muy flexibles y resilientes. Mientras no se les cargue en exceso, estas estructuras podrán recobrar su forma cuando se retire la carga y todo continuará funcionando bien. Sin embargo, si los sobrecargamos, más pronto o más tarde, por supuesto, terminarán por romperse.

Ahora bien, para que un material se rompa a tracción es necesario que se propague una grieta a través de él. Sin embargo, para producir una grieta nueva se necesita un suplemento de energía —como veremos dentro de poco— y esta energía adicional debe venir de alguna parte. Como hemos dicho, es bastante fácil romper un arco disparándolo sin flecha. Esto ocurre porque la energía de deformación que ha sido almacenada en el arco no puede ser disipada de forma segura transformándola en energía cinética en la flecha, y parte de ella se emplea en producir grietas en el material del propio arco. El arco roto es, sin embargo, sólo un caso especial de las muchas clases de fractura que existen.

Todas las sustancias elásticas que soportan una carga contienen en mayor o menor medida energía de deformación, y esta energía de deformación está disponible potencialmente para el proceso autodestructivo que llamamos “fractura”. En otras palabras, la energía potencial almacenada o resiliencia puede ser utilizada para pagar el costo energético de propagar una grieta a lo largo de la estructura y producir su rotura. En una estructura resiliente existe una gran cantidad de energía de deformación, y el mismo tipo de energía que utilizaron los romanos para hundir las sólidas murallas de Cartago puede servir para que un superpetrolero se parta en dos.

De acuerdo con el moderno punto de vista sobre este tema, cuando rompemos una estructura haciéndola trabajar a tracción, no debemos ver la fractura como algo causado *directamente* por la acción de una carga tirando de los enlaces químicos que unen los átomos del material. Esto es, no es la consecuencia de la pura acción de una tensión de tracción como los libros de texto clásicos nos han querido hacer creer⁹. El resultado directo de aumentar la carga sobre la estructura es únicamente aumentar la energía de deformación almacenada en el material.

⁹ La tensión de tracción máxima “verdadera” o teórica que se requiere en realidad para separar los átomos entre sí es realmente alta, mucho más alta que la resistencia “práctica” que se obtiene en los ensayos de tracción ordinarios. Véase *La Nueva Ciencia de los Materiales Fuertes*, capítulo 3.

La cuestión realmente básica para que se produzca la rotura en una unión determinada de una estructura, es si es posible o no que la energía de deformación se transforme en energía de fractura que produzca una nueva grieta.

La moderna mecánica de fractura se ocupa, pues, menos de tensiones y fuerzas que de cómo, por qué, y dónde se puede transformar la energía de deformación en energía de fractura. Por supuesto, en casos sencillos como cables o barras, el concepto clásico de tensión de rotura nos da normalmente una guía adecuada, pero en estructuras grandes o complicadas, como los puentes, los barcos o los depósitos, esta forma de ver las cosas ha probado ser una sobresimplificación peligrosa, como hemos visto. Lo que se deduce de la teoría reciente es que, esté una estructura sometida a un golpe brusco o a una carga estable, la fractura por tracción depende *principalmente* de:

- El precio en términos de energía que debe pagarse para producir una grieta nueva.
- La cantidad de energía de deformación de la que se dispone para pagar este precio.
- El tamaño y la forma del peor hueco, grieta o defecto que tenga la estructura.

El hecho de que la cantidad de energía que se requiera para romper cualquier sección de material varía de forma realmente grande de un sólido a otro puede confirmarse fácilmente, por ejemplo golpeando con un martillo una jarra de cristal y después otra de estaño. La cantidad de energía que se necesita para romper la sección de material está definida como su “ductilidad”, que se llama en nuestros días “energía de fractura” o “trabajo de fractura”. Esta propiedad es muy diferente y está muy distante de la “resistencia a tracción” del material, que se define como la *tensión* (no la energía) necesaria para romper el sólido. La ductilidad o trabajo de fractura de un material tiene un efecto muy importante en la resistencia práctica de una estructura, especialmente en las grandes. Por esta razón vamos a dedicar algún tiempo a hablar del trabajo de fractura de varios tipos sólidos.

Energía de fractura o "trabajo de fractura"

Como, cuando se rompe un sólido a tracción, por lo menos debe producirse una grieta que se propague a través del material de forma que lo divida en dos partes, se deben crear dos nuevas superficies por lo menos que no existían antes de la fractura. Para romper el material en dos de esta forma y producir estas nuevas superficies es necesario haber roto todos los enlaces químicos que unían entre sí las dos superficies.

Se conoce bien la cantidad de energía que se necesita para romper casi todas las formas de enlaces químicos —al menos, por los químicos— y resulta que, para la casi totalidad de los materiales tecnológicos, la cantidad total de energía que se necesita para romper todos los enlaces en cualquier plano de sección¹¹ es prácticamente siempre la misma y no difiere demasiado de 1 julio por metro cuadrado.

Cuando tratamos con la familia de materiales que se llaman, de manera bastante clara, *sólidos frágiles* —en la que están incluidos la piedra, el ladrillo, el cristal y la cerámica— ésta es aproximadamente toda la energía que debemos emplear para producirles la fractura. De hecho, 1 julio/m² es realmente una minúscula cantidad de energía. Es ilustrativo darse cuenta de que, según la teoría más sencilla, la energía de deformación que puede almacenarse en un kilogramo de tendón puede producir 2.500 metros cuadrados de cristal roto —lo que puede hacernos estimar el efecto que producen los elefantes en las cacharrerías—. Por eso, un albañil puede partir limpiamente un ladrillo en dos mitades con un ligero toque de paleta y por eso sólo tenemos que ser un poco torpes para romper un plato o una copa.

Naturalmente, ésta es la razón por la que, si podemos evitarlo, no usamos "sólidos frágiles" para construir objetos que trabajan a tracción. Estos materiales no son frágiles, principalmente, porque tengan resistencia baja a tracción —es decir, porque necesitan una fuerza pequeña para romperlos— sino más bien porque necesitan muy poca energía para romperlos.

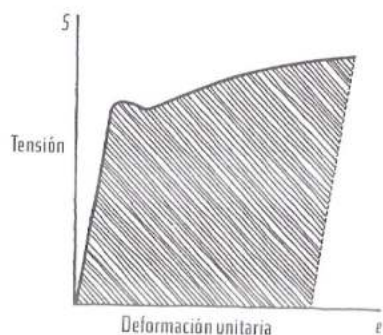
¹¹ Esto es frecuentemente lo mismo que energía superficial libre, que está estrechamente ligado a la tensión superficial de líquidos y sólidos y que se analiza con frecuencia en los análisis de ciencias de los materiales. Véase por ejemplo, *La Nueva Ciencia de los Materiales Fuertes*, capítulo 3.

Material	Trabajo aproximado de fractura J/m ²	Tensión de rotura por tracción aproximada MN/m ²
Cristal, cerámica	1-10	170
Cemento, ladrillo, piedra	3-4	4
Poliéster y resinas, aprox.	100	50
Nailon, polietileno	1.000	150-600
Huesos, dientes	1.000	200
Madera	10.000	100
Acero dulce	100.000-1.000.000	400
Acero de alta resistencia	10.000	1.000

Los materiales biológicos y técnicos que se utilizan realmente para trabajar a tracción, y se utilizan con seguridad suficiente, necesitan mucha más energía para producir una nueva superficie de fractura. En otras palabras, el "trabajo de fractura" es mucho mayor —enormemente mayor— que el de los sólidos frágiles. El trabajo de fractura de un material dúctil de uso habitual se encuentra entre los 10³ J/m² y los 10⁶ J/m². Por lo tanto, la energía que se necesita para producir la fractura en el hierro colado o el acero dulce puede llegar a ser un millón de veces mayor que la que se necesita para romper una sección equivalente de cristal o cerámica, aunque las tensiones de rotura a tracción de todos estos materiales, no son muy diferentes entre sí. Ésta es la razón por la que una tabla de "tensiones de rotura a tracción", como la tabla 2, puede llegar a ser un documento bastante peligroso cuando se trata de elegir un material para un uso determinado. Ésta es también la razón por la que la teoría de la elasticidad, basada principalmente en fuerzas y tensiones, que ha sido laboriosamente elaborada a lo largo de cien años —y continúa siendo laboriosamente enseñada a los estudiantes— es realmente inadecuada, en sí misma, para predecir el comportamiento de las estructuras y los materiales.

Tabla 4. Valores muy aproximados del trabajo de fractura y de la tensión de rotura por tracción de algunos sólidos habituales.

Aunque la mecánica detallada de cómo se absorben esas enormes cantidades de energía dentro de los materiales dúctiles como "trabajo de fractura" es a menudo sutil y complicada, su comportamiento global es bastante sencillo. En un material "frágil" el trabajo realizado durante la fractura se limita virtualmente al que se necesita para romper los enlaces químicos en, o muy cerca de, la nueva superficie de fractura. Como hemos visto, esta energía es pequeña y vale como mucho 1 J/m^2 . En un material dúctil, aunque la resistencia y la energía de los enlaces individuales puede ser la misma, la perturbación en la estructura básica del material alcanza un espesor mucho mayor durante el proceso de rotura. De hecho puede producirse a lo largo de un espesor de más de un centímetro: esto es, el espesor de alrededor de 50 millones de átomos por debajo de la superficie de fractura visible. De esta forma, si sólo se rompe un enlace atómico de cada cincuenta durante el proceso de perturbación, el trabajo de fractura —la energía necesaria para producir una superficie nueva—, aumentará un millón de veces, esto, como hemos visto, es más o menos lo que realmente ocurre. Así pueden entrar a formar parte del proceso de fractura moléculas que están colocadas muy en el interior del material.



Los metales dulces tienen un elevado valor del trabajo de fractura debido principalmente a que son dúctiles. Es decir, que cuando están sometidos a una tracción moderada la curva tensión-

deformación cumple la ley de Hooke, pero cuando las tensiones son altas el metal se deforma plásticamente, como la plastilina (figura 9). Cuando una placa o una lámina de uno de estos metales se rompe por tracción el material fluye de forma muy parecida al almibar o el chicle antes de romperse; los extremos rotos se estrechan o se vuelven cónicos tomando una forma parecida a la de la figura 10. A esta forma de fractura se le suele llamar rotura por "estricción".

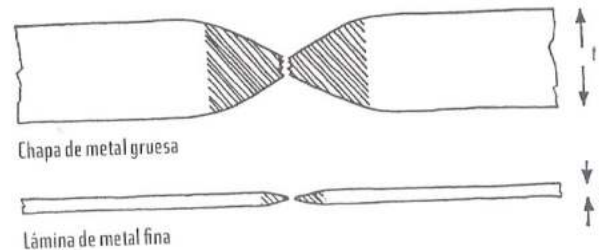


Figura 10. El trabajo de fractura es proporcional al volumen de metal deformado plásticamente, es decir, el área sombreada, y por tanto a t^2 de forma gruesa. Así, el trabajo de fractura de la lámina delgada es muy pequeño.

La estricción y otras formas parecidas de rotura pueden existir porque una gran cantidad de las innumerables capas de átomos que forman los cristales metálicos son capaces de deslizarse unas sobre otras por medio de lo que se llama "mecanismos de dislocación". Las dislocaciones no sólo permiten deslizarse a las capas de átomos unas sobre otras como un mazo de cartas, sino que absorben energía —mucho energía—. El hecho de que los cristales se escurran, deslicen y estrechen da como resultado que el metal pueda distorsionarse y de esta forma pueda disiparse una gran parte de la energía.

El mecanismo de dislocación,¹¹ que fue descrito por primera vez por sir Geoffrey Taylor en 1934, ha sido objeto de una intensa investigación académica en los últimos treinta años. Ha demostrado ser un asunto extraordinariamente sutil y complicado. Todo lo que pasa dentro de algo tan aparentemente sencillo como un trozo de metal, parece ser tan ingenioso como los

¹¹ Véase *La Nueva Ciencia de los Materiales Fuertes*, capítulos 3 y 9, para una descripción elemental del mecanismo de dislocación; para una descripción más completa véase, por ejemplo, *The Mechanical Properties of Matter* de sir Alan Cottrell (Ed. John Wiley, 1964).

mecanismos de muchos tejidos biológicos vivos. Lo curioso es que este ingenioso mecanismo puede no tener ningún propósito, aunque sólo sea porque la naturaleza no tiene nada, por decirlo de alguna manera, que ganar con ello, ya que no hace ningún uso estructural de los metales, que en cualquier caso muy rara vez aparecen en estado puro espontáneamente. Sea como sea, las dislocaciones de los metales han producido un gran beneficio para los ingenieros y parece casi que fueron creadas en su beneficio, porque no sólo hacen a los metales dúctiles, sino que permiten forjarlos, trabajarlos y endurecerlos.

Los plásticos artificiales y los compuestos de fibras tienen otros mecanismos de trabajo a fractura, que además son bastante distintos de los que tienen los metales, pero son bastante efectivos. Los materiales biológicos parecen haber desarrollado métodos para producir cantidades altas de trabajo de fractura que demuestran realmente maestría. El de la madera, por ejemplo, es excepcionalmente eficiente, y el trabajo de fractura de la madera es, comparando sus pesos relativos, mayor que el de la mayoría de los metales¹².

Analicemos ahora cómo la energía de deformación de una estructura resiliente consigue transformarse en trabajo de fractura. O si se quiere, ¿cuál es la verdadera razón por la que se rompen las cosas?

Griffith o cómo vivir con grietas y concentraciones de tensión

Es mejor cortar una cebolla que tirar de ella si tiene grietas superficiales en el tallo.

RUDYARD KIPLING, *EL PAN SOBRE LAS AGUAS* (1895)

Como ya hemos dicho al principio de este capítulo, todas las estructuras tecnológicas tienen grietas, entalladuras, orificios y otros defectos; los barcos, los puentes y las alas de los aviones están sujetos a toda clase de abrasiones y golpes accidentales y debemos aprender a convivir con ellas con la máxima seguridad posible, a pesar del hecho de que, de acuerdo con Inglis, las ten-

siones locales que aparecen en muchas de esas zonas defectuosas pueden estar muy por encima de la tensión de rotura oficial del material.

Cómo y por qué somos en general capaces de convivir con esas altas tensiones sin que se produzca una catástrofe, fue lo que describió A. A. Griffith (1893-1963) en el artículo que publicó en 1920, exactamente veinticinco años después del magnífico cuento de Kipling sobre una grieta. Como en 1920 Griffith era sólo un hombre joven, nadie le hizo caso. En cualquier caso, Griffith hizo un análisis de todo el problema de la fractura basándose en la energía, no en fuerzas y tensiones, y esto no sólo era nuevo en aquella época, sino extraño a la forma de pensar de los ingenieros, entonces y durante muchos años después. Aún ahora, demasiados ingenieros no entienden de qué trata la teoría de Griffith.

Griffith estaba diciendo lo siguiente: visto desde el punto de vista de la energía, la concentración de tensiones de Inglis era sencillamente un *mecanismo* (como una pinza) que transforma energía de deformación en energía de fractura, de la misma manera que un motor eléctrico es un mecanismo que convierte energía eléctrica en trabajo mecánico o un abrelatas es sencillamente un mecanismo que utiliza la energía muscular para cortar la lata. Ninguno de estos mecanismos puede funcionar si no se le suministra continuamente la energía apropiada. La concentración de tensiones funcionará bien si su trabajo es mantener apresada una porción de átomos del material, pero necesita estar alimentada de energía de deformación. Si el suministro de energía de deformación se acaba, se termina el proceso de fractura.

Supongamos ahora que tenemos una pieza de material elástico que se alarga y se fija en sus extremos de forma que, en principio, ninguna clase de energía mecánica entra o sale del sistema. Tenemos entonces un sistema cerrado que contiene una cantidad fija de energía de deformación.

Si se propaga una grieta sobre este material alargado, el necesario trabajo de fractura debe ser suministrado por el sistema cerrado, que no puede pedir prestada energía fuera. Si, por simplificar, suponemos que nuestra pieza es una placa de material de espesor unidad, la energía gastada valdrá $W \cdot L$ donde W = trabajo de fractura y L = longitud de la grieta. Nótese que esto

¹² De nuevo véase *La Nueva Ciencia de los Materiales Fuertes* (segunda edición) capítulo 8.

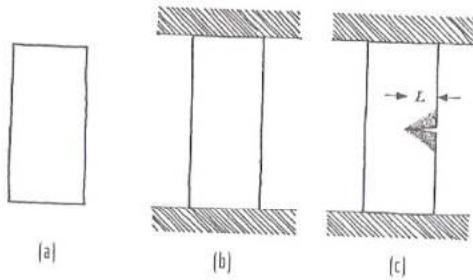
representa un gasto para una cantidad fija de energía, y que de hecho no puede pedir ningún préstamo adicional.

Este gasto crece linealmente o, lo que es lo mismo, proporcionalmente a la longitud L de la grieta.

Debe encontrarse inmediatamente esta energía en los recursos internos del material, y como el sistema es cerrado, sólo puede obtenerse disminuyendo la cantidad de energía de deformación total del sistema. En otras palabras, en alguna zona de la pieza deben bajar las tensiones.

Figura 11.

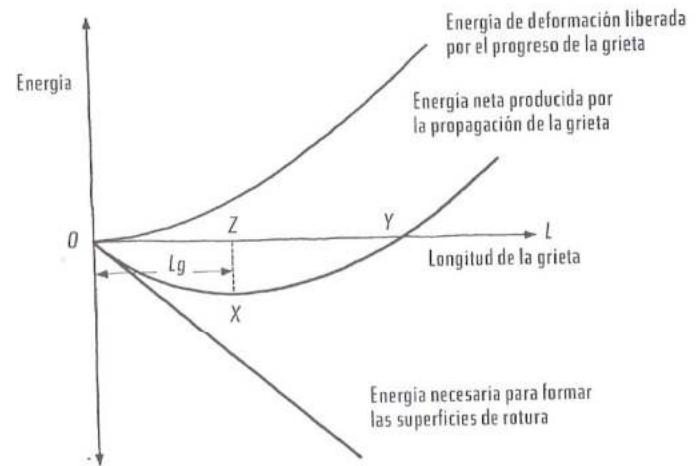
a) El material sin deformar
b) El material deformado y fijado rígidamente. No puede salir ni entrar ninguna energía del sistema.
c) En el material deformado aparece una fisura. Las zonas de puntos se relajan y proporcionan energía de deformación, que puede utilizarse para propagar la grieta.



Esto puede conseguirse si la grieta se abre debido a las tensiones y por tanto la parte de material que se encuentra detrás de la grieta, se relaja (figura 11). De forma aproximada, dos zonas triangulares —que son las que están sombreadas en la figura— proporcionan energía de deformación. Como puede esperarse, sea cual sea la longitud de L de la grieta, las zonas triangulares mantendrán proporcionalmente la misma forma, y por tanto sus áreas aumentarán con el cuadrado de la longitud de la grieta, es decir, con L^2 . Así, la liberación de energía de deformación crece con L^2 .

Podemos ver que el corolario de todo el principio de Griffith es que, mientras que la necesidad de energía de la grieta crece con la longitud L , la provisión de energía que el material da a la

grieta crece con L^2 . Las consecuencias de esto se muestran gráficamente en la figura 12. OA representa las necesidades crecientes de energía que surgen a medida que la grieta se extiende, y es una línea recta, OB representa la cantidad de energía que se libera a medida que la grieta se propaga, y es una parábola. El balance neto de energía es la suma de los dos efectos y está representado por OC .



Hasta el punto X todo el sistema está consumiendo energía; a partir del punto X empieza a liberarse energía sobrante. De esto se deduce que existe una longitud crítica de grieta, que llamaremos L_g , y que se llama longitud crítica de grieta de Griffith. Si la grieta es más corta que esta longitud, será segura y estable; si la grieta es más larga se propagará por sí misma y será muy peligrosa¹⁵. Este tipo de grietas se propaga cada vez más deprisa a través del material e inevitablemente lleva a un colapso "explosivo", ruidoso y alarmante. La estructura se acabará con una explosión, no con un gemido, y muy posiblemente con un funeral.

Figura 12. La liberación de la energía de Griffith, o porqué las cosas quiebran.

¹⁵ Podría parecer que L_g corresponde a OY en el diagrama, pero si pensamos un poco nos daremos cuenta de que no es verdad. La cantidad de energía negativa, Z , con la que debemos alimentar el sistema para seguir propagando la grieta representa el margen de seguridad (esto es, el verdadero "coeficiente de seguridad").

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

La consecuencia más importante de todo esto es que, aun si la tensión local cerca del extremo de la grieta es muy alta —aun si es mucho más alta que la tensión de rotura "oficial" del material— la estructura continúa siendo segura y no romperá mientras que las grietas o las aperturas tengan una longitud menor que la longitud crítica L_g . Este principio es el que nos da la principal defensa contra las alarmas indebidas y las desesperaciones que pueden producir las concentraciones de tensiones de Inglis. Es la razón por la que los agujeros, las grietas y las raspaduras son menos peligrosas de lo que parecían.

Naturalmente, querríamos ser capaces de poder calcular L_g numéricamente. Como puede demostrarse, por razones elementales, es mucho más sencillo de lo que razonablemente podría esperarse. Aunque el razonamiento matemático que siguió Griffith para obtenerlo puede ser descrito como ligeramente alarmante, el verdadero resultado final es tremendamente sencillo, en verdad brillantemente sencillo, porque:

$$L_g = \frac{1}{\pi} \times \frac{\text{Trabajo de fractura por unidad de superficie de grieta}}{\text{Energía de deformación almacenada por unidad de volumen de material}}$$

O, puesto en forma algebraica¹⁴:

$$L_g = \frac{2WE}{\pi S^2}$$

Donde: W = trabajo de fractura en J/m^2 para cada superficie
 E = módulo de Young en newtons/ m^2
 S = tensión media a tracción del material cerca de la grieta (sin tener en cuenta concentraciones de tensión) en newtons/ m^2
 L_g = longitud crítica en metros

Por lo tanto, la longitud de una grieta segura depende sencillamente de la relación entre el valor del trabajo de fractura y la energía de deformación almacenada en el material —en otras palabras, es inversamente proporcional a la "resiliencia". En general, cuanto mayor es la resiliencia, más corta es la grieta que puede permitirse. Es otro de los casos para los que no se pueden pedir dos cosas a la vez.

¹⁴ porque la energía de deformación $= \frac{1}{2} \epsilon \cdot S$, que puede ser escrita como $S^2/2E$ al ser $E = S/\epsilon$.

LA ENERGÍA DE DEFORMACIÓN Y LA MODERNA MECÁNICA DE FRACTURA

Como hemos visto, la goma es capaz de almacenar mucha energía de deformación. Además, su trabajo de fractura es bastante bajo y por tanto la longitud crítica de grieta, L_g , para una goma estirada es bastante corta, normalmente la fracción de un milímetro. Ésta es la razón por la que, cuando pinchamos un globo con una aguja, estalla con un ruido muy satisfactorio. Así, aunque la goma es altamente resiliente y se alargará mucho antes de romperse, cuando se rompe, lo hace de manera frágil, de forma muy parecida a un cristal.

Las telas, los trabajos de cestería, los barcos de madera y los coches de caballos, nos proporcionan una solución al problema de cómo ser a la vez resiliente y dúctil. En todos estos objetos las juntas son más o menos laxas y flexibles y por tanto la energía se absorbe por fricción —ésta es la razón de sus chirridos— Sin embargo, aunque las vallas y los nidos de pájaros son bastante resistentes a los ataques, esta forma de hacer las cosas no es muy utilizada por los ingenieros modernos, excepto quizá en los neumáticos de los coches, donde se libra a la goma de ser inadecuadamente quebradiza incorporándole cubiertas armadas con alambres.

Podemos ver que L_g se acorta muy rápidamente a medida que crece la tensión S . Por lo tanto, si queremos admitir una grieta bien grande con una tensión razonablemente alta, necesitamos un valor de W , el trabajo de fractura, lo más alto posible, es decir, un material muy rígido o lo que es lo mismo con un valor alto de E . Ésta es la razón por la que el acero dulce disfruta de un alto valor de trabajo de fractura combinado con una rigidez muy alta, y como además es lo suficientemente barato, se ha usado tan abundantemente y tiene tanta importancia económica y política.

Aunque, como veremos, existan muchas trampas en la aplicación de la ecuación de Griffith que acabamos de describir, y no queremos que parezca una respuesta enviada por Dios a todos los problemas de proyecto, es de hecho una forma de aclarar muchos problemas estructurales que solían parecer bastante oscuros y llenos de supersticiones. Por ejemplo, en lugar de complicarse la vida con "coeficientes de seguridad" totalmente ficticios, se puede ahora sencillamente intentar proyectar una estructura que admita una grieta de una determinada longitud sin romperse. La longitud de la grieta elegida puede relacionarse con las dimensiones de la estructura y también con las

condiciones probables de inspección y de servicio. Cuando depende de ello la vida humana, es claramente deseable que una grieta "segura" sea lo suficientemente larga para ser visible a un aburrido y bastante estúpido inspector trabajando con mala luz una tarde de viernes.

En una estructura realmente grande, como un barco o un puente, queremos que pueda aparecer una grieta de por lo menos 1 o 2 metros de longitud manteniendo la seguridad. Supongamos que queremos que la estructura pueda mantener una grieta de 1 metro de longitud, entonces, haciendo la hipótesis muy conservadora de que el trabajo de fractura del acero es 10^3 J/m^2 , obtendremos que esa grieta será estable si la tensión no es mayor de 110 MN/m^2 . Sin embargo, si queremos más seguridad y queremos mantener una grieta de 2 metros de longitud, tenemos que reducir la tensión alrededor de 80 MN/m^2 .

De hecho, 80 MN/m^2 es más o menos la tensión con la que se proyectan las estructuras grandes, en el acero dulce esta tensión supone un coeficiente de seguridad (estrictamente hablando, lo que se conoce como "minoración de tensiones") entre cinco y seis, en su valor equivalente. Como ejemplo de lo que ocurre en realidad, de los 4.694 barcos que se inspeccionan en los muelles, 1.289, algo más de la cuarta parte, tenían grietas serias en la estructura del casco —después de lo cual, por supuesto, se pusieron remedios—. El número de los que realmente se parten en dos en altamar, aunque sigue siendo demasiado alto, es más o menos de uno cada quinientos, una proporción bastante pequeña. Si estos barcos se hubiesen proyectado con una tensión más alta, o se hubieran hecho de un material más quebradizo, en la mayoría de los casos las grietas no hubieran sido detectadas antes de que los barcos se rompieran en altamar y se hubieran perdido.

De acuerdo con la pura y simple doctrina de Griffith, una grieta más corta de la longitud crítica no se propagaría nunca y como todas las grietas comienzan su existencia siendo cortas, nada se puede romper. De hecho, debido a toda clase de buenas razones que son el trabajo de los metalúrgicos y de los que se ocupan de las ciencias de los materiales, las grietas de menor longitud que la crítica se las arreglan para extenderse, como veremos en el capítulo 15. Sin embargo, lo importante es que generalmente lo hacen tan despacio que sobra tiempo para detectarlas y poder resolver el problema.

Por desgracia, las cosas no ocurren siempre de esta forma. El profesor J. F. C. Conn, que ha sido profesor de Ingeniería Naval hasta hace muy poco, me contó la historia del cocinero de un carguero que se quedó un poco alarmado cuando fue a su puente una mañana a preparar el desayuno, y se encontró con una larga grieta en medio del suelo. El cocinero avisó al sobrecargo, que fue y observó la grieta y avisó al primer oficial. El primer oficial fue, vio la grieta y avisó al capitán. El capitán fue, vio la grieta y dijo: "Oh, no es nada ¡y ahora puedo desayunar de una vez?".

El cocinero, sin embargo, tenía una mentalidad científica, y cuando terminó con el desayuno cogió algo de pintura, marcó el final de la grieta y escribió la fecha al lado de la señal. Tiempo después el barco sufrió mal tiempo, la grieta se extendió unos cuantos centímetros y el cocinero dibujó una nueva señal y una nueva fecha. Como era un hombre concienzudo lo volvió a hacer varias veces.

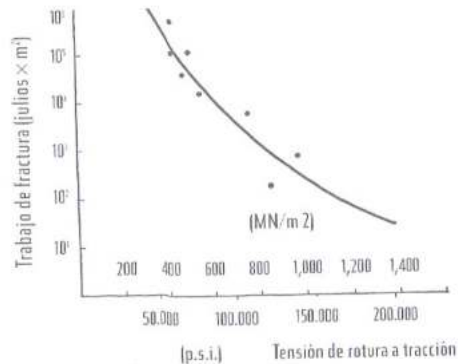
Cuando el barco se partió en dos, la parte que fue rescatada y conducida a puerto resultó ser la del lado en el que el cocinero había escrito las fechas, y esto, me dijo el profesor Conn, es el registro mejor y más fiable que tenemos del progreso de una grieta grande de longitud subcrítica.

Acero "dulce" y acero de "alta resistencia"

Cuando una estructura se cae o parece en peligro de caerse, el instinto natural del ingeniero le conduce a exigir la utilización de un material "más fuerte": si se trata de acero, el que se suele llamar de "mayor resistencia". En el caso de estructuras grandes, esto suele ser generalmente una equivocación, porque está claro que la mayor parte de su capacidad resistente, si se trata de acero dulce, se deja sin utilizar. Esto ocurre, como hemos visto, porque para evitar el colapso de una estructura se debe controlar, no su resistencia, sino la fragilidad del material.

Aunque los valores que se han medido del trabajo de fractura dependen de la forma en que se ha hecho el ensayo, y es difícil obtener valores fiables, es indudable que la ductilidad de la mayoría de los metales se reduce a medida que crece la tensión de tracción. La figura 13 muestra el tipo de relación entre estos dos valores que existe en aceros al carbono normales trabajando a temperatura ambiente.

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN



Es bastante fácil, y no muy caro, duplicar la resistencia de un acero dulce aumentando el contenido de carbono. Si hacemos eso, sin embargo, reducimos el trabajo de fractura a algo parecido a un quinceavo de su valor. En tal caso la longitud crítica de la grieta se reduce en la misma proporción —es decir, de 1 metro a 6 centímetros— para la misma tensión. Sin embargo, si duplicamos la tensión de trabajo, que es presumiblemente lo que nos ocupa, la longitud crítica de la grieta se reduce en $15 \times 2^2 = 60$. Es decir, si la grieta segura tenía al principio 1 metro de longitud, puede medir ahora 1,5 centímetros, lo que puede ser absolutamente peligroso en una estructura grande.

Si se trata de piezas pequeñas como los pestillos o los pernos la cosa es diferente, no tiene sentido proyectarlas para una grieta de 1 metro de longitud. Si fijamos una longitud admisible de grieta de, digamos, 1 centímetro, esta grieta será segura con una tensión de cerca de 280 MN/m^2 , y por tanto es muy razonable utilizar aceros de alta resistencia. Por lo tanto, una de las consecuencias de Griffith es que, en general, podemos usar con más seguridad aceros de alta resistencia y tensiones de trabajo altas en estructuras pequeñas que en estructuras grandes. Cuanto mayor sea la estructura más baja será la tensión de trabajo que podemos aceptar en favor de la seguridad. Es éste uno de los factores que tienden a poner un límite al tamaño de los barcos grandes y de los puentes.

LA ENERGÍA DE DEFORMACIÓN Y LA MODERNA MECÁNICA DE FRACTURA

La relación entre trabajo de fractura y tensión de rotura a tracción que se esquematiza en la figura 13, es básicamente cierta para aceros comerciales al carbono de uso común. Es posible obtener a la vez más resistencia y más ductilidad si usamos "acero de aleación", esto es, aleaciones de acero con elementos que no son carbono, pero esto es en general demasiado caro para las construcciones en gran escala. Por estas razones, algo así como el 98 por 100 del acero que se usa es "acero dulce", es decir, un metal blando dúctil con una tensión de rotura a tracción de alrededor de 450 MN/m^2 .

Sobre la fragilidad de los huesos

Niños, sois muy pequeños / Y vuestros huesos muy frágiles / Si queréis crecer altos y sanos / Debéis andar con cuidado.

B. L. STEVENSON, UN JARDÍN DE POEMAS PARA UN NIÑO.

Por supuesto, los huesos de los niños no son muy frágiles¹⁵, y Stevenson estaba escribiendo un sentido bastante encantador. En el embrión, los huesos empiezan siendo colágeno, o cartilago, que es fuerte y dúctil pero no muy rígido (el módulo de Young es aproximadamente 600 MN/m^2).

A medida que se desarrolla el feto, el colágeno se refuerza con unas delgadas fibras inorgánicas que se llaman osteones. Están formadas principalmente por cal y fósforo y tiene una fórmula química que se aproxima a $3 \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 - \text{Ca}(\text{OH})_2$. En un hueso totalmente reforzado el módulo de Young aumenta treinta veces hasta llegar a un valor de alrededor de 20.000 MN/m^2 . Sin embargo, nuestros huesos no quedan totalmente calcificados hasta mucho tiempo después de la fecha de nacimiento. Los niños pequeños son vulnerables mecánicamente hablando, pero en general tienden a doblarse elásticamente más que a romperse, como se puede observar en cualquier pista de esquí.

Sin embargo, comparados con los tejidos blandos, los huesos son frágiles, y su trabajo de fractura es más pequeño que el de la madera. Esta fragilidad limita los riesgos estructurales que puede aceptar un animal grande. Como ya hemos señalado cuando hablábamos de barcos y maquinaria, la longitud crítica de grieta de Griffith es un valor absoluto, no relativo. Es decir, es

¹⁵ Existen casos en medicina para lo que los huesos de gente bastante joven se vuelven frágiles, pero esto es poco frecuente. Un cirujano ortopedista me contó que las causas de estas patologías no se entienden en absoluto.

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

igual en un ratón que en un elefante. Además, todos los animales tienen aproximadamente huesos de la misma resistencia y rigidez. De esta forma, parece que el tamaño máximo seguro de un animal está alrededor del de un hombre o un león. Un ratón, un gato o un hombre razonablemente entrenado pueden saltar desde una mesa impunemente; es bastante dudoso que pueda hacerlo un elefante. De hecho, los elefantes deben ser muy cuidadosos; raramente se les ve correteando o saltando vallas como las ovejas o los perros. Los animales realmente grandes, como las ballenas, se limitan consecuentemente a vivir en el mar. Un caso que parece interesante es el de los caballos. Cabe suponer que los pequeños caballos salvajes primitivos no se rompían las patas a menudo, pero ahora que el hombre ha criado caballos que son capaces de transportarlo sin cansarse, estos pobres animales parecen estar siempre rompiéndose las patas.

Es sabido que las personas mayores son particularmente propensas a romperse los huesos, esto se atribuye generalmente a que los huesos se vuelven progresivamente frágiles con la edad. No hay duda que esta fragilidad tiene que ver con muchas fracturas, pero no parece que siempre sea el factor más importante. Por lo que yo sé, no existen datos fiables sobre la variación del trabajo de fractura con la edad, pero, dado que la tensión de rotura a tracción se reduce sólo en un 22 por 100 entre los treinta y cinco y los sesenta y cinco años no parece que esta reducción sea dramática. El profesor J. P. Paul, de la Universidad de Strathclyde, me contó que sus investigaciones parecen indicar que la causa más importante de las fracturas en los ancianos es la pérdida progresiva del control nervioso sobre las tensiones de los músculos. Una alarma súbita puede producir una contracción muscular que basta para romper el cuello del fémur, por ejemplo, sin que el paciente haya experimentado ningún golpe externo. Cuando esto ocurre el paciente, naturalmente, se cae al suelo —quizá encima de algún obstáculo— de forma que se echa la culpa de la fractura, equivocadamente, a una caída en lugar de a un espasmo muscular. Se dice que la pierna trasera de cierto antilope africano sufre una fractura similar cuando se asusta repentinamente de un león.

SEGUNDA PARTE:

Estructuras a tracción

CAPÍTULO 6

Estructuras a tracción y depósitos de presión con algunas puntualizaciones sobre calderas, murciélagos y juncos chinos

Que el barco iba más deprisa por el agua, y que le empujaba un viento más fuerte, era seguro; pero justo antes de que alcanzáramos nuestro objetivo, la galería aumentó en intensidad. "Si esto empieza, estamos perdidos, señor", observó de nuevo el primer teniente. "Soy perfectamente consciente de ello" contestó el capitán, en un tono calmado, "pero, como ya dije antes, y usted debe darse cuenta de ello, es nuestra única oportunidad. Las consecuencias de cualquier falta de atención, o de cualquier negligencia en la colocación y la seguridad de los aparejos se natarán ahora; y este peligro, si escapamos de él, le ayudará a recordar la responsabilidad que tenemos si descuidamos el cumplimiento de nuestras obligaciones."

CAPITÁN MARRYAT, PETER SIMPLE

Las estructuras más fáciles de comprender son normalmente aquellas que deben sólo resistir fuerzas que producen tracciones —fuerzas que tiran en lugar de empujar— y, de éstas, las más sencillas de todas son aquellas que deben resistir una sola fuerza, en otras palabras: tracción unidireccional, el caso básico de un cable o una cuerda. Aunque puede observarse algún caso de tracción unidireccional en las plantas —especialmente en sus raíces— los mejores ejemplos biológicos pueden encontrarse en los músculos y los tendones de los animales o también en las cuerdas vocales y las telas de araña.

Los músculos son tejidos blandos que, cuando reciben una señal nerviosa, son capaces de acortarse y producir fuerzas de tracción tirando de forma activa¹. Sin embargo, aunque los músculos son instrumentos más eficaces que cualquier máquina artificial para transformar la energía química en trabajo mecánico, no son muy fuertes. Por tanto, para producir o soportar cualquier tracción mecánica, los músculos deben ser gruesos y abultados. En parte por esta razón los músculos están fijados a los huesos, que manipulan mediante una pieza de tracción con forma de

¹ Recientemente se ha comprendido el mecanismo muscular. Funciona alimentando energía a las dislocaciones de borde que operan, como si dijéramos, a la inversa. Sobre dislocaciones de borde véase *La Nueva Ciencia de los Materiales Fuertes*, capítulo 4.

tirante compuesta de tendones. Aunque un tendón es incapaz de contraerse, es varias veces más fuerte que un músculo y por tanto sólo necesita una pequeña fracción de su sección transversal para soportar una tracción dada. Así, la función de un tendón es en parte la de una cuerda o un cable, aunque también funciona como una suspensión, como vimos en el capítulo anterior.

Aunque algunos tendones son bastante cortos, muchos de los que tenemos en nuestros brazos y nuestras piernas son realmente muy largos, y recorren el cuerpo de una forma casi tan complicada como los cables de un viejo carillón victoriano. En el caso particular de nuestras piernas los músculos no sólo son abultados, sino que son pesados, y la razón de esto parece ser el conseguir que el centro de gravedad de nuestras piernas esté lo más alto posible en el cuerpo. El objetivo de esto es que, cuando caminamos normalmente, las piernas funcionen como un péndulo oscilando libremente en su período natural y por tanto consumiendo la menor energía posible. Debido a que tenemos que forzar nuestras piernas a oscilar de manera más rápida que su frecuencia natural, nos cansamos tanto corriendo. El período natural de oscilación de nuestras piernas será tanto más rápido cuando más cerca esté el centro de gravedad de este miembro de la rótula superior del muslo. Ésa es la razón por la que tenemos pelvis y fémures gruesos y, especialmente, pies y tobillos pequeños.

Sin embargo, los pies grandes no son una desventaja tan importante en la lucha por la vida como las manos grandes, diga lo que diga la gente de los policías. Nuestros brazos, por supuesto, han evolucionado a partir de las piernas, y parecen haber llevado el proceso de control remoto aún más lejos. De esta manera, por medio de unos tendones aún más largos y finos que los que existen en nuestras piernas, nuestras manos y nuestros dedos son manejados por músculos que están muy alejados, en la parte alta de nuestros brazos. Así, las manos pueden tener proporciones mucho más esbeltas de las que tendrían si tuviesen que contener sus propios músculos. Las ventajas de esta disposición desde el punto de vista mecánico —y quizá estético— son obvias.

En las estructuras artificiales pueden encontrarse bastante casos de tracción unidireccional, como los hilos de pescar o las cargas que cuelgan de las grúas. Difieren muy poco del problema

del ladrillo y la cuerda que estudiamos en el capítulo 3. Sin embargo, muchos de los casos más interesantes, como los aparejos de un barco o el diseño de los funiculares, pueden ser oscurecidos por incertidumbres y complicaciones.

Si empezamos por el aparejo de un barco puede, por supuesto, no encontrarse ninguna dificultad en determinar el grueso seguro de una cuerda, suponiendo que se conocen las cargas que debe soportar. El problema está en predecir los valores de las distintas fuerzas que actúan en algo tan complicado como un barco de vela. Aunque existen varias formas de abordarlo, tengo la vehemente sospecha de que la mayoría de los diseñadores de barcos prefieren apoyarse en lo que podría ser descrito como supuestos experimentados. Sin embargo, más vale que estas suposiciones sean correctas, porque la rotura de una parte vital del aparejo puede producir la pérdida de un mástil. Si esto ocurre y el barco queda atrapado en una peligrosa arribada a puerto, como la fragata de Marryat, las consecuencias pueden ser serias.

En nuestros días esquiar es una gran industria internacional que depende de la seguridad de muchos cientos de telesquís y funiculares. Supongo que a muchos de nosotros nos habrá preocupado, en los momentos más vertiginosos, la resistencia de los cables que soportan telesquís y funiculares cuando estamos encima de algún barranco. En realidad, los accidentes se deben muy raramente a la rotura por tracción de alguno de estos cables. Esto se explica porque en este caso las cargas estáticas se conocen con mucha exactitud, y no es difícil hacer los números necesarios y asegurarse con un coeficiente de seguridad amplio. Aparecen riesgos mayores debido a causas como que la excesiva oscilación de los cables producida por el viento, haga que las cabinas choquen unas contra otras o contra los pilones que las soportan. En este caso, los proyectistas parecen de nuevo confiar principalmente en el precedente y la experiencia.

Una aplicación muy diferente de la teoría de la tracción unidireccional es la relacionada con los instrumentos musicales de cuerda. La frecuencia ² de la nota musical que produce una cuerda tensada depende, no sólo de su longitud, sino de la tensión de tracción que soporta. En los instrumentos de cuerda se producen las tensiones apropiadas acortando las cuerdas —que están

² El número de oscilaciones por segundo (es decir, la frecuencia) de una cuerda tensada puede ser descrita por:

$$n = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{S}{\rho}}$$

donde: l = longitud de la cuerda (metros)

ρ = densidad del material de la cuerda (kg/m^3)

S = tensión de tracción de la cuerda (N/m^2)

hechas de un material rígido, como el cable de acero o el cuero— contra un armazón apropiado, que puede ser el cuerpo de madera de un violín o el armazón de fundición de un piano. Como las cuerdas y el armazón son rígidos, unos alargamientos pequeños varían enormemente las tensiones de las cuerdas y, por consiguiente, la frecuencia de sus notas. Es ésa la razón por la que estos instrumentos tienen tanta sensibilidad al afinado. Es también la razón por la que se puede utilizar la nota emitida por una cuerda cuando se le pellizca, para medir la tracción que soporta el material. El ejército romano solía pedir que los oficiales que se hacían cargo de las catapultas tuviesen buen oído musical, de forma que pudiesen comprobar la tensión que sufrían las cuerdas de tendón de estas armas cuando estaban tensadas y listas para ser utilizadas.

Aunque la voz humana difiere en bastante de los instrumentos de cuerda, se pueden aplicar a este caso reflexiones parecidas. Los mecanismos que producen la voz humana son bastante complicados, pero nuestra laringe desempeña un papel importante en el canto y el habla. Puede ser interesante señalar que los distintos tejidos de la laringe están entre los pocos tejidos blandos del cuerpo que siguen de forma apropiada la ley de Hooke; la mayoría de los tejidos del cuerpo obedecen a leyes propias bastante diferentes y extrañas, como veremos en el capítulo 8.

La laringe contiene las "cuerdas vocales", que son tiras o pliegues de tejido cuya tensión de tracción puede variarse mediante la tracción muscular para controlar la frecuencia con la que vibran. Como el módulo de Young de los pliegues vocales es bastante bajo, deben producirse grandes deformaciones unitarias para conseguir las tensiones necesarias: se alargan, de hecho, hasta un 50 por 100 cuando se quieren conseguir notas altas.

Por cierto, las frecuencias más altas de las mujeres y los niños están producidas, no por tracciones más altas en las cuerdas vocales, sino sencillamente por el hecho de que sus laringes son más pequeñas y por tanto las cuerdas vocales más cortas.

Existe a este respecto una diferencia sorprendente entre los hombres y las mujeres adultas: se han medido laringes de alrededor de 36 milímetros en hombres frente a alrededor de 26 en mujeres. Sin embargo, las laringes de los niños y las niñas son de tamaño muy similar hasta la

pubertad. El cambio de voz en los niños no se debe a ninguna variación en la tracción de las cuerdas, sino a un súbito aumento del tamaño de la laringe alrededor de los catorce años.

Tuberías y depósitos de presión

Las plantas y los animales pueden ser considerados en gran parte como sistemas de tubos y vejigas que contienen y distribuyen distintos tipos de líquidos y gases. Aunque las presiones de los sistemas biológicos no son normalmente muy altas, no son de ninguna manera despreciables, y los depósitos y membranas pueden reventar de vez en cuando, muchas veces con resultados fatales.

La obtención tecnológica de depósitos de presión seguros es un logro bastante moderno y pocas veces nos paramos a pensar cómo nos las arreglaríamos sin usar tuberías. Debido a la carencia de tuberías que pudiesen transportar líquidos a presión, los romanos tuvieron que realizar enormes gastos construyendo acueductos de fábrica sobre altos arcos, para conducir agua a través de canales abiertos en terrenos ondulados. Lo más parecido a contenedores de presión estancos que se empezó a construir, fueron los tubos de los cañones, e históricamente nunca fueron muy satisfactorios, y fallaron con bastante frecuencia. La lista de las personas que han muerto por el estallido accidental de un cañón, del rey Jacobo II de Escocia en adelante, sería larga e impresionante. En cualquier caso, cuando se empezó a instalar la luz de gas en Londres, poco después del 1800, las tuberías tuvieron que ser fabricadas por los armeros de Birmingham que fabricaban cañones, y de hecho las primeras tuberías de gas estaban hechas con cañones de mosquete soldados entre sí.

Aunque existen innumerables relatos de la historia de la máquina de vapor, se ha escrito relativamente poco del desarrollo de las tuberías y las calderas de las que aquella dependía, y que, en realidad, presentan problemas más difíciles que el mecanismo en sí. Las primeras máquinas eran muy pesadas, abultadas, y consumían una enorme cantidad de combustible, principalmen-

te porque trabajaban con presiones de vapor muy bajas, lo que también coincidía con la naturaleza de las calderas de aquella época.

La fabricación de maquinaria que fuese ligera, compacta y a la vez más económica dependía enteramente de la utilización de presiones de trabajo mucho más altas. En los barcos de vapor de 1820, con presiones de vapor de alrededor de $0,07 \text{ MN/m}^2$ —producida por calderas cuadradas— el consumo de carbón era alrededor de 15 libras por caballo de vapor a la hora. En 1850 los ingenieros seguían hablando de 15 MN/m^2 y de 9 libras por caballo de vapor a la hora. Hacia 1900, las presiones habían subido hasta 150 MN/m^2 y el consumo de vapor había caído a 1,5 libras por caballo de vapor a la hora —una reducción a la décima parte en ochenta años—. No fue el barco de vapor, como tal, el que expulsó a los veleros de altamar, sino el barco de vapor de *alta presión* con maquinaria de triple expansión, calderas "Scotch", costos bajos de combustible, y gran autonomía.

La caldera de alta presión no fue desarrollada sin incidentes. A lo largo de casi todo el siglo XIX fueron relativamente frecuentes las explosiones y sus consecuencias fueron a veces muy terribles. Los vapores de río americanos, en particular, fueron los pioneros en el trabajo a alta presión. Durante la mitad del siglo los vapores del Misisipi solían regalarse con carreras escalofriantes a lo largo de miles de millas de río. Los proyectistas de estos barcos estaban preparados a sacrificar casi cualquier cosa a la velocidad y la ligereza, y tomaron lo que podría calificarse caritativamente como una actitud optimista frente al proyecto de calderas.

El resultado fue, que sólo entre 1859 y 1860, se perdieron veintisiete de esos barcos debido a explosiones de calderas³.

Aunque algunos de estos accidentes se debían a prácticas criminales como bloquear las válvulas de seguridad, la mayoría se debía a la falta de cálculos adecuados. Fue una pena porque en realidad los cálculos básicos que se necesitaban para obtener las tensiones en depósitos de presión sencillos son muy fáciles, tan fáciles en realidad que, por lo que he podido encontrar, nadie se ha atribuido el mérito de haberlos descubierto, y solo se necesitaba para desarrollarlos el tipo más elemental de álgebra⁴.

³ Pero también, durante el mismo periodo, fueron destruidos por el fuego ochenta y tres vapores, por chocar con árboles hundidos ochenta y ocho, y setenta por "otras causas". Parece que la vida en el Misisipi, en los días de los vapores, no era pobre en incidentes.

⁴ Mariette obtuvo una solución parcial alrededor de 1680, pero por supuesto era incapaz de utilizar el concepto de tensión.

Depósitos de presión esféricos

Si empezamos a estudiar cualquier tipo de depósito o contenedor a presión —lo que incluye cosas tales como globos, vejigas, estómagos, tuberías, calderas y arterias— tenemos que trabajar con tensiones de tracción que actúan en una o dos direcciones a la vez. Esto puede posiblemente parecer complicado pero no debe producir, de hecho, ninguna alarma. La piel de cualquier depósito de presión realmente cumple dos funciones. Tiene que contener un líquido siendo estanco al agua o al gas, y además tiene que soportar las tensiones producidas por la presión interna. Casi siempre esta piel o lámina está sometida a tensiones de tracción actuando en dos direcciones de su plano o, lo que es lo mismo, paralelas a su superficie. La tensión en la tercera dirección, la que es perpendicular a su superficie, es despreciablemente baja y se puede olvidar. Es conveniente estudiar en primer lugar los depósitos de presión esféricos. Podemos suponer que la piel o lámina del objeto con forma de vejiga de la figura 1 es razonablemente delgada, digamos que un espesor de menos de un décimo del diámetro. El radio de la lámina, midiéndolo desde la mitad del espesor de su pared, es r . El espesor de la pared o lámina es t y todo está sometido a una presión interna debido al fluido que contiene de P (estando todo expresado en cualquiera de las unidades que queramos patronizar).

Si nos imaginamos que cortamos el objeto en dos, como un pomelo, entonces está bastante claro si nos fijamos en las figuras 1, 2 y 3 que la tensión de la lámina —en todas las direcciones paralelas a su superficie— debe ser:

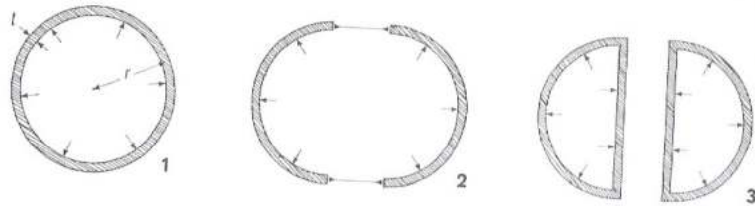
$$S = \frac{rP}{2t}$$

Este resultado es útil y práctico, y es de hecho una fórmula clásica en la práctica de la ingeniería.

Figura 1. Un depósito esférico con presión interna P , radio medio r , y espesor de pared t .

Figura 2. Imaginemos el depósito partido en dos a lo largo de cualquier diámetro. La resultante de toda la presión que actúa dentro de cada medio depósito debe igualar la suma de las tensiones que actúan en la sección plana de la lámina cortada, cuya superficie es: $2\pi r t$.

Figura 3. La resultante de todas las presiones que actúan contra la parte curva de media esfera debe ser igual, por equilibrio, a la de las que actúan contra el plano de contorno circular que se obtiene al cortar en dos la esfera, cuyo valor debe ser: $\pi r^2 P$.



Por tanto:

$$\text{la tensión } S = \frac{\text{carga}}{\text{área}} = \frac{\pi r^2 P}{2\pi r t} = \frac{\pi P}{2t}$$

De la figura 4 podemos deducir que la tensión S_1 , a lo largo del cilindro debe ser la misma que la de los bordes semiesféricos, o planos, es decir debe ser:

$$S_1 = \frac{rP}{2t}$$

Depósitos de presión cilíndricos

Los contenedores esféricos tienen su utilidad, pero claramente los depósitos cilíndricos tienen aplicaciones más amplias, en especial para objetos como tuberías y conductos. La superficie del cilindro no tiene ya la misma clase de simetría que la de la esfera y por lo tanto no podemos suponer que la tensión en un cilindro es la misma que en una esfera del mismo radio; y de hecho no lo es. Supongamos un depósito cilíndrico que termina a cada lado en dos bordes semiesféricos o en dos bordes planos, y que llamamos S_1 a la tensión dentro del espesor del cilindro que actúa en la dirección de las directrices rectas y S_2 a la tensión que actúa en la dirección de las circunferencias.

Para obtener S_2 , la tensión circunferencial, cortamos ahora, imaginariamente, por otro plano, como en la figura 5, de donde podemos deducir que:

$$S_2 = \frac{rP}{t}$$

Por tanto, la tensión circunferencial que actúa en el espesor de un depósito cilíndrico es doble de la tensión longitudinal, es decir: $S_2 = 2S_1$. (figura 6).

Una de las consecuencias de esto podría haber sido deducida por cualquiera que fría una salchicha. Cuando se sale el relleno de la salchicha porque revienta su piel, la rotura es casi siempre longitudinal. En otras palabras, la piel se rompe debido a la tensión circunferencial, no a la tensión longitudinal.

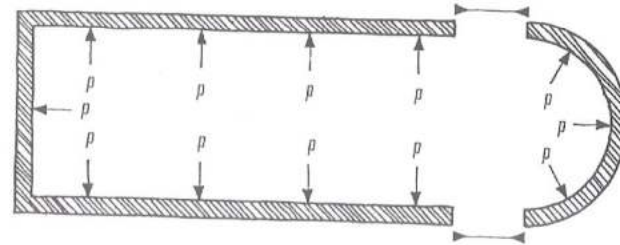


Figura 4. La tensión longitudinal, S_1 , en el espesor de un depósito de presión cilíndrico es la del depósito esférico equivalente

$$S_1 = \frac{rP}{2t}$$

Estos números están continuamente apareciendo en ingeniería y en biología. Se usan para calcular la resistencia de tubos y calderas, de globos, de cubiertas hinchables, de cohetes y de naves espaciales. Como veremos en el capítulo 8, esta misma sencilla teoría se aplica a todo el problema de la evolución de las formas de vida tipo ameba, a seres vivos primitivos más alargados y más móviles.

Otra consecuencia del álgebra que hemos utilizado es que contener un volumen de fluido dado a una determinada presión requiere un volumen mayor de material si utilizamos un depósito cilíndrico que si usamos uno esférico. En los casos en que el peso es importante —como las

Figura 5. Tensión circunferencial en un cilindro, S_c :

$$S_c = \frac{rP}{t}, \text{ ya que}$$

$$S_c = \frac{\text{carga}}{\text{área}} = \frac{2rPl}{2lt}$$

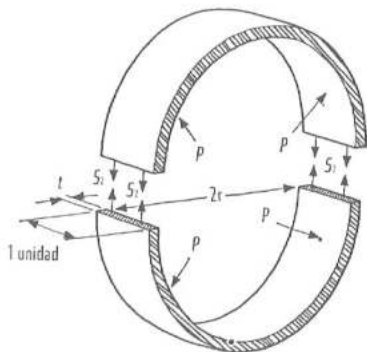
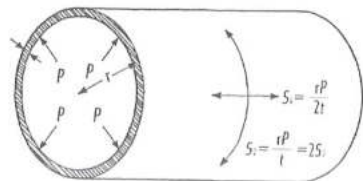


Figura 6. Tensiones en el espesor de un depósito cilíndrico.



botellas de oxígeno que usan los escaladores a gran altura o los depósitos de los aviones— lo usual es utilizar depósitos esféricos. Para la mayoría de los otros usos, donde el peso no es un problema importante, las botellas cilíndricas son más adecuadas y más baratas. Las botellas de gas que se usan en los hospitales y los garajes pertenecen a esta familia.

Ingeniería China o mejor hincharse que reventar

Existe un problema interesante que debe ser resuelto por el proyectista de cualquier nave a vela. Éste es: ¿Cuál es el mejor método para impedir en un barco que salten volando los mástiles por la borda? La opinión sobre este punto está dividida. Existen dos escuelas de pensamiento: la Occidental y la Oriental. En la Occidental creemos que el mejor sistema de mantener los mástiles dentro del barco es fijarlos rigidamente en su posición por medio de un complicado sistema de cabos y aparejos. Los discípulos de la Escuela Oriental sostienen que esto no tiene sentido, además de ser muy caro. Colocan un mástil alto y frágil sujeto en su base, le añaden grandes superficies, telas de saco, tejidos de bambú, o cualquier otra cosa que encuentren a mano y mantienen todo en pie con el poder de la fe. Al menos, no he podido descubrir ningún otro poder que pueda interesarse en este milagro.

WENSTON MARTYR. EL MARINO DE LOS MARES DEL SUR

La teoría de los depósitos de presión, que acabamos de deducir, también se aplica, con modificaciones mínimas, a objetos diferentes de los contenedores cerrados: esto es, a membranas y tejidos abiertos que deben soportar la presión del flujo libre del viento o del agua. A esta familia pertenecen las tiendas de campaña, los milanos, los sombreros, los aviones con alas de tela, los paracaídas, las velas de los barcos, los molinos de viento, los tímpanos de los oídos, las aletas de los peces, las alas de los murciélagos y los pterodáctilos y las velas de la medusa llamada "guerrero portugués".

En todas estas aplicaciones es útil y económico (como veremos en el capítulo 14) no usar paneles rígidos, láminas o cascarones sino cubrir un entramado de barras, estacas o huesos con algún tipo de tela, piel o membrana flexible. Esta estructura no puede ser muy rígida, y debe tenerse en cuenta que, tan pronto como una carga lateral actúe contra la membrana debido a la presión del viento o el agua, debe flechar o doblarse tomando una forma curva que, en una primera aproximación, puede ser estudiada como una parte o segmento de una esfera o un cilindro, y en la que por tanto las tensiones dentro de la membrana obedecen las mismas leyes que las de una lámina o un depósito a presión.

De esto se puede inferir fácilmente que fuerza o tracción dentro de la membrana, por unidad de espesor, es $p \cdot r$, el producto de la presión del viento (p) por el radio de la curvatura de

la membrana (r). Así, cuanto más fuertemente curvada esté la membrana menor será su esfuerzo interno.

Cuando sopla el viento, la presión producida por el viento aumenta con el cuadrado de la velocidad de éste. Con un viento fuerte la presión en la membrana se vuelve verdaderamente muy alta y también, por tanto, las cargas sobre la estructura que la soporta. De acuerdo con la forma de pensar de la escuela Occidental de ingeniería, poco podemos hacer para remediar esto, porque preferimos morir antes de permitir a una membrana—sea un vela, una pieza de aeroplano o cualquier otra cosa—hincharse de forma apreciable entre sus soportes. Por supuesto, nunca podremos conseguir mantener la tela perfectamente plana, pero hacemos lo que sea para mantenerla tan tensa como sea posible. Lo que estamos haciendo en realidad es construir un entramado sustentante fuerte, pesado y caro con la esperanza de que no se rompa—lo que por supuesto ocurre a menudo—.

Por ejemplo, el aparejo que se ha diseñado para los veleros de regata modernos consiste en mástiles tubulares metálicos y velas casi inextensibles de terileno. Este mecanismo aerodinámico se mantiene en pie a base de muchas cuerdas y cables que, a su vez, están tensadas en un grado espantoso por medio de cabrestantes, ruedas y gatos hidráulicos, todos los cuales deben vérselas con enormes cargas producidas por las velas cuando el barco está navegando velozmente bajo el impulso del viento. Todo esto es un milagro de la "eficacia" de la ingeniería occidental, pero también es horriblemente caro. Los barcos de este tipo transmiten a sus ocupantes una sensación de tensión que es todo menos tranquilizadora.

Una forma más sencilla y más económica de resolver el problema sería el conseguir que las velas se hinchen entre los soportes de forma que, a medida que aumenta la presión del viento, el radio de curvatura disminuya, y por tanto la tracción de la membrana se mantenga básicamente constante sea cual sea la intensidad de la fuerza del viento. Naturalmente, se debe estar seguro de que las deformaciones que ayudan a disminuir los problemas estructurales no producen problemas aerodinámicos.

Una forma elegante y satisfactoria de conseguirlo fue la que inventaron los chinos, que, después de todo, han estado navegando por los mares en moderadas condiciones de comodidad y seguridad durante muchos siglos.

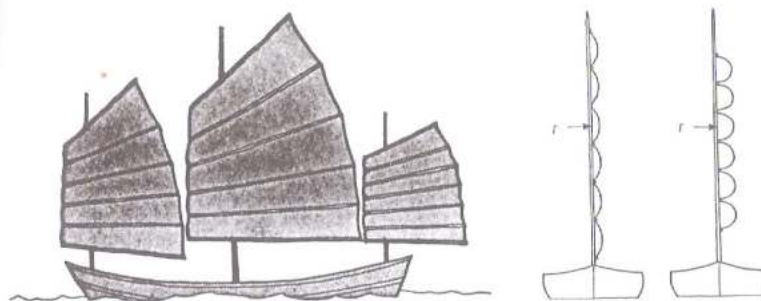


Figura 7. Aparejo de un junco chino.

Figura 8. Perfil de un velero de junco con la driza aflojada.

El aparejo de un junco chino tradicional puede variar según los usos locales, pero a grandes rasgos se parece mucho al de la figura 7. Las vergas que cruzan la vela están fijadas a los mástiles y, como todo el aparejo está construido con materiales flexibles, a medida que aumenta la fuerza del viento, la vela se hincha entre las vergas en la forma de la figura 8 sin una gran pérdida de eficacia aerodinámica. Si no se hincha lo suficiente es bastante fácil aflojar la cuerda que fija la posición de las vergas hasta conseguir que las ondas de la vela adquieran la suficiente curvatura y, al acortar la superficie de viento que recoge la vela, rebajar el empuje sobre el mástil. Recientemente, el coronel Blondie Hasler (conocido por la regata de Burdeos) ha utilizado el sistema de velas chino con resultados muy satisfactorios. Varios veleros con el aparejo del coronel Hasler han realizado largos viajes oceánicos con éxito y de una manera relativamente relajada. Los parapentes, que son ahora tan populares, están proyectados siguiendo los mismos principios y, aunque pueden escandalizar a los tradicionalistas, son baratos y fuertes y parecen funcionar.

Murciélagos y pterodáctilos

Toma de un demonio su cara deforme, sus agudas/orejas de un gnomo, pide prestada la nariz/de un duende y escóndela cuidadosamente, cose/unos dedos desahorados a la muñeca de un fantasma;/lava un pergamino transparente entre ellos /fija piernas para espatarrarlas con rodillas/aidecuados a un cuerpo de terciopelo.

DOUGLAS ENGLISH (PUNCH, 11 DE JULIO DE 1923)

La semejanza entre un murciélago y un junco chino salta a la vista (figura 9). En todos los murciélagos se construyen las alas tensando una membrana de piel muy flexible contra un entramado de huesos largos y finos que son, en esencia, los huesos de una mano. Los murciélagos comedores de fruta, por ejemplo, son animales bastante grandes, con una envergadura de alas de algo más de un metro. En su India natal, donde son una plaga, no es nada para ellos volar durante cincuenta o sesenta kilómetros en una noche para robar un huerto de frutas. Como pueden hacer esto sin sentirse excesivamente exhaustos podemos deducir que son máquinas de volar muy eficaces. Además, para ahorrar peso, y lo que se llama "coste metabólico", han avanzado mucho en la técnica de adelgazar los huesos de sus alas.

Se puede comprobar, cuando se fotografía un murciélago en pleno vuelo, que cuando baja las alas la membrana de piel se hincha tomando una forma aproximadamente semicircular, minimizando las tensiones en las alas. Está claro que en la práctica hay una pérdida aerodinámica pequeña o nula como consecuencia de este cambio de forma.

El lugar de los pájaros estaba ampliamente ocupado hace aproximadamente 30.000.000 de años por una gran familia de seres vivientes volantes que se llamaban pterodáctilos (alas de dedo). Muchos de ellos parecían murciélagos, excepto en que sólo un dedo, el dedo pequeño, tenía función estructural. Así, el ala membranosa de los pterodáctilos se parecía a una vela latina sin vergas.

Algunos de estos animales eran muy grandes. Los restos fósiles del pteranodón, por ejemplo, que se han encontrado nos muestran que este animal llegaba a los 8 metros de envergadura de alas y posiblemente a más. Tenía 3 metros de estatura y parece que su peso total sólo era de alre-

dedor de 20 kilogramos. Había pues poco peso disponible para estructura ósea y para musculatura de alas. Recientemente, han sido descubiertos en América pterodáctilos aún más grandes, alrededor del doble de envergadura del pteranodón.

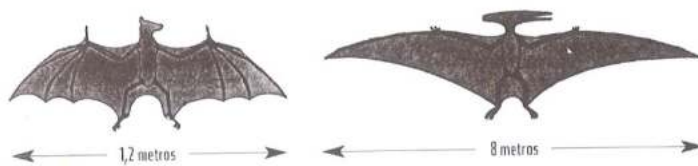


Figura 9. El murciélago comedor de fruta.

Figura 10. Pteranodón.

El pteranodón era probablemente pelágico, es decir, llenaba, hablando de forma aproximada, el nicho ecológico que ahora ocupa el albatros. Como el albatros, parece haber vivido prácticamente siempre en el aire, planeando cerca de las olas de mar adentro y pescando mientras volaba. Aún más que el murciélago comedor de frutas, los huesos de las alas del pteranodón parecen, por lo que indican los restos fósiles, haber sido casi increíblemente finos y frágiles. Por supuesto, nada sabemos de forma experimental sobre la elasticidad de la piel que cubría sus grandes alas, pero parece claro suponer que esta piel se comportaba de forma muy parecida a la de un murciélago. La eficiencia aerodinámica de todo el sistema debía ser alta, y comparable a la del moderno albatros.

¿Por qué los pájaros tienen plumas?

Aunque los murciélagos florecen y sobreviven muy bien en nuestros días, los pterodáctilos fueron superados por los pájaros, que tienen plumas, hace muchísimos años. Es posible, por supuesto, que la extinción de los pterodáctilos no tenga nada que ver con razones estructurales, pero también es posible que las plumas tengan algo especial que den a los pájaros ventaja sobre

los otros seres vivos voladores. Cuando trabajaba para las Reales Fuerzas Aéreas solía preguntar a mis superiores, de vez en cuando, si no sería mejor que los aeroplanos tuviesen plumas, pero jamás conseguí obtener una respuesta racional o ni siquiera paciente a esta pregunta.

Pero, después de todo, ¿por qué los pájaros tienen plumas? Puesto a diseñar un animal volador, un ingeniero moderno podría producir algo parecido a un murciélago, o posiblemente a un insecto volador. No creo que se le ocurra inventar las plumas. Sin embargo, deben presumiblemente existir muy buenas razones para su existencia. Se puede suponer que los murciélagos y los pterodáctilos tienden a perder una gran cantidad de energía en forma de calor a través de la piel de sus alas; pero podría conseguirse un aislamiento térmico razonable a base de pelos.

Quizá es esto lo que ocurrió en las primeras etapas de la evolución de las aves, porque las plumas, como los cuernos y las garras, han evolucionado a partir del pelo. Sin embargo, el pelo es probablemente mejor cuando es blando, y la queratina de la que está hecho el pelo tiene un módulo de Young bastante bajo. La molécula de queratina de las plumas se ha hecho más rígida intercalando en las cadenas moleculares átomos de azufre (lo que se nota en el olor de las alas quemadas).

Existen, sin duda, ventajas aerodinámicas en usar plumas, porque su empleo se extiende a todas las formas exteriores de las que puede hacer uso el animal. Por una razón, las secciones de ala "espesas" son más eficaces desde el punto de vista aerodinámico que las secciones finas de las membranas. Es fácil obtener una sección eficaz "espesa" apilando sobre el perfil de las alas capas de plumas, con poco aumento de peso. Además, las plumas se pueden adaptar mejor que la piel o los huesos para producir instrumentos de estabilidad y frenado como los alerones y los "flaps".

Sin embargo, me inclino a creer que las mayores ventajas de las alas para el animal son de tipo estructural. Cualquiera que haya hecho volar modelos de aviones sabe, a su costa, lo vulnerables que son estas máquinas a las roturas accidentales producidas por árboles y arbustos, y aun a un manejo descuidado. Muchos pájaros están constantemente volando dentro y fuera de

árboles, setos y otros obstáculos. En realidad, usan éstos como refugio para ocultarse de sus enemigos. Para la mayoría de los pájaros no es muy importante perder unas cuantas plumas. Además, es mejor dejar al gato con la boca llena de plumas que ser comido.

Las plumas permiten a los pájaros no sólo librarse de más arañazos y abrasiones locales que otros animales, sino que el cuerpo del pájaro está protegido de un daño más serio por una armadura espesa y resistente. La armadura japonesa de plumas que se puede contemplar en los museos no era, como podría suponerse, un absurdo pintoresco de un pueblo primitivo que no conocía nada mejor. Era una protección eficaz contra armas como las espadas. Del mismo modo, durante la guerra Ruso-Finlandesa, los trenes finlandeses acorazados estaban protegidos por pacas de papel; y las botas a prueba de corte que usan los pilotos de combate modernos están hechas de muchas capas de celofán. Cuando un halcón mata un pájaro, no lo hace normalmente hiriéndole con su pico o sus garras, que probablemente no pueden atravesar las plumas. Le mata dándole un golpe en la espalda adelantando sus patas, lo que produce en el pájaro una violenta aceleración global que tiene el efecto de romperle el cuello, de forma parecida a lo que le ocurre a un ahorcado en el patíbulo.

Toda la constitución y la forma de las plumas parece ser algo extremadamente bien pensado. Las plumas no necesitan probablemente ser especialmente fuertes, pero necesitan ser rígidas y a la vez resistentes y producir un alto trabajo de fractura. El mecanismo del trabajo de fractura de las plumas es bastante misterioso; en la fecha en que estoy escribiendo esto, no creo que nadie sepa cómo funciona. Como muchos otros mecanismos de trabajo de fractura, el de las plumas parece tener gran sensibilidad a lo que pueden parecer pequeños cambios. Todo el que haya criado y hecho volar halcones sabe que estos inteligentes, exigentes e irritables pájaros pierden fácilmente sus cualidades. Aun cuando se les alimente y se les dé ejercicio de forma apropiada en cautividad, las plumas de los halcones tienen tendencia a volverse frágiles y romperse con frecuencia. La cura o paliativo a esto consiste en unir las partes rotas de las plumas "entablillándolas". Esto se realiza introduciendo una aguja de doble punta, con un poco de cola, en el con-

ducto interior de los cañones de la plumas. Los detalles de este proceso están descritos en los libros de cetrería del siglo XVI.

Cuando se piensa en la apabullante y costosa frecuencia con la que los coches contemporáneos sufren golpes, perforaciones y rozaduras, se puede conjeturar si no deben aprender alguna lección de los pájaros. A propósito, me han contado que existen en alguna parte de los Estados Unidos enormes cantidades de plumas de gallina indeseadas. Sería bastante bueno que se les encontrara un uso.

CAPÍTULO 7

Las uniones, los atados y la gente también sobre fluencia y ruedas de carro

Y ahora quiero contarles una historia sobre un barco que se construyó durante la guerra. Era un barco de vapor, y se hizo de madera, buena madera; y los hombres que lo proyectaron eran también muy buenos y hábiles artesanos... Empezó su andadura como un hombre que soporta una carga excesiva, y a continuación trapeó y perdió pie (era sólo un pequeño bulto en el suelo); se abrió y se venció a un lado como si fuera una vieja y frágil caja que alguien hubiera pisado. En cinco minutos no quedó nada excepto una mancha flotando de polvo de carbón, con algún trozo de madera y uno o dos hombres despistados danzando en medio de todo aquello. Esto es un relato verdadero; pero lo que quiero resaltar es que el barco estaba construido por carpinteros: carpinteros de armazones, carpinteros de edificios; y no estaba construido de ninguna manera por trabajadores de astilleros

WESTON MARTYR. EL MARINO DE LOS MARES DEL SUR

El vapor de la historia de Weston Martyr se hundió, bastante bruscamente, porque las uniones que se suponía que debían unir su armazón de madera eran demasiado débiles, aunque los carpinteros de edificios que lo construyeron —que eran a su manera gente honesta— estaban presumiblemente satisfechos con ellas. En realidad, cuando un carpintero está construyendo una casa o montando un mueble tradicional tiene la costumbre de hacer juntas que para un ingeniero naval son débiles y altamente ineficaces. Son ciertamente débiles: el que no sean eficaces depende de lo que se está intentando hacer. Los objetivos de un constructor de edificios no pueden ser los mismos que los de un constructor de barcos o aeroplanos.

Se admite quizá con demasiada frecuencia por los ingenieros que una estructura “eficaz” es aquella en la que cada parte y cada junta tiene exactamente la resistencia necesaria para soportar las cargas que actúan sobre ella, de modo que, si se fija la resistencia, se debe conseguir utilizar la mínima cantidad de material y el mínimo de peso. Tal estructura debe, de forma ideal, romperse por cualquier punto con la carga de rotura. O, mejor, como la cabaña de paja del primer

cerdito, romperse por todos los lados a la vez. Realizar algo con este criterio requiere un gran cuidado por parte del ingeniero, ya que el más leve defecto en el proyecto o la realización puede producir un debilitamiento peligroso.

Existen, por supuesto, estructuras que se aproximan a este ideal, notablemente en barcos y aviones, y en algunos tipos de maquinaria en los que ahorrar peso es muy importante. Sin embargo, esto representa una forma especializada e inadecuada de resolver el problema de la eficacia, y no tiene en cuenta la necesidad de rigidez, dejando aparte la necesidad de economía. Las estructuras de este tipo son a veces necesarias, pero siempre son caras de construir y de mantener. Ahorrar peso mediante el perfeccionismo estructural es uno de los factores que hacen que viajar por aire sea un lujo extravagante. Aun en el gran mundo se nota que el costo del espacio útil, por metro cúbico, es alrededor de veinte veces mayor en un barco pequeño que en una casa normal; el costo del espacio en los aviones es aún mucho mayor.

Los constructores de edificios y de juntas tienen el suficiente sentido común para no dedicarse a estructuras extravagantes de este tipo; las casas ya son lo suficientemente caras, y esta gente sabe muy bien que para la mayoría de las ocupaciones normales de la vida el proyecto de una estructura depende más de la rigidez que de la resistencia.

Realmente, la importancia relativa de la necesidad de rigidez contra la de resistencia es la base del problema del costo y de la eficacia de las estructuras. Cuando la necesidad de rigidez predomina sobre la de resistencia, todo el problema se vuelve más fácil y barato. Éste es generalmente el caso de los muebles, forjados, escaleras y edificios en general y también de las cocinas, las neveras, y muchos otros instrumentos: maquinarias pesadas, y algunos de los componentes de los motores de los coches. Estos objetos no se rompen a menudo, pero, si hacemos el material más delgado, las deformaciones, las flechas y la inestabilidad general pueden pronto resultar inaceptables. De esta forma, para ser lo suficientemente rígidas, los distintos componentes del objeto deben ser tan gruesos que las tensiones en su interior deben ser bajas, muchas veces, desde el punto de vista del ingeniero, absurdamente bajas.

De esto podemos deducir que, aunque el material esté plagado de defectos y de concentraciones de tensiones, en las estructuras de este tipo esto carece de importancia y, lo que es más, la resistencia de las juntas está muy lejos de ser crítica; en muchos casos, unos pocos clavos son perfectamente adecuados. Esta clase de cosas es, por supuesto, la base del punto de vista que tiene mucha gente sobre el proyecto. Millones de personas que jamás han oído hablar de la ley de Hooke o del módulo de Young pueden adivinar el espesor que debe tener una mesa o un gallinero, con la suficiente aproximación a base de experiencia y sentido común, y si estas cosas se hacen lo suficientemente rígidas, será muy difícil que rompan bajo las cargas ordinarias, cotidianas.

Aún más, un poco de "holgura" en algunas juntas puede no ser un defecto, y esto es más corriente en una junta tradicional que en una más elaborada. Un cierto grado de flexibilidad puede permitir dispersar las cargas de una forma beneficiosa. Aunque es verdad que los muebles no se rompen a menudo, un buen sistema de intentar conseguirlo es sentarse en una silla en la cual tres patas se apoyan en una alfombra, y la cuarta en el suelo desnudo. En los muebles tradicionales la carga se repartirá entre las cuatro patas mediante la distorsión de las uniones cajeadas: una moderna silla industrial con uniones "eficaces" encoladas se romperá por las juntas, después de lo cual será bastante difícil reparar la silla de forma satisfactoria.

Otra razón para intentar obtener un cierto grado de flexibilidad en las uniones, es que la madera, y a veces otros materiales, cambia de dimensiones con la temperatura y la humedad. La madera se contrae y se dilata en la dirección de la fibra hasta un 5 por ciento y aún un 10 por ciento. Las uniones tradicionales admiten todos estos movimientos por medio de "ineficaces" juntas deslizantes. En el colegio de Churchill teníamos una bonita mesa nueva de banquetes hecha con la madera mejor y más cara, en la que sus uniones fuertes y rígidas habían sido científicamente encoladas. Después de estar colocada unos pocos meses en el salón científicamente calefactado, la mesa se dilató y se rajó por la mitad. El resultado no fue una fisura sin importancia, sino una

grieta de varios metros de longitud capaz de dar cobijo a un gran número de guisantes de diámetro estándar.

Uniones fuertes y gente inconsistente

Muchas de las estructuras populares, en las que se limitan las deformaciones son absolutamente excelentes en una situación adecuada, pero en cuanto les pedimos ahorro de peso, resistencia y movilidad nos podemos encontrar inmersos en toda clase de dificultades, en especial en todo lo que se relaciona con el buen funcionamiento de las uniones entre las partes que las componen. Históricamente, éste ha sido el problema más serio de la construcción de los barcos, los molinos de viento y los molinos de agua. La cualidad más importante de los viejos constructores de barcos y molinos consistía en saber combinar la resistencia suficiente para que la estructura fuese segura con el mínimo de flexibilidad necesaria para permitir "moverse" a la madera. Los viejos constructores de barcos erraban del lado de la flexibilidad, y, aunque sus barcos eran a menudo excesivamente permeables, pocas veces se rompieron realmente en el mar. Fue necesario que entraran en juego las habilidades administrativas de los modernos gobiernos en tiempos de guerra para que se fabricasen barcos de madera que se rompían en pedazos.

Los problemas que presentaban las uniones en barcos y aviones fueron una de las características más relevantes de ambas guerras mundiales. En la Primera Guerra Mundial los americanos construyeron un gran número de barcos de madera —de vapor y de vela— frecuentemente con métodos heterodoxos; y muchos de estos barcos se rompieron. En la Segunda Guerra Mundial construyeron un número aún mayor de vapores de acero soldado, de los cuales aún una mayor proporción rompió, tanto en altamar como en puertos. En Inglaterra, en las dos guerras, se fabricaron unas enormes cantidades de aviones de madera, que siempre parecían tener problemas con las uniones de un género u otro.

En el caso de los aviones esto no era sorprendente del todo, porque recuerdo que me fue mostrado, justo dentro de uniones encoladas, vitales de la estructura principal, en diversas ocasiones:

1. Un par de tijeras
2. Un manual de primeros auxilios (tamaño bolsillo)
3. Ninguna clase de pegamento

En conjunto no creo que la mayoría de estos accidentes fueran producidos por gente subnormal o anormal; me temo que la culpa era de gente muy corriente, y ahí estaba precisamente el problema. Naturalmente, la gente se cansa y se aburre, pero creo que el origen del problema era más profundo que esto. Muy pocos de los que hicieron, o fracasaron al hacer, esas uniones tenían experiencia personal de casos en los que el colapso de una unión produjera un accidente fatal, aunque como colectivo tenían bastante experiencia en fabricar cosas como armarios y cobertizos de jardinería, donde la resistencia de las uniones realmente importaba muy poco. Todos nuestros esfuerzos para persuadirles de que una unión mal hecha era moralmente equivalente a producir una carnicería humana se estrellaban con la tradición popular profundamente arraigada de que era estúpido molestarse por estas cosas, y de que en cualquier caso eso de la resistencia era un tema aburrido. Todo esto no hubiera tenido mucha importancia si no hubiese sido imposible inspeccionar las uniones de forma adecuada una vez realizadas.

Recientemente se han conseguido pegamentos para metales muy eficaces que tienen una gran cantidad de sólidas ventajas técnicas, suponiendo en cualquier caso que las uniones se realicen concienzudamente. Por desgracia, su utilización moderna en la aeronáutica está siendo lastrada por el hecho de que se ha probado la necesidad de un inspector por separado que observe a cada obrero mientras pega la unión —también la de inspectores que inspeccionen a los inspectores—. A pesar de todo esto, me han contado que está aumentando la utilización de pegamentos en la aeronáutica metálica moderna.

La distribución de tensiones en las uniones

Como la función de una unión es transmitir la carga de un componente de la estructura a otro, las tensiones deben de alguna forma salir de una de las piezas del material e introducirse en la pieza contigua, este proceso corre el riesgo de producir fuertes concentraciones de tensiones con el consiguiente debilitamiento de la unión. En cualquier caso, en unas pocas circunstancias favorables, es posible conseguir que las tensiones pasen a través de la junta de forma uniforme de una pieza a otra con muy pequeña o ninguna concentración de tensiones. Éste es más o menos el caso de la unión pegada en diagonal de la madera (figura 1) y la soldadura a tope de los metales (figura 2).

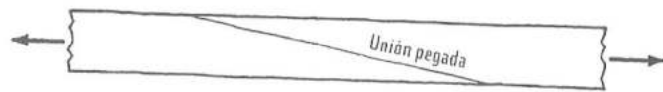


Figura 1. Unión oblicua con pegamento en madera.



Figura 2. Soldadura a tope de metales.

Sin embargo, no siempre es posible usar uniones en diagonal o soldaduras a tope, y es probablemente más habitual usar uniones solapadas entre dos placas o planchas adyacentes. Este tipo de geometría produce de forma inmediata concentraciones de tensiones, y en una unión "rígida" solapada no existe gran diferencia en que la junta esté pegada, clavada, atada, soldada, roblonada o atornillada. En todos los casos la carga debe transmitirse a los dos extremos de la unión.

Debido a esto la resistencia de estas uniones depende mucho de su ancho y poco de la longitud de solape entre las piezas. Ésta es la razón por la que la forma más sencilla y habitual de las uniones atornilladas es la de las figuras 4 y 5, que son razonablemente eficaces y no se pueden mejorar mucho si se complican.

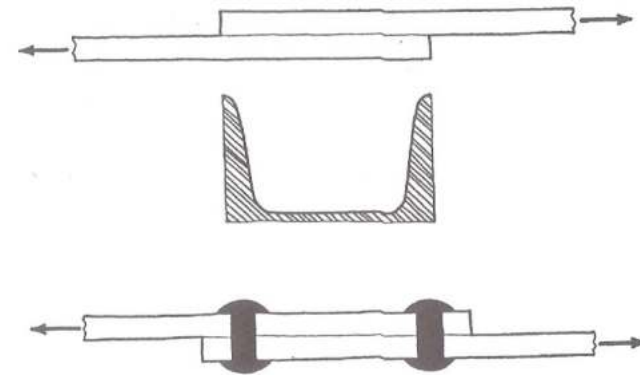


Figura 3. Transmisión de la carga en una unión solapada.

Figura 4. Unión con roblones solapada o soldada entre dos chapas metálicas.

Muy a menudo queremos conseguir un empotramiento en el extremo de una barra o un redondo traccionado en algún tipo de excavación o de cuerpo sólido; de nuevo pueden utilizarse los mismos razonamientos, excepto en que en este caso sólo existe una concentración de tensiones, que habitualmente aparece en el punto en el que el redondo penetra en el cuerpo (figura 6). Si se atornilla el redondo dentro del cuerpo, por ejemplo, se soporta prácticamente toda la carga con las dos o tres primeras vueltas de hélice y, darle más longitud al redondo dentro del cuerpo produce poco o ningún beneficio. Así, el trabajo que necesita un gorrión para arrancar un gusano de su agujero no depende de la longitud del gusano; un gusano corto es tan difícil de extraer como un gusano largo¹.

¹ Nótese que si introducimos un hilo de nailon dentro de un bloque de plástico "rígido", el filamento puede sacarse siempre del plástico tirando de él sea cual sea la longitud del hilo. Es un buen método de hacer orificios y complicados, por ejemplo en modelos con túnel de viento, para medir presión.

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

La distribución de tensiones de la figura 6 es válida cuando los dos componentes de la unión tienen un módulo de Young parecido, lo que ocurre habitualmente en uniones entre metales. También es válida cuando el redondo o la barra a tracción es menos rígida que el material del cuerpo —que aparentemente es el caso de los gusanos y sus agujeros—. Si el redondo o la barra es sustancialmente más rígida que el material en el que está anclado, sin embargo, la distribución de tensiones puede invertirse y la concentración de tensiones puede aparecer principalmente en la parte inferior o más adentrada de la barra o injerto (figura 7).

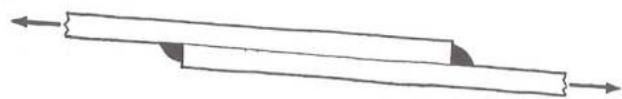


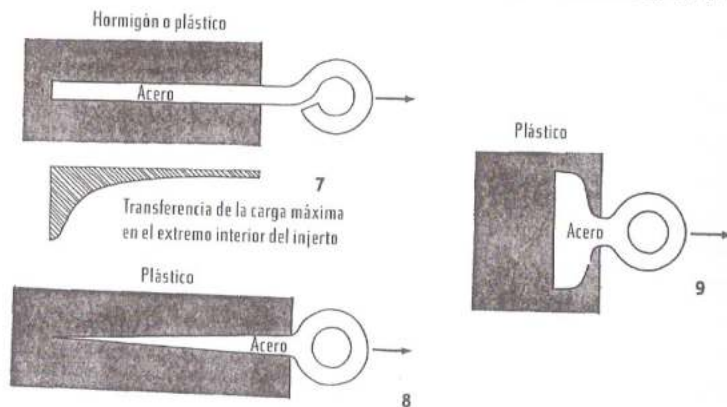
Figura 5. Unión solapada y soldada



Figura 6. Distribución de tensiones

En la práctica, por supuesto, los dos casos pueden debilitar la junta en la misma medida. Debe existir, quizá, una relación entre el módulo del injerto y el del material anclado que dé una distribución óptima de tensiones en la unión; pero si existe esa relación, es muy difícil dar con ella en la vida real.

LAS UNIONES, LOS ATADOS Y LA GENTE



Durante algún tiempo estuve ocupado en hacer anclajes puntuales entre alas de plástico armado y el fuselaje metálico de un avión. Aunque yo debería estar perfectamente al corriente de las concentraciones de tensiones, gusanos en agujeros y todo lo demás, estaba lo suficientemente despistado como para empezar a introducir fuertes cables trenzados con extremos ramificados, como las raíces de un árbol, dentro del cuerpo del plástico.

Cuando los ejemplares de esta construcción mal concebida fueron puestos en carga en la máquina de ensayos, los cables saltaron del plástico con una sucesión de chasquidos y bajo cargas ridículamente bajas.

En el siguiente experimento se sustituyeron los cables por unas delgadas chapas metálicas con forma de espada o púa y se amoldaron dentro del plástico una vez cubiertas de un adhesivo adecuado (figura 8). Esta vez el ejemplar ensayado no falló con una serie de chasquidos, sino con una explosión, pero bajo una carga igual de baja. Después de tomarnos una pausa para reflexionar e intentar algún razonamiento inteligente sobre los gusanos, probamos una serie de

Figura 7. Transferencia de carga de redondo embebido sometido a tracción.

Figura 8. La forma equivocada de un injerto metálico. Esta disposición es débil.

Figura 9. La forma correcta de un injerto metálico. Es mucho más fuerte.

injertos metálicos con forma de pala que eran mucho más cortos y tenían una forma semejante a la de la figura 9. Todos rompieron con cargas mucho mayores, que eran, en cada caso, proporcionales al ancho de la "pala". Desarrollando este diseño fuimos capaces de aplicar cargas del orden de las 40 a 50 toneladas a estructuras de plástico mediante anclajes metálicos bastante pequeños.

Estas uniones dependen enteramente de la adherencia entre el plástico y el metal y deben por tanto ser amoldadas concienzudamente y bajo una inspección adecuada. Deben ser además proyectadas con cuidado, porque, en todos estos casos, la adherencia entre metal y no metal puede fallar totalmente tan pronto como el metal alcance el límite elástico y por tanto cese de comportarse elásticamente¹. Como las tensiones en el metal son mucho mayores de lo que se suele esperar, es necesario, en general, hacer los injertos de acero de alta resistencia calentándolo cuidadosamente. Aún más, el borde ancho del injerto metálico debe ser agudo, como una espátula.

Uniones roblonadas

"He conseguido moverme la fracción de una pulgada", dijo la plancha del casco triunfante. Así que lo había hecho, y todo el fondo del barco sintió alivio por ello. "Entonces no servirán para nada" sollozaron los roblones del fondo. "Se nos había ordenado —se nos había ordenado— no caer nunca; y hemos cedido, y entrará el mar, y nos veremos al fondo todos juntos! Primero se nos acusa de cualquier cosa desagradable, y ahora no tenemos el consuelo de haber cumplido con nuestras obligaciones". "No digáis que os lo he contado", susurró el vapor consoladoramente, "pero entre vosotros y yo, y la última nube de la que venga, esto tenía que pasar antes o después. Habéis cedido una fracción, y habéis cedido sin saberlo... Ahora aguardad como antes".

RUDYARD KIPLING, *EL BARCO QUE SE ENCONTRÓ A SÍ MISMO*.

Las uniones roblonadas de estructuras metálicas están bastante pasadas de moda, principalmente porque son caras pero en parte porque tienden a ser más pesadas que las uniones soldadas. Es una pena, porque las uniones roblonadas tienen varias ventajas. Una unión roblonada es segura y fácil de inspeccionar, y en una estructura grande se comporta en gran medida como un freno a las grietas: es decir, si una grieta de Griffith grande y sana empieza a propagarse, puede

muchas veces, aunque no infaliblemente, ser parada o retenida en el foso o discontinuidad de una unión roblonada.

Aún más importante, las uniones roblonadas pueden deslizarse un poco y así distribuir la carga, evadiéndose de las consecuencias de las concentraciones de tensiones que son la ruina de todas las uniones. Este proceso ha sido descrito para siempre en *El barco que se encontró a sí mismo* de Rudyard Kipling, y realmente las intuiciones de Kipling sobre los problemas de concentración de tensiones y grietas en las estructuras, muchos años antes de Inglis y Griffith, son notables; debería exigirse la lectura obligatoria de algunos de sus cuentos sobre estructuras a los estudiantes de ingeniería.

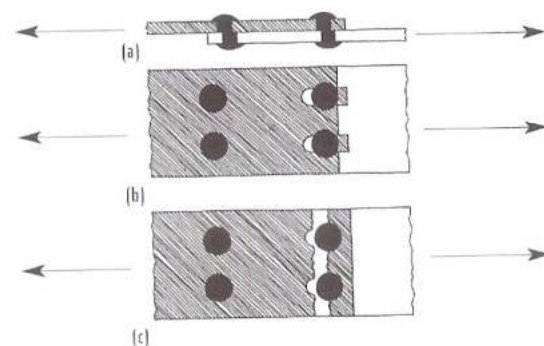


Figura 10. Tres formas de rotura de una unión roblonada.
a) Rotura por cortante en los roblones.
b) Rotura por deslizamiento de los roblones fuera de la chapa (es decir, por "huelgo" o alargamiento de los agujeros).
c) Rotura por desgarramiento de las chapas.

Dado que cada roblón puede deslizarse muy ligeramente, es posible reducir los peores efectos de la concentración de tensiones, y así puede ser aconsejable hacer uniones solapadas colocando varias filas de roblones, ya que los roblones extremos pueden deslizarse lo suficiente para que los del centro entren en carga. Cuando una unión roblonada recién hecha entre chapas de acero o hierro se estabiliza con una distribución de cargas razonable, la oxidación puede tener la

¹ Esto también es igualmente aplicable a la adherencia entre metales y pintura o esmalte incluyendo "esmalte vitrificado", es decir, cristal. Antes de la época de los modernos extensómetros, los ingenieros solían estimar el límite elástico del acero laminado por la carga para la que la película de óxido negro salía de la superficie.

oportunidad de desempeñar un papel benéfico. Los productos de la corrosión, óxidos e hidróxidos de hierro, se expanden y por tanto sellan la junta e impiden que se deslicen las chapas hacia delante y atrás cuando se invierte la carga. Además, la oxidación transmite parte de los esfuerzos cortantes entre las chapas, como un pegamento, y por tanto la resistencia de una unión roblonada crece con los años.

Cuando se realizan los agujeros de los roblones en estructuras grandes, como barcos o calderas, es normal perforarlas. Aunque éste es un medio rápido y barato de hacer agujeros en el acero, no es enteramente satisfactorio, ya que el metal del borde del agujero se deja en un estado frágil y también suele tener pequeñas grietas. Como ciertamente deben aparecer concentraciones de tensiones en esa zona, todo esto no da lugar a un estado de cosas muy recomendable. Por esta razón, en los trabajos de calidad, es habitual perforar los agujeros con un diámetro menor, y después limarlos. Aunque esto aumenta el costo, también aumenta la resistencia y la seguridad de la junta.

Se pueden hacer uniones roblonadas y atornilladas de toda clase de formas y tamaños, pero, hablando en general, todas tienen tres formas de romperse diferentes (figura 10): a) Por cortante o rotura de los propios roblones; b) por deslizamiento de los roblones fuera de la chapa (es decir, por "huelgo" o alargamiento de los agujeros); o c) por rotura del material de una de las chapas a tracción entre los roblones, de la misma forma que desgarramos un sello de correos, contra otro.

Generalmente es necesario comprobar las posibilidades de rotura de cada uno de estos tres mecanismos haciendo los cálculos necesarios. Sin embargo, organizaciones como Lloyds y otras han desarrollado "reglas" para el dimensionado de las uniones roblonadas, que se pueden encontrar en casi todos los manuales de estructuras.

Uniones soldadas

Las uniones soldadas de todo tipo son las más habituales hoy en día en estructuras metálicas, principalmente porque la soldadura es en general más barata que el roblonado y también porque se con-

sigue un cierto aumento de resistencia y un ahorro en el peso. En los barcos, también, la ausencia de cabezas de roblones debajo de la línea de flotación reduce en una pequeña medida la resistencia.

La soldadura más elaborada es la soldadura en arco. En este proceso el soldador toma una barra de metal, el metal de aportación, con su mano derecha, protegida por un guante aislante. Con su mano izquierda, generalmente sujeta una máscara o pantalla, provista de un cristal muy oscuro, a través del cual puede mirar sin peligro el arco, que él maneja y sujeta entre el metal de aportación y la junta que está soldando. El resultado es, o debería ser, un "cordón" continuo de metal soldado, de aproximadamente 7 mm de ancho, que se solidifica y une la junta. Si se necesita un mayor espesor de cordón, se repite la operación las veces que sea necesario. Si el cordón se ha realizado de forma adecuada es en general fuerte y satisfactorio, pero cualquier falta de calidad o atención por parte del soldador produce con facilidad defectos, como la inclusión de impurezas, que debilitan la unión y no pueden ser detectadas fácilmente por un inspector. También es fácil que suceda que un soldador torpe sobrecaliente tanto el metal circundante que produzca serias distorsiones. Esto ocurre en especial cuando lo que se quiere soldar es pesado y grueso; los soportes soldados de la maquinaria del acorazado de bolsillo *Graf Spee*, por ejemplo, produjeron serios problemas por esta causa.

En teoría, la unión soldada de un depósito o un barco debe ser completamente estanca sin necesidad de tratamientos posteriores, pero esto ocurre pocas veces; en la práctica la construcción soldada produce más dificultades de este tipo que la roblonada. En una unión de roblones solapadas se puede impedir el movimiento de los bordes separándolos con un aparato neumático. Esto no se puede hacer en una unión soldada, y la mejor forma de resolver el problema es inyectar cualquier compuesto de sellado líquido bajo presión en el espacio que queda entre los dos cordones de soldadura en la junta. En cualquier caso, recuerdo haber detectado muchos defectos en las pruebas de estanqueidad de los compartimentos de los barcos de guerra.

Tiempo atrás, tuve el privilegio de trabajar durante algunas pocas semanas como roblonador y soldador en uno de los Reales Astilleros, y durante este período aprendí varias cosas que no se encuentran en los libros de texto. Aunque colocar un roblón de 60 mm en un puente armado con

un martillo neumático es un trabajo duro y ruidoso, es también curiosamente interesante, y casi todos los métodos de roblonar me parece que tienen al menos el mismo atractivo que el golf, con la ventaja de ser más útiles. Le añadía un componente deportivo el proceso de inspección; en aquellos tiempos se nos pagaba a tanto el roblón colocado, pero se deducía cinco veces su valor por cada roblón que era rechazado por el inspector y tenía que ser retirado y vuelto a colocar.

Roblonar puede no ser el cielo, pero, en comparación, soldar era ciertamente el infierno. Soldar es bastante divertido durante las dos primeras horas —como me atrevería a decir que debe ser posiblemente el infierno— pero después de esto la labor de contemplar un arco chirriante y centelleante y un pequeño y deleznable charco de metal fundido se vuelve intolerablemente aburrida, y el aburrimiento no se alivia mucho con las chispas y las partículas de metal fundido que se abren camino por el cuello o en los zapatos del operario. En pocos días se asienta una sensación de aburrimiento y atontamiento y resulta muy difícil concentrarse para realizar una soldadura satisfactoria.

En nuestros días las máquinas automáticas realizan las soldaduras de la tuberías y los depósitos de presión, supongo que no se aburrirán, y que por tanto las soldaduras serán normalmente seguras. Sin embargo, la soldadura automática es a menudo imposible de realizar en estructuras grandes como barcos y puentes, donde, en la práctica, los cordones de soldadura suelen ser bastante imperfectos. Además, la unión soldada produce una barrera pequeña o nula a la propagación de las grietas, y esta es una de las razones por la que tantas estructuras metálicas han roto de forma catastrófica en estos últimos años.

Fluencia

Homero sabía que lo primero que se debe hacer cuando se deja un carro es quitarle las ruedas.

JOHN CHADWICK, *EL DESCIFRAMIENTO DEL LINEAR B* (CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1968)

Los carros micénicos y griegos arcaicos tenían ruedas muy ligeras y flexibles, hechas con madera doblada muy fina —fresno, olmo, ciprés— normalmente con sólo cuatro radios (figura 11). Este

tipo de construcción era altamente elástica y resiliente, y parece que permitía a estos vehículos ir al galope a través del accidentado terreno de las colinas griegas, donde un vehículo más pesado y más rígido hubiera sido inútil. De hecho, las llantas de los carros se doblaban, como un arco, bajo el peso de la carrocería y, al igual que un arco no debe tenerse tendido durante mucho tiempo, el peso no debía ser mantenido mucho tiempo actuando contra las ruedas del carro. Por la tarde, entonces, o bien había que apoyar en vertical el carro contra un muro, con el peso fuera de las ruedas, como hizo Telémaco en el Libro IV de la *Odisea*, o bien se quitaban las dos ruedas del carro. Aun en el monte Olimpo la diosa Hebe tenía la obligación matutina de colocar las ruedas en el carro de Atenea, la de los ojos verdes. Este procedimiento es menos necesario y menos utilizable con ruedas más pesadas, aunque a mí me parece que las ruedas del carruaje del actual alcalde de Londres están claramente deformadas excéntricamente, presumiblemente porque se las ha mantenido cargadas a lo largo de períodos de tiempo largos¹.

La distorsión de las ruedas de carruajes bajo cargas prolongadas se debe a lo que los ingenieros llaman *plastificación* o *fluencia*. En la elasticidad elemental hookeana suponemos, para simplificar, que si un material es capaz de soportar una tensión, la soporta indefinidamente, y también que las deformaciones unitarias no varían con el tiempo, mientras las tensiones se mantengan constantes. En los materiales reales ninguna de esas hipótesis son estrictamente ciertas; casi cualquier sustancia continuará deformándose, o fluyendo, bajo carga constante a lo largo del tiempo.

La capacidad de fluir de los distintos materiales, sin embargo, es algo que varía mucho. De los materiales tecnológicos, la madera, la cuerda y el hormigón plastifican muy considerablemente y este efecto debe tenerse en cuenta. La fluencia de los textiles es una de las razones por las que nuestros vestidos pierden su forma y por la que tenemos rodilleras en nuestros pantalones: es, sin embargo, mucho más pronunciada en las fibras naturales, como la lana o el algodón que en las nuevas fibras artificiales. Es por eso que las velas de terileno no sólo mantienen su forma, sino que no necesitan ser cuidadosamente “tensadas” cuando están nuevas, como hay que hacer con las velas de algodón o de lino.

¹ Esta clase de cosas son la causa de muchas de las historias de gente importante que se marea cuando van en carruajes oficiales.

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

La fluencia de los metales es generalmente menos pronunciada que la de los no metales, y aunque el acero se plastifica significativamente con tensiones altas y cuando se calienta, se puede despreciar este efecto cuando se trabaja con tensiones pequeñas a temperatura normal.

La fluencia de cualquier material produce una redistribución de tensiones que puede ser beneficiosa, ya que las zonas más tensionadas son las que más plastifican. Es ésa la razón por la que los zapatos viejos son más cómodos que los nuevos. De este modo la resistencia de una unión puede aumentar con el tiempo si así disminuyen las concentraciones de tensiones. Naturalmente, si se invierte la carga que actúa en la unión, la fluencia puede tener un efecto opuesto debilitando la unión.

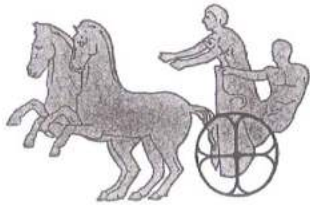


Figura 11. La mayor cualidad de las ruedas del carro de Homero era su flexibilidad y que estaban hechas de una madera bastante fina. Soportaban la torsión con facilidad o se "deslizaban" si se las sometía a una carga prolongada.

El efecto de las distorsiones producidas por la fluencia es particularmente conspicuo en las viejas estructuras de madera. Las cubiertas de los viejos edificios flechan a menudo de forma pintoresca, y la mayoría de los viejos barcos de madera tienen "panza": los extremos del barco se caen mientras que la zona central se levanta. Esto se nota mucho en los puentes del buque *Victory*. En los metales como el acero notamos los efectos de la plastificación cuando la suspensión de un coche se "asienta" y debe ser reemplazada.

Aunque el efecto de las distorsiones producidas por la fluencia varía mucho entre los distintos materiales, el modelo de comportamiento es prácticamente el mismo para casi todos. Si hacemos un gráfico en el que en ordenadas medimos la deformación o deformación unitaria y en

LAS UNIONES, LOS ATADOS Y LA GENTE

abscisas el tiempo medido en escala logarítmica (que es una forma conveniente de contraer la escala del tiempo) el diagrama para el mismo material bajo tensiones constantes S_1, S_2, S_3, \dots etc, es semejante al de la figura 12. Puede observarse que existe una tensión crítica S_c , quizá, tal que los valores más bajos de tensión no rompen nunca el material, sea cual sea el tiempo que esté cargado. Con tensiones más altas que la S_c el material no sólo se deformará con el tiempo sino que se irá acercando gradualmente a la rotura real y a su destrucción, un efecto que en general queremos evitar.

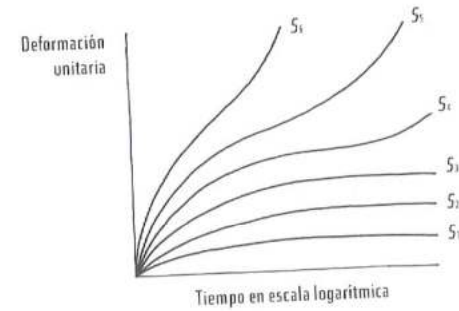


Figura 12. Típicas curvas de plastificación a lo largo del tiempo para una serie de tensiones constantes S_1, S_2, S_3, \dots etc.

El suelo también fluye bajo la carga como los otros materiales, y por tanto, a no ser que construyamos sobre roca o sobre un suelo muy duro, necesitamos controlar los "asientos" de los cimientos, que habitualmente necesitan ser más profundos para edificios grandes que para edificios normales. Ésta es la razón por la que construyen los edificios grandes sobre emparillados de hormigón. Obsérvese el hundimiento de las cimentaciones del puente de Clare en la lámina 7 (véase el capítulo 9).

CAPÍTULO 8

Los materiales blandos y las estructuras vivas o cómo proyectar un gusano

"Me alegro mucho", dijo Pooh muy contento "que se me haya ocurrido regalarle un Práctico Bote para que guarde cosas"/
Me alegro mucho", dijo Piglet muy contento "que se me haya ocurrido regalarle cosas para que las guarde en un Práctico Bote".

A. A. MILNE, WINNIE EL POOH.

Cuando la naturaleza inventó algo llamado "vida" debió de buscar, con un poco de ansiedad, un Práctico Bote para guardarla, porque la vida no hubiera prosperado mucho desnuda y desguarnecida. En aquellos tiempos el planeta presumiblemente disponía de rocas, arena, agua y una atmósfera, pero debía de andar bastante escaso de materiales utilizables para producir contenedores. Los cascarones duros se pueden hacer con minerales, pero las ventajas de una piel blanda, sobre todo en las primeras etapas de la evolución, parecen ser incuestionables.

Fisiológicamente, las paredes y las otras membranas vivas necesitan poseer una permeabilidad bastante controlada para un cierto tipo de moléculas pero no para otras. Mecánicamente, estas membranas tienen más bien la función de una bolsa flexible. En general deben ser capaces de resistir esfuerzos de tracción y alargarse muy considerablemente sin reventar o desgarrarse. En casi todos los casos las pieles y las membranas deben ser capaces de recobrar sus dimensiones originales por sí mismas cuando desaparece la fuerza que la estaba alargando¹. Las membranas vivas actuales pueden alargarse con seguridad y repetidamente con deformaciones unitarias muy variables, que habitualmente se encuentran entre el 50 y el 100 por ciento. La deformación unitaria segura de trabajo para los materiales de construcción habituales es generalmente menor del 0,1 por ciento. Podemos afirmar que los tejidos biológicos necesitan trabajar

¹ El problema mecánico se complica a menudo mucho más por la colaboración de los tejidos musculares y otros principios activos en la contracción, pero ignoramos de momento todo esto.

elásticamente con deformaciones unitarias que son mil veces mayores que las que pueden soportar los materiales de construcción.

Este enorme aumento del orden de las deformaciones unitarias, no sólo sobrepasa una gran cantidad de las ideas preconcebidas de los ingenieros sobre la elasticidad y estructuras; está también claro que deformaciones unitarias de esa magnitud no pueden ser producidas en sólidos de tipo cristalino compuestos de minerales, metales u otras sustancias duras. Es por tanto tentador, por lo menos para el científico de los materiales, suponer que las células vivas debieron empezar siendo gotas aprisionadas por las fuerzas de la tensión superficial. Debemos tener bien claro, sin embargo, que no tenemos ninguna seguridad de que esto ocurriese en realidad; lo que ocurrió realmente pudo ser algo bastante diferente —o en cualquier caso considerablemente más complicado—. Lo único que podemos asegurar es que algunas características de la elasticidad de los tejidos animales blandos son parecidas al comportamiento de las superficies líquidas y por tanto deben derivarse de ellas.

Tensión superficial

Si extendemos la superficie de un líquido, de forma que su área aumente, debemos aumentar el número de moléculas que aparecen en la superficie. Estas moléculas adicionales sólo pueden proceder del interior del líquido y deben ser extraídas desde el interior del líquido a su superficie luchando con fuerzas que tienden a mantenerlas dentro, y que se puede demostrar que son bastante grandes. Por esta razón, la creación de una nueva superficie exige energía, y la superficie además contiene una tensión que es una fuerza perfectamente real¹. Esto se puede observar fácilmente en una gota de agua o de mercurio, donde la tensión en la superficie tira de la gota dándole una forma más o menos esférica en contra de la fuerza de gravedad.

Cuando cuelga una gota de un grifo, el peso del agua se soporta por la tensión en su superficie. Este fenómeno es el tema de un sencillo experimento escolar donde se mide la tensión super-

ficial del agua y de otros líquidos contando las gotas y pesándolas después. Aunque la tensión en un líquido es tan real como la tensión en un cable, o en cualquier otro sólido, difiere de la de un sólido elástico o hookeano al menos en tres importantes aspectos:

1. La tensión no depende de la deformación unitaria o el alargamiento sino que es constante sea cual sea la dilatación que se produzca en la superficie.
2. A diferencia de un sólido, la superficie de un líquido puede alargarse indefinidamente con deformación unitaria tan grande como se quiera, sin romperse.
3. La resistencia no depende de la sección transversal de la superficie, sino únicamente del contorno de la superficie. La tensión superficial es igual en un líquido "grueso" o espeso que en uno fino o "delgado".

Las gotas de un líquido en el aire tienen poca utilidad biológica porque se caen pronto al suelo; pero las gotas de un líquido flotando dentro de otro líquido pueden continuar existiendo indefinidamente y tienen una gran importancia biológica y tecnológica. Los sistemas de este tipo se llaman "emulsiones", y son de uso corriente en la leche, los lubricantes y bastantes clases de pintura.

Las gotas son en general esféricas y el volumen de una esfera es función del cubo de su radio, mientras que la superficie de la esfera depende del cuadrado de su radio. De esto podemos deducir que si dos gotas similares se unen para transformarse en una sola con volumen doble, se conseguirá una considerable reducción neta del área de la superficie y por tanto de la energía superficial. Por lo tanto, existe un incentivo en términos de energía para que las gotas de una emulsión se unan entre sí y para que se segreguen en dos líquidos continuos.

Si queremos que las gotas se mantengan separadas y no se unan entre sí, tenemos que conseguir que se repelan entre sí. A esto se llama "estabilizar la emulsión" y es un proceso bastante complejo. Uno de los factores de estabilización es la provisión de una carga eléctrica adecuada a la superficie de las gotas —es ésa la razón por la que las emulsiones están afectadas por

¹ La teoría de la tensión superficial fue desarrollada, independientemente, por Young y Laplace hacia 1805.

electrólitos como ácidos y álcalis—. Si se ha hecho de forma adecuada la estabilización, costará mucho trabajo unir dos gotas —a pesar del ahorro de energía superficial—. Esa es la razón por la que hacer mantequilla a partir de la leche es un trabajo tan duro. La naturaleza estabiliza bastante bien las emulsiones.

Aunque puede tener desventajas serias, por lo menos hasta ahora, si un animal se contenta con ser redondo y muy pequeño, adquiere gran importancia la tensión superficial como piel y como contenedor. Por un lado, una piel así es muy alargable y también muy fácil de recomponerse a sí misma; por otro, se simplifica mucho el problema de la reproducción, ya que, si se estira una gota, se puede romper en dos y transformarse en dos gotas.

El comportamiento de los verdaderos tejidos blandos

Por lo que sé, ninguna célula real actúa simplemente con el puro mecanismo de la tensión superficial, pero muchas de ellas se comportan de una forma mecánicamente muy similar. Uno de los problemas que presenta la tensión superficial pura es que la resistencia a tracción es constante y no puede aumentarse haciendo más gruesa la piel; esto limita el tamaño de un contenedor construido de esta forma.

Sin embargo, la naturaleza es lo suficientemente hábil como para producir un material que tiene las características de la tensión superficial "a través del espesor", por decirlo de alguna manera. Un ejemplo ligeramente embarazoso puede ser familiar a mucha gente: cuando un dentista nos hace escupir en sus recipientes el hilo de saliva parece ser muchas veces infinitamente extensible y virtualmente irrompible. No está claro del todo qué mecanismo molecular está entrando en juego, pero el comportamiento de un material así en términos de tensión y deformación unitaria se parece mucho al de la figura 1.

La mayoría de los tejidos animales no son tan extensibles como la saliva, pero una parte muy grande muestra características muy similares hasta alcanzar deformaciones unitarias del 50 por

ciento o más. La vejiga de los jóvenes puede alargarse, más o menos de esa forma, hasta una deformación unitaria de alrededor del 100 por cien y la de los perros puede llegar al 200 por ciento. Como mencioné en el capítulo 3, mi colega el Dr. Julian Vincent ha demostrado recientemente que, mientras que la cutícula blanda de la langosta macho y de la hembra virgen se contenta con una deformación unitaria un poco por debajo del 100 por cien, la de la hembra preñada puede alargarse hasta un increíble 1.200 por ciento —y puede a continuación recobrase completamente—.

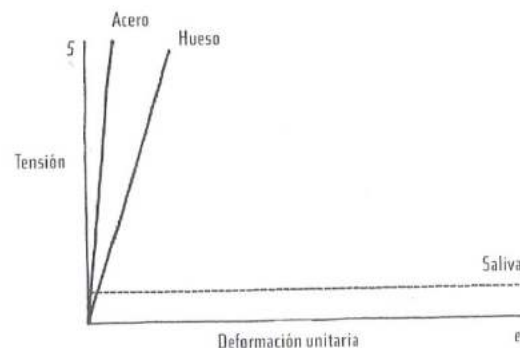


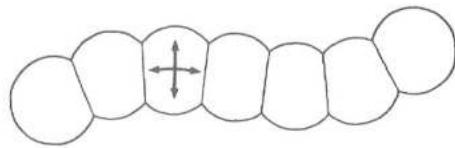
Figura 1. Diagrama tensión-deformación del acero, el hueso y la saliva.

Aunque la curva tensión-deformación de la mayoría de las membranas y otros tejidos blandos no es estrictamente horizontal, se aproxima mucho, en cualquier caso hasta alcanzar el primer 50 por ciento de deformación unitaria, y debemos estudiar bien qué consecuencias tiene este tipo de comportamiento elástico. De hecho, cualquier estructura hecha con este material debe parecerse necesariamente a la que esté compuesta de películas sometidas a tensión superficial, que se pueden observar muy bien haciendo pompas de jabón la próxima vez que nos bañemos.

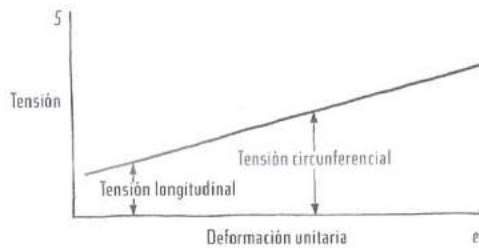
El principio básico consiste en que un material o membrana de este tipo es esencialmente un mecanismo que trabaja a tensión constante, es decir, sólo puede ofrecernos una tensión, y que

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

esta tensión actúa en todas las direcciones. La única forma de lámina, recipiente o depósito de presión que es compatible con esta condición es o bien una esfera o bien una parte de una esfera. Esto puede observarse claramente en la espuma del jabón, y en la de la cerveza. Si se quiere crear un animal alargado con membranas de este tipo, lo mejor que se puede hacer es construirlo "segmentado", como en la figura 2, y de hecho este tipo de soluciones es muy habitual en los seres vivos con aspecto de gusano.



Por muy apropiado que sea este sistema para las cutículas de los gusanos, no tiene utilidad si lo que se necesita es una tubería, como un vaso sanguíneo. En las tuberías, como vimos en el capítulo 6, la tensión circunferencial es inevitablemente el doble que la tensión longitudinal, y como sabemos, una membrana del tipo que hemos estudiado hasta ahora no puede producir dos tensiones distintas. Para ello es necesario tener un material cuya curva tensión-deformación se incline hacia arriba como en la figura 3.



LOS MATERIALES BLANDOS Y LAS ESTRUCTURAS VIVAS

El tipo más inmediato de sólido altamente extensible que cumple esta condición es el de las gomas; tenemos actualmente a nuestra disposición una gran cantidad de materiales tipo goma. Naturales y artificiales: algunos de estos sólidos pueden alargarse hasta una deformación unitaria de alrededor del 800 por ciento. Se conocen en ciencia de los materiales como "elastómeros". Utilizamos tubos de goma para todo tipo de usos tecnológicos, y podemos suponer que lo más fácil para la naturaleza sería desarrollar un sólido gomoso para elaborar las venas y las arterias. Sin embargo, esto es justamente lo que la naturaleza no ha hecho y, como veremos, por una muy buena razón.

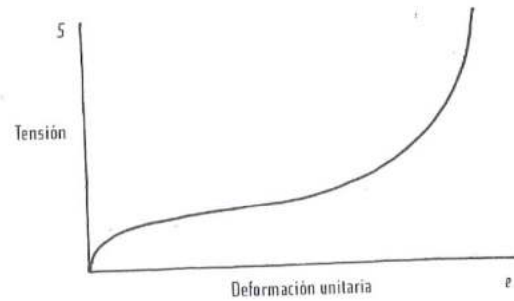


Figura 4. Diagrama tensión-deformación de una goma típica.

Los materiales tipo goma tienen un diagrama tensión deformación con un forma característica "sigmoidea" o con forma de "S" (figura 4). De acuerdo con mis algo vacilantes matemáticas, se puede demostrar que si hacemos un tubo o un cilindro de ese material y lo inflamos después, mediante una presión interna, hasta conseguir una deformación unitaria del 50 por ciento o más, el proceso de hinchado o alargamiento se volverá inestable, y el tubo se abultará, como si una serpiente se hubiese tragado un balón de fútbol, con una protuberancia esférica que un médico describiría como un "aneurisma". Como se puede obtener fácilmente este resultado hinchando un globo cilíndrico corriente para niños (lámina 3), probablemente mis matemáticas estarán bien.

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

Figura 3. La goma tiene el diafragma tensión-deformación "sigmoideo" de la figura 4. Un tubo realizado con este material no se alargará uniformemente bajo presión interna sino que se produce un abultamiento en forma de "aneurisma". Es ésta la razón por la que las paredes de las arterias no tienen el comportamiento elástico de una goma.



Como las venas y las arterias generalmente trabajan con un 50 por ciento de deformación unitaria, y como, cosa que podría confirmar cualquier médico, uno de los incidentes que con más ahinco se debe evitar en los vasos sanguíneos es la producción de aneurismas, cualquier tipo de comportamiento elástico tipo goma resulta bastante poco apropiado para la mayoría de las membranas internas; y de hecho es comparativamente difícil de encontrar en los tejidos animales.

Si lo estudiamos matemáticamente nos damos cuenta de que el único tipo de comportamiento elástico que es completamente estable bajo la presión de los fluidos con altas deformaciones unitarias es el representado en la figura 5. Con variaciones mínimas, esta forma del diagrama

tensión-deformación es realmente muy habitual en los tejidos animales, en particular en las membranas. Nos podemos dar cuenta de ello si nos tiramos del lóbulo de la oreja.

Debe hacerse notar que la figura 5 parece poner en relieve la cuestión de si el diagrama tensión-deformación de tales materiales realmente pasa por el origen (el punto de tensión y deformación nula) o de si se mantiene una tensión finita en el material cuando no hay deformación, algo que sin duda ha sido planeado para conmovir el alma de los ingenieros que han sido educados con materiales hookeanos como el acero. Por lo que he podido observar, sin embargo, en un cuerpo vivo no parece que exista nada que realmente corresponda con un "origen": esto es, no existe, aparentemente, ningún punto de tensión y deformación nula (como ocurre en cualquier

LOS MATERIALES BLANDOS Y LAS ESTRUCTURAS VIVAS

estructura hecha de, digamos, pompas de jabón). Las arterias, en cualquier caso, están permanentemente traccionadas en todo el cuerpo, y si proceden de la disección de un animal vivo o muerto recientemente, se acortan muy significativamente.

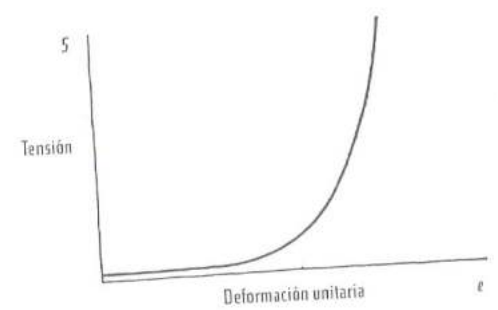


Figura 5. Diagrama tensión-deformación de los tejidos animales típicos.

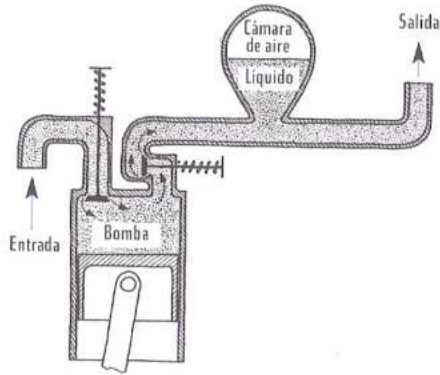
Como veremos en la próxima sección, esta tracción es quizá un dispositivo adicional para contrarrestar en las arterias cualquier tendencia a alterar su longitud cuando cambia la presión sanguínea, o también puede representar un intento velado de igualar la tensión longitudinal a la tensión transversal a lo largo de las paredes de las arterias. En otras palabras, un intento de volver a las condiciones de tracción superficial que pudieron existir en un oscuro pasado. Cuando se somete a la gente a vibraciones profundas y prolongadas —por ejemplo el caso de los leñadores cuando utilizan sierras mecánicas— se puede perder esta tracción y las arterias se pueden alargar buscando un camino sinuoso, retorcido o en zig-zag.

El coeficiente de Poisson o cómo funcionan nuestras arterias

El corazón es, en efecto, una bomba cíclica que descarga sangre en las arterias a base de una serie de impulsos algo bruscos. Se alivia el trabajo del corazón, y así se mantiene el bienestar del cuer-

po, con el hecho de que, en la fase de bombeo o sístole del ciclo cardíaco, gran parte del exceso de sangre a alta presión se amortigua mediante la expansión elástica de la aorta y de las arterias más grandes; esto consigue suavizar las fluctuaciones de la presión y en general hace más fácil la circulación de la sangre. De hecho, el comportamiento elástico de las arterias cumple la misma función que los vasos de expansión que los ingenieros añaden a los circuitos de las bombas.

Figura 6. La expansión elástica de la aorta y de las arterias cumple la misma función de suavizar las fluctuaciones de la presión sanguínea que hace la cámara de aire de un vaso de expansión añadido a una bomba cíclica.



En este sencillo mecanismo, el aumento brusco de la presión se amortigua consiguiendo que el líquido que ha sido temporalmente bombeado comprima el aire que queda atrapado en un contenedor o bulbo adecuado. Cuando la válvula de la bomba se cierra al final del ciclo de impulsión (como hace el corazón en la diástole) el líquido continúa su camino mediante la recuperación y expansión del aire atrapado (figura 6). Esta rítmica expansión y relajamiento de las arterias es necesaria y beneficiosa; y de hecho, si las paredes de las arterias se vuelven más rígidas y endurecen con la edad, la presión sanguínea tenderá a aumentar y el corazón a trabajar más, lo que no es bueno para él. Casi todos estamos al corriente de esto, pero poca gente se ha parado a pensar en las deformaciones unitarias de las paredes de las arterias.

Como vimos en el capítulo 6, la tensión longitudinal de un depósito cilíndrico, como una arteria, es precisamente la mitad de la circunferencia; y esto ocurrirá siempre, sea cual sea el material que componga las paredes del contenedor. Por lo tanto, si obedecieran a la ley de Hooke directa y crudamente, la deformación unitaria longitudinal sería también mitad de la circunferencial, y los alargamiento totales estarían en la misma proporción, para las mismas dimensiones. Ahora bien, una arteria principal —como las que proveen de sangre a nuestras piernas— puede tener aproximadamente un centímetro de diámetro y quizá un metro de largo. Si las deformaciones unitarias están realmente en la relación de dos a uno, unos sencillos cálculos demuestran que un aumento de diámetro de medio milímetro —que puede ser admitido fácilmente en cualquier parte del cuerpo— estará asociado a un aumento de longitud en la arteria de alrededor de 25 milímetros.

Es obvio que un aumento de longitud de esa magnitud, actuando setenta veces por minuto, no puede ocurrir, y no ocurre. Si existiesen este tipo de cosas, nuestros cuerpos simplemente no funcionarían. Como ejemplo extremo, imaginemos que ocurra algo así en los vasos sanguíneos que sirven a nuestro cerebro.

Afortunadamente, en la vida real, los aumentos de longitud y las deformaciones unitarias de los tubos presurizados de toda clase y tipo son mucho más pequeñas de lo que puede predecirse o tenerse a partir de estos razonamientos demasiado elementales. Que esto ocurra así se debe a algo llamado "coeficiente de Poisson".

Si se alarga una tira de goma se vuelve significativamente más estrecha; y una cosa semejante ocurre en todos los sólidos, aunque en la mayoría de los materiales este efecto se nota mucho menos. Al contrario, si se acorta un material comprimiéndolo, se dilatará por los lados. Estos dos fenómenos son elásticos, y desaparecen cuando se retira la carga.

No notamos estos movimientos transversales en cosas como el acero o el hueso porque las deformaciones unitarias longitudinales y transversales son muy pequeñas. El hecho de que esto ocurre en todos los sólidos y de que este comportamiento es significativo en la elasticidad prác-

tica, fue observado por primera vez por el francés S. D. Poisson (1781-1842). Aunque nació en la pobreza más dramática y tuvo muy poca educación formal hasta los quince años, Poisson fue nombrado Académico —uno de los más altos honores que Francia puede ofrecer— a la edad de treinta y un años por su trabajo sobre la elasticidad.

Como contamos en el capítulo 3, la ley de Hooke dice:

$$\text{Módulo de Young} = E = \frac{\text{tensión}}{\text{deformación unitaria}} = \frac{S}{e}$$

Así, si producimos una tensión de tracción, S_1 , en una placa plana, el material se alargará o estirará elásticamente de forma que habrá una deformación unitaria de tracción en la dirección que estamos tirando de:

$$e_1 = \frac{S_1}{E}$$

Sin embargo, el material también se *contraerá* transversalmente (es decir, en dirección perpendicular a la de S_1) con otra deformación unitaria que llamaremos e_2 . Poisson descubrió que, para cada material, la relación entre e_2 y e_1 es constante, y esta relación es la que llamamos "coeficiente de Poisson". Usaremos en este libro el símbolo n . Así, para un material dado sometido a una simple tensión de tracción uniaxial S_1 , e_1 , la deformación unitaria en dirección

$$n = \frac{e_2}{e_1} = \text{coeficiente de Poisson}^*$$

a S_1 , se denomina frecuentemente "deformación unitaria primaria"; la deformación unitaria producida por S_1 en su dirección perpendicular, por decirlo de alguna manera, se llama "deformación unitaria secundaria" (figura 7).

$$\text{Coeficiente de Poisson} = n = \frac{e_2}{e_1}$$

(De lo que acabamos de decir, se deduce: $e_2 = n \cdot e_1$)

y como $e_1 = S_1 / E$ (la ley de Hooke), entonces: $e_2 = \frac{n S_1}{E}$

de esta forma, si conocemos n y E podemos calcular las deformaciones primaria y secundaria.

En casi todos los materiales de construcción como los metales, la piedra y el hormigón, n casi siempre se encuentra entre 1/3 y 1/10. Los valores del coeficiente de Poisson en los materiales biológicos son generalmente más altos que éstos, y suelen estar alrededor de 1/2.

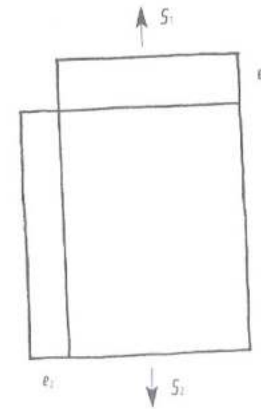


Figura 7. Cuando se estira un sólido mediante una tensión de tracción S_1 , se alarga en la dirección de S_1 mediante una deformación unitaria primaria e_1 , pero también se contrae transversalmente con una deformación unitaria secundaria e_2 .

Los profesores de elasticidad elemental os contarán que los valores del coeficiente de Poisson no pueden ser mayores de 1/2, de otra forma ocurrirían una gran variedad de cosas desagradables e inadmisibles. Esto sólo es en parte cierto, y los valores para algunos materiales biológicos pueden ser a veces verdaderamente altos, a veces muy por encima de la unidad⁴. El valor

⁴ Para ahorrar a los estudiantes teóricos de la elasticidad las molestias de una correspondencia innecesaria, conozco los cambios en el valor de la energía que supone. Estas anomalías tienen una explicación física.

* Como en todos los casos e_2 tiene signo opuesto que e_1 , el coeficiente de Poisson debería ser siempre negativo, y debería ir siempre acompañado de un signo menos. Sin embargo, nos olvidaremos de esto omitiendo el signo menos; y lo corregiremos poniendo el signo menos en sumas, como éstas que vamos a realizar.

experimental del coeficiente de Poisson de mi barriga, medido recientemente por mí mismo en la bañera, es de alrededor de $1,0^3$.

De esta forma, como hemos dicho, el efecto del coeficiente de Poisson es que, si tiramos de un fragmento de material, como una membrana o la pared de una arteria, en una dirección, se volverá más larga en esa dirección, pero se contraerá, o se volverá más corta, en su dirección perpendicular. De este modo, si se introducen dos tensiones, perpendiculares entre sí, los efectos serán aditivos y las deformaciones unitarias serán *menores* de lo que podíamos esperar si las dos tensiones hubiesen sido introducidas por separado.

En el caso de dos tensiones simultáneas S_1 y S_2 , la deformación unitaria total en la dirección de S_1 será:

$$e_1 = \frac{(S_1 - n \cdot S_2)}{E}$$

Y la deformación unitaria total en la dirección S_2 será:

$$e_2 = \frac{(S_2 - n \cdot S_1)}{E}$$

Volviendo al capítulo 6, la consecuencia de la existencia del coeficiente de Poisson es que la deformación unitaria, en la dirección del tubo, o longitudinal, de la pared de un depósito tubular que obedece la ley de Hooke es:

$$e_2 = \frac{r \cdot p}{r \cdot E} = (1 - 2n)$$

Donde r = radio, p = presión y t = espesor de la pared.

De esto se puede deducir que el alargamiento elástico longitudinal de un tubo es mucho menor de lo que se puede esperar: en una material hookeano con un coeficiente de Poisson de

$1/2$ no existirá ninguna clase de movimiento. De hecho, como hemos visto, las paredes de las arterias no obedecen la ley de Hooke, y es también probable que su coeficiente de Poisson sea mayor que $1/2$; posiblemente estos efectos se anulan entre sí, porque experimentalmente se observan muy pocos movimientos longitudinales (véase nota 5). No hay duda de que el hecho de que las arterias estén permanentemente estiradas en todo el cuerpo es una precaución contra cualquier deformación unitaria longitudinal residual.

Los efectos del coeficiente de Poisson son probablemente de una muy gran importancia en los tejidos animales; pero también son significativos para los ingenieros y este tema está apareciendo continuamente en todo tipo de conexiones.

Debe quizá añadirse que, mientras que la aorta y las arterias principales se expanden y contraen elásticamente con cada latido del corazón, de la forma que hemos estudiado, el comportamiento de las arterias más pequeñas es totalmente diferente en la mayoría de los casos. Las paredes de estos vasos menores están provistas de un tejido muscular que puede aumentar su rigidez efectiva y por tanto, restringiendo su diámetro, controlar la cantidad de sangre que puede pasar a una zona particular del cuerpo. De esta forma se ajusta la distribución de la sangre disponible.

Seguridad o la ductilidad de los animales

Los animales se rompen los huesos con bastante frecuencia y algunas veces se desgarran los tendones, nada de lo cual obedece al comportamiento elástico que hemos descrito; pero es muy notable que la fractura mecánica de los tejidos blandos parece ocurrir muy raramente. Existen varias razones para esto. Como son tan blandos, la piel y la carne pueden evitar un golpe deformándose y escapando con un moratón. El problema de las concentraciones de tensiones, sin embargo, parece ser más interesante, porque la mayoría de los tejidos animales blandos parecen ser prácticamente inmunes a esta importante causa de las catástrofes en ingeniería. Por esta razón se reduce mucho la necesidad de un coeficiente de seguridad, y así,

⁵ Nota para los teóricos de la bio-elastividad. Este análisis hookeano es simplista. En un sistema no hookeano, donde los módulos tangentes son E_1 y E_2 , aproximadamente, la variación de deformación unitaria longitudinal es nula cuando:

$$\frac{E_1}{E_2} = 2n$$

Aunque la mayoría de los tejidos blandos mantienen aproximadamente el volumen constante —es decir, tienen un coeficiente de Poisson real de alrededor de 0,5— la mayoría de las membranas prefieren deformarse con deformación unitaria plana, es decir, no se vuelven más delgadas cuando son estiradas, y por lo tanto aparentan tener un coeficiente de Poisson de alrededor de 1 —como mi barriga—. Esto coincide con un valor de E_1/E_2 de alrededor de 2, que es bastante creíble. Pero ¿por qué una membrana no se vuelve más delgada cuando se la estira? Véase, por ejemplo, E. A. Evans, Proc. Int. Conf. On Comparative Physiology (1974), North Holland Publishing Company.



Lámina 4. Las paredes de las arterias y los tejidos blandos vivos tienen el comportamiento elástico específico de la figura 5, capítulo 8. La pared de las arterias está construida con elastina armada con fibras de colágeno. Esto permite conseguir el comportamiento elástico "seguro" que se necesita. (Las arterias tienden a aplastarse cuando están vacías de sangre después de la muerte.)

LOS MATERIALES BLANDOS Y LAS ESTRUCTURAS VIVAS

la eficacia estructural, esto es, la relación entre la carga que puede soportar una estructura y su peso, puede ser bastante alta.

Esta inmunidad no se debe únicamente a que el material es blando y tiene un módulo de Young bajo. La goma es realmente blanda y tiene un módulo bastante bajo, y sin embargo muchos de nosotros recordamos, cuando éramos niños, haber sacado nuestros globos de goma hinchados al jardín, donde de pronto explotaban al toparse con las púas de la primera mata de rosales. Cuando éramos niños no nos dábamos cuenta de que, debido a las concentraciones de tensiones y al bajo trabajo de fractura de la goma, una grieta se propagaba muy rápidamente en la goma estirada a partir del agujero del pinchazo, y es bastante dudoso que nuestras lágrimas hubieran cesado si lo hubiésemos sabido. Sin embargo, la membrana del ala de un murciélago, por ejemplo, aunque se estira mucho más cuando vuela, no se comporta de esta forma. Si se le pincha el ala, raramente se propaga el arañazo, la herida pronto se cierra, y el murciélago puede durante todo este proceso continuar usando sus alas.

La explicación está, creo, en que las gomas y las membranas animales poseen comportamientos elásticos y trabajos de fractura muy diferentes. No existen actualmente datos disponibles sobre el trabajo de fractura de muchos tejidos biológicos blandos; pero se conocen muy bien en la mayoría de los casos las curvas de sus diagramas tensión-deformación, y este factor parece tener una gran influencia sobre la probabilidad de la fractura.

La membrana de la cáscara de un huevo nos proporciona un ejemplo interesante. Es la membrana que podéis encontrar al desayunar, justo debajo de la cáscara de vuestro huevo pasado por agua. Es una de las pocas membranas biológicas que obedecen la ley de Hooke, en este caso hasta su deformación unitaria de rotura, que es de un 24 por 100. Un experimento sencillo aunque ligeramente pringoso con un huevo crudo demostrará que las membranas de huevo se rasgan muy fácilmente. Esto es, por supuesto, para lo que están, porque lo primero que tiene que hacer un pollo es salir del cascarón, lo que realiza picándolo. A propósito, la propia cáscara del huevo —que tiene una forma redondeada—, es difícil de romper desde fuera, pero fácil de romper desde dentro.

Las membranas de los huevos son bastante excepcionales, por el hecho de que existen para ser rotas después de cumplir la función de mantener la humedad del huevo y protegerlo de las infecciones; como hemos dicho, poseen un tipo especial de comportamiento elástico, muy posiblemente por esta razón. Sin embargo, la gran mayoría de los tejidos blandos tienen un comportamiento elástico que es bastante distinto y muy parecido al de la figura 5; y desde el punto de vista funcional, casi todos estos tejidos necesitan ser dúctiles. Aunque los razonamientos científicos que puedan justificarlo no están perfectamente claros, parece ser que desde el punto de vista práctico, los materiales que tienen ese tipo de diagrama tensión-deformación son extremadamente difíciles de rasgar. Una razón para que esto ocurra puede ser que la energía de deformación almacenada bajo esa curva, y por tanto disponible para propagar la fractura (capítulo 5) es mínima⁶.

Como hemos dicho, una parte realmente importante de los tejidos animales se comporta, elásticamente, de forma muy parecida a la de la figura 5. Debo confesar que, cuando esta información me fue facilitada por primera vez, me pareció que indicaba por parte de la naturaleza un comportamiento excéntrico o insustancial, la cual, pobre, no conocía nada mejor, al no haber disfrutado de los beneficios de la educación en una Escuela de Ingenieros. Después de pasar una buena cantidad de tiempo dando palos de ciego mientras buscaba la explicación del problema utilizando matemáticas elementales, estoy empezando a llegar a la conclusión de que, si se necesita un sistema estructural que funcione con seguridad a deformaciones unitarias realmente altas, éste es el *único* comportamiento elástico adecuado. De hecho, la consecución de este tipo de diagrama tensión-deformación para los materiales animales representa un hecho realmente esencial en la evolución y para el mantenimiento de las formas más elevadas de vida. Biólogos, por favor, tomad nota.

La composición de los tejidos blandos

Quizá en parte por estas razones, la estructura molecular de los tejidos animales no se suele parecer a la de la goma y los plásticos artificiales. La mayoría de estos materiales naturales son

⁶ La forma del diagrama tensión—deformación de la mayoría de los tejidos animales—como la piel—se parece mucho a la de la tela “cruzada” o reforzada, que es casi imposible de rasgar.

altamente complejos, y en muchos casos compuestos de al menos dos componentes; es decir, tienen una base continua, o matriz, que se refuerza con fuertes fibras o filamentos de otra sustancia. En bastantes animales esta base continua o matriz contiene un material llamado “elastina”,

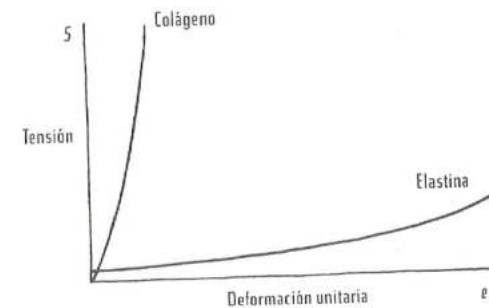


Figura 8. Diagrama tensión-deformación aproximados de la elastina y el colágeno.

que tiene un módulo realmente bajo y un diagrama tensión-deformación muy parecido al de la figura 8. En otras palabras, la elastina está sólo un escalón por encima, elásticamente, de un material con tensión superficial. La elastina se refuerza, sin embargo, con el añadido de fibras sinuosas y en zig-zag de colágeno (lámina 4), una proteína, parecida al tendón, que tiene un módulo de elasticidad alto y un comportamiento prácticamente hookeano. Como las fibras de refuerzo tienen una forma muy sinuosa, cuando el material descansa en un estado de baja tensión contribuyen muy poco a su resistencia o extensión, y el comportamiento elástico inicial es prácticamente el de la elastina. Sin embargo, a medida que se alarga este tejido compuesto, empiezan a entrar en carga; y así, en el estado de extensión el módulo de elasticidad del material es prácticamente el del colágeno, y el resultado final es que el comportamiento elástico global del material es más o menos el de la figura 5.

El papel de las fibras de colágeno no es sólo aumentar la rigidez de los tejidos con altas deformaciones unitarias; además, parecen contribuir mucho a su ductilidad. Cuando se corta un tejido vivo, accidental o quirúrgicamente, las fibras de colágeno se reabsorben o desaparecen, temporalmente, en la primera etapa, hasta una distancia considerable de la herida. Sólo después de que el corte se ha llenado y ligado con la elastina, se vuelven a formar las fibras de colágeno y se recupera la completa resistencia del tejido. El proceso puede durar tres o cuatro semanas, y en este tiempo la carne de alrededor posee un trabajo de fractura despreciablemente bajo. Por esa razón, si debe abrirse de nuevo una herida quirúrgica antes de pasar dos o tres semanas después de la primera operación, es difícil que se mantengan los puntos al cerrar la herida.

El colágeno existe con varias configuraciones, una de las cuales consiste en cuerdas o hilos retorcidos de moléculas de proteína; y su resistencia al alargamiento se debe básicamente a la de los enlaces atómicos de sus moléculas: o lo que es lo mismo, es un material hookeano muy parecido al nailon o al acero. ¿Por qué entonces la elastina se comporta como lo hace, casi como la tensión superficial? La respuesta fácil es que realmente nadie lo sabe, pero los profesores Weis-Fogh y Andersen han sugerido que este comportamiento se debe a una forma modificada de tensión superficial. De acuerdo con esta hipótesis, la elastina debe consistir en una malla de largas cadenas moleculares flexibles actuando dentro de una emulsión. Cuando las moléculas de la malla están impregnadas de gotas —pero no por la sustancia intermedia— es energéticamente preferible para casi toda la longitud de estas moléculas mantenerse enrolladas o dobladas dentro de las gotas (figura 9a). Bajo los efectos de una tracción, son extraídas de las gotas y tensadas (figura 9b).⁷

Gran parte de nuestro cuerpo está formado, por supuesto, de músculos, que es una sustancia activa capaz de contraerse para producir las tracciones que se necesitan en los tendones y otros puntos. El músculo, sin embargo, contiene fibras de colágeno, que sólo pueden tener un papel pasivo desde el punto de vista elástico. Cuando se estira un músculo muerto tiene un diagrama tensión-deformación que es, de nuevo, el de la figura 5, y parece posible que la función del

colágeno sea limitar el alargamiento del músculo cuando está relajado o extendido: en otras palabras, actúa como una especie de freno de emergencia. Como hemos dicho, la otra finalidad de las fibras de colágeno es aumentar el trabajo de fractura. Esto es bueno para el animal, pero

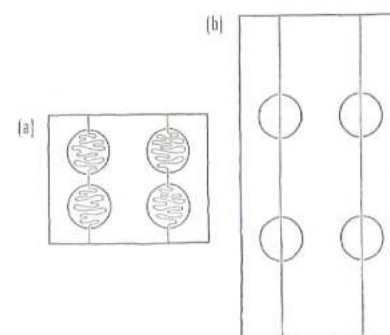


Figura 9. Morfología hipotética de la elastina. (a) Descansando sin deformarse. Las cadenas moleculares dobladas o casi dobladas dentro de gotas. (b) Estado con alargamientos. Las cadenas moleculares han sido empujadas fuera de las gotas.

es poco conveniente para las personas que se quieren comer su carne. La naturaleza no parece estar del lado de los vegetarianos, porque ha conseguido, en su sabiduría, que el colágeno se vuelva gelatina —una sustancia con baja resistencia cuando está mojada— a una temperatura algo más baja de la que la elastina o el músculo pueden soportar. El proceso de cocinar la carne consiste entonces en convertir casi todas las fibras de colágeno en gelatina, asándola, friéndola o cociéndola. Son este tipo de estudios científicos los que restauran nuestra fe en los benéficos diseños de la Providencia.

TERCERA PARTE:

Estructuras comprimidas y flectadas

CAPÍTULO 9

Muros, arcos y presas o torres como rascacielos y la estabilidad de la fábrica

¿Qué es lo que eres capaz de construir / con tus bloques? / Castillos y palacios, templos y puertos.

R. L. STEVENSON, UN JARDÍN DE POEMAS PARA UNA NIÑA

Como hemos visto, a no ser que seamos tan inteligentes como la naturaleza, todo el asunto de hacer estructuras traccionadas está plagado de dificultades, complicaciones y trampas escondidas para el incauto. Esto ocurre en especial cuando queremos hacer una estructura de más de una pieza de material, de forma que tengamos que enfrentarnos con el problema de impedir que se separe por las uniones. Por todas estas razones nuestros antepasados evitaron en general las estructuras traccionadas tanto como pudieron, e intentaron usar construcciones en las que todo trabajaba a compresión.

Con mucho, la forma más satisfactoria y más antigua de conseguirlo es el uso de la fábrica. De hecho, el inmenso éxito que han tenido las construcciones de fábrica se debe realmente a dos factores. El primero es el obvio de que se evitan las tensiones de tracción, especialmente en las uniones; la segunda razón puede parecer menos obvia: es que la naturaleza de los problemas de proyecto de los grandes edificios de fábrica está adaptada peculiarmente a las limitaciones de la mente pre-científica.

De todos los distintos tipos de estructuras que se pueden construir, los edificios de fábrica son, como veremos, los *únicos* en los que una fe ciega en las proporciones tradicionales no conduce automáticamente al desastre. Ésta es la razón, desde el punto de vista histórico, por la que los edificios de fábrica son con mucho los trabajos del hombre más grandes y más

importantes. El deseo de construir torres como rascacielos y templos solemnes aparece muy lejos en la historia y hasta en la Prehistoria. Hay una cita del Génesis sobre la Torre de Babel al principio del capítulo I. Debe recordarse que esto era el proyecto de construir "una torre que llegue al cielo".

Sin embargo, no creo que ningún teólogo haya indagado hasta qué altura debía realmente construirse tal torre.

Casi toda la carga que soportarían sus muros se debería al efecto de su propio peso. Una forma de atacar el problema sería sencillamente calcular las tensiones de compresión directas debidas al peso propio vertical de la fábrica, en la base de la torre. El límite a la altura de la estructura sería para cuando ésta sea tal que el peso de la estructura por encima aplaste los ladrillos de la base.

Ahora bien, la densidad del ladrillo¹ y de la piedra es de alrededor de 2.000 kg/m³, y la tensión de rotura de estos materiales es en general algo más de 40 MN/m².

Elementales cálculos aritméticos demuestran que una torre con muros perimetrales se podría haber construido hasta una altura de 2 kilómetros antes que se aplastasen los ladrillos de su base. Sin embargo, si se hubiesen inclinado los paramentos de muros hacia el interior, se podría haber hecho todavía más alta; es así más o menos como funcionan las montañas. El monte Everest tiene unos 8 kilómetros de alto y no muestra ningún signo de derrumbe. De este modo una sencilla torre, preferiblemente con una base ancha y estrechándose hacia su parte superior, podía haber sido construida hasta tal altura que los hombres de Shinar empezarían a estar faltos de oxígeno y a tener dificultad en respirar, antes de que los muros de ladrillo quedasen aplastados bajo su propio peso.

Aunque no existen excesivas equivocaciones en estos números, de hecho aun las torres más ambiciosas que se han construido no llegan ni remotamente a este orden de altura. El edificio más alto que existe hoy es probablemente las Petronas Towers de Kuala Lumpur (Malasia), que sólo tienen alrededor de 450 m de altura; y podría decirse, como en otros rascacielos, que además se ha conseguido haciendo trampa, porque su estructura es metálica. La Gran Pirámide y

¹ Nótese que el Génesis 11 dice específicamente "hagamos ladrillos fuertes cocidiéndolos al sol". Estaba fuera de lugar usar ladrillos crudos baratos como hicieron los egipcios. Esto parece ser un caso lejano del síndrome del Concorde.

las más altas linternas de las catedrales alcanzan poco más de 150 metros, y muy pocas de las otras estructuras de fábrica tienen más de la mitad de esa altura; la gran mayoría son todavía más bajas.

Por lo tanto, las fábricas normales soportan unas tensiones de compresión realmente bajas. En general, rara vez superan la centésima parte de la tensión de rotura por aplastamiento de la piedra, y este factor no constituye en la práctica una limitación a la altura o la resistencia del edificio. Sin embargo —volviendo a ser bíblicos— la Torre de Siloam, que probablemente no debía ser muy alta, se hundió y mató a dieciocho personas, y además es notorio que a pesar de la seguridad que puedan sentir constructores y arquitectos, los muros y los edificios se hunden inesperadamente. Lo han estado haciendo durante mucho tiempo y siguen haciéndolo de vez en cuando hoy en día. Como las fábricas son pesadas, mueren personas a menudo.

Si los muros no se derrumban directamente debido a la tensión de aplastamiento ¿por qué se caen? De nuevo, podemos aprender de lo que los niños hacen. Cuando éramos muy jóvenes, muchos de nosotros jugábamos con bloques, y prácticamente lo primero que hacíamos era apilar un bloque encima de otro de forma bastante errática. Normalmente, cuando la torre alcanzaba una cierta altura, se venía abajo. Aun un niño se daba perfecta cuenta, aunque no podía expresar estos conceptos científicamente, de que esto no se debía de ninguna manera a que los bloques se habían aplastado debido a la tensión de compresión. La tensión real de los bloques era despreciable; lo que había ocurrido es que la pila de bloques se había vencido hacia fuera y se había caído porque la torre no estaba ni derecha ni vertical. En otras palabras, el hundimiento se debía a una falta de estabilidad, no a una falta de resistencia. Aunque distinguir entre estas dos cosas se vuelve pronto evidente para los niños pequeños, no está siempre claro para los arquitectos y los constructores. Por esta misma razón las reflexiones de los historiadores de arte que escriben sobre catedrales y otros edificios pueden llegar a convertirse en una lectura bastante irritante.

Las líneas de presiones y la estabilidad de los muros

Qué venerable es la faz de este alto edificio / cuyos viejos pilares levantan sus cabezas de mármol / Para soportar en las alturas su cubierta arqueada y solemne. / Que su propio peso hace firme e inamovible, / Aparentando tranquilidad. / Sobresalta con temor, / Y terrar mi contemplación dolerida.

WILLIAM CONGREVE, *LA NOVIA MELANCOLICA*.

En tiempos de la reina Ana todos participaban de la misma cultura, hay pocas dudas de que Congreve (1670-1729) hablaba y bebía con Vanbrough, que escribió obras de teatro y proyectó el Palacio de Blenheim, y con el mismo sir Christopher Wren. Para toda esta gente estaba perfectamente claro —en general— que lo que impedía que un edificio se venciera hacia afuera y desmoronara no era tanto la resistencia de los bloques de piedra y el mortero como el peso del material, actuando en los sitios adecuados.

Sin embargo, una cosa es darse cuenta de esto en general y otra saber qué es lo que ocurre en detalle y además ser capaz de predecir exactamente cuándo un edificio es estable y cuándo no. Para conseguir una comprensión científica del comportamiento de la fábrica es necesario tratarla como un material elástico; es decir, se debe tener en cuenta el hecho de que las piedras se deforman cuando están cargadas y de que obedecen la ley de Hooke. Resulta también de gran ayuda, aunque quizá no sea absolutamente esencial, utilizar los conceptos de tensión y deformación unitaria.

A primera vista parece, por supuesto, improbable que los sólidos ladrillos y bloques de piedra puedan deformarse de forma significativa bajo las cargas que actúan en los edificios. De hecho, este punto de vista basado en el sentido común prevaleció al menos durante un siglo después de Hooke, y los constructores, arquitectos e ingenieros continuaron ignorando la ley de Hooke, y tratando a la fábrica como si fuera perfectamente rígida. En consecuencia, sus edificios a veces se caían porque habían hecho los números mal.

De hecho, los módulos de Young del ladrillo y la piedra no son particularmente altos, como puede observarse en los pilares de la catedral de Salisbury (lámina 1), los movimientos elásticos de la

fábrica no son de ninguna manera tan pequeños como podría suponerse. Aun en una casa pequeña normal las paredes pueden acortarse o ser comprimidas elásticamente en dirección vertical, hasta algo así como un milímetro, debido a su propio peso. Los movimientos son, naturalmente, mayores en un edificio grande. Hablando de ello, cuando una casa es sacudida por el viento durante un vendaval, no estamos imaginando este efecto; la casa *está* siendo sacudida por el viento. La cúspide del Empire State se balancea alrededor de medio metro durante las tormentas², alrededor de su eje.

El análisis moderno de las estructuras de fábrica se basa en la simple elasticidad hookeana y además en cuatro hipótesis, que están justificadas por la experiencia. Éstas son:

1. Que las tensiones de compresión son tan bajas que el material no se romperá por aplastamiento. Ya hemos estudiado por qué esto es así.
2. Que, debido al uso de morteros, el engarce entre las juntas es tan bueno que los esfuerzos de compresión se transmiten a través de toda la superficie de la unión y no a través de unos pocos puntos que sobresalgan de su superficie.
3. Que la fricción entre las juntas es tan alta que no puede ocurrir una rotura debida a que los bloques de piedra se deslicen entre sí. De hecho, no ocurre ninguna clase de movimiento debido al deslizamiento antes de que la estructura colapse.
4. Que las juntas son incapaces de proporcionar ninguna clase de resistencia a tracción. Aun cuando, por casualidad, el mortero tenga alguna resistencia a tracción, ésta no debe ser tenida en cuenta y debe ser despreciada.

Por tanto, la función del mortero no es “pegar” los ladrillos y los bloques de piedra entre sí, sino simplemente transmitir la carga de compresión más fácilmente.

Por lo que se ve la primera persona que tuvo en cuenta las deformaciones elásticas de la fábrica fue Thomas Young. Young estudió lo que ocurriría en un bloque de piedra rectangular, como el de un muro, cuando soporta una carga vertical de compresión, P , por ejemplo. En lo que sigue he simplificado los razonamientos de Young traduciendo los al lenguaje de las tensiones y las deformaciones unitarias, que por supuesto no estaban a su alcance en su época.

² En la Iglesia de la Abadía de Saint Denis, en Francia, durante el siglo XIX, leemos... “tal era la fuerza con la que el terrible vendaval embistió contra los dichos arcos, que no estaban soportados por columnas ni descansando en ningún apeo, que amenazaron con una espantosa ruina en cualquier momento, temblando miserablemente y, por decirlo así, balanceándose por doquier”. (Estoy en deuda con el Profesor Heyman por esta cita.)

Si P actúa simétricamente a lo largo del eje de la pieza, esto es, en el centro del muro, la fábrica estará uniformemente comprimida y, de acuerdo con el Sr. Hooke, la distribución de las correspondientes tensiones de compresión a lo largo del espesor del muro será también uniforme (figura 1).

Supongamos ahora, que la carga vertical P se hace un poco excéntrica, es decir, ya no actúa exactamente a lo largo del eje del muro; las tensiones de compresión no pueden continuar siendo constantes y deben ser mayores a un lado que al otro de forma que puedan reaccionar adecuadamente contra la carga y mantenerla en equilibrio. Young demostró que si el material obedece la ley de Hooke, el diagrama de distribución de tensiones puede ser el de la figura 2.

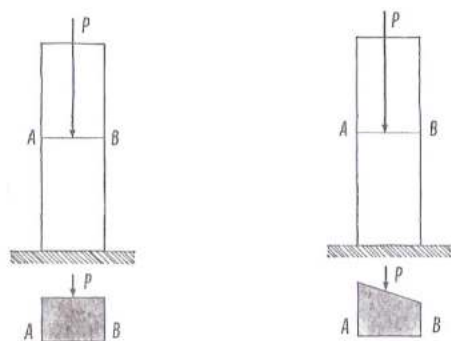


Figura 1. (izquierda) Distribución de las tensiones de compresión a lo largo de AB. Carga P actuando en el centro de la junta AB.

Figura 2. (derecha) Distribución de la tensión de compresión a lo largo de AB. Carga P actuando de forma ligeramente excéntrica pero dentro de "tercio medio" de AB.

Hasta ahora, el mortero de la junta está bastante satisfecho porque todo el ancho de la junta trabaja de forma segura a compresión. Sin embargo, si la posición de la carga se desplaza aún más del centro, de hecho al borde de lo que se llama el "tercio medio" del muro, puede aparecer el caso de la Figura 3, donde la distribución de tensiones es ahora triangular y la tensión en uno de los bordes de la pieza es nula.

Esto, en sí, no importa mucho, pero a una mente perspicaz puede empezar a parecerle claro que algo está a punto de ocurrir. En efecto, si se mueve la carga un poco más hacia afuera, algo ocurrirá: lo que describe la figura 4.

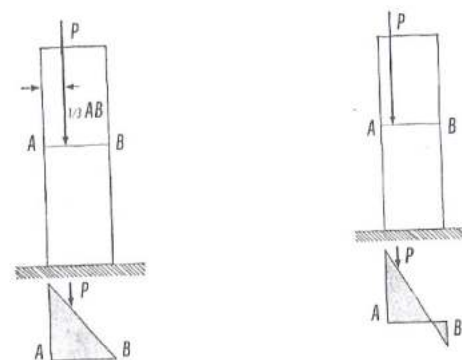


Figura 3. (izquierda) Distribución de tensiones a lo largo de la sección. La tensión B es nula. Carga actuando en el borde del "tercio medio" de AB.

Figura 4. (derecha) La tensión en B es ahora una tracción. Carga P actuando fuera del "tercio medio" de la sección.

La tensión en la cara opuesta del muro ha pasado de ser una compresión a ser una tracción. Dijimos, sin embargo, que no se puede confiar en el mortero para soportar una tracción, y esto es en general demasiado cierto. Lo que se puede esperar que ocurra, ocurre: la junta se agrieta. Por supuesto es malo para un muro agrietarse, y esto no debe ser permitido en edificios sujetos a normativa, pero de esto no debe seguirse necesariamente que el muro vaya a caerse de inmediato. Lo que suele ocurrir en la vida real es sencillamente que la grieta se abre un poco, pero el muro continúa en pie, descansando en las zonas que siguen en contacto (figura 5).

Todo esto nos hace sentir que estamos sufriendo una experiencia peligrosa, y en efecto un día de éstos la posición de la carga, o la línea de presiones, puede aventurarse fuera de la superficie del muro, el cual, como podemos darnos cuenta si reflexionamos un poco, como no es capaz de ningún tipo de esfuerzos de tracción, empezará a girar en una de sus juntas alrededor de uno de

los bordes exteriores, se vencerá hacia fuera y caerá (figura 6). Y esto es exactamente lo que ocurre en la vida real.

En la época en que llegó a estas conclusiones, esto es, alrededor del año 1802, Young, un prometedor hombre de veintinueve años, obtuvo la cátedra de Filosofía Natural en la Royal Institution de Londres. Su colega, y en cierto modo su rival, era Humphry Davy, que fue nombrado profesor de Química el mismo año a la increíble edad de veinticuatro años. Los profesores de la Royal Institution tenían la costumbre, entonces y ahora, de dar una serie de conferencias a audiencias populares. En aquellos días, sin embargo, esas conferencias tenían un carácter bastante "televisivo", y la Institution dependía fuertemente de ellas para obtener dinero y publicidad.

Figura 5. (izquierda)
Lo que ocurre realmente con la posición de la carga de la figura 4. La junta se agrieta de B a C y la carga está soportada ahora en la superficie AC: el efecto es que la pared se hace más estrecha.

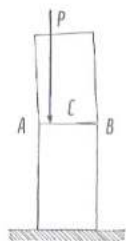
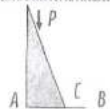


Figura 6. (derecha)
Cuando la carga P actúa fuera de A, es decir, fuera de la superficie que limita el muro, el muro girará alrededor de A, se vencerá hacia afuera y caerá.



Young tomó seriamente su misión educativa, y, lleno del entusiasmo del investigador triunfante, se lanzó a una serie de conferencias sobre el comportamiento elástico de varios tipos de estructuras, con muchas útiles y novedosas observaciones sobre el comportamiento de los muros y de los arcos.

La asistencia a las conferencias de la calle Albemarle estaba de moda en aquellos días, y se ha dicho que el público estaba compuesto de "mujeres tontas y filósofos aficionados". Young no despreció de ninguna manera a la porción femenina de su auditorio, y señaló en su primera lectura:

Una considerable parte de mi audiencia, para cuya información será mi particular ambición dirigir mis conferencias, consiste en ese sexo que, como acostumbra la sociedad civilizada, está en cierta medida exento de tareas más laboriosas que ocupan el tiempo o la atención del otro sexo. Las muchas horas de asueto que son la posesión de la fêmeas de los rangos superiores de la sociedad pueden seguramente ser más apropiadas, con mayor satisfacción, para el perfeccionamiento de la mente y para la adquisición de conocimientos que para esas diversiones que sólo están dirigidas a facilitar la insípida consunción de tiempo superfluo...

Sin embargo, la fortuna no siempre sonríe a aquellos que, aunque lo intenten celosamente, se esfuerzan en comunicar provechosa información, y podríamos sospechar que algunas de las fêmeas de los rangos superiores de la sociedad se deslizarían silenciosamente fuera, prefiriendo consumir insipidamente su tiempo superfluo. En cualquier caso, Davy, que exhibía en sus conferencias algunos de los emocionantes fenómenos asociados con el recién descubierto fluido eléctrico, además de una serie de experimentos químicos llenos de color, era una joven personalidad pública, lo que ahora llamaríamos un fenómeno televisivo. Davy era además extraordinariamente apuesto, y las mujeres jóvenes se amontonaban en sus conferencias por razones que no eran siempre estrictamente académicas; "esos ojos", se había oído decir a una de ellas, "están hechos para algo más que para absorberse en problemas difíciles". El resultado, en términos de caja, no podía ponerse en duda, y se nos ha contado que:

El Dr. Young, cuyo profundo conocimiento de los temas que enseñaba nadie se aventuraría a poner en duda, daba conferencias en el mismo teatro y a una audiencia de composición similar

a la que atraía Davy, pero el número de espectadores disminuía a diario y no por otra razón que la de adoptar un estilo excesivamente severo y didáctico.

No hubiera importado demasiado este tipo de fracaso si Young se hubiera atraído el interés y el apoyo de los ingenieros en ejercicio. Sin embargo, la profesión de ingeniero en aquella época estaba liderada, y frecuentemente dominada, por el gran Thomas Telford (1757-1834), cuyas opiniones, como hemos visto, eran severamente pragmáticas y anti-teóricas. En consecuencia, Young dejó su cátedra casi inmediatamente y volvió a la práctica de la medicina³. El desarrollo de la elasticidad se traspasó, por muchos años, a Francia, donde, en esta época, Napoleón estaba estimulando activamente el estudio de la teoría de estructuras.

La teoría de la compresión elástica, el "tercio medio" y la inestabilidad que tanto aburrió a las féminas de moda durante las conferencias de Young, realmente nos cuenta prácticamente todo lo que se necesita conocer sobre el comportamiento de las juntas de fábrica, *suponiendo que conocemos la posición del punto de aplicación de la carga*. En otras palabras, ¿cuál es la excentricidad de la carga?

La mejor forma de definirla es por medio de lo que se llama "línea de presiones", es decir, una línea que pasa a través del espesor del muro de un edificio desde su cúspide a su base, y que une las posiciones sucesivas que toman las resultantes de las cargas de cada junta. La "línea de presiones" es un descubrimiento francés y parece que fue concebida por primera vez por Coulomb (1736-1806).

En un muro, pilar o columna perfectamente simétrico, como el de la figura 7, la línea de presiones pasa evidentemente por el centro del muro, y por lo tanto obtenerla no es ningún problema. Sin embargo, un edificio que tenga alguna pretensión de refinamiento debe soportar al menos una fuerza oblicua debida al empuje horizontal de los elementos de la cubierta, de los arcos, de las bóvedas o de cualquier otro tipo de construcción asimétrica. En tal caso, la línea de presiones no pasa exactamente por el centro del muro, sino que queda desplazada hacia uno de los paramentos del muro, recorriendo frecuentemente un camino curvo como el de la figura 8⁴.

Una de los remedios que podemos aplicar, y puede ser uno de los más acertados, es añadir peso a la parte superior del muro. En la figura 9 se representa gráficamente lo que ocurre. Al contrario de lo que podría suponerse, un peso actuando en su parte superior, hace al muro más, no menos, estable, y puede hacer volver una línea de presiones errada al recorrido más o menos correcto.

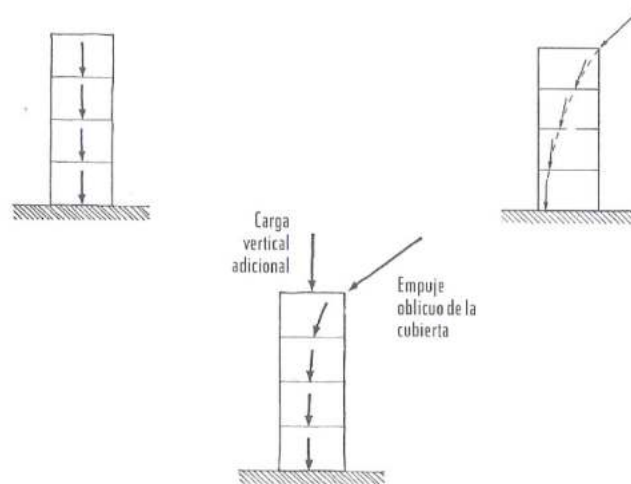


Figura 7. (izquierda) Para el caso más sencillo de carga simétrica, la "línea de presiones" pasa a través del centro del muro.

Figura 8. (derecha) El efecto de una carga oblicua es desplazar la línea de presiones de esta forma.

Figura 9. (abajo) El efecto de una carga adicional colocada encima del muro es reducir la excentricidad de la línea de presiones.

Una forma de conseguirlo es sencillamente construir el muro más alto de lo que aparentemente es necesario, y, además, añadir cualquier cosa como pesadas balastradas o cresterías también es bueno. También puede servir de ayuda una fila de estatuas, si el edificio es adecuado para ello, y puedes permitirte (figura 10).

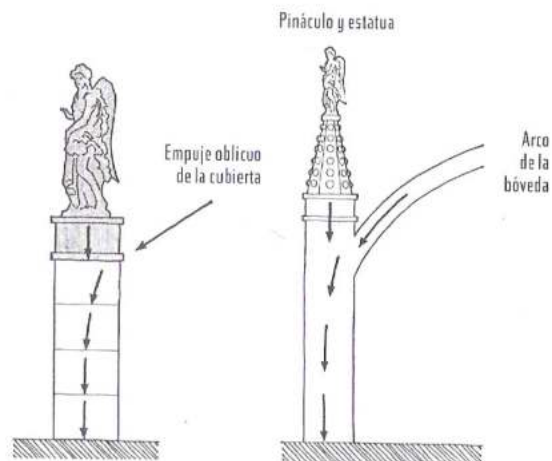
Esta es la justificación estructural de los pináculos y la estatuaría de las iglesias y catedrales góticas. Están en pie realmente para reírse de los funcionalistas, y de todos esos pelmazos que parlotean en exceso sobre la "eficacia".

Solia suponerse que era absolutamente esencial que la línea de presiones³ entrase dentro del "tercio medio" del muro porque, si aparecen grietas, el muro debería hundirse. Este principio es muy holgadamente conservador respecto a la seguridad y debería ser seguido, pero, en estos tiempos permisivos, me temo que raramente se cumple.

³ Realmente existen varios tipos de líneas de presiones, y todas deben estar dentro de la superficie del muro. La línea de presiones pasiva, es la que proviene del peso del muro en sí, y de todo lo que está ligado permanentemente a él, como los forjados y las cubiertas. Las líneas de presiones activas, son las que provienen, no sólo de las cargas permanentes, sino también de las sobrecargas transitorias que pueden actuar en el edificio debido a la presión del viento o el agua, el carbón, la nieve, la maquinaria, los vehículos, el público y así sucesivamente. Las formas de las distintas líneas de presiones activas definen los límites con que pueden cargarse con seguridad las estructuras de fábrica.

⁴ Ésta es una de las razones de la moda moderna de no hacer decoraciones de yeso en los interiores de los edificios.

Figura 10. Esto puede conseguirse añadiendo carga superior en forma de pináculo, estatuas, etc.



Cualquiera que contemple un edificio de viviendas moderno o una universidad nueva se dará cuenta que los muros de fachada están llenos de grietas, y, donde hay una grieta, existió alguna vez una tracción. Sin embargo, aunque estas grietas pueden dañar bastante los enlucidos o la decoración interior⁴, pocas veces son un peligro para la estabilidad de la estructura.

La condición básica para que una fábrica sea estable es que la línea de presiones esté siempre dentro de la superficie de un muro o un pilar.

Presas

Al igual que los muros, las presas se vienen abajo no por falta de resistencia, sino por falta de estabilidad: de nuevo pueden correr peligro de volcar. El empuje horizontal en una presa debido a la presión del agua embalsada es en general del mismo orden que el peso de la fábrica utilizada en su construcción. Por esa razón pueden existir diferencias muy grandes en la posición de la línea de presiones cuando la presa está llena y cuando está vacía. En las presas, a diferencia de los edificios, el ingeniero no puede tomarse ninguna libertad con respecto a la regla del "tercio medio". Es bastante esencial que no exista ningún tipo de grietas en la fábrica, especialmente en el paramento interior. Si apareciesen grietas, el agua a presión puede introducirse fácilmente dentro de la estructura de la presa y producir dos acciones, ambas malas.

La primera es que el flujo de agua puede dañar la fábrica; para evitar cualquier tipo de disgregación, se suelen drenar los interiores de las presas grandes. La segunda acción es más peligrosa. Consiste en que la presión del agua dentro de la grieta produce una presión hacia arriba (del orden de $0,5 \text{ MN/m}^2$ a una profundidad de 30 metros) que, si actúa además superpuesta a otra acción desfavorable, puede volcar la presa.

Es probable que la destrucción por las Reales Fuerzas Aéreas británicas en 1943 de las presas de Mohne y Eder, tuviera dos etapas distintas separadas entre sí por un corto espacio de tiempo. En la primera etapa se bombardearon, con bombas rodantes, los paramentos interiores de las presas, donde se hundieron antes de explotar. Cuando explotaron, la estructura de la presa se debió de agrietar en su parte enterrada, y después de una pequeña pausa la penetración del agua a presión dentro de las grietas produjo el vuelco de las presas. Todos los que han leído los informes de la operación se acordarán que hubo una pausa apreciable entre la explosión de las bombas y el hundimiento visible de las presas. La rotura de esas presas, por supuesto, produjo daños inmensos en el Ruhr.

El hundimiento de una presa en épocas de paz es la pesadilla del ingeniero. Aunque la presa no esté construida de piedra, sino de hormigón en masa, sería una locura contar con la más

pequeña resistencia a tracción. Por consiguiente, en las presas de hormigón en masa la línea de presiones no se debe salir del borde interior del tercio medio cuando está vacía ni del borde exterior cuando está llena, y además es mejor dejar un cierto margen. Estos requisitos producen normalmente la sección ataluzada asimétrica que nos es familiar (figura 11).

Figura 11. (Izquierda) Presa de hormigón en masa.

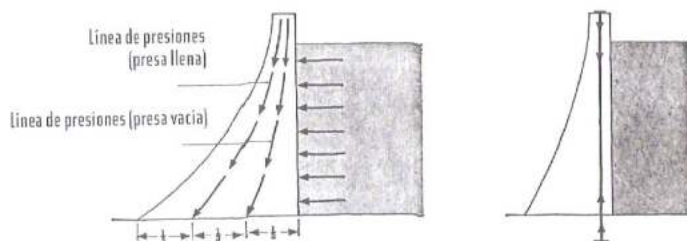


Figura 12. Presa pretensada. Se puede algunas veces conseguir una presa más delgada y más barata utilizando armadura de acero postensada anclada en roca inferior. Esto es equivalente a añadir peso en la parte superior de la presa y por lo tanto limitar los movimientos de la línea de presiones.

Sin embargo, las presas son caras en relación al valor del agua embalsada, y por tanto los ingenieros están buscando continuamente métodos más baratos de construirlas. Se puede conseguir un ahorro considerable de peso y costo de cemento armando el hormigón con redondos de acero, en especial si el armado es a tracción. Sin embargo, salvo que las armaduras estén ancladas a roca firme bajo la cimentación, existe un peligro real de que toda la presa, las armaduras y todo el resto, se levante y vuelque.

La figura 12 muestra una forma de resolver el problema. Aquí unas armaduras de acero verticales se han anclado en la roca bajo la presa y, atravesándola, son conducidas a su parte superior, donde se tensan mediante gatos. Se puede ver que las armaduras postensadas hacen el mismo papel que los ángeles y los pináculos de las catedrales. Por supuesto, toda la pesada fábrica tradicional se puede concebir como una estructura "pretensada" por su propio peso. Sin duda, una pesada fila de estatuas colocadas encima de la presa puede ser igual de adecuada, y además quedaría mejor, pero me temo que serían algo más caras que los redondos de acero.

Arcos

Aunque el arco no es tan antiguo como la fábrica propiamente dicha, es ciertamente muy antiguo. Existe certeza histórica de la existencia de arcos de ladrillo perfectamente contruidos en Egipto y Mesopotamia, alrededor del 3600 antes de Cristo. El arco de piedra parece haber evolucionado por separado, y probablemente de manera independiente, a partir del concepto de *falsa bóveda*, es decir, de construir la bóveda con piezas horizontales voladas escalonadamente a cada lado hasta que se unan en la clave. Las salas abovedadas (lámina 5) que se encontraron profundamente enterradas bajo las murallas de la ciudad micénica de Tirinto —que ya eran antiguas cuando Homero se maravillaba ante ellas— están contruidas de esta forma. El arco de la portena de esas inmensas murallas (lámina 6) puede considerarse como el desarrollo de una falsa bóveda. Fue probablemente contruido antes de 1800 a.C.

Sin embargo, el arco falso⁷ o semi-falso, como la portena de Tirinto, es bastante tosco. Los arcos evolucionaron pronto hacia una construcción en la que los bloques que le dan forma tienen una forma ligeramente trapezoidal y son llamadas "dovelas". La composición de un arco tradicional se muestra en la figura 13.

La dovela que se encuentra en la parte superior del arco o clave se llama "piedra de clave", y algunas veces se hace mayor que el resto. Aunque los poetas, políticos y otras gentes sin formación técnica han atribuido propiedades especiales a las piedras de clave reales o figuradas, de hecho no son funcionalmente diferentes al resto de las dovelas y la diferencia, si existe, es puramente decorativa.

La función estructural de un arco es transformar las cargas verticales que actúan hacia abajo, en cargas oblicuas que actúan en la dirección de su trazado y que comprimen a las dovelas entre sí. Las dovelas, naturalmente, empujan a su vez contra los contrafuertes o arranques de los arcos. La forma de comportarse un arco se intuye con claridad usando el sentido común. Un arco, con sus dovelas, se parece mucho a un muro curvo, y la posición de la carga en cada

⁷ El arco verdadero es algo inventado por el mundo. Las civilizaciones indígenas de Mesopotamia y Egipto contruyeron grandes arcos.



Lámina 5. Falsa bóveda de Tirinto (hacia 1800 a. C.). Los falsos arcos y bóvedas precedieron al verdadero arco.

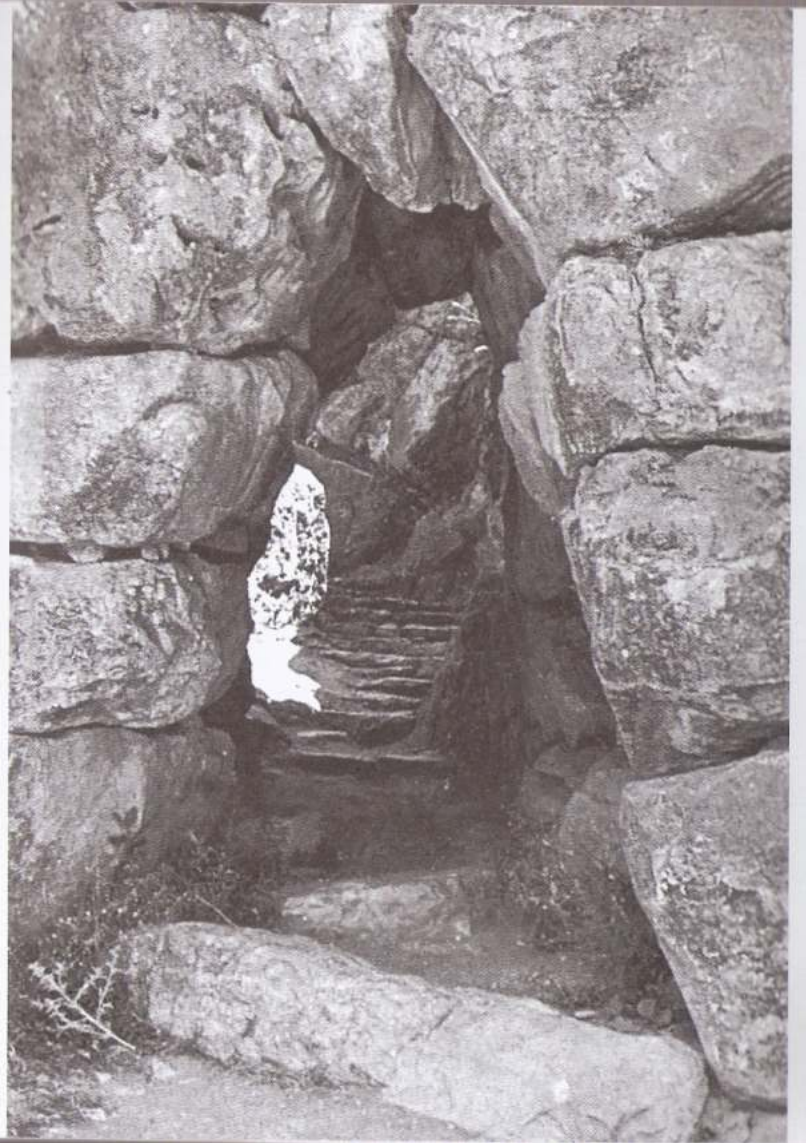
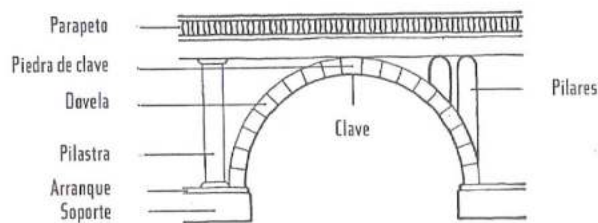


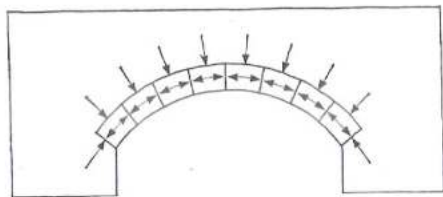
Lámina 6. semi-falsa Tirinto. Estas eran viejas. Homero se ante ellas.

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

La junta puede ser definida igualmente por la línea de presiones. En este caso la línea de presiones debe curvarse y seguir, más o menos, la forma del arco. Hablaremos en el próximo capítulo de la línea de presiones de los arcos; de momento supongamos que existe. También, como en los muros, podemos suponer que las dovelas no pueden deslizarse entre sí y que las juntas no pueden soportar tracciones.



Las juntas entre las dovelas se comportan de forma muy parecida a las juntas entre los bloques de un muro de piedra. Si la línea de presiones se sale del "tercio medio" aparece una grieta; también, si la línea de presiones se acerca al borde de la junta, es decir, al contorno del arco, aparece una "rótula". El arco se diferencia, sin embargo, radicalmente de un plebeyo muro, en que el muro se hunde si aparece una rótula, pero el arco no. Viendo la figura 15 nos podemos dar cuenta de que en un arco pueden aparecer rótulas sin que pase nada grave.



De hecho, una buena cantidad de los arcos modernos están contruidos deliberadamente con tres rótulas para permitir los asentos diferenciales y las dilataciones térmicas.

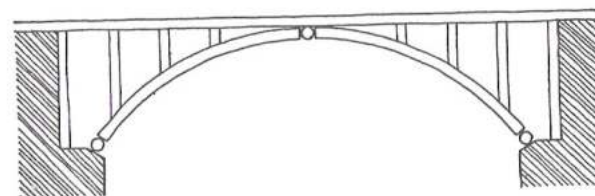


Figura 15. Un arco puede tener hasta tres rótulas sin hundirse; de hecho, muchos arcos modernos están contruidos deliberadamente de esta forma.

Si queremos realmente que un arco se hunda necesitamos producir cuatro rótulas de forma que el arco pueda transformarse en una cadena de tres eslabones o "mecanismo" que tiene ahora libertad para plegarse y derrumbarse (figura 16). De pasada, ésta es la causa por la que si se quiere demoler un arco —por buenas o malas razones— es mejor colocar la carga explosiva cerca del "tercer punto" del arco. Esto en general obliga a cavar la carretera hasta alcanzar la parte superior del arco. Como esto consume tiempo, la demolición de puentes detrás de los ejércitos en retirada queda a menudo sin efecto.

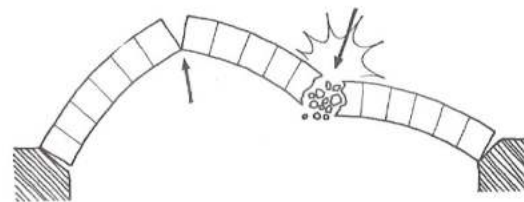


Figura 16. Un arco necesita la aparición de cuatro rótulas antes de venirse abajo.

Todo esto quiere decir que los arcos son extraordinariamente estables y que son muy poco sensibles a los movimientos de las cimentaciones. Si existe un movimiento apreciable en la

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

cimentación un muro probablemente se derrumbará⁴, a los arcos no les importa demasiado, y es bastante frecuente observar algún tipo de asiento. El puente de Clare, por ejemplo, en Cambridge (lámina 7) se ha hundido de forma notable por el centro debido a movimientos de sus contrafuertes. Ha estado así mucho tiempo y es bastante seguro. De la misma manera los arcos soportan notablemente bien los terremotos y otro tipo de agresiones, como el tráfico moderno.

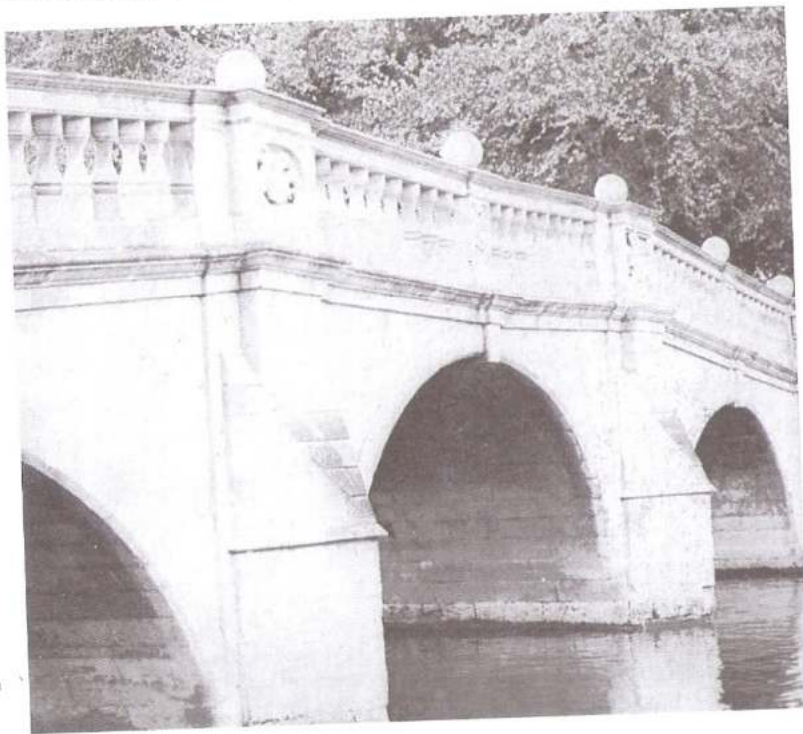


Lámina 7. Es muy difícil que se hunda un verdadero arco. La cimentación del puente de Clare, Cambridge, se movió hace mucho tiempo, pero el puente sigue estando perfectamente seguro aunque el arco está deformado.

⁴ Este es el objeto de minar las murallas de las fortalezas durante los asedios. Cuando el final del túnel llegaba bajo los cimientos de la muralla se apeaba con pies derechos de madera. En el momento apropiado se introducía fuego para quemar los pies derechos, esperando que se hundiera la muralla. La función de los fosos inundados o secos era precisamente evitar las minas.

MUROS, ARCOS Y PRESAS

Con todo esto, no es sorprendente que nuestros antepasados fuesen tan adictos a los arcos, seguían en pie aunque se hiciesen los números mal (o no se hiciese ninguna clase de número) y, además, se colocasen las cimentaciones de todo ello en un pantano, como desde luego es el caso de varias catedrales inglesas.

Es bastante notable que, en las ruinas, los arcos son lo que ha sobrevivido mejor. Esto se debe en parte a la estabilidad inherente a los arcos, aunque también podría ser debido al hecho de que las piedras rectangulares de los muros son más apetecibles para el campesinado local que las dovelas trapezoidales de los arcos. La supervivencia de las columnas circulares de los templos griegos, mucho después que los aparejos de los muros fueran robados, se debe sin duda a causas similares.

En general, es más fácil mantener la línea de presiones en el interior de un muro o un arco si la fábrica es gruesa; pero por supuesto a costa de hacer la fábrica de piedra o ladrillo más cara. Para conseguir espesor adicional a bajo costo los romanos añadieron hormigón en masa. Este estaba fabricado mezclando puzolana (*pulvis puteolanis*) —una tierra natural que es bastante común en Italia— con limo añadiéndole arena y grava.

Si los muros y los arcos son más gruesos, son en general tan estables que puede que no necesiten ser tan pesados. Si todo lo que se va a construir debe ser transportado y manipulado, un ahorro de peso supone un ahorro en el precio de la construcción. Vitrubio (siglo II a.C.), que era un ilustre tratadista de arquitectura además de oficial de artillería, nos cuenta que en sus días se utilizaban con frecuencia hormigones de baja densidad que se conseguían añadiéndoles polvo de piedra pómez machacada. La gran cúpula de Santa Sofía de Constantinopla (528 d.C.) se construyó con este sistema.

Se puede conseguir también una reducción de peso y costo introduciendo contenedores vacíos de uno u otro tipo dentro del hormigón. En el mundo antiguo el comercio extenso y próspero del vino se llevaba a cabo mediante ánforas. Estos envases comerciales eran estrictamente no retornables y tenían tendencia a acumularse en embarazosas cantidades. La solución más ele-

mental era introducirlos en el hormigón, y de hecho muchos edificios tardo-romanos están contruidos así. En especial se dice que las hermosas iglesias bizantinas de Rávena están compuestas en gran parte de envases desechables³.

Escala, proporción y seguridad

Aunque se alega que algunas estructuras se tienen en pie debido al Poder de la Fe, y otras se mantienen enteras gracias a la pintura y a la oxidación, a un proyectista que no sea totalmente irresponsable le gusta tener algún tipo de seguridad objetiva sobre la resistencia y la estabilidad de lo que se propone hacer. Si no se es capaz de realizar los cálculos adecuados modernos, lo más sencillo es o bien hacer un modelo, o bien variar la escala de alguna versión anterior de estructura que se comporta bien.

Esto, por supuesto, es justo lo que se solía hacer hasta épocas recientes. Quizá se continúe haciendo. El problema es que los modelos están muy bien si lo que se quiere conocer es la apariencia de lo que se está proyectando, pero puede producir peligrosos equívocos si se quiere predecir su resistencia. Esto se debe a que, cuando variamos la escala, el peso de la estructura crece con el cubo de sus dimensiones; es decir, si duplicamos sus lados, el peso aumenta ocho veces. El área de las secciones que deben soportar estas cargas, sin embargo, crece sólo con el cuadrado de sus dimensiones, por lo que, en una estructura duplicada, estas secciones aumentarán sólo cuatro veces su área. De esta forma la tensión crece linealmente con el área, y, si duplicamos su tamaño, duplicamos las tensiones y entraremos en serias dificultades.

La resistencia de cualquier estructura que puede hundirse por rotura de sus materiales no puede predecirse a partir de modelos o variando la escala de estructuras experimentadas previamente.

³ Los famosos balandros del canal de Bristol (hacia 1900) estaban lastrados con hormigón colocado en la línea de la quilla. El hormigón del centro del barco, que tenía que ser pesado, estaba hecho con desechos de hierro y restos de calderas. El hormigón de los extremos del barco, que tenía que ser ligero, estaba relleno con botellas de cerveza vacías. En los pilinos de las estatuas y las urnas de mi jardín uso generalmente una mezcla de telas de gallinero usadas, botellas de vino vacías y hormigón, parece funcionar muy bien.

Este principio, que fue enunciado por Galileo, se conoce por la "ley del cuadrado-cubo", y es la verdadera razón por la que los vehiculos, los barcos, los aviones y la maquinaria necesitan ser calculados por métodos analíticos modernos. Es probablemente la razón por la que se desarrollaron tan tarde, al menos en sus formas modernas. Sin embargo, podemos despreciar la ley del cuadrado-cubo en casi todos los edificios de fábrica porque, como hemos dicho, estos edificios no rompen prácticamente nunca debido a la rotura a compresión. Las tensiones en las fábricas son tan bajas que podemos permitirnos aumentar su escala casi de forma indefinida. Al contrario del resto de casi todas las estructuras, estos edificios se hunden porque se vuelven inestables y vuelcan; y esto puede predecirse en un modelo a cualquier escala.

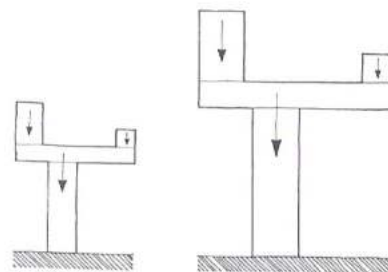


Figura 17. La estabilidad de un edificio de fábrica es la misma que la de una balanza romana. La balanza está afectada por el cambio de escala.

Desde el punto de vista filosófico, la estabilidad de un edificio no es distinta de la estabilidad de una balanza o de cualquier otro instrumento de pesar como una balanza romana (figura 17). Como los momentos de sus dos brazos crecen con la cuarta potencia de sus dimensiones si aumentamos la escala todo continúa en equilibrio. De forma que, si un edificio pequeño se mantiene en pie, una versión a escala mayor del mismo continúa siendo capaz de hacerlo. Los "secretos" de los constructores medievales consistían en convertir estas experiencias en una serie de reglas y proporciones. Sin embargo, está demostrado que utilizaron modelos —algunos de 18

metros de longitud— hechos de fábrica o escayola. Esta forma de actuar funcionaba para estructuras de increíble complejidad, como la catedral de Reims (figura 18).

Figura 18. (izquierda) Catedral de Reims: arbotantes (según Viollet-le-Duc).

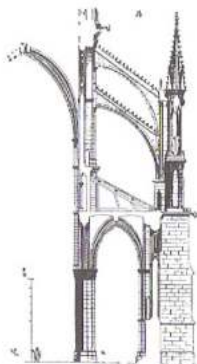
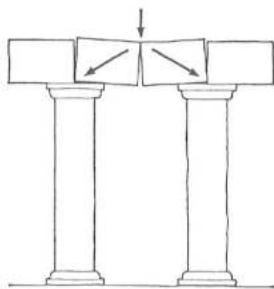


Figura 19. (derecha) Si el dintel corto de un arquivado se agrieta por la cara traccionada, puede convertirse en un arco de tres articulaciones y continuar soportando la carga.



Los griegos del período clásico abandonaron el arco en casi toda su arquitectura seria, prefiriendo utilizar vigas de piedra o dinteles. En estas vigas las tensiones de tracción eran relativamente altas, y muchas veces estaban en el límite de la seguridad. Se agrietó un número considerable de estos arquivados, ya en la antigüedad. Ésa es la razón por la que se utilizaron refuerzos de hierro en las vigas de mármol de los Propileos, por ejemplo. Lo que salvó a los templos dóricos del colapso estructural fue que las vigas de piedra eran cortas y gruesas y, cuando se fisuraban, se comportaban como arcos (figura 19, láminas 8 y 23).

La arquitectura adintelada griega exigía bloques muy grandes de piedra. Cuando decayó la civilización, se volvió cada vez más difícil el transporte de grandes pesos, y ésta pudo ser la razón, estrictamente práctica, por la que los constructores medievales prefirieron los arcos góticos y las bóvedas, ya que pueden ser construidos con piedras de pequeña dimensión.

Como ya señaló sir John Soane hace cerca de 200 años en sus lecciones de arquitectura, a pesar de las limitaciones que presentaban las vigas de piedra, el tamaño de los edificios de la antigüedad era muchas veces mayor que el de los correspondientes edificios modernos.

El Partenón, por ejemplo, es considerablemente mayor que la iglesia de Saint Martin-in-the-Fields en Londres. Aun así, el Partenón —de alrededor de 69 por 30 metros de planta— es pequeño comparado con el templo de Zeus Olímpico de Adriano, en sus proximidades, que mide 108 por 52 metros y casi llenaría la Plaza de Trafalgar en Londres (lámina 8). Sin embargo, el templo de Adriano queda pequeño al lado de los muros de la Acrópolis que se levantan por encima de él. De nuevo, simplemente por su tamaño, muchos de los puentes y acueductos romanos son impresionantes sea cual sea el punto de vista con que se miren.

Estas antiguas construcciones han sido más a menudo destruidas por el hombre que por la naturaleza y algunos de ellos se conservan en buenas condiciones hoy en día. Sin embargo, los antiguos seguían en todos estos trabajos el ejemplo de experiencias parecidas: si no podían hacerlo podían quedarse atorados de mala manera. No sólo los barcos y los vehículos antiguos eran patéticamente pequeños y frágiles desde el punto de vista moderno, además los edificios novedosos y poco convencionales como las *Insulae* romanas —que eran altos bloques de pisos—



Lámina 8. Parte del enorme templo de Zeus Olímpico en Atenas. Fue construido según el orden Corintio por el emperador Adriano hacia 138 d. C. Se ve que uno de los arquivados está agrietado. Nótese que las murallas de la Acrópolis se levantan por encima del templo de Adriano.

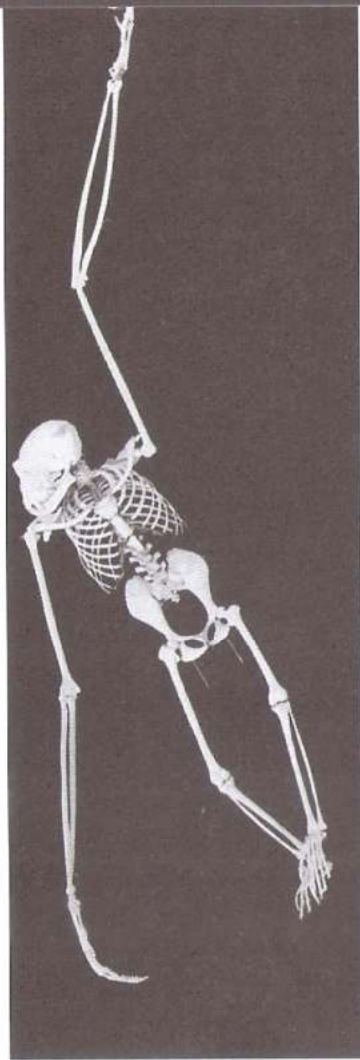


Lámina 9. Los esqueletos del gibón (a) y el gorila (b), a la misma escala. La ley "cuadrado-cubo" tiene más aplicación en las vigas que en las columnas. De esta forma, a medida que un animal se hace más grande, sus costillas y los huesos de sus patas tienen a volverse más gruesos en proporción a sus vértebras.

MUROS, ARCOS Y PRESAS

se venían abajo con una frecuencia tan deprimente, que el emperador Augusto se vió obligado a promulgar una ley que limitaba su altura a 18 metros.

Sobre columnas vertebrales y esqueletos

Las columnas vertebrales de las personas y de los animales están compuestas de una serie de cortas vértebras, con aspecto de tambor, hechas de hueso duro. Están separadas entre sí por los "discos intervertebrales" que están hechos de un material relativamente blando para permitir un cierto movimiento entre las vértebras. Normalmente, la espina dorsal está sometida a una compresión global debida al peso que tiene que soportar y a la tracción producida por los distintos músculos y tendones.

En los jóvenes el material de los discos es flexible y dúctil, y pueden soportar tensiones de tracción considerables si tienen que hacerlo. Tanto, que si la espina dorsal queda dañada por una tracción, la fractura aparece más bien en los huesos que en los discos. A partir de los veinte años, sin embargo, el material del disco se vuelve cada vez menos flexible y por tanto progresivamente débil al trabajar a tracción. A medida que nos volvemos más venerables, por lo tanto, nos vamos aproximando a un estado en el que nuestra columna vertebral se parece a la de una iglesia o un templo. Las vértebras representan los tambores de piedra y los discos, el débil mortero. Aunque los discos pueden todavía, en una urgencia, soportar algo de tracción, en general debe ser evitado.

Por consiguiente, las personas de edad avanzada deben tener cuidado en mantener la línea de presiones tan cerca de la columna como sea posible. Es ésta la razón por la que existe una forma correcta y una forma incorrecta de levantar un peso. Si levantamos el peso de forma incorrecta, aparecen tensiones de tracción en las juntas y éstas pueden romperse. El resultado puede ser un "deslizamiento de disco" o una u otra de las variadas molestias de espaldas que están incluidas en el nombre de "lumbago" —que pueden llegar a ser sorprendentemente dolorosas—.

De la misma manera que la columna vertebral se comporta como un muro o una columna de piedra y que la regla del "tercio medio" tiene una cierta condición limitativa, se deben aplicar las mismas reglas al cambio de escala de un animal que las que aplicamos al de un edificio. Si empezamos con un animal pequeño y aumentamos progresivamente su tamaño, el grueso de las vértebras se mantendrá en la misma proporción. La mayoría de los otros huesos, sin embargo, como las costillas o los huesos de las piernas, están sometidos principalmente a flexión —como los dinteles de un templo— y las cargas que soportan son proporcionales a la masa del animal. De esto se sigue, por consiguiente, que estos huesos deben ser desproporcionadamente más gruesos.

Si observamos en un museo los esqueletos de una serie de animales semejantes de tamaño creciente, como los monos, se ve claramente que, mientras que las dimensiones de las vértebras de los monos pequeños, los medianos, los gorilas y el hombre están aproximadamente en proporción a la altura del animal, las costillas y, especialmente, los huesos de las piernas se vuelven mucho más gruesos y pesados, para el tamaño del animal, a medida que aumenta la escala (lámina 9).

Respecto a esto, la naturaleza parece ser más inteligente que los arquitectos romanos, que, a medida que aumentaban el tamaño de sus templos, abandonaron las robustas proporciones del estilo dórico y construyeron, normalmente, en el florido estilo corintio imperial, que tenía arquivas más esbeltos que por tanto rompían con frecuencia.

CAPÍTULO 10

Algo sobre puentes o Saint Bénézet y Saint Isambard

El puente de Londres se está cayendo/Cayendo, cayendo/El puente de Londres se está cayendo/Mi hermosa dama/Construido de ladrillos y piedras/Ladrillos y piedras, ladrillos y piedras/Construido de ladrillos y piedras/Mi hermosa dama/Poned un hombre para vigilar toda la noche/Vigilar toda la noche, vigilar toda la noche/Poned un hombre para vigilar toda la noche/Mi hermosa dama.

Cuanto más pensamos en esta canción infantil, más timorata nos parece. Aunque no se han encontrado rastros de ella muy anteriores al siglo XVII, es sin duda mucho más antigua, el *Diccionario de Oxford de Canciones Infantiles* dedica varias páginas a ella, bastante insoporables por cierto. En todo el mundo los puentes suelen estar asociados a danzas infantiles —*on y danse, on y danse, sur le pont d'Avignon*— y con sacrificios humanos que no son exactamente leyendas. Se ha encontrado al menos un esqueleto de niño, emparedado en los cimientos de un puente¹. Quizá por esa razón durante la Edad Media se fundaron varias órdenes de frailes especializados en construir puentes —*Frates Pontifices*— en distintos lugares de Europa. Produjeron un santo —San Bénézet, llamado en España Benito el Mozo o San Benitico— que se cree que proyectó el puente de Avignon. Igual que más tarde Telford, había sido pastor de niño. Y es bonito pensar que, al suprimir los sacrificios humanos, lo celebró con las danzas y la canción infantil con la que los niños franceses siguen bailando. La rama francesa de la Orden de Frailes constructores, tiene un monasterio cerca de París con el encantador nombre de Saint Jacques-de-Haut-Pas.

En términos prácticos, el objetivo de un puente es permitir cruzar a objetos pesados, como los vehículos, por encima de algún tipo de obstáculo o barranco. No importan excesivamente los

¹ En el fuerte romano de Lowbury Hill, en Berkshire, a una milla más o menos del lugar donde estoy escribiendo este capítulo, se encontró el cuerpo de una mujer horrigonada en las cimentaciones. Esta práctica ha durado hasta los tiempos modernos. En 1865 se dijo que en Ragusa, los musulmanes secuestraban niños cristianos para emparedarlos dentro de las cimentaciones. Aun en Inglaterra, tan recientemente como en 1871, se sospechó que un cierto Lord Leigh había empotrado una "persona indeseable" dentro de la cimentación de un puente en Stoneleigh, Warwickshire.

medios técnicos con que se ha construido con tal que soporte de forma segura ese peso. Como veremos, se puede utilizar una gran variedad de principios estructurales.

El método estructural que se elija para un caso dado no sólo depende de los condicionantes físicos y económicos, también influye la moda del día o el capricho del ingeniero. Se han ensayado prácticamente todas las formas concebibles de construir un puente, en una época u otra, para hacer los puentes reales. Se podía suponer que una de las formas de resolver el problema demostraría ser la "mejor" y que sería aceptada universalmente, pero este no es el caso; y además el número de sistemas estructurales de uso común parece crecer a medida que pasa el tiempo.

En los países civilizados los puentes se esparcen por la campiña en número generoso y en una rica variedad; nos proporcionan un interesante muestrario de los distintos principios estructurales. En cualquier otro artefacto la estructura principal está escondida debajo de los paneles, los aislamientos, los cables o cualquier otro tipo de instrumento y es por tanto difícil de ver o de deducir. Una de las virtudes de los puentes es que son muy fáciles de observar tanto la estructura como la forma en que trabaja.

Puentes en arco

Los puentes en arco han sido siempre muy utilizados, y, con formas diferentes, están todavía bastante de moda. Un sencillo arco de fábrica puede construirse hasta una luz bastante por encima de los 60 metros. En la mayoría de los emplazamientos, los problemas de diseño están originados por el costo, la altura del arco, la carga, los contrafuertes y la cimentación.

Si examinamos el arco plano, semicircular de fábrica que fue tan pródigamente utilizado en la época romana y medieval, veremos que el condicionante básico es que la altura del arco debe ser aproximadamente la mitad de la luz. De este modo, una luz de 30 metros supone una altura de al menos 15 metros —en la práctica bastante más—. Esto está muy bien si el puente salva un barranco que tenga más de 15 metros de profundidad, ya que el arco se puede hundir hasta que

su cúspide queda al nivel de la carretera en cada lado. Sin embargo, si el puente se construye en terreno llano, tendremos como alternativas, o bien hacer un puente con doble pendiente, que es inconveniente y peligroso, o bien construir rampas largas y caras.

El problema se volvió particularmente importante con la llegada de los ferrocarriles porque a los trenes no les gustan los puentes con pendientes —de cualquier tipo— y el costo del movimiento de tierras que se necesita para hacer rampas a ambos lados es serio. Una forma de superar esta dificultad, al menos hasta cierto punto, es hacer un arco tendido que tendría una altura considerablemente menor.

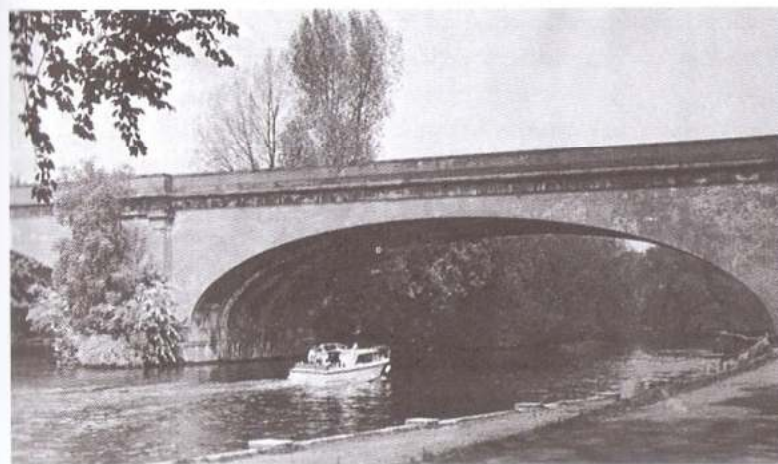


Lámina 10. El puente de Maidenhead de Brunel (1837) tenía el arco de ladrillo más largo y más tendido del mundo. Mucha gente predijo que los arcos no se tendrían en pie, pero todavía están allí hoy en día soportando trenes diez veces más pesados que los de Brunel.

En 1837, enfrentado al problema de cruzar con el ferrocarril Great Western el Támesis en Maidenhead, Isambard Kingdom Brunel construyó un puente de dos arcos de ladrillo, cada uno con una luz de 43 metros y una altura de sólo 8 metros (lámina 10).

El público y los expertos quedaron horrorizados, y los periódicos se llenaron de cartas en las que se profetizaba que el puente no podría nunca mantenerse en pie. Para mantener viva la correspondencia y la publicidad, y quizá para dar suelta a su sentido del humor, Brunel aplazó la retirada de las cimbras y los apeos de madera sobre los que se habían construido los arcos. Naturalmente, se dijo que tenía miedo de hacerlo. Cuando, después de aproximadamente un año, todas las cimbras quedaron destruidas en una tormenta, los arcos continuaron en pie perfectamente bien. Brunel reveló entonces que el cimbrado se había bajado de hecho hasta separarlo algunos centímetros del arco poco después de que la fábrica se terminase y llevaba muchos meses sin servir para nada. El puente sigue hoy en día allí, soportando trenes diez veces más pesados de lo que nunca calculó Brunel.

Cuando hacemos más tendida la forma de un arco, de forma que reducimos la altura en relación a la luz, la compresión entre las dovelas aumenta considerablemente, como podríamos esperar. Sin embargo, las tensiones de compresión continúan estando, normalmente, muy por debajo de la tensión de rotura por aplastamiento de la fábrica, y las dovelas del arco corren pocas veces peligro de romperse, aunque las deformaciones que aparecen cuando el arco se asienta después de retirar el cimbrado pueden ser bastante grandes, muchas veces de varios centímetros.

Los daños posibles de un arco "tendido", sin embargo, pueden aparecer como consecuencia del empuje mayor que deben soportar los contrafuertes. Si los cimientos se asientan en un material sólido, como la roca, todo irá bien, pero si lo están en terreno blando pueden aparecer serios percances si éste fluye demasiado. Desgraciadamente, la necesidad de un arco largo y tendido tiene más posibilidades de aparecer cuando necesitamos cruzar ríos que corren a través de un territorio plano y esponjoso.

Por esa razón se construyeron a menudo puentes con muchos arcos pequeños; de hecho, prácticamente todos los puentes medievales tienen arcos múltiples. Se puede objetar a esta forma de hacer las cosas que el costo de construir las pilastras —normalmente bajo el agua y a menudo

sobre terreno blando—es alto y, además, los pilares numerosos con arcos pequeños obstruyen el paso y pueden producir embalsamientos en las crecidas y peligros para la navegación.

Puentes de fundición

Se pueden eliminar algunos de los inconvenientes de los puentes en arco construyéndolos con materiales menos tradicionales. Hacia el año 1770, gente como John Wilkinson (1728-1808) —que había abaratado mucho la fabricación del hierro fundido con mejoras en el sistema de inyección de aire de los hornos de fundición— empezó a fundir dovelas de hierro. El hierro fundido es un material totalmente distinto del hierro colado y el acero porque, a diferencia de estos materiales, es muy frágil. Se parece a la piedra en que es resistente a compresión y débil y poco fiable a tracción y, por tanto, en la construcción de edificios se debe tratar como la fábrica.

Una ventaja del hierro fundido es que es posible moldear elementos arquitectónicos, como las dovelas, a base de triangulados de barras, con lo que se puede reducir enormemente el peso en comparación con la fábrica tradicional. Además, es en general más barato fundir hierro en moldes que tallar la piedra, y, antes de que degenerase el gusto en los tiempos de la primera Acta de Reforma, estas fundiciones de hierro tenían a menudo una forma muy atractiva.

La ventaja de construir puentes con fundición era doble. En primer lugar, había un ahorro de costos de mano de obra y transporte; pero sobre todo la reducción de peso en los arcos disminuía el valor del empuje que soportaban los contrafuertes y de esta forma permitía a los ingenieros construir arcos más tendidos sobre cimentaciones más baratas.

Curiosamente, una de las primeras personas que sacó ventajas a esta técnica fue el americano Thomas Paine (1737-1809), que es conocido en los libros de historia como el autor de *Los Derechos del Hombre*. Paine planeó construir un gran puente de fundición, que había proyectado él mismo, para cruzar el río Schuylkill, cerca de Filadelfia. Fue a Inglaterra a encargar las piezas de fundición, y mientras las estaban haciendo decidió, como partidario de la Revolución

Francesa, hacer una visita a sus amigos jacobinos de París. Estos caballeros le metieron en la cárcel y estuvieron a punto de guillotinarlo. Le salvó por poco la caída de Robespierre.

Debido a estos retrasos, las finanzas de Paine se hundieron y las piezas de fundición fueron vendidas para construir un puente sobre el Wear en Sunderland. El arco, que se terminó en 1796, tenía una luz entre apoyos de 78 metros y una altura de sólo 11 metros. Brunel no utilizó la fundición en el puente de Maidenhead cuarenta años después probablemente porque temía que las vibraciones de los trenes pudieran fisurar el frágil hierro fundido. En cualquier caso, sus arcos de ladrillo funcionaron muy bien. A lo largo del siglo XIX se construyeron una gran cantidad de puentes de fundición. Aunque casi todos se comportaron bien, este método apenas se usa hoy en día, principalmente porque se puede resolver el problema con procedimientos más baratos. Desgraciadamente, un arco de fundición tendido se parece, superficialmente, a una viga (véase capítulo 11). Desde el punto de vista estructural, son bastante distintos porque el arco trabaja, o debe trabajar, totalmente a compresión, mientras que la parte inferior de una viga trabaja a tracción. Si se puede confiar en que el material soporte tracciones, entonces una viga es a menudo más ligera y más barata que un arco, para cumplir una función semejante.

Algunos de los primeros ingenieros, es especial Robert Stephenson (1803-1859), estuvieron tentados —por razones económicas— a aventurarse a utilizar vigas de fundición. Gracias a la sobresaliente reputación profesional de Robert Stephenson las compañías de ferrocarril fueron convencidas para construir varios cientos de puentes con vigas de fundición. Sin embargo, como hemos dicho, la fundición es débil y traicionera a tracción, y estos puentes se volvieron realmente peligrosos. Al final, todos tuvieron que ser reemplazados a costa de enormes desembolsos de las compañías.

El puente en arco con tablero suspendido

Una de las tendencias modernas de construir puentes en arco es utilizar tableros suspendidos. Si dividimos un arco en dos elementos paralelos separados, que pueden estar hechos de acero

hormigón armado, podemos colgar el tablero de los dos arcos, a la altura que queramos, de una forma muy parecida a lo que se hace en los puentes colgantes (figura 1). Ahora ya no existen, por supuesto, restricciones para la altura del arco.

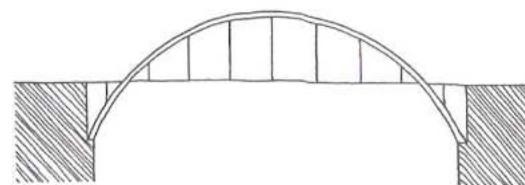


Figura 1. Arco con tablero suspendido.

El puente de Hell Gate de Nueva York (1915) que tiene una luz de 300 metros, y el puente de la bahía de Sydney (1930), que tiene una luz de 500 metros, son ejemplos de puentes de este tipo construidos con acero. En estos puentes, las cargas están soportadas íntegramente a compresión por los arcos, y el tablero colgado está libre de tensiones longitudinales. En los puentes grandes el empuje que actúa contra los contrafuertes es por consiguiente considerable, y se necesitan cimentaciones muy fiables. Tanto el puente de Hell Gate como el de la bahía de Sydney están cimentados en sólida roca.

Puentes colgantes

Los arcos de fábrica tienen una serie de ventajas. Como vimos en el capítulo anterior, son relativamente fáciles de proyectar, ya que se puede cambiar la escala de algo previamente construido con bastante seguridad. Como señala el profesor Heyman, es muy difícil proyectar un arco que realmente pueda hundirse. Esta hazaña fue, de hecho, llevada a cabo por un cierto William Edwards en Pontypridd en 1751, pero no creo que exista ninguna otra noticia de un hecho seme-

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

jante desde entonces. Como vimos, los puentes no son excesivamente sensibles a un movimiento razonable en sus cimentaciones. Sin embargo, debe existir algún tipo de cimentaciones; y en un terreno blando pueden llegar a ser caras y producir problemas.

Además, aunque el coste del mantenimiento de las fábricas es normalmente bajo, el costo de construcción ha sido siempre alto, y esto puede aplicarse particularmente a los puentes grandes, que necesitan de cimbras muy elaboradas durante su construcción. Por todas estas razones siempre ha existido la necesidad de un tipo de puente más barato e ingenioso. En los países primitivos se utilizaban con frecuencia los puentes colgantes de varios tipos: estaban hechos con cuerdas u otros tipos de fibra vegetal. Los ingenieros militares utilizaron también puentes colgantes de cuerda, en especial los zapadores de Wellington durante la Guerra de Independencia Española.

Sin embargo, aunque la cuerda es un material fuerte y fiable para soportar tracciones cuando están nuevas, las que están fabricadas con fibras vegetales se deterioran muy rápidamente al aire libre y se vuelven muy inseguras — como descubrieron personalidades muy interesantes en las proximidades del puente de San Luis Rey³—. Para conseguir un puente colgante permanente, se necesitan cables de hierro o acero. La fundición era excesivamente frágil y el acero no era comercialmente posible hasta hace relativamente poco, pero el hierro colado es bastante fuerte y muy dúctil; también excepcionalmente resistente a la corrosión.

Aunque se había levantado sobre el Tees en 1741 una pasarela de 20 metros de longitud, hecha con cadenas de hierro, el hierro colado era excesivamente caro para ser utilizado en general en la construcción de puentes³, hasta que no se introdujo hacia 1790 el proceso de forjado industrial. A partir de entonces las cadenas de hierro colado se volvieron relativamente baratas. En el puente de Tees las viguetas del tablero estaban unidas directamente a las cadenas de forma primitiva, con lo que el puente era impracticable para los vehículos y debió ser inestable e inquietante para los peatones. El sistema moderno de soportar los cables desde altas pilas y colgar el tablero por debajo del cable (figura 2) fue inventado por James Finlay, de Pensilvania, que empezó a construir puentes de este tipo alrededor de 1796. Añadir a la posibilidad de colocar un tablero

ALGO SOBRE Puentes

suspendido a nivel, la de disponer de cadenas de hierro colado a un precio razonable, hizo del puente colgante una propuesta atractiva para atravesar con tráfico rodado ríos anchos. En muchos casos estos puentes eran más baratos y más prácticos que los puentes grandes de fábrica. Esta idea fue seguida en muchos países, y especialmente por Thomas Telford, cuyo puente a través de los estrechos de Menai (lámina 11) se terminó en 1825; salvaba en el centro una luz de 166 metros, con mucho la mayor de la época.

Las cadenas de Telford, como todas las de los puentes colgantes de aquellos tiempos, estaban formadas por chapas planas, unidas con remaches o roblones, muy parecidas a las cadenas de las bicicletas modernas. La concentración de tensiones en las uniones con los remaches exigía un material dúctil, como el hierro colado, y desde luego las cadenas de este tipo han sido utilizadas con gran éxito y rara vez han dado disgustos. Aunque el hierro colado es seguro a tracción, no es

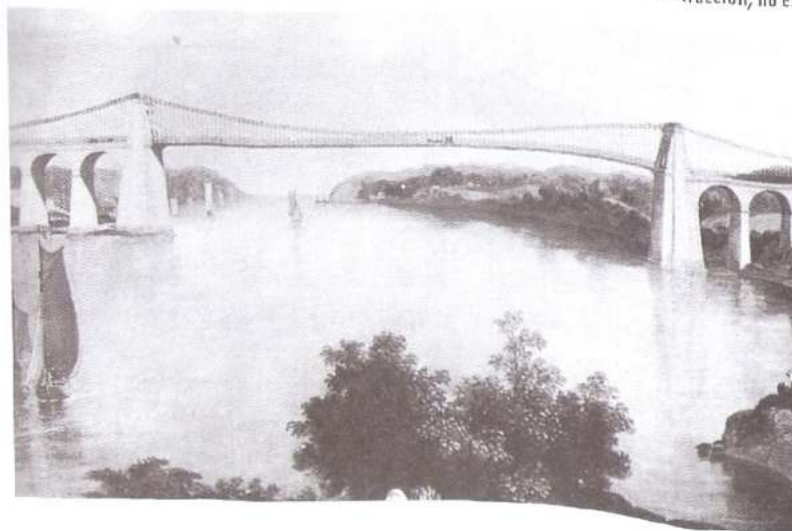


Lámina 11. El puente colgante de Menai de Telford (1819). La luz de 166 metros se acerca al límite de las cadenas de suspensión de hierro colado.

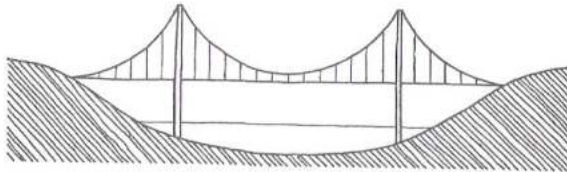
te de San Luis Rey.
Wilder (1927)

na Ciencia de
viles Fuertes.
0.

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

especialmente fuerte, y Telford mantuvo sabiamente la tensión de trabajo de sus cadenas por debajo de los 55 MN/m^2 , que es menos del tercio de su tensión de rotura.

Lámina 2. La forma moderna del puente colgante, con un tablero a nivel y el colgado de los cables, fue inventado por James B. Finlay hacia 1796.



Con estos condicionantes, consumía una gran parte de la resistencia de las cadenas en soportar su propio peso, y por ello Telford opinaba que el puente de Menai representaba la máxima luz segura de un puente colgante, utilizando los materiales de la época. Aunque Brunel mostró más tarde que Telford había sido excesivamente cauto —el puente de Clifton de Brunel tiene una luz de 190 metros— durante muchos años el puente de Menai continuó siendo un récord, y, en cualquier caso, las limitaciones del hierro colado estaban claramente a la vista.

La moda reciente de hacer puentes colgantes de carreteras de gran longitud ha sido posible gracias a que disponemos de filamentos de acero de alta resistencia. Este material es mucho más fuerte que el hierro colado o el acero dulce y puede por tanto soportar una longitud mucho mayor de su peso propio. El acero de alta resistencia es más frágil que el hierro colado, pero esto puede ser aceptable, dado que el cable es continuo y no tiene uniones con remaches, que son especialmente vulnerables a la fisuración. Aún más, en lugar de tener tres o cuatro uniones de chapa roblonadas en paralelo en cada eslabón de la cadena, los cables están formados por el trenzado de varios cientos de hilos, de forma que la rotura de cualquiera de los hilos no resulta peligrosa (lámina 12).

Como ejemplo del tipo de cosas que se pueden hacer hoy en día, el nuevo puente de carretera de Humber tiene una luz libre de 1.388 metros, que es más de ocho veces la luz que Telford creía admisible. Esto es posible porque los hilos de los cables trabajan con una tensión de 580 MN/m^2 , que es más de diez veces mayor que la tensión de las cadenas de hierro colado de Telford.

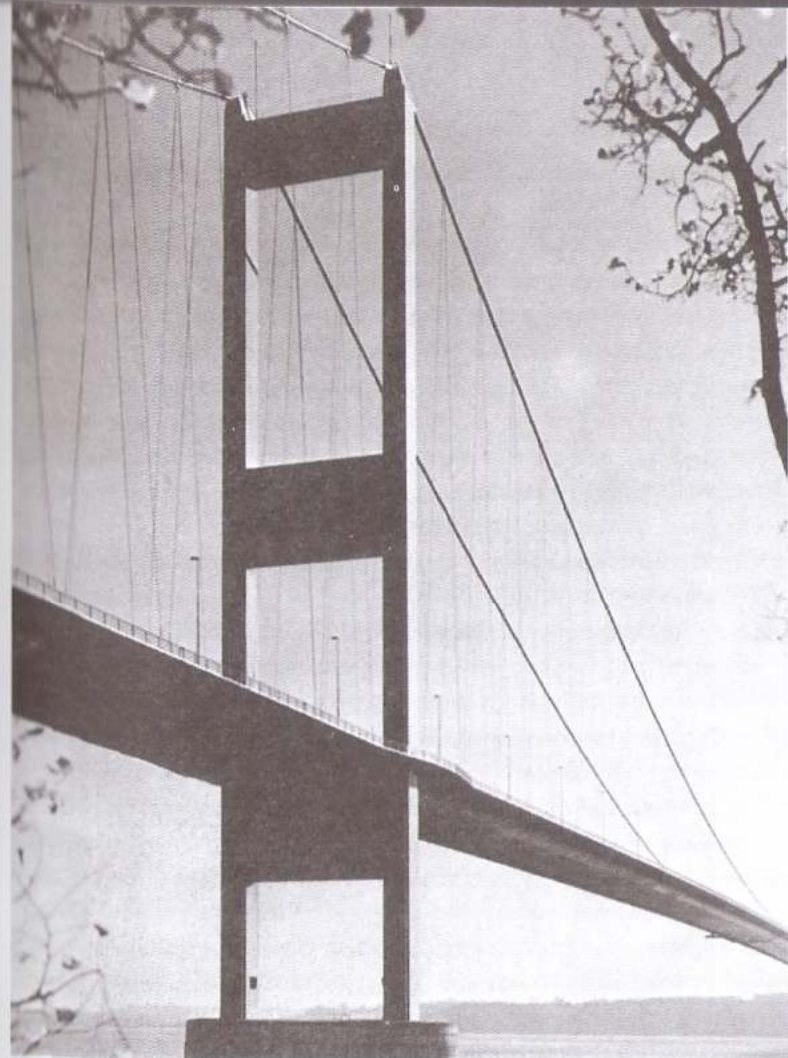


Lámina 12. El puente colgante de Severn. Los cables de acero de alta resistencia con una tensión de tracción diez veces mayor que la del hierro colado permiten construir puentes 10 veces más largos que el puente de Menai de Telford.

La línea de presiones de los arcos y los puentes colgantes

Los cables de los puentes colgantes adquieren la forma adecuada automáticamente, debido a que una cuerda flexible no tiene otro medio de resistir las cargas que actúan sobre ella. Podemos obtener la forma de los cables de un puente colgante cargando un modelo, como hizo Telford, o bien utilizando un método gráfico bastante sencillo llamado "polígono funicular" en el tablero, o calculando sus coordenadas analíticamente. Es útil para proyectar puentes colgantes —por ejemplo, necesitamos conocer las longitudes de las péndolas que soportan el tablero— pero también para calcular arcos.

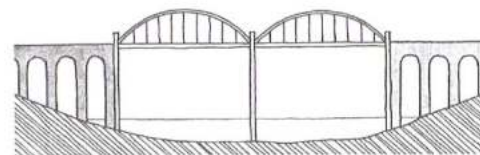
Si observamos a la vez un puente colgante y un arco, no necesitaremos mucha imaginación para darnos cuenta de que un puente colgante es un arco colocado al revés o viceversa. En otras palabras, si cambiamos el signo de las tensiones de un arco, es decir, convertimos las compresiones en tracciones, estas tensiones pueden ser soportadas por una sencilla cuerda curvada, que puede tomarse como la "línea de presiones" a tracción. Haciendo esto podemos conseguir definir, sin esfuerzo, la línea de presiones aproximada a compresión de un puente en arco o una bóveda de cañón.

Cuando hacemos todo esto podemos definir varias formas de líneas de presiones que pueden variar un poco con los detalles de la puesta en carga, por ejemplo, la ausencia o la actuación de tráfico sobre el puente. Cualquiera de estas líneas de presiones nos indicará un cierto grado de seguridad si se encuentra dentro del espesor del arco. Si no, ciertamente será inestable.

Se ha dicho algunas veces, por gente ligeramente prepotente, que la línea de presiones de un arco es una catenaria, y que por lo tanto la forma de un arco circular está "mal". Esto no es desde luego siempre el caso, ya que la catenaria corresponde al caso de una carga constante a lo largo de la longitud del arco, y en un arco circular con relleno en los arranques, la carga no es constante y la línea de presiones se parece lo suficiente a un arco de círculo como para justificar los altamente duraderos arcos circulares romanos. Sin embargo, si se quiere hacer un arco realmente delgado —como es habitual en los puentes de hormigón armado modernos— más vale que la forma obtenida sea exactamente la forma correcta, ya que le queda poco sitio a la línea de presiones para pasear.

El desarrollo de la celosía en arco

Aunque el puente colgante tuvo un principio prometedor en los comienzos del siglo XIX, su desarrollo fue interrumpido durante cien años por la llegada de los ferrocarriles. La mayoría de los 25.000 grandes puentes que fueron construidos en Inglaterra durante la época victoriana eran puentes de ferrocarril.



El puente colgante es una estructura muy flexible, y puede llegar a deformarse peligrosamente con cargas concentradas. Esto tiene poca importancia en un puente de carretera⁴, pero un tren puede ser cien veces más pesado que las carretas o los camiones, y por tanto las deformaciones que producen pueden ser cien veces mayores y por tanto inaceptables. Los pocos puentes colgantes de ferrocarril que se construyeron en Inglaterra, fueron estrepitosos fracasos. Los americanos, que tenían ríos más anchos, y en aquellos tiempos menos dinero y más fe, continuaron utilizándolos durante algún tiempo pero al final tuvieron que prescindir de ellos.

Existía por tanto la necesidad de puentes que fueran, no sólo ligeros y baratos sino rígidos y capaces de cubrir grandes luces. Esto produjo el desarrollo de lo que se podría llamar "arco atirantado" o "celosía en arco" (figura 3). Un arco, por supuesto, es muy rígido, pero empuja contra los contrafuertes con una fuerza muy considerable. Esto no importaría si los contrafuertes consistieran en firme y servicial roca, pero esto es difícil de encontrar en muchos de los casos que pueden surgir al construir ferrocarriles. Es particularmente difícil, si se necesita colocar un arco, o una serie de arcos, encima de pilares altos y esbeltos que suelen ser incapaces de resistir cargas horizontales grandes.

Figura 3. La celosía en arco, o arco atirantado, exige a los contrafuertes del empuje horizontal. Era muy utilizada por los ingenieros de los ferrocarriles victorianos.

⁴ Todos los puentes de Telford eran puentes de carretera o acueductos. Los americanos utilizaron profusamente puentes colgantes como acueductos; el agua canalizada se transportaba mediante un canal suspendido de madera. Naturalmente, no existía ningún cambio en la configuración de la carga y por tanto, ningún cambio en la forma del cable ni deformación importante cuando una barcaza cruzaba por el puente.

Sin embargo, esto era precisamente lo que querían hacer tan a menudo los ingenieros victorianos, ya que llevaban frecuente y audazmente sus vías por encima de profundos valles, algunas veces a una altura de 30 metros o más. Se puede resolver el problema atando los dos apoyos del arco mediante una barra a tracción. Esto se puede conseguir utilizando como tirante el tablero, que en este caso debe trabajar para seguir viviendo: el tablero por tanto quedaba traccionado.

La celosía en arco se parece superficialmente a un arco normal con el tablero suspendido, pero su forma de trabajar es bastante diferente. No existen empujes horizontales en los cimientos, que sólo tienen que soportar una carga vertical hacia abajo debida al peso propio de la celosía y las sobrecargas que producen los vehículos que lo crucen. De hecho, todo este sistema estructural puede montarse sobre rodillos en lugar de cimentaciones rígidas, y se hace a menudo, principalmente para permitir los movimientos debidos a las dilataciones térmicas del metal. Como no producen empujes laterales, se pueden colocar encima de pilares relativamente delgados.

El hecho de que la celosía en arco se puede considerar como una unidad integral, autónoma, puede facilitar enormemente la construcción de un gran puente, porque pueden montarse las celosías en el suelo, o en algún otro lugar fuera de donde se encuentra el puente. Pueden ser transportados por el agua hasta las pilas y colocados en posición mediante gatos. Esto es precisamente lo que hizo Brunel en el puente de Saltash.

Como veremos en el capítulo siguiente, el arco atirantado es en realidad un miembro más de la familia de las "celosías" o triangulados que pueblan densamente la tipología de las estructuras.

Las ventajas de ser una viga con algunas observaciones sobre cubiertas, celosías y mástiles

Salomón... construyó la Casa del Bosque de Libano, de cien lados de largo, cincuenta de ancho, y treinta de alto, hecha con cuatro filas de columnas de cedro, sobre las que se colocaron tramos de cedro. Tenía una cubierta de cedro, sobre las vigas, que se apoyaban en las columnas, quince en cada fila; y el número de vigas era de cuarenta y cinco.

REYES 7 1-3 (NUEVA BIBLIA INGLESA)

Tener un sólido techo encima de la cabeza es uno de los principales requisitos de una existencia civilizada, sin embargo las cubiertas duraderas son pesadas y el problema de mantenerlas en pie es realmente tan antiguo como la propia civilización. Cuando se contempla un edificio bello y famoso —o realmente cualquier edificio— puede ser esclarecedor darse cuenta de que el método elegido por el arquitecto para resolver el problema de la cubierta condiciona no sólo la cubierta en sí, sino también la forma de los muros, las ventanas y realmente todo el carácter del edificio.

De hecho, el problema de resolver la cubierta es en esencia similar al problema de construir un puente, con la diferencia de que como los muros de los edificios suelen ser más delgados que las pilas de los puentes, cualquier empuje horizontal producido por la cubierta debe ser cuidadosamente estudiado. Como vimos en el capítulo 9, si la cubierta empuja excesivamente contra la parte superior de los muros sobre los que descansa, la línea de presiones dentro de la fábrica puede desplazarse peligrosamente hacia afuera y por tanto hacer colapsar a los muros.

En muchos de los edificios romanos y en prácticamente toda la arquitectura áulica bizantina se utilizaron cubiertas abovedadas o cupuliformes. Estas estructuras tipo arco empujan vigorosamente contra sus apoyos, lo que se resolvió en la mayoría de los casos apoyando las cubiertas sobre gruesos

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

muros dentro de los cuales la línea de presiones tenía sitio de sobra para circular con seguridad. Como vimos, estos espesos muros se construían normalmente de hormigón en masa, algunas veces engrosados a base de incorporar ánforas de vino vacías dentro de su espesor. Estos muros eran estructuralmente estables y tenían la ventaja adicional de que proporcionaban un excelente aislamiento térmico en climas calurosos: una iglesia bizantina es a menudo el único lugar fresco de los pueblos griegos. Sin embargo, no es fácil perforar ventanas en muros muy gruesos, por lo que las ventanas que existían en los edificios romanos y bizantinos eran habitualmente pequeñas y elevadas.

Los castillos medievales se construyeron siguiendo de cerca la tradición romana; a menudo, como en el Castillo de Corfe, con mampostería de varios metros de grueso. Con estos muros se podían resistir fácilmente los empujes que producían las cubiertas abovedadas: y, por razones militares, sus defensores no deseaban en realidad ningún tipo de ventana. Las primeras iglesias románicas no eran muy distintas, sus muros gruesos, sus arcos pequeños y circulares y sus pequeñas ventanas proceden directamente de prototipos romanos. Muchas de las iglesias románicas cumplían su función satisfactoriamente, y muchas de ellas sobreviven hoy en día¹. Las dificultades y las complicaciones empezaron a surgir más tarde debido en gran medida a la moda emergente de hacer ventanas mejores y más grandes.

Evidentemente, los pueblos que viven en países soleados no piensan lo mismo sobre las ventanas que los pueblos nórdicos. Aún hoy en día muchos de aquellos parecen habitar, aparentemente adrede, en una perpetua penumbra provocada por las persianas. Sin duda todo esto proviene de una larga tradición mediterránea, porque en tiempos de los griegos, los romanos y los bizantinos las ventanas eran en general pequeñas y bastante ineficaces². Por lo que se ve, esto no se debía de ningún modo a la carencia de cristales.

En el norte de Europa, aun a los nobles y a los caballeros guerreros les era insoportable pasar su tiempo en castillos oscuros y sin ventanas. Lo que querían era luz y sol, y por tanto se cansaron de las formas arquitectónicas que se basaban en modelos romanos. El culto a las ventanas se convirtió en una obsesión, y, a medida que fue pasando el tiempo, los constructores competían

¹ Por supuesto, muchas de las iglesias románicas pequeñas tenían cubiertas de madera, pero su forma era a menudo tal que los empujes que provocaban en los muros eran tan dañinos como los de las bóvedas de piedra.

² En Pompeya, donde las ventanas eran escasas, y la luz artificial debía de ser mala, las paredes de casi todas las habitaciones estaban pintadas de rojo oscuro o negro. Me pregunta por qué.

LAS VENTAJAS DE SER UNA VIGA

entre sí para construir salones e iglesias con ventanas cada vez más grandes y más espléndidas. Los artesanos medievales podían ser desesperadamente científicos pero eran mucho más creativos de lo que generalmente se reconoce. Particularmente tenemos con ellos una gran deuda por mostrarnos las cosas emocionantes y hermosas que se pueden hacer con las ventanas.

Sin embargo, gran parte del efecto que produce una impresionante y costosa ventana se pierde si está incrustada dentro de la apertura en forma de túnel de un muro grueso. Inevitablemente, cualquier intento de conseguir ventanas mayores colocadas en muros más finos choca con las líneas de presiones. La arquitectura románica era básicamente arquitectura romana y no estaba hecha para todo eso, porque dependía de los muros gruesos para conseguir estabilidad y seguridad. Pero esto no fue para los constructores un obstáculo para intentar modificarla, se ha dicho de la arquitectura románica tardía que había que preguntar a cada edificio "no cómo, sino cuántos, se hundía el cimborrio".

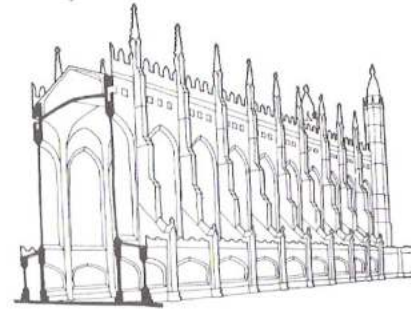
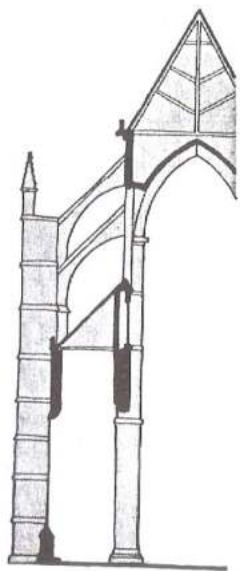


Figura 1. Capilla del King's College, Cambridge

No está claro hasta qué punto sabían los canteros medievales comprender lúcidamente lo que estaba pasando. Probablemente su comprensión de la situación era borrosa y subjetiva; de otra forma no hubieran continuado cometiendo errores durante generaciones. Más pronto o más

tarde, sin embargo, alguien se dio cuenta de que la forma de armonizar la demanda de ventanas grandes con la de muros delgados era utilizar contrafuertes, que protegerían el muro contra el empuje producido por la cubierta, contrarrestándolo desde fuera³.

Figura 2. La aparición de naves laterales y del triforio exigió la invención del arbotante.



Efectivamente, los contrafuertes convierten los muros finos en muros gruesos, y por lo tanto hacen el mismo papel que las ánforas de vino vacías de los romanos, aunque de forma distinta.

El contrafuerte macizo ordinario es realmente poco más que un engrosamiento del muro entre dos ventanas. Cuando sólo existía una nave, como en la Capilla del King's College (figura 1 y lámina 13), es muy eficaz. Las dificultades aparecen, sin embargo, cuando existen dos naves laterales. Para contrarrestar el empuje de la cubierta de la nave principal sin producir una desagradable sombra en las ventanas del triforio, los canteros góticos tuvieron que inventar el arbotante (figura 2). Con esta solución los contrafuertes están separados del muro de la nave principal por una serie de arcos, que transmiten el empuje sin interceptar demasiado la luz.

Son muy grandes las posibilidades decorativas del conjunto que forman los arbotantes y las ventanas, y, como hemos dicho, están además resaltadas con la juiciosa colocación de estatuas y pináculos, cuyo peso, como debieron entender de alguna manera los canteros, ayudan a los contrafuertes a cumplir la complicada tarea de guiar las líneas de presiones con seguridad hacia abajo a través del bosque lanceolado de fábrica. Al final se volvieron las ventanas tan grandes que no quedaron prácticamente muros para sopor-

³ "Yo no soy un pilar, soy un contrafuerte, de la Iglesia Establecida, que le soporto desde fuera" (Lord Melbourne).

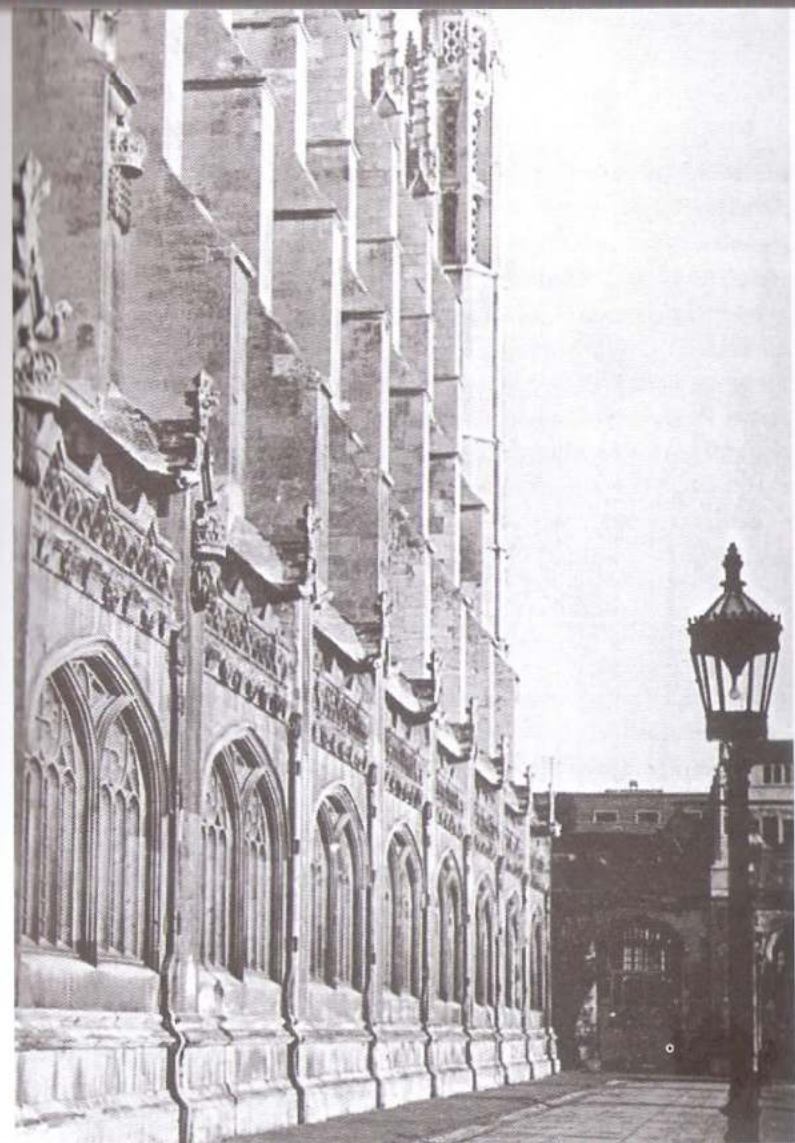
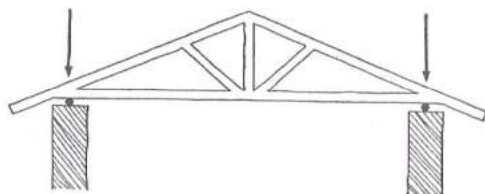


Lámina 13. Donde existen naves laterales, como en la Capilla del King's College de Cambridge, los contrafuertes se pueden colocar directamente arriba sin mayores aplicaciones.

tar el edificio. Como mástiles modernos, estas estrechas tiras de fábrica dependían totalmente para su estabilidad de los arriostramientos laterales. Del mismo modo que un delgado mástil no puede existir sin la complicada red de jarcias del aparejo, la estabilidad de estos esbeltos muros depende totalmente del arriostramiento que proporcionan los arbotantes y los contrafuertes.

Sea cual sea el proceso mental con que todo esto fue concebido, el logro estructural y artístico fue inmenso. En la época de la Edad Media en la que los maestros canteros creaban los edificios del Alto Gótico, la arquitectura había perdido cualquier conexión visible con sus orígenes clásicos. Pocas cosas pueden parecer tan distintas como, digamos, la catedral de Canterbury y una basílica romana. Sin embargo, la línea de su descendencia es clara y sencilla.

Figura 3. Una cercha de cubierta apoyada. Ésta se muestra apoyada en rodillos para enfatizar que no necesitan un empuje hacia fuera sobre los muros sustentantes.



Aunque los edificios de este tipo son a menudo muy hermosos, son siempre horriblemente caros, y en cualquier caso las cubiertas con arcos y bóvedas son muchas veces poco prácticas para construir viviendas. En lugar de usar arcos, puede ser más barato y más sencillo construir la cubierta de un edificio con vigas de uno u otro tipo. Si se cubren los espacios a techar con largas correas, que apoyan su peso en vigas, éstas pueden a su vez transmitir el peso que gravita sobre ellas, a través de sus apoyos, a los muros de fábrica sin necesidad de empujar horizontalmente hacia fuera. De esta forma dejan de producirse perturbaciones rechazables en la línea de presiones y los muros se pueden hacer bastante delgados y además no necesitan contrafuertes (figura 3).

Sólo por esta razón, la viga es uno de los instrumentos más importantes de toda la tecnología de las estructuras. De hecho, las aplicaciones de la viga —y de sus equivalentes la cercha, la armadura y la celosía— se extienden mucho más allá de la cubierta de edificios; las vigas y la teoría de vigas han tenido un papel realmente importante para hacer posible la civilización tecnológica. En biología, conceptos similares surgen muy a menudo.

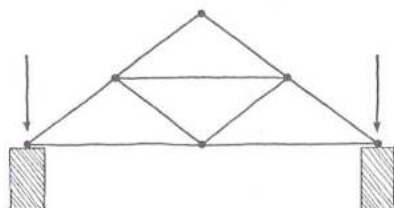
La palabra "viga" significa en inglés antiguo "árbol". Aunque en nuestros días las vigas se hacen habitualmente de hormigón armado o acero, durante muchísimos años una "viga" en su significado estructural, significaba una pieza de madera maciza, muy a menudo un tronco de árbol. Aunque es más barato y más fácil cortar un árbol que construir un arco o una bóveda de fábrica, el suministro de árboles no es ilimitado y llega un tiempo en el que las piezas largas de madera se hacen escasas. Cuando esto ocurre, podemos encontrarnos forzados a construir cubiertas con piezas de madera de pequeña longitud.

Cerchas o armaduras

Puede parecer evidente a la mentalidad moderna que el método más adecuado de cubrir una gran luz utilizando piezas cortas de madera es unir estas piezas entre sí, en forma de mecano, para formar una estructura triangulada, algo parecido a la de la figura 4. Éste es realmente el principio de las celosías. Todos estamos familiarizados con los triangulados de los puentes de ferrocarril. Cualquier estructura triangulada de este tipo se llama "celosía". Igual que una viga maciza, si una cercha está bien diseñada permite cubrir económicamente luces considerables que además no producen peligrosos empujes hacia afuera sobre los muros de carga. Al igual que las vigas y que la teoría de vigas, las aplicaciones de los triangulados en la tecnología moderna van mucho más allá, se extienden a barcos, puentes, aeroplanos y a toda clase de artefactos estructurales. Como vimos en el capítulo anterior, el arco atirantado es en realidad una aplicación más de este concepto estructural.

Sin embargo, en la historia de la arquitectura el concepto de cercha o armadura de madera fue sorprendentemente lento en abrirse camino. La forma más primitiva de este concepto estructural, la armadura de madera ordinaria, nos puede parecer obvia pero conseguirla tomó a nuestros antepasados mucho, mucho tiempo. No habían visto nunca un puente de ferrocarril ni habían nunca jugado al mecano. Parece ser que las celosías de edificación fue una invención romana tardía, aunque nunca se desarrolló adecuadamente hasta la Edad Media. Durante casi toda la antigüedad los arquitectos construyeron simplemente sin celosías. Los constructores griegos jamás pensaron en utilizarlas.

Figura 4. Si no se dispone de largas piezas de madera, una cercha puede formarse, en forma de mecano, con piezas cortas.



Muy ilustres arquitectos atenienses, como Mesicles, que construyó los propileos, Ictinos, que proyectó el Partenón y el Templo de Apolo en Basae, rechazaron conscientemente los arcos y las bóvedas como método para cubrir sus edificios, y aun así no fueron claramente capaces de inventar la cercha o concebir algo realmente adecuado para sustituirla. La brillantez de la arquitectura helénica se detiene, bastante súbitamente, cuando se llega a la altura del arquitrabe. Las cubiertas griegas sólo pueden describirse como arquitectónicamente escuálidas.

Las vigas y dinteles de piedra no pueden usarse con seguridad para cubrir luces mayores de 2,5 metros; de otra forma pueden fisurarse. Por consiguiente, para conseguir cubiertas construibles para templos y otros edificios, era necesario utilizar vigas de madera, a pesar del hecho de que en la Grecia Clásica la madera era tan escasa como en la Grecia moderna.

Si se podían encontrar para el templo griego las necesarias vigas de madera enteras, se colocaban simplemente en horizontal apoyándose en la parte superior de los muros y de los dinteles de piedra del peristilo. Estas vigas se cubrían con un entrevigado para formar un techo plano continuo sobre toda la superficie del edificio (figura 5). Naturalmente, este techo plano, que estaba sólo hecho con tabloncillos ordinarios, era todo menos impermeable. Por lo tanto, era necesario colocar encima un gran relleno hecho de tierra arcillosa mezclada con agua y paja. Para un templo de tamaño medio este relleno de arcilla podría pesar algo así como 3.000 toneladas.

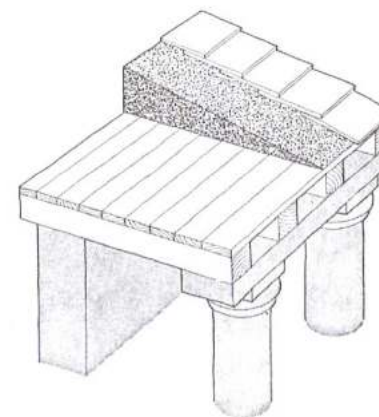
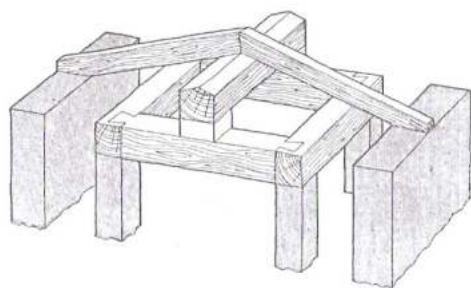


Figura 5. Cubierta de un templo griego.

Cuando tenían todo ese material de origen agrícola encima y lo habían apisonado adecuadamente, se cortaba y moldeaba de la forma más exacta posible para que adquiriera la forma triangular de una cubierta a dos aguas. Después de esto se acopiaban las tejas y simplemente se las colocaba directamente encima de la arcilla, del mismo modo que se colocan piedras para hacer un camino en un jardín. Presumiblemente se debía tener la esperanza de que esa gran masa de arci-

La mojada se seca antes de que la madera que la soportaba empezase a pudrirse. Una vez seca, debía convertirse en un maravilloso santuario para los bichos; sin embargo el excelente aislamiento térmico pudo, sin duda, ser bien acogido en tiempo caluroso.

Figura 6. En los templos más elaborados del siglo V se consiguió soportar sus cubiertas sin utilizar cerchas.



Con frecuencia, por supuesto, era necesario utilizar vigas o correas de menor longitud. El rey Salomón llegó a acuerdos políticos especiales⁴ con el rey Hiram, para el suministro de cedros del Líbano, pero aun así estas vigas de cubierta tenían solo alrededor de 7 metros de longitud (17 codos). Muchas de las vigas de los templos griegos eran más cortas. En los templos griegos, como en el edificio de Salomón, estas cortas vigas están sostenidas desde abajo, con filas de pilares, sin tener en cuenta si esto era arquitectónicamente adecuado. En uno de los grandes templos griegos de Paestum (hacia 650 a.C.) en el sur de Italia, existe una fila de columnas justo en el centro de la nave, que la divide en dos partes iguales. Esto hacía molesta cualquier tipo de ceremonia religiosa. En la mayoría de los templos más recientes se intentaron conseguir resultados más simétricos (figura 6), pero aun el interior del Partenón estaba plagado de pilares que nos parecerían innecesarios.

La forma más sencilla de armadura de cubierta, la que tiene forma de "A", fue desarrollada en la Edad Media. La barra horizontal traccionada, que cruza por debajo de la armadura, es conoci-

⁴ | Reyes 5 (donde existen fuertes indicios de que Salomón tuvo que pagar un alto precio).

da por los constructores como "tirante". Si se trataba de cubrir luces cortas era generalmente fácil encontrar troncos para el tirante que fuesen lo suficientemente largos como para hacer una simple armadura triangular como la de la figura 7, sin embargo, en una casa pequeña de dos pisos esta disposición daba lugar a proporciones arquitectónicas bastante torpes, además se desaprovechaba una gran cantidad del espacio bajo cubierta.

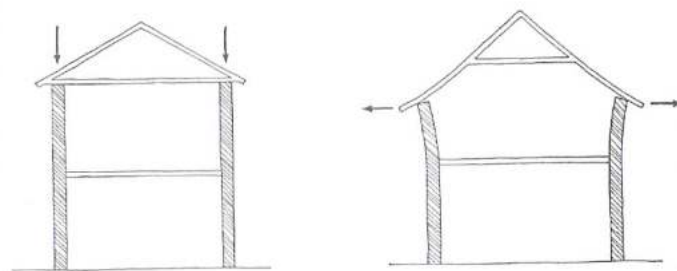


Figura 7. (Izquierda) Una sencilla casa de dos pisos con el tirante de armadura al nivel de la parte superior de los muros.

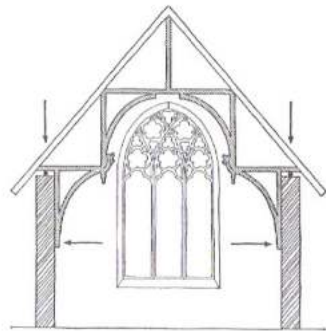
Figura 8. (derecha) El efecto de subir el tirante demasiado para ahorrar espacio (exagerado, pero no mucho).

Por estas razones, los constructores colocaron los tirantes más altos, con lo que podían aprovechar parte del espacio bajo la cubierta para las habitaciones del piso superior, utilizando buhardillas cuando fuera necesario. Todo esto está muy bien, pero, si el tirante se coloca muy arriba, los cordones inclinados de la cercha tienen tendencia a flexionarse y desplazarse hacia afuera bajo el peso de la cubierta. Si el muro está rígidamente unido a los cordones, éstos empujarán contra el muro (figura 8), muy posiblemente con costosos resultados. Naturalmente, cuanto más alto se coloque el tirante, más grave será este efecto.

Cubrir un salón o una iglesia medieval grande, que a menudo tenían luces considerables, era un problema serio. Una cubierta a base de cerchas podía ser más barata que una a base de arcos o bóvedas de fábrica, pero, aun si se encontraban palos lo suficientemente largos como para conseguir tirantes de la longitud requerida, la presencia de tirantes relativamente bajos en el edifi-

cio estropeaban el efecto espacial de la nave o el salón, y, particularmente, entorpecían la vista de los grandes ventanales al Este y al Oeste. La gente de esa época estaba tan atrasada que daba más importancia a la apariencia de los edificios que a su "eficacia". Los constructores de la Europa continental continuaron apegados a las bóvedas de fábrica, equilibrando sus cubiertas abovedadas mediante contrarrestos elaborados y caros.

Figura 9. Una sencilla armadura en arco. El efecto es desplazar el punto de aplicación del empuje (que está producido por el movimiento hacia fuera de la cercha) hacia abajo de forma que los muros sufran un menor desplazamiento en la línea de presiones. Al mismo tiempo se despeja la vista de las ventanas del fondo.



De modo característico, los constructores ingleses produjeron un compromiso o tipo paliativo de armadura de madera, que ha sido descrito como "más ingenioso que científico". Esto era lo que podría llamarse "armadura en arco".

Las armaduras en arco se hicieron relativamente frecuentes en los edificios grandes ingleses, pueden verse hoy en día en la Sala del Parlamento Viejo de Westminster, en muchos colegios de Oxford y Cambridge y en algunas viviendas privadas. Son muy admiradas desde el punto de vista artístico, quizá en parte por las oportunidades que daban sus nudos al ejercicio de la imaginación de los tallistas de madera (figura 9). Los adictos a Dorothy Sayers recordarán las aventuras de Lord Peter Wimsey entre los ángeles y los querubines tallados en las armaduras en arco de la iglesia de San Pablo en Fenchurch⁴.

En términos estructurales, el efecto principal de la armadura en arco, comparado con cualquier armadura similar con el tirante elevado, es desplazar hacia abajo a lo largo de los muros exteriores el punto de aplicación del empuje horizontal, de forma que su efecto sobre la importantísima línea de presiones sea menos desastroso. Aunque la armadura en arco ha funcionado bien en la práctica, nunca ha atraído la mente lógica del resto de Europa y por tanto existen pocos ejemplares fuera de Inglaterra.

Las uniones de las armaduras de madera tradicionales están resueltas con pasadores de madera, y a veces con chapas de hierro. Aunque estas uniones no eran particularmente eficaces, como las armaduras exigían rigidez más que resistencia, no tenía mucha importancia que las uniones fueran débiles. En los edificios modernos, como las fábricas, almacenes y graneros, las cerchas están resueltas frecuentemente con secciones de acero, como por ejemplo angulares, en cuyo caso no deben surgir problemas. En las casas pequeñas modernas, sin embargo, las cerchas son casi siempre de madera, y sus secciones se han reducido al mínimo —y aún peor, por debajo del mínimo—. En particular, el entablonado de los techos tiene apenas la rigidez necesaria para que la escayola se mantenga sin fisurar. Si caemos en la tentación de seguir la moda de transformar la buhardilla en un dormitorio más, el problema más grave será la rigidez del suelo. Aunque es difícil que la cercha rompa, las deformaciones producidas por el peso añadido de los ocupantes y los muebles, pueden producir un daño serio y costoso en la vivienda. Aficionados al bricolage, por favor, tomad nota.

Las celosías en la construcción de barcos

Existe una tierra de barcos de vela. Una tierra mas allá de los rios de Eus que manda sus mercancías por el Nilo viajando sobre las aguas en naves de juncos.

ISAÍAS 18.1. (HACIA EL 740 A. C., NUEVA BIBLIA INGLESA)

Hay que señalar que los constructores navales utilizaron y comprendieron el funcionamiento de distintos tipos de celosías antes de que los constructores y los carpinteros de edificios se acer-

⁴ *Los Nueve Santos* (Gollancz, 1934). Sin embargo las armaduras de la pequeña iglesia de Stuthin en Wiltshire y Berkshire están decoradas con grandes elefantes y rios de papel: m

casen siquiera al concepto de estos elementos constructivos. La mayoría de las historias de la construcción naval empiezan con las barcas que los antiguos egipcios utilizaron en el Nilo. Como aparentemente sabía bien el profeta Isaías, estas barcas de junco, que se desarrollaron a partir de las almadías, proceden de una época muy anterior a la de Isaías, probablemente de entre el 4000 y el 3000 a.C. Se utilizan barcas similares todavía en el Nilo Blanco y en el lago Titicaca, en América del Sur. Dado que los manojos de juncos se curvan de forma natural por sus extremos, se consigue de forma más o menos automática una forma aproximada a la de una barca. A menudo los largos, deshilachados, extremos de los manojos de juncos se ataban de forma que se curvasen hacia arriba y de esta forma se conseguía una decoración vertical a proa y a popa. Estas formas sobreviven hoy en día, algunas veces casi sin transformaciones, en los altos palos de popa y proa de los botes de remo mediterráneos —especialmente en la góndola veneciana y en la gaisa maltesa—.

Aunque la navegabilidad de un barco depende de la parte central del casco y está poco influida por sus extremos, nada puede impedir que se coloquen cargas pesadas en esas zonas. Una de las consecuencias de esto es que los barcos tienden a “tener panza” (los dos extremos del barco tienden a hundirse y el centro del casco tiende a levantarse). Este tipo de cosas es justamente el opuesto del que aparece en las cubiertas y los puentes, donde el centro de la celosía tiende a hundirse por debajo de sus soportes extremos. Este fenómeno está descrito como “flechar” por los ingenieros. Aunque “flechar” o “tener panza” implica fuerzas y deformaciones actuando en sentido contrario, está claro que en ambos casos la viga o la celosía está trabajando a flexión y que por tanto son de aplicación principios y razonamientos análogos.

Desde el punto de vista estructural, el casco de un barco es una especie de viga, con lo que el efecto de las fuerzas que intentaban levantar el centro del casco debía hacerse evidente en los flexibles cascos de junco egipcios. Un barco deformado es algo deprimente para ser contemplado, además este estado de cosas debía ser evitado por toda clase de excelentes razones, por lo que se hizo necesario actuar para remediarlo aún en el año 3000 a.C. De hecho, los egip-

cios solucionaron este problema bastante inteligentemente. Reforzaron sus barcos con lo que hoy se llama una “viga ayudada”. Esto consistía en pasar una sólida cuerda por encima de una serie de montantes verticales y atarla alrededor de la proa y a popa, de forma que quedase perfectamente fija (figura 10).

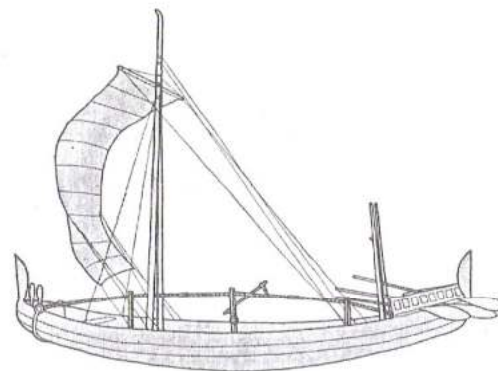


Figura 10. Un barco de altura egipcio, hacia el 2500 a.C. Está hecho de madera pero mantiene los ornamentos verticales a proa y popa característicos de las barcas hechas con juncos. Las planchas de madera son cortas y están mal trabadas, por lo que este barco también está rigidizado en forma de “viga ayudada”. Nótese el mástil en forma de “A”.

La cuerda podría tensarse con una especie de cabrestante. Este aparato es un manajo de cuerdas que pueden ser trenzadas —y por tanto acortadas— mediante un largo palo o palanca que atraviese su parte media. De esta forma el gran casco de junco podía ser tensado hasta el nivel que exigiera la horizontalidad o la curvatura. Cuando progresó el arte de construir barcos, los egipcios llegaron a hacer sus barcos de madera, en lugar de juncos. Sin embargo, como las planchas de madera eran muy cortas y prácticamente todas las uniones podían ser descritas como flojas, se mantuvo la necesidad del refuerzo en viga ayudada.

Dado que los constructores de barcos griegos eran más avanzados que los egipcios pudieron construir los espléndidos trirremes y galeras de combate de las dependía el poder naval de

Grecia. Sin embargo, también estos barcos estaban contruidos con piezas cortas de madera, y sus ligeros cascos eran muy flexibles y muy propensos a hacer agua. Por esas razones, los griegos mantuvieron el sistema de viga ayudada de los egipcios en la elaborada versión que se llamó *hupozoma*. Ésta era una gruesa cuerda que corría alrededor del casco, elevada justo por encima de la borda. De nuevo el *hupozoma* entraba en carga por medio de un cabrestante que permitía al operario ajustarlo en función de las necesidades. Como los barcos de guerra griegos luchaban abordándose unos a otros, tenían que ser capaces de soportar unos enormes esfuerzos estructurales. El *hupozoma* era por tanto una parte esencial de los cascos de estos barcos, sin él eran inútiles para el combate, y aun para salir a la mar. Del mismo modo que se solía desarmar los barcos de guerra modernos retirando las recámaras a los cañones, en los tiempos clásicos, los miembros de las comisiones de desarme solían desarmar los trirremes retirándoles los *hupozomata*.

Está bastante claro que los constructores de barcos atenienses, en el Pireo, estaban familiarizados con los principios del comportamiento de las celosías, en consecuencia podríamos preguntarnos por qué los arquitectos atenienses, como Mesides e Ictinio, no captaron este concepto para utilizarlo en las cubiertas de sus templos. Quizá no se dieron cuenta de la analogía entre flechar y hacer panza, o quizá nunca tuvieron familiaridades con los constructores de barcos. Después de todo, ¿cuántos arquitectos contemporáneos hablan alguna vez con un ingeniero naval?

Cuando las frágiles galeras de combate a remo quedaron en desuso desaparecieron las *hupozomata*. Sin embargo, los vapores fluviales americanos del siglo XIX eran tan flexibles como los trirremes griegos o las naves egipcias del Nilo. Sus alargados cascos de madera presentaban exactamente los mismos problemas, y los americanos los resolvieron de una forma exactamente igual a como lo habían hecho los antiguos egipcios. Todos los vapores americanos estaban provistos de tensores y montantes iguales a los egipcios. La única diferencia era que los tensores estaban hechos de redondos de hierro, en lugar de cuerda de papiro, y que estaban tensados con poleas metálicas en lugar de cabrestantes. Los capitanes de barco que participaban en las carre-

ras del Misisipi proclamaban que eran capaces de arrancar a sus vapores medio nudo más, ajustando la forma del casco a base de atornillar y desatornillar el sistema de tensado. El hecho de que los cascos de estos barcos hicieran agua, en consecuencia, aún más que los trirremes, no importaba demasiado porque estaban provistos de bombas de desagüe a vapor.

Las celosías también aparecen, por supuesto, con formas diferentes en los aparejos de casi todos los veleros. Muy probablemente la vela fue también invento egipcio, porque en el Nilo el viento sopla aguas arriba durante casi todo el año, de forma que los barcos de carga podían subir el río llevados por buen viento, y bajarlo llevados por la corriente —como siguen haciendo hoy—.

El primer problema que plantea la construcción de un velero es erigir un mástil sobre el que se fija la vela. El segundo, y mucho más difícil, es mantener el mástil en pie. De forma global, los mástiles de los veleros convencionales son, estructuralmente, simples cordones a compresión o codales que se mantienen en equilibrio en varias direcciones mediante un sistema de cuerdas fijas traccionadas que los hombres de mar llaman "aparejo fijo"; es decir por las "jarcias", y los "cabos". Si tenemos un casco lo suficientemente rígido para soportar las tracciones de aquellas, éste es casi siempre el mejor método para resolver el problema y (como veremos en el capítulo 14) como se puede demostrar matemáticamente, la que minimiza el peso y el costo. Sin embargo, los egipcios no habían hecho este tipo de cálculos matemáticos, y, además, no tenían ideas preconcebidas sobre este tema. Todo lo que sabían es que estaban bastante cansados de remar y que querían encontrar algún medio de sujetar una cosa recién inventada llamada vela encima de un casco hecho con juncos.

Habiéndome pasado una buena porción de años proyectando aparejos para los botes salvavidas neumáticos que transportaban los bombarderos⁴ puedo simpatizar con los antiguos egipcios y sus problemas con los mástiles. Los cascos hinchados de los botes salvavidas neumáticos eran probablemente tan flexibles como las barcas de juncos egipcios. No se puede realmente esperar que sea posible fijar cuerdas fuertemente tensadas a algo así como un globo mojado o un flojo manojo de juncos, y en esas circunstancias la sola idea de la "viga ayudada" resulta bastante

⁴ Para el beneficio de algún infortunado aviador que haya tenido alguna involuntaria experiencia con estos artefactos, debo decir que ahora haría estas cosas de forma bastante diferente.

risible. Muy inteligentemente, por lo tanto, los egipcios simplemente plantaron una especie de tripode, o algunas veces un triangulado en forma de "A" encima del escurridizo casco (figura 10). Este artefacto funcionó perfectamente en el Nilo; yo solía envidiar a los antiguos egipcios su solución al problema, que, desgraciadamente, no era posible en los botes salvavidas. Los egipcios no necesitaban que el aparejo completo quedase plegado y empaquetado dentro de una pequeña bolsa, que a su vez, debía ser almacenada dentro de un avión repleto de gente.

Los cascos de los barcos mercantes griegos y romanos eran en general lo suficientemente resistentes y rígidos como para resistir los esfuerzos que transmitían los aparejos; por tanto, estas naves tenían sus mástiles colocados en el centro del barco y sujetos con jarcias en la forma usual.

Por alguna razón, sin embargo, aun los barcos romanos más grandes no pasaron nunca de tener un solo mástil, que soportaba una sola gran vela cuadrada, que colgaba de una larga verga. No fue hasta la gran expansión de viajes marítimos del Renacimiento que el aparejo de los grandes barcos empezó a complicarse al multiplicarse el número de palos y de velas. Alrededor de esa época se reemplazó el mástil único por tres, llamados el trinquete, el palo mayor y la mesana. Más adelante, cada uno de estos mástiles creció hasta ser capaz de portar, por encima de las velas cuadradas o "vela mayor", primero las gabias, más tarde los velachos, y finalmente los sobrejuanetes (las aún más imponentes velas estays y cangrejas vinieron mucho más tarde, una extravagancia de la época de los clíper).

Tradicionalmente cada vela —mayor, gabia, velachos y sobrejuanete— está colocada en una altura distinta en el mástil. Es decir, cada verga tiene una posición fija en el mástil, una por encima de la otra, y cada una de ellas es una pieza separada de madera, que se mantiene en su posición mediante elaboradas fijaciones deslizantes. Están diseñados de forma que todos los palos y vergas puedan, en su caso, ser bajados y colocados en cubierta. Como los palos más grandes podían pesar varias toneladas, se necesitaba a la vez habilidad y nervio para subir y bajar tan incontrolables objetos en un barco de vela. Sin embargo, un gran barco de guerra podía llegar a tener una tripulación de 800 hombres, muchos de los cuales pondrían en ridículo a trapecistas y a

atletas entrenados. El trapío de la flota del Mediterráneo en el año 1840 se ha vuelto legendario. Se cuenta que, cuando el almirante había terminado su desayuno, podía ordenar: "que todos los barcos icen velas, informen del tiempo que ha costado y del número de bajas". Sea como sea, es cierto que algunos barcos de combate rápidos como el buque *Malborough* podían bajar el velamen con su propia tripulación en cuestión de minutos y volver a aparejarlo con la misma rapidez. Estos ejercicios no eran de ningún modo un desperdicio de esfuerzo. Los barcos llevaban una gran cantidad de repuestos de palos y velas, y la seguridad de un barco en una emergencia, o en una acción en tiempo de guerra, dependió repetidamente de lo rápido que se podían retirar y reemplazar los mástiles y los palos. Se podía aceptar un número limitado de bajas durante las maniobras en tiempo de paz, como aceptamos los accidentes en equitación o montañismo.

La tecnología estructural que estaba detrás de todo esto era soberbia en su clase, y debería reclamar la atención de los modernos ingenieros, que son bastante indiferentes ante ella. La complejidad del cordaje necesario para mantener las cargas de los mástiles en los últimos barcos de vela, se puede apreciar mejor visitando el buque *Victory* (lámina 14) o el *Cutty Sark*. La altura total del palo mayor del *Victory*, por ejemplo, es de alrededor de 67 metros. La longitud de su verga mayor era de 30 metros, pero se podía aumentar si se quería a una longitud total de 59 metros, mediante vergas deslizantes. Todo este inmenso mecanismo funcionaba, y funcionaba con seguridad, durante años aun en las situaciones más terribles de viento o mar, y era mucho más fiable que mucha de la maquinaria moderna.

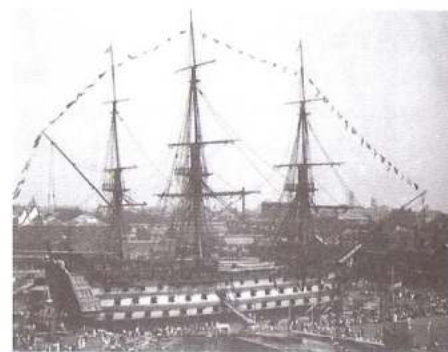


Lámina 14. El buque *Victory*. Sus palos son un soberbio ejemplo de una celosía especial en voladizo de grandes dimensiones.

Los mástiles de los barcos de vela representan quizá los más elaborados, y ciertamente los más hermosos, sistemas de atirantado que jamás se han concebido. A costa de una complejidad considerable, el peso total de estructura que debía soportar el casco se mantenía en valores razonables. Sin embargo, cuando tuvieron que colocarse grandes cañones, montados en torretas giratorias, en los barcos de guerra de alrededor de 1870, se vio que el entramado de las jarcias y las otras cuerdas restringían fuertemente los ángulos de tiro de los cañones. Por esta razón fueron provistos varios barcos acorazados, especialmente el buque *Captain*, de mástiles en tripode que podían colocarse de forma que permitían un mayor campo de tiro. Fue una vuelta al sistema de aparejo egipcio, si se quiere. Sin embargo, la carga adicional que producía la estructura de los tripodes tenía mal efecto sobre la ya precaria estabilidad de estos barcos. Esta sobrecarga contribuyó indudablemente a que el *Captain* zozobrase una tempestuosa noche en el mar Cantábrico. Se ahogaron cerca de quinientos hombres.

Voladizos y vigas "apoyadas"

Es evidente que no debe existir mucha diferencia entre el comportamiento de una "viga", si toma la forma de pieza continua —un tronco de árbol macizo, una vigueta, tubo o redondo de acero— o si toma la forma de una celosía. Esta última puede ser la armadura de madera de una cubierta, o el conjunto de jarcias y mástiles del aparejo de un barco, o cualquier triangulado tipo mecano, como un puente o una torre de alta tensión. Como vamos a ver, también se encuentran muchas vigas de los dos tipos en los animales.

El hecho de que los puentes, las cerchas, las espaldas de los caballos y los sabuesos estén habitualmente más o menos en posición horizontal, mientras que los mástiles de los barcos, los postes de telégrafo, las torres y los cuellos de los avestruces estén bastante a menudo en posición vertical, no hace que sean diferentes. El objeto esencial de todas estas estructuras es el mismo, es decir, una carga que actúa perpendicularmente a la dirección de la viga, se resiste sin

necesidad de que la viga produzca un esfuerzo total de compresión o tracción en su propia dirección. Para eso, en esencia, existen todas las vigas.

Podría pensarse que algo como el mástil de un barco es una excepción, porque el mástil empuja hacia abajo, forzosamente, contra el casco del barco. Pero al mismo tiempo las jarcias y las cuerdas tiran lo mismo hacia arriba, de forma que no existe una fuerza neta vertical que actúe contra el casco, sino varias de signo contrario que se anulan entre sí, y en consecuencia no levantan o hunden el casco en el agua. Razonamientos similares pueden aplicarse a muchas estructuras animales. El cuello de un caballo, por ejemplo, se parece mucho a un mástil. Las vértebras, como el mástil, trabajan a compresión y empujan hacia abajo contra el cuerpo del caballo, pero están equilibradas, como el mástil, por los tendones del cuello, que tiran hacia arriba contra el cuerpo con una fuerza resultante igual y opuesta.

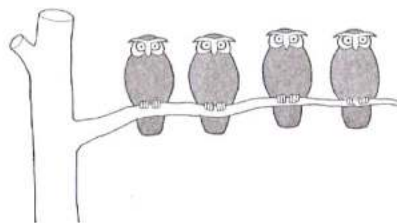


Figura 11. Un voladizo con carga uniforme

Todas las vigas, vivas o muertas, hacen el mismo trabajo en el sentido que estamos explicando; sin embargo las vigas en conjunto pueden dividirse en dos categorías: "voladizos" y vigas "apoyadas". Existen de hecho variantes y subdivisiones ulteriores, que son con frecuencia útiles para aprobar exámenes y otros propósitos, pero las ignoraremos de momento.

Un "voladizo" es una viga en la que uno de sus extremos puede suponerse "empotrado" a algún soporte rígido, como un muro o el suelo. Esta condición de borde es conocida por los inge-

nieros como "empotramiento". El otro extremo del voladizo, por supuesto, se mantiene aunque se le aplique una carga.

Las torres de alta tensión, los postes de telégrafo, los mástiles de los barcos, las paletas de una turbina, los cuernos, los dientes, los cuellos de los animales, los árboles, los tallos del trigo y los "dientes de león" son voladizos, también lo son las alas de los pájaros, de los aviones y de las mariposas y además las colas de los ratones y de los papagayos.

Una viga apoyada (figura 12) es la que descansa libremente sobre dos soportes colocados en sus extremos.

Figura 12. Una viga apoyada es la que descansa libremente sobre dos soportes colocados en sus extremos.

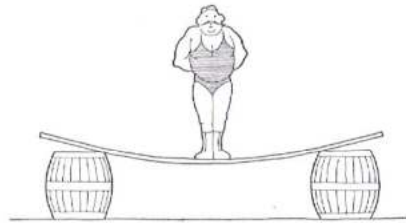
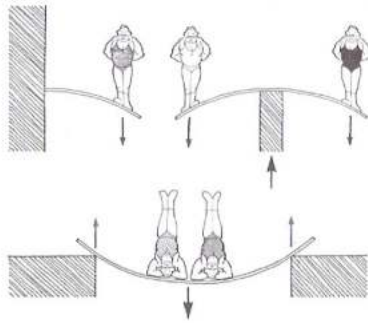


Figura 13. Una viga apoyada puede considerarse como dos voladizos puestos espalda contra espalda y bocabajo.



Desde el punto de vista estructural los dos casos están íntimamente ligados. Podemos deducir de la figura 13 que una viga apoyada es equivalente sencillamente a dos voladizos, puestos espalda contra espalda y bocabajo.

Puentes en celosía

La vía atraviesa valles de varios cientos de pies de profundidad por medio de toscos puentes de entramado de madera, que crujen y gruñen bajo el peso del tren. Nada puede encontrarse tan aparentemente inseguro como estas estructuras, y siempre doy un gran suspiro de alivio cuando me encuentro a segura en el otro lado del puente. Es algo espantoso mirar a través de las ventanillas del vagón el profundo abismo que está por debajo, y se siente que si la endeble armazón cediera, como parece que está a punto de hacer, nos partiríamos en pedazos sin posibilidad de escape. Aun en los Estados del Este se mantienen muchos de estos primitivos puentes, y se dice que han ocurrido pocos accidentes por utilizarlos. Son sin embargo muy propensos a ser destruidos por el fuego, producido por los carbones ardientes que caen de la máquina.

REV. SAMUEL MANNING, LL.D. ESTAMPAS AMERICANAS (1815)

Los ferrocarriles ingleses fueron construidos rectos y a nivel a través de la ondulada campiña inglesa usando profusamente zanjas, terraplenes y espléndidos viaductos de fábrica o hierro. Todo este lujo técnico era posible por la abundancia de capital y trabajo que poseía la Inglaterra victoriana. Las circunstancias en América eran totalmente diferentes⁷. Las distancias eran enormes, el capital, escaso, los salarios, aun para gente sin preparación, altos. En la tierra de la libertad, donde todos los hombres eran unos aficionados, los hábiles artesanos de tipo europeo casi no existían. El hierro era caro, pero existía madera barata sin limite. Sobre todo, los ingenieros del ferrocarril americanos, como sus colegas de los barcos de vapor, estaban listos para correr riesgos con la vida y la propiedad de los otros, que hubieran puesto los pelos de punta a sus colegas ingleses, debajo de sus chisteras. Aun así estos ingenieros ingleses no eran ciertamente gente excesivamente cautelosa, en nuestros tiempos los consideraríamos temerarios. Los americanos del siglo XIX, claro, tenían el hábito de vivir peligrosamente, pero esto se lo debían más a sus ingenieros que a los pieles rojas o a los bandoleros.

⁷ El costo por milla ferrocarril americano era la quinta parte del de Inglaterra, aunque los salarios americanos eran más altos.

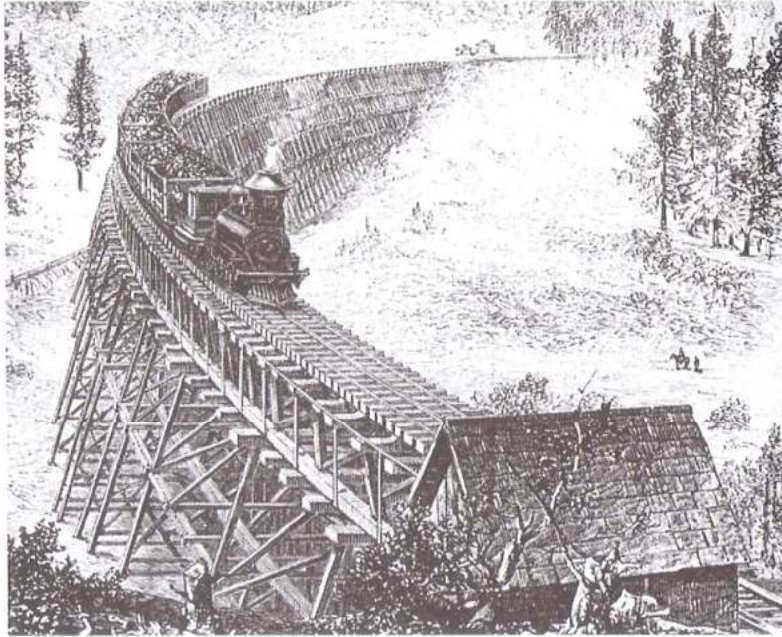


Lámina 15. Los ferrocarriles americanos pudieron construirse deprisa y con poco coste porque los puentes de entramado de madera se utilizaron masivamente para ahorrar los trabajos de terraplenado.

Los ferrocarriles se lanzaron al Oeste tan rápido como podían ser construidos y con el mínimo posible de costosas zanjas y terraplenes. Cuando era posible, se cruzaban los valles mediante esos enormes viaductos de entramado de madera que tanto alarmaron al reverendo Dr. Manning. Se asociaron siempre, como tradición, a los ferrocarriles americanos, y bastante de ellos sobreviven todavía (lámina 15). Una vez construidos, los ferrocarriles americanos producían enormes beneficios —se dice que el ferrocarril “Central Pacific” llegó a pagar dividendos del 60 por ciento— y por tanto pronto pudieron transformar sus precarios entramados de madera en sólidos

LAS VENTAJAS DE SER UNA VIGA

terraplenes de tierra lanzada desde arriba, mediante trenes especiales contruidos ex profeso, hasta que la estructura de madera quedaba enterrada en la tierra, donde se la dejaba pudrir.

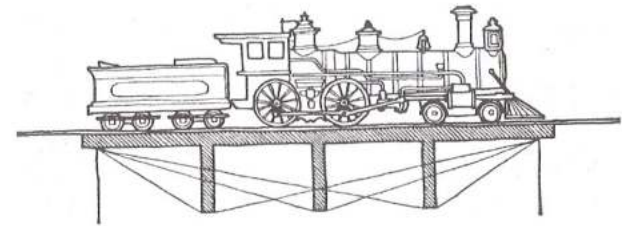


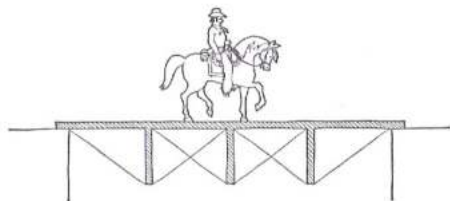
Figura 14.
Viga Bollman.

Cuando los ríos eran anchos y accidentados no podían utilizarse los entramados de madera para cruzarlos y se necesitaban construir puentes grandes, de mucha luz. Los puentes permanentes de tipo europeo eran imposibles de construir por falta de dinero y trabajadores preparados, y por tanto existía una activa demanda de largas —y baratas— celosías de madera, que podían ser construidas por carpinteros corrientes. Como construir esas celosías era potencialmente beneficioso y como los americanos son un pueblo incurablemente inventivo, existió al parecer un número muy considerable de americanos del siglo XIX que dedicaron su tiempo a inventar celosías. Se pueden encontrar por tanto en los libros técnicos un número considerable de diseños de puentes en celosía, cada uno ligeramente diferente, y cada uno de ellos bautizado con el nombre de su inventor. No necesitamos estudiarlos uno a uno en detalle, porque todos están realizados según principios similares, pero existen tres o cuatro tipos que merecen ser mencionados.

Uno de los primeros de estos fue la viga Bollman (figura 14) que fue utilizada abundantemente en América —quizá debido al talento político de Bollman más que a su capacidad técnica—. De alguna manera consiguió persuadir al gobierno americano de que era el único diseño “seguro” de celosía, y durante una época su uso fue compulsivo. Esto no debía ser un hecho legislativo tan

difícil como podría parecer, ya que durante muchos años fue aceptado como principio práctico de trabajo, por los ingenieros profesionales, que la ignorancia técnica de los congresistas americanos podía ser considerada con seguridad como sin fondo⁶.

Figura 15. Viga Fink.



La figura 14 muestra una viga Bollman simplificada con sólo tres montantes. En la práctica eran muchos más, con lo que el conjunto tendía a ser complicado. Además, las piezas a tracción tendían a ser muy grandes. La viga Fink (figura 15) hace el mismo trabajo que la viga Bollman, pero lo hace bastante mejor, utilizando piezas más cortas.

Podemos, con ventaja, colocar una barra continua a lo largo de la parte inferior de la viga Fink y convertirla en algo más o menos semejante a una viga Pratt o Howe (figura 16).

Esto es exactamente lo que se usó en general para los biplanos tradicionales. Se puede ver que la viga Pratt o Howe trabaja igual de bien boca abajo —es decir, para flechar o para empujar hacia arriba—, si se toman ciertas precauciones de sentido común. Aún más, si conseguimos que todas las barras puedan trabajar indiferentemente a tracción o a compresión, podemos simplificar la estructura convirtiéndola en una viga Warren (figura 17). Esta forma, o algo semejante, es la de uso más común, en las celosías metálicas actuales.

Hasta ahora, hemos supuesto que estos puentes son vigas simplemente apoyadas, y efectivamente, una gran cantidad de ellos lo eran y lo son. Sin embargo, un cierto número de puentes son voladizos. Por alguna razón los puentes en voladizo nunca fueron muy utilizados en la construc-

⁶ Tan cerca como en 1912, durante una investigación gubernamental americana por la pérdida del Titanic fue recogido el siguiente diálogo:

Senador X: ¿Nos ha dicho que el barco se hundió con compartimentos estancos?

Experto: Sí.

Senador X: Entonces ¿podría usted explicarnos por qué los pasajeros no pudieron entrar dentro de esos compartimentos cuando el barco se hundió?

ción de madera, pero ahora se hace en abundancia cuando se construyen de acero y hormigón. Una buena proporción de los puentes de carretera son puentes en voladizo de hormigón armado.

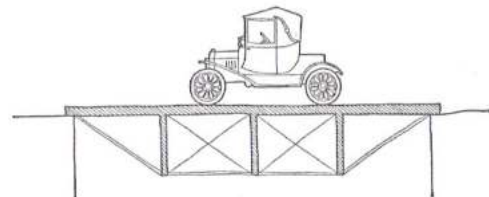


Figura 16. Viga Pratt o Howe.

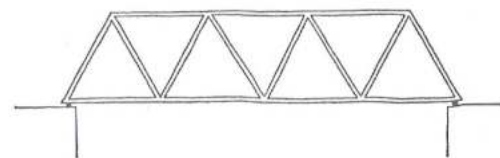


Figura 17. Viga Warren.

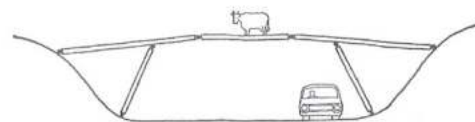


Figura 18. Puente en voladizo con una viga apoyada en el tramo central.

Estos puentes suelen tener un tramo central que es una viga apoyada, soportada en sus extremos por dos voladizos (Figura 18). Esto ocurre en parte porque es más fácil controlar las deformaciones con esta disposición. Sin embargo, existen pocos puentes donde los dos voladizos se juntan entre sí topándose en el centro.

En los días en que se construyeron puentes de ferrocarril muy largos, se puso de moda construir puentes en voladizo de acero muy grandes. El caso más famoso fue el del puente de ferrocarril

rril de Forth, que se terminó en 1890. Fue el primer puente importante construido con acero de alto horno⁹, y, de hecho, contenía 51.000 toneladas de aquél. Sin embargo, los puentes de carretera no necesitan tanta rigidez como los puentes de ferrocarril (del puente Forth se ha dicho que fue el único gran puente del mundo sobre el que se permitía pasar a los trenes a tope de velocidad), y por tanto los grandes puentes modernos son puentes colgantes, habitualmente más baratos de construir. El puente de carretera de Forth, que está en la vecindad del de ferrocarril con una luz libre semejante y que fue terminado en 1965, contiene sólo 22.000 toneladas de acero.

El sistema tensional de las celosías y las vigas

Por lo que acabamos de ver, está claro que los distintos tipos de vigas y celosías desempeñan un papel inmensamente importante para soportar las cargas de la tierra. Lo que está bastante menos claro es cómo lo hacen exactamente. ¿Cómo funcionan las tensiones de una viga y qué es lo que realmente mantiene todo en pie? Como hemos dicho, las vigas trianguladas y las macizas o de alma llena prácticamente se pueden utilizar indistintamente, y por tanto, como podría suponerse, el sistema tensional de una celosía no es en principio muy diferente del de una viga maciza o de alma llena, aunque aquél tiene la ventaja de ser más fácil de visualizar. Además, es más fácil de comprender el funcionamiento de un voladizo que el de una viga apoyada, aunque como nos hizo comprender la figura 13, las dos formas de sustentación están relacionadas entre sí de forma bastante sencilla.

Podemos empezar por tanto con el estudio de una celosía en voladizo que está empotrada en un muro por un extremo, y se mantiene libre y además soporta una carga P en el otro. Empezaremos por el voladizo en embrión o naciente que representa la disposición triangular que aparece en la figura 19. En este caso lo que impide caerse al peso P es la acción de la componente vertical hacia arriba de la tracción que soporta la barra en diagonal 1. El esfuerzo de compresión que soporta la barra horizontal 2 puede sólo actuar en dirección horizontal, y por lo tanto no tiene ninguna función directa de sostener el peso. Sin embargo, también sirven para algo los que

solo empujan horizontalmente, en este caso la barra 2 está ejerciendo una función indirecta pero muy necesaria, está equilibrando la componente horizontal de la barra 1, es decir, manteniéndola en su sitio al impedir que gire hacia dentro alrededor del empotramiento.

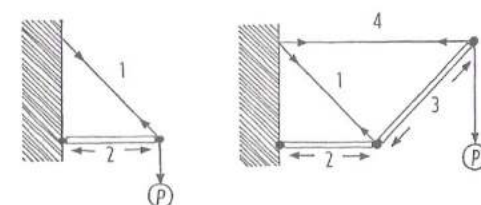


Figura 19. (izq.)

Figura 20. (der.)

Añadamos ahora un módulo más a la celosía, como en la figura 20. Está claro que la carga se soporta ahora *directamente* por la acción *combinada* de las componentes verticales hacia arriba de la tracción en la barra 1 y la compresión de la 3. La número 4 debe estar trabajando necesariamente a tracción, pero como la número 2 (que continúa trabajando a compresión), no contribuye directamente a soportar la carga, aunque la celosía no podría mantenerse en pie sin ellas.

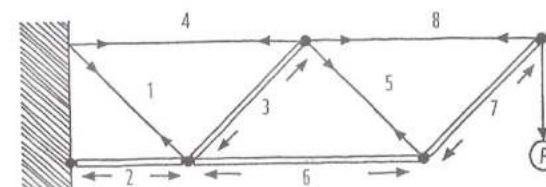
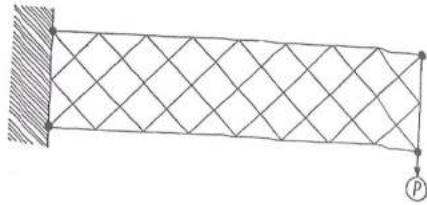


Figura 21. Celosía con varios módulos.

Si hacemos una celosía de varios módulos, como la de la figura 21, el comportamiento general continúa siendo el mismo. Las barras en diagonal 1 y 5 trabajan a tracción, y las 3 y 7, a compresión. Estas barras continúan soportando directamente la carga. Vistas en conjunto, estas barras

⁹ La Nueva Ciencia de los Materiales Fuertes. Capítulo 10

Figura 22. El cortante puede ser resistido por un triangulado múltiple que es realmente como una chapa continua.



están resistiendo lo que se llama "cortante". Tendremos mucho más que hablar sobre cortante en el próximo capítulo.

Mientras tanto podemos observar que todas las barras en diagonal soportan, hablando numéricamente en valor absoluto, el mismo esfuerzo. Esto continúa siendo cierto sea cual sea el número de módulos que tenga el voladizo y su longitud.

Esto no es cierto, sin embargo, para las fuerzas horizontales. La compresión en la barra 2 es mayor que la de la 6, y de la misma manera, la tracción en la barra 4 es más grande que la de la 8. A medida que hagamos más largo el voladizo, se hará mayor la compresión en la barra 2 y la tracción en la barra 4. Si hacemos el voladizo muy largo, las compresiones o tracciones horizontales longitudinales de las barras cerca del empotramiento se harán realmente altas, y si mantenemos la sección de las barras del voladizo corto, las tensiones también crecerán fuertemente. En otras palabras, este voladizo puede llegar a romper cerca de su apoyo, lo que después de todo es lo que nos dicta el sentido común.

Sin embargo, nos encontramos con la aparente paradoja de que los esfuerzos más altos son los de las barras que no contribuyen directamente a soportar la carga.

En la figura 21, la carga hacia abajo, o "esfuerzo cortante", está soportada directamente, como hemos dicho, por las barras diagonales en zig-zag 1, 3, 5 y 7. Sin embargo, nada nos impide hacer más complicado este triangulado colocando más barras inclinadas, que continuarán cumpliendo la misma función. De hecho, esto se hace por varias razones (figura 22). Precisamente esto es lo

LAS VENTAJAS DE SER UNA VIGA

que hace con frecuencia la naturaleza. El tronco y la caja torácica de la mayoría de los vertebrados puede ser considerado como una viga apoyada. Esto es obvio en el caso del caballo. Los huesos y las costillas de los vertebrados son las barras a compresión de una muy elaborada viga Fink (figuras 15 y 23). El espacio entre las costillas está cosido por un alma, malla o triangulado de tejido muscular que está dirigido aproximadamente a +/- 45K de las costillas.

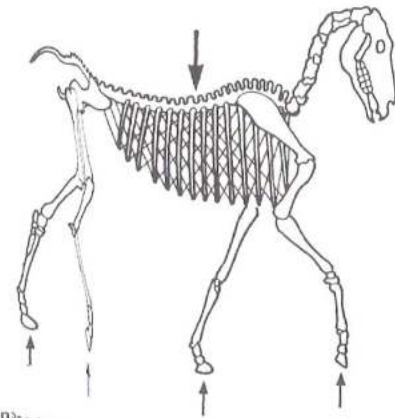


Figura 23. Muchos animales vertebrados forman una especie de viga Fink en la que los músculos y los tendones producen entre las costillas un complicado triangulado en diagonal para resistir el cortante.

El siguiente paso que puede dar una estructura de construcción es rellenar el espacio del centro de la viga, no con algún tipo de triangulado, sino con una chapa continua o "alma" de algún material como el acero o la madera laminada.

Esta clase de viga puede tener varias formas, sin embargo la más familiar para nosotros es la viga en doble T o I ordinaria (figura 24). La función de la chapa o alma del centro de la viga es precisamente la misma que la de la celosía (figura 24). La función de la chapa o alma del centro de la viga es pretensiones del alma se como un triangulado en zigzag de una celosía, y por lo tanto las cargas y esfuerzos son prácticamente igual.

De este modo, en una viga en doble T, las "alas" situadas en su parte superior e inferior están ahí para resistir tracciones o compresiones longitudinales, mientras que el "alma", en el centro, está principalmente para resistir los esfuerzos verticales o cortantes.

Tensiones de flexión longitudinales

Como hemos dicho, las tensiones longitudinales de tracción o compresión que actúan a lo largo de la longitud de la viga son frecuentemente más altas y más peligrosas que las tensiones debidas al cortante, aun cuando estas tensiones longitudinales no contribuyen directamente a soportar la carga en sí. En las vigas normales que podemos encontrar en la práctica, es muy habitual que sean estas tensiones las que producen la rotura, y son con frecuencia las primeras tensiones que calcula el ingeniero.

Aunque el tipo más corriente de sección en una viga (figura 24) es la de doble T, pueden tener cualquier forma de sección, la teoría elemental de flexión de vigas permite calcular vigas con cualquier forma sencilla de sección. De hecho, la distribución de tensiones longitudinales a lo largo de la sección de la viga es en esencia similar a la distribución de tensiones a lo largo de una sección de fábrica (capítulo 9) con la importante diferencia de que, mientras que la fábrica no puede soportar tensiones de tracción, la viga sí puede hacerlo.

Todas las vigas se deformarán bajo la carga que actúe sobre ellas y por lo tanto cambiarán su forma transformándose en una forma curvada o flectada.

El material en la cara cóncava o de compresión de una viga flectada se acortará o deformará a compresión. El material en la cara convexa o de tracción se alargará o deformará a tracción (figura 25). Si el material de la viga obedece la ley de Hooke y suponemos que las secciones se mantienen planas después de la deformación, la distribución de tensiones y deformaciones unitarias en cualquier sección de la viga será recta, y existirá algún punto "0" en el que la tensión longitudinal y su correspondiente deformación unitaria no son ni de com-

presión ni de tracción, sino nulas. A este punto de la sección se le llama "fibra neutra" (F. N.) de la viga.

Dado que es importante conocer la posición de la fibra neutra, es una suerte que sea fácil de obtener. Es bastante fácil demostrar algebraicamente que la fibra neutra pasa por el "centro de gravedad" de la sección de la viga, si ésta está construida del mismo material. En secciones sencillas simétricas, como rectángulos, círculos, tubos y dobles T, la fibra neutra está en el centro, a mitad de camino entre la parte superior y la parte inferior de la viga. En secciones no simétricas, como los carriles de ferrocarril, los barcos y las alas de los aviones, se tiene que calcular su posición, pero no es muy difícil.

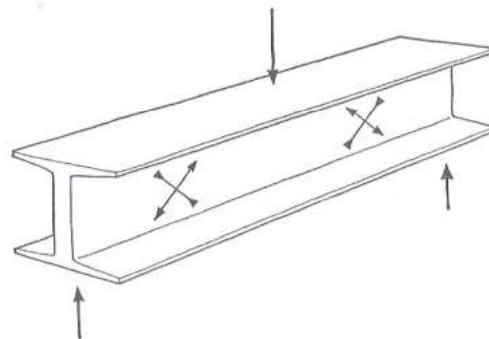
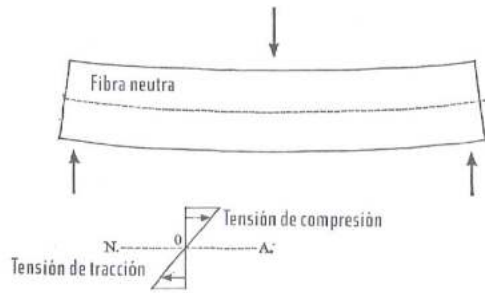


Figura 24. En muchas vigas de construcción el cortante se soporta por una alma de chapa continua. Sin embargo, las tensiones de compresión o tracción debidas al cortante continúan estando a 45°.

Viendo la figura 25, está claro que la tensión longitudinal aumenta en proporción directa a la distancia a la fibra neutra. A esta distancia se le llama generalmente y en la teoría de vigas¹⁹. Ahora bien, si lo que estamos buscando es "eficacia" estructural, sea en peso y costo o en energía metabólica, no debemos mantener gatos que no coman ratones. En otras palabras, no queremos gastar material que soporte poca o ninguna tensión. Esto significa que queremos, tanto como sea posible, eliminar el material que se encuentra cerca de la fibra neutra y colocar material tan lejos

¹⁹ Véase Apéndice 2.

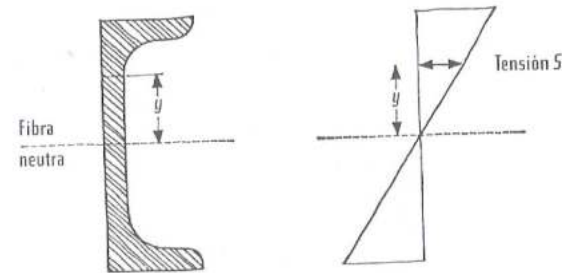
de la fibra neutra como podamos. Por supuesto, necesitamos dejar algo de material cerca de la fibra neutra para soportar tensiones de cortante, pero en la práctica no necesitamos mucho para este propósito y un alma bastante fina puede ser suficiente (figura 26).



Esta es la razón por la que, en la técnica de construcción, las vigas de acero normalmente la sección transversal tiene forma de "I", de "U" o "Z" (figura 24). Este tipo de secciones tienen la ventaja de ser relativamente fáciles de fabricar con acero dulce en los trenes de laminado. Se conocen habitualmente como "secciones de acero laminado", se pueden actualmente conseguir en tamaños muy grandes. Las secciones en Z tienen como ventaja sobre las de U y las de doble T que sus alas son más fáciles de roblonar a una placa. Es ésta la razón por la que las secciones en Z se usan a menudo como nervios en los barcos.

Cuando estas secciones no son adecuadas es bastante común utilizar secciones en cajón hechas en obra. La primera vez que se utilizó, y el caso más importante, fue en el puente Britannia sobre los estrechos de Menai de Stephenson (1850; lámina 16 y figura 11 del capítulo 13, página 290). A partir de la aparición de los pegamentos estancos y la madera laminada fiable, las vigas en cajón se han usado en la construcción de madera, en particular en las secciones del ala de los planeadores de madera (capítulo 13, figura 5 pág. 278).

El mismo tipo de razonamientos puede aplicarse, por supuesto, cuando estudiamos los materiales en forma de chapa. La chapa de acero es débil y deformable a flexión, por lo que para ahorrar peso, debemos obtener en lo posible una sección con más canto. Esto se puede conseguir plegando la chapa, con el desgraciado resultado de obtener chapa plegada¹¹. Las chapas plegadas de acero se han usado en el pasado para carcasas de aviones y barcos, en especial en los viejos aviones de hélice como los "Junkers". Sin embargo, se le pueden poner objeciones obvias, y es mucho más común en nuestros días rigidizar y fortalecer las pieles de metal de la ingeniería naval y aeronáutica roblonando o soldando unos angulares metálicos, llamados rigidizadores, a la superficie interior de la piel.



En todos estos casos la carga actúa contra la viga en una sola dirección, y la forma de la sección está optimizada para este tipo de condiciones de carga. En algunas estructuras técnicas, y en muchas biológicas, la carga puede aparecer en cualquier dirección. Esto es aproximadamente cierto en los faroles, en las patas de las sillas, en los bambúes y en los huesos de las piernas. En estos casos es mejor usar un tubo circular, y por supuesto es lo que se hace a menudo. Un caso intermedio ocurre en los mástiles de los balandros. Están generalmente hechos con tubos ovales o de sección en forma de pera. Esto no se hace para reducir la resis-

Figura 26. La tensión de tracción o compresión debida a la flexión en un punto que está separado una distancia y de la fibra neutra es:

$$s = \frac{M_y}{I}$$

donde:

M = momento flector
 I = momento de inercia de la sección

Para ver cómo se obtiene M , y , I , véase el Apéndice 2



Lámina 16. En el puente Britania, Stephenson (1850) usó vigas en cajón de hierro colado. Los trenes transitaban dentro de las vigas. Hubo muchas dificultades para evitar que las planchas de hierro pandearan. Delante del puente se agrupan varios ingenieros contemporáneos: Robert Stephenson se sienta en el centro a la izquierda y I. L. Brunel en el extremo de la derecha.

tencia al viento con un perfil aerodinámico, como se supone con frecuencia, sino más bien para tener en cuenta el hecho de que es mucho más fácil mantener un mástil moderno en dirección lateral que en el plano de la quilla, y que la sección del mástil debe tener en cuenta esto dándole más resistencia y rigidez en ese plano.

CAPÍTULO 12

Los misterios del cortante y la torsión o el Polaris y el monstruo cortado al bias

¡Retorneos! ¡Retorneos! Aún más sombras/deformadas por mezcla de alegría y tristeza/esperanza y miedo, y paz y confrontación/A lo largo del hilo de la vida humana.

SIR WALTER SCOTT. GURU MANNERING

Se cree que existió una crítica literaria de Dorothy Parker que empezaba con: *Este libro me explica mucho más sobre los Principios de la Contabilidad de lo que yo querría saber.* Y verdaderamente me atrevo a decir que muchos de nosotros podemos llegar a la conclusión de que la forma de comportarse a cortante de las cosas es algo que debe, después de todo, dejarse a los expertos. Todavía podríamos llegar a creer que la tracción y la compresión son conceptos abarcables, pero cuando llegamos al cortante detectamos una temerosa aprensión en nuestra mente.

Es lamentable, por lo tanto, que las tensiones de cortadura que se encuentran en los libros técnicos sobre elasticidad parezcan pasarse todo el tiempo habitando dentro de objetos campaniformes o los tipos de vigas más aburridos. Aunque indudablemente necesaria, esta forma de estudiar el problema carece de atractivo humano, y además distrae la atención del hecho de que las tensiones y deformaciones unitarias debidas al cortante no sólo están confinadas a las vigas y a los objetos campaniformes sino que se introducen en prácticamente todo lo que hacemos —algunas veces con resultados inesperados—. Son la explicación de por qué las barcas hacen agua, las masas se distorsionan, a los trajes les salen bultos donde no deben. No sólo los ingenieros, también los biólogos, los cirujanos, los sastres, los carpinteros aficionados, y los que hacen fundas de sillas podrían vivir vidas mejores y más provechosas con

tal de que contemplasen las tensiones de cortadura que tienen delante de sus ojos sin descorazonarse.

Si la tensión de compresión tiene que ver con empujar, y la tensión de tracción con tirar, la tensión de cortadura tiene que ver con deslizar. En otras palabras, la tensión de cortadura mide la tendencia de una parte de un cuerpo a deslizarse sobre la contigua; una cosa semejante a lo que ocurre cuando se lanza una baraja encima de la mesa o se quita algo pegajoso de debajo del zapato frotándolo contra el suelo. Es también lo que casi siempre actúa cuando algo se tuerce, como nuestros tobillos, la transmisión de un coche o cualquier otra pieza de maquinaria. Los materiales que trabajan a torsión o a cortante se comportan normalmente de forma bastante sencilla y racional, pero, como podría suponerse, puede servirnos de gran ayuda para empezar a estudiar su comportamiento utilizar el vocabulario apropiado.

Por lo tanto, vamos a empezar con unas cuantas definiciones.

El vocabulario del cortante

La teoría elástica del cortante es muy semejante a la de la tracción y la compresión, y los conceptos de tensión de cortadura, deformación unitaria a cortadura, y módulo de rigidez están estrechamente ligados a sus equivalentes para la tensión de tracción y ciertamente no son más difíciles de entender.

Tensión de cortadura (t)

Como hemos dicho, la tensión de cortadura mide la tendencia que tiene una parte de un cuerpo a deslizarse sobre la parte contigua de forma muy parecida a lo que se observa en la figura 1. Por lo tanto, si una sección transversal de material, de área A , fuese solicitada por un esfuerzo que produce cortadura que llamaremos esfuerzo cortante T , la tensión de cortadura, si se mantiene constante dentro de la sección será:

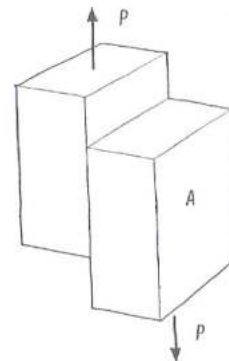


Figura 1.
Tensión de cortadura = $\frac{\text{esfuerzo cortante}}{\text{área solicitada}} = \frac{T}{A} = t$

como puede observarse en la figura 1. Por tanto, si una sección transversal de material, de área A , fuese solicitada por un esfuerzo que produce cortadura que llamaremos esfuerzo cortante T , la tensión de cortadura, si se mantiene constante dentro de la sección será:

$$\text{tensión de cortadura} = \frac{\text{esfuerzo cortante}}{\text{área solicitada}} = \frac{T}{A} = t$$

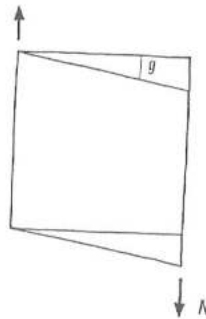
digamos que exactamente igual que la tensión de tracción. Las unidades también son las mismas que las de la tensión de tracción, es decir, p.s.i., MN/m^2 , Kg/cm^2 o lo que queramos.

Deformación unitaria a cortante (γ)

Todos los cuerpos sólidos alabean bajo la acción de una tensión de cortadura, de forma parecida a lo que ocurría con la tensión de tracción. En el caso del cortante, sin embargo, la deformación unitaria no es un movimiento longitudinal sino angular y, por lo tanto, se mide como cualquier otro ángulo, en grados o en radianes —en este caso siempre en radianes (figura 2)—. Los radianes, por

supuesto, no tienen dimensiones, y son en realidad una fracción o una relación. En esta obra llamaremos a la deformación unitaria por cortante g ; igual que hemos llamado a la deformación unitaria a tracción, e , y también es un número adimensional o fracción y no tiene unidades.

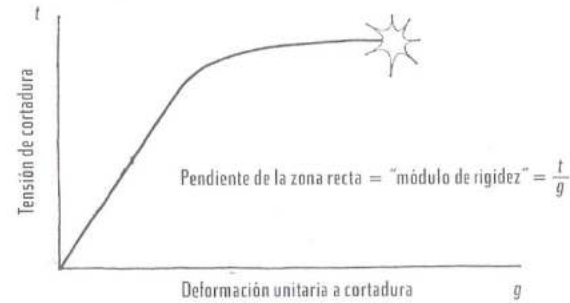
Figura 2. Deformación unitaria a cortadura = ángulo con el que el material se alabea debido a la tensión de cortadura $t = g$, que es un ángulo —normalmente pequeños—.



En los cuerpos duros como los metales, el hormigón o el hueso, la deformación elástica unitaria a cortante suele ser menor de 1° ($1/57$ de radián). Más allá de esta deformación unitaria, los materiales de este tipo, o bien rompen, o bien fluyen plásticamente de forma irre recuperable, como la mantequilla. Sin embargo, en materiales como la goma, los tejidos y los tejidos biológicos blandos, las deformaciones unitarias que son recuperables o deformación unitaria elástica a cortante puede ser mucho mayor —quizá 30 o 40 grados—. En los líquidos y en las sustancias gelatinosas como la melaza, las natillas y la plastilina, la deformación unitaria por cortante no tiene límite; pero entonces es irre recuperable.

El módulo transversal o módulo de rigidez (G)

Con tensiones pequeñas y moderadas, la mayoría de los cuerpos sólidos obedecen la ley de Hooke a cortante, de la misma manera que la obedecen a tracción. Así, si ponemos en ordenadas



las tensiones de cortadura, t , y en abscisas la deformación unitaria de cortadura, g , obtendremos un diagrama tensión—deformación que es, al menos inicialmente, una línea recta (figura 3). La pendiente o la tangente de la zona recta representa la rigidez del material a cortante y se llama "módulo de rigidez", o algunas veces "módulo de elasticidad transversal", o " G ", por tanto:

$$\text{Módulo de rigidez} = \frac{\text{tensión de cortadura}}{\text{deformación unitaria a cortadura}} = \frac{t}{g} = G^1$$

Por lo tanto G es el análogo exacto del módulo de Young, E , y como E , tiene las dimensiones y las unidades de una tensión: es decir, p.s.i., MN/m^2 , kg/cm^2 , o lo que sea.

Almas de viga a cortante, materiales isotropos y anisotropos

Como hemos dicho en el capítulo anterior, aunque suelen existir esfuerzos o tensiones de tracción y compresión muy grandes en las partes superior e inferior de una celosía o una viga, el esfuerzo vertical hacia arriba que realmente permite a la estructura realizar su misión de sopor-

Figura 3. El diagrama tensión—deformación a cortadura se parece mucho al de tracción. La pendiente de la zona recta es equivalente al módulo de rigidez.

$$G = \frac{t}{g}$$

¹ Nótese que existe una relación entre G y E . Para materiales isotropos y elásticos, como los metales es:

$$G = \frac{E}{2(1+n)}$$

Donde n = coeficiente de Poisson.

tar la carga hacia abajo que la solicita está producido por el triangulado o el alma, es decir, por la zona que se encuentra en el centro de las celosías o vigas y une el cordón o el ala superior con el cordón o ala inferior. En una viga de alma llena esta alma es maciza, quizá una placa metálica; en una celosía es algún otro tipo de triangulado.

Como no existe una diferencia clara entre cuál es el material y cuál la estructura, no tiene excesiva importancia si el alma se compone de un material continuo o de un triangulado que puede estar hecho de barras y cables, de planchas de madera o cualquier otra cosa. Existe, sin embargo, una diferencia importante. Si el alma se compone de, digamos, una placa metálica, el hecho de colocar la placa en una dirección u otra no trae ninguna consecuencia. Es decir, si formamos el alma a base de una lámina de metal más grande, no importa el ángulo con que la hemos cortado, siempre tendrá la misma resistencia porque los metales poseen las mismas propiedades en cualquier dirección. Estos materiales, en los que están incluidos los metales, se llaman "isótropos", que en griego quiere decir "lo mismo en todas las direcciones". El hecho de que los metales sean isótropos (o casi) y tengan las mismas propiedades en todas las direcciones hace la vida a los ingenieros un poco más fácil y es una de las razones por las que les gustan los metales.

Sin embargo, si ahora estudiamos un alma formada por una malla de barras está claro que debe ser construida de tal forma que los cordales y los tirantes estén prácticamente a 45° de la directriz de la viga. Si esto no se hace, el triangulado tendrá poca o ninguna rigidez al cortante (figuras 4 y 5). Cuando entre en carga, la malla se alabeará y la viga probablemente cederá. Los materiales de este tipo son conocidos como "anisótropos", o a veces como "alótropos" —los dos significan en griego "distintas en direcciones diferentes". Cada una a su modo, la madera, la tela y casi todos los materiales biológicos son anisótropos y tienen tendencia a complicarle la vida no sólo a los ingenieros, sino también a mucha más gente.

La tela es uno de los materiales artificiales más usados y es altamente anisótropa. Como ya hemos dicho repetidamente, la distribución entre material y estructura es bastante vaga, y la

ropa, aunque los sastres la llamen "material", es en realidad una estructura, formada por hilos separados que se cruzan entre sí según ángulos rectos: vemos que deberá comportarse, cuando entre en carga, de forma parecida a la malla que formaba el alma de la celosía.

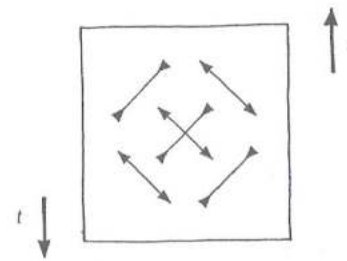


Figura 4. El cortante produce tensiones de tracción y compresión en la dirección a 45° del plano en que actúa el esfuerzo cortante.

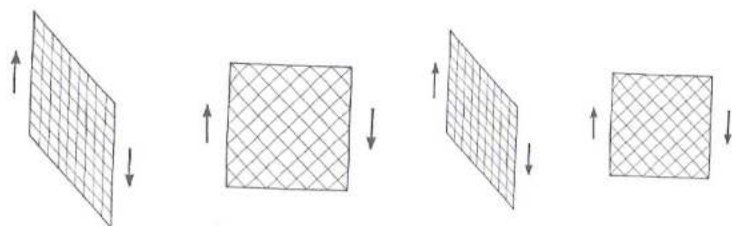
Si cogemos entre nuestras manos un retal cuadrado de tela —un pañuelo podría servir— es fácil darse cuenta de que su forma de deformarse depende marcadamente de la dirección en que se tira. Si tiramos, lo más exactamente que podamos, en la dirección de los hilos, la tela se alargará muy poco, en otras palabras, es rígido a tracción. Aún más, si lo observamos cuidadosamente, nos podemos dar cuenta de que no existe contracción transversal por efecto de la tracción (figura 6). Por lo tanto, el coeficiente de Poisson (que estudiamos en el capítulo 8 cuando hablamos de las arterias) es muy bajo o nulo.

Sin embargo, si tiramos de la tela a 45° de la dirección de los hilos —como diría una modista, "al bias"— es mucho más alargable; es decir, el módulo de Young a tracción es bajo. Ahora, además, existe una gran contracción transversal, de forma que, en esa dirección, el coeficiente de Poisson es alto: de hecho debe tener un valor alrededor de 1. En general, cuanto menos tupida se teja la tela, mayor será la diferencia entre su comportamiento al bias y su comportamiento en dirección de los hilos o "al hilo".

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

Figura 5. (izquierda) Así, una malla como la derecha es "rígida" a cortante, y una como la de la izquierda, totalmente deformable.

Figura 6. (derecha) Cuando se tira de la tela en dirección paralela a los hilos, el "material" es rígido y la contracción transversal nula.



Aunque supongo que no hay mucha gente que haya oído la palabra "anisotropía", el hecho de que la tela se comporte así ha sido familiar a prácticamente todo el mundo durante siglos. Sorprendentemente, sin embargo, las consecuencias sociales y técnicas que se pueden conseguir de la anisotropía de los tejidos no han sido tenidas en cuenta adecuadamente hasta una época bastante reciente.

Cuando nos paramos a pensar en el tema, está muy claro que si vamos a hacer algo con tela, podremos minimizar los alabeos consiguiendo que las direcciones principales vayan, tanto como sea posible, en la dirección de los hilos. Esto implica normalmente cortar el material "al hilo". Si por alguna circunstancia la tela queda traccionada a 45° , es decir "al bias", tendremos alargamientos muy grandes que serán, sin embargo, simétricos. Sin embargo, si somos tan poco hábiles que permitimos que la tela quede traccionada en alguna dirección intermedia, que no es ni una ni otra, no sólo tendremos alargamientos grandes, sino que además serán asimétricos. De esta forma la ropa tomará un aspecto fatal y ciertamente no bien recibido¹.

Aunque la fabricación de velas ha sido una industria importante desde el principio de la historia, estos hechos elementales sobre los tejidos no han sido nunca bien entendidos por los fabricantes europeos. Siguieron año tras año haciendo velas en las que la tracción actuaba oblicuamente contra los hilos. En consecuencia, sus velas se volvían enseguida barrigudas y no podían nunca ser colocadas correctamente cuando el viento soplabla a popa.

¹ Entender este principio es muy importante cuando se fabrican objetos como globos o botes neumáticos con tela impermeabilizada con goma. Si aparecen alabeos debidos al cortante la capa de goma se deforma de tal modo que la tela hace agua.

LOS MISTERIOS DEL CORTANTE Y LA TORSIÓN

Esto fue empeorando por la predilección europea por las velas de tejido de lino, que es especialmente deformable porque es un tejido poco tupido.

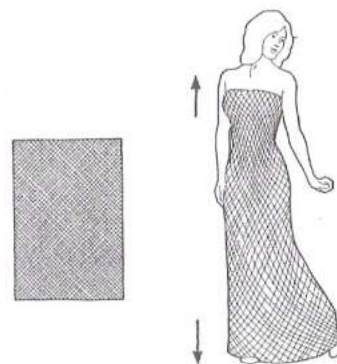


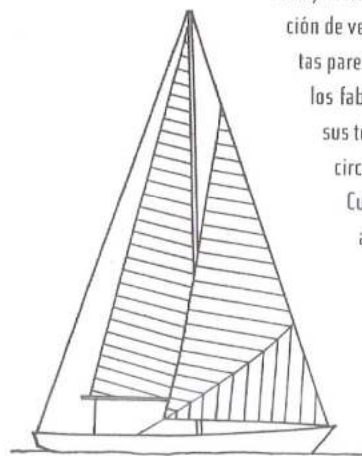
Figura 7. Si se usa una tela "al bias" a 45° de la dirección de los hilos, el "material" es alargable y el coeficiente de Poisson —y por lo tanto la contracción transversal— grande. Este es el efecto de la base del "corte al bias" en la costura.

La fabricación racional moderna de velas empezó en los Estados Unidos al principio del siglo XIX. Los fabricantes de vela americanos usaban un tejido de algodón tupido, y colocaron las costuras de forma que la dirección del hilo correspondía más o menos con la dirección de las tensiones principales. Aunque a consecuencia de esto los veleros americanos podían navegar más deprisa y aprovechando mejor la dirección del viento que los británicos, se necesitó algo así como un terremoto para que los fabricantes de velas ingleses tomaran nota de este hecho. Aquél fue suministrado por la publicidad que produjo el yate *América*, que viajó de Nueva York a Cowes en 1851 para competir con los Yates ingleses más rápidos. Entró en una regata alrededor de la isla de Wight, cuyo premio era un objeto bastante feo de plata que entregaba la Reina Victoria. Este objeto en forma de cacerola ha adquirido desde entonces cierta fama como la "Copa América". Cuando se le dijo a la Reina que el *América* era el primer yate que había cruzado la meta, preguntó "¿Y quién es el segundo?"

— "Todavía no está a la vista, majestad."

A partir de entonces, los fabricantes ingleses de velas enmendaron sus métodos tanto que, pocos años después, los propietarios de Yates americanos compraban sus velas a Mr. Ratsey de Cowes. Las lecciones aprendidas de los fabricantes de velas americanos se habían asentado, y aunque la mayoría de las velas actuales están hechas de terileno, no de algodón, si se observa una vela moderna (figura 8) se puede ver que está cortada de forma que sus hilos están, en lo posible, en dirección paralela a sus bordes libres, que es normalmente la dirección principal de la tensión mayor. El problema de persuadir a la tela para que tome una forma tridimensional

dada, es en muchos aspectos no muy diferente en la fabricación de velas y en la costura. Aunque los sastres y las modistas parecen haber tratado más inteligentemente el tema que los fabricantes de velas. Mientras fuese posible cortaban sus telas al hilo, de forma que la mayoría de las tensiones circunferenciales actuaban en la dirección de los hilos. Cuando se quería un vestido más ceñido, se conseguía a base de lo que podría llamarse un sistema de postensado: en otras palabras, apretando y tensando los cordones de un corpiño. Hubo un tiempo en el que las señoritas victorianas parecían tener tanto cordaje como un barco de vela.



Con el abandono virtual de los corpiños en los tiempos post-eduardianos —posiblemente debido al decrecimiento del

número de doncellas en el servicio doméstico— las mujeres deberían haber afrontado un futuro sin curvas. Sin embargo, en 1922, una modista llamada Mlle. Vionnet abrió una tienda en París e inventó el "corte al bias". Mlle Viollet probablemente nunca había oído hablar de su compatriota S. D. Poisson —y menos de su coeficiente— pero se dio cuenta intuitivamente que hay más for-

Figura 8. En las velas modernas es habitual colocar las costuras de la tela de tal forma que los hilos quedan paralelos a los bordes libres.

mas de ajustar un traje que tirar de cordones o forzar imperdibles y ojales. La tela de un vestido está sometida a una tensión de tracción vertical debida a su propio peso y a los movimientos del que lo lleva; si la tela se coloca a 45° de esa tensión vertical se puede explotar la gran contracción lateral que produce y conseguir un efecto de ceñido. El resultado fue sin duda más cómodo y más barato que las soluciones eduardianas al problema y, en situaciones especiales, probablemente más devastador (láminas 17 y 18).

Un problema análogo surge al proyectar cohetes. Algunos cohetes están impulsados por mezclas de combustibles líquidos como el queroseno y el oxígeno líquido, pero éstos exigen un sistema de tuberías complicado que es susceptible de funcionar mal. Por esto suele ser mejor usar un combustible "sólido" como el conocido como "propulsor plástico". Este material arde vigorosamente pero relativamente despacio, produciendo una gran cantidad de gas caliente que sale a través de las toberas con un ruido impresionante. El propulsor, y el gas que produce, están contenidos dentro de un fuerte recipiente cilíndrico que en realidad es un depósito de presión, cuyas paredes no conviene que estén expuestas a las llamas o a las temperaturas altas. Por esa razón se le da al volumen de combustible, o "carga" del propulsor, forma de tubo de paredes gruesas que entra ajustadamente en el depósito de combustible del cohete. Cuando se enciende el cohete, la combustión empieza en las paredes interiores del cilindro del propulsor plástico, de forma que el combustible arde de dentro a fuera. De esta manera, el combustible que queda sin arder protege las paredes del depósito de las llamas, hasta el último momento.

El combustible plástico se parece y se comporta como la plastilina y, como la plastilina, puede ser susceptible de rotura frágil a temperaturas bajas. Cuando el cohete está ardiendo, el depósito tiende a expandirse naturalmente bajo la presión del gas, igual que una arteria se expande bajo la presión sanguínea; si esto ocurre, también el combustible se expandirá. Si el interior de la carga continuá estando frío, es posible que se agriete cuando la deformación circunferencial unitaria alcance el valor de un uno por ciento. Si esto ocurre, las llamas penetran por

Lámina 17. (izquierda) El corte al bias, inventado por Mlle. Vionnet, saca partido del bajo módulo de rigidez y alto coeficiente de Poisson de ciertos tejidos con hilo cruzado en la dirección a 45° de los hilos. Éste es uno de los primeros vestidos de Vionnet cortados al bias (1926).



Lámina 18. (derecha) Vestido contemporáneo cortado al hilo (también de Vionnet). Nótese el bajo coeficiente de Poisson y la falta de ondulaciones. Los pliegues verticales están producidos por la existencia de un campo de tensiones de Wagner.



la grieta y destruyen el depósito. Esto naturalmente produce la sensacional explosión habitual cuando un Polaris más muerde el polvo.

Alrededor de 1950, se nos ocurrió a algunos de nosotros que sería muy ventajoso hacer el depósito de combustible del cohete, no a base de un tubo metálico, sino como un recipiente cilíndrico, armado con una doble hélice de fuertes fibras de vidrio, unidas entre sí con pegamento de resina. Si los ángulos de la fibra están correctamente calculados, puede conseguirse que la variación del diámetro del tubo bajo presión sea pequeña. Es cierto que, en este caso, el tubo se alargaría más que en el otro, como los vestidos ceñidos de Mlle. Vionnet, pero, por distintas razones, un alargamiento longitudinal es menos dañino para el combustible. Creo recordar que esta idea acerca de los cohetes nos vino a partir de los vestidos de noche cortados al bias, tan habitual en aquellos tiempos.

Las exigencias de deformabilidad de los cohetes son en general exactamente lo opuesto de las de los vasos sanguíneos. Como vimos en el capítulo 8, en una arteria se necesita que mantenga la longitud constante cuando está expuesta a las fluctuaciones de la presión sanguínea (el cambio las variaciones del diámetro de las arterias no tiene importancia). Las dos exigencias pueden cumplirse si se proyectan tubos con las fibras helicoidales adecuadas. Cuestiones de este tipo continúan apareciendo continuamente en biología, y fue muy interesante enterarse de que el profesor Steve Wainwright de la Universidad de Duke, que se dedica al estudio de los gusanos, había deducido, de forma independiente, los mismos análisis matemáticos con los que habíamos estado trabajando cuando estudiábamos los cohetes¹. Cuando hice las averiguaciones oportunas, descubrí que también en este caso la inspiración vino, a través del Profesor Biggs, del corte al bias.

El invento del corte al bias dio fama a Mlle. Vionnet en el mundo de la alta costura. Vivió hasta edad avanzada y murió, no hace mucho, a los noventa y ocho años, bastante poco consciente de su muy significativa contribución a los viajes espaciales, la tecnología militar y la bioquímica de los gusanos.

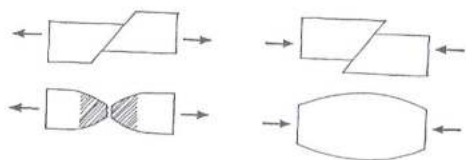
¹ Las cutículas de gusanos y de otros animales blandos están compuestas por sistemas de colágeno helicoidal (capítulo 8). Un gusano tiene más o menos los mismos problemas que un modista, aunque a veces con más éxito. Arregar un gusano...

La tensión de cortadura es sólo tracción y compresión a $\pm 45^\circ$, y viceversa

Si avanzamos un poco más en los razonamientos sobre almas de vigas, almas en forma de malla inclinada, la celosía y los trajes de noche cortados al bias, nos daremos pronto cuenta de que una tensión de cortadura es simplemente una tracción combinada con una compresión actuando a 45° de su dirección, y que, además, una tracción o una compresión aislada produce una tensión de cortadura máxima actuando a 45° .

De hecho, los cuerpos sólidos, en especial los metálicos, se rompen con mucha frecuencia a tracción cuando se les somete a una tensión de cortadura a 45° . Es esto lo que conduce a la "estricción" de los redondos y de las chapas metálicas cuando trabajan a tracción y es la base de la ductilidad de los metales (figura 9 y capítulo 5).

Figura 9. En los materiales dúctiles la rotura a tracción o a compresión tiende a aparecer debida al cortante.



Como veremos en el próximo capítulo, algo muy semejante ocurre con la compresión. Es decir, muchos cuerpos sólidos rompen a compresión bajo la carga deslizando sus caras inclinadas a 45° a cortante.

Arrugamiento o el campo de tensiones de Wagner

Una chapa gruesa o una pieza maciza de metal puede fácilmente resistir compresiones, y por tanto, cuando estas cosas están sometidas a esfuerzos cortantes, deben aparecer, a 45° , tensiones a com-



Lámina 19. Tensiones de Wagner en la carcasa del fuselaje del helicóptero Fairchild.

presión y a tracción. Las chapas delgadas, las membranas, las películas y las telas son a duras penas capaces de resistir esfuerzos de compresión actuando en su plano, y por tanto, cuando se les hace trabajar a cortante se arrugan. Este arrugamiento a cortante es muy corriente en las chapas metálicas delgadas, como ocurre en aeronáutica, donde es bastante fácil observar un fenómeno de arrugamiento u ondulación en las superficies de las alas y los fuselajes debido a esta causa (lámina 19). Esto es conocido por los ingenieros como "campo de tensiones de Wagner".

Aún más común es este mismo fenómeno en las telas de los vestidos, las fundas holgadas, los manteles y las velas mal cortadas. Supongo que las modistas no hablarán con frecuencia del campo de tensiones de Wagner, pero suelen hablar a menudo de una cualidad algo misteriosa que es conocida en el comercio de tejidos como "caída". La caída de una tela depende básicamente de su módulo de rigidez, y aunque, muy probablemente, pocos modistos pueden dar algún valor —en MN/m^2 u otras unidades— del módulo de rigidez G de sus sedas y algodones, en general, cuanto

más bajo sea el módulo de rigidez G del "material", más baja es la tendencia del tejido a tener una arruga poco deseada. La razón por la que no nos podemos vestir de celofán sin estar ridículos es principalmente porque este material tiene una rigidez a cortante demasiado alta, con lo que no tiene la caída apropiada. Al contrario, el raso y el crepé tienen el módulo de Young y el módulo de rigidez bajo, de forma que se puede ceñir fácilmente al cuerpo —como han descubierto las muchachas en sus chaquetas de raso—. De la misma forma la piel de los jóvenes tiene un módulo de Young inicial bajo y un bajo módulo de rigidez y por lo tanto se ajusta fácilmente a la forma del cuerpo⁴. A medida que pasan los años, la piel se vuelve más rígida a cortante, con resultados palpables. Recientemente el profesor R.M. Kenedi de la Universidad de Strathclyde ha realizado un extenso estudio sobre la capacidad elástica de la piel humana. Así, por primera vez, las arrugas debidas a la edad tendrán base cuantitativa y numérica.

Torsión

El aeroplano pasó de ser un objetivo imposible a un arma militar seria en poco más de diez años. Todo esto se consiguió prácticamente sin la ayuda de la ciencia. Los pioneros de la aviación eran a menudo aficionados dotados o grandes deportistas, sin embargo muy pocos tenían conocimientos teóricos. Como los entusiastas de los coches modernos, estaban generalmente más interesados en sus ruidosas e inseguras máquinas que en la estructura que las soportaba, de la cual sabían poco y a menudo hacían aún menos caso. Naturalmente, si se da a los motores potencia suficiente, se puede lanzar al aire casi cualquier aeroplano. El que se mantenga allí depende de cuestiones como control, estabilidad y resistencia estructural que son conceptualmente difíciles.

En los primeros días de la aviación demasiados hombres valientes, como C. S. Rolls y S. F. Cody, pagaron con sus vidas esa actitud. Aunque las bases teóricas de la aerodinámica habían sido sentadas por F. W. Lanchester en el año 1890, la mayoría de los profesionales no tenía ni la más leve idea de lo que estaba contando⁵. Gran parte de los accidentes de los pioneros estaban

⁴ Nótese que, para que una membrana fina se ajuste fácilmente a una superficie con pronunciada curvatura en las dos direcciones, es necesario tener a la vez un bajo módulo de Young y un bajo módulo de rigidez. Este es esencialmente el problema de la proyección de los mapas de la tierra con que se encontró Mercator en 1560.

⁵ Tampoco muchos de los ingenieros académicos. Aún tan tarde como en 1936, la teoría básica de Lanchester-Prandtl (o vórtice) de dinámica de fluidos ni se enseñaba ni se permitía usar en el Departamento de Arquitectura Naval de la Universidad de Glasgow. Para aquellos de las últimas generaciones que no están dispuestos a creer esta historia, puedo señalar que: a) yo era estudiante en ese departamento en aquellos tiempos, b) prácticamente ocurre lo mismo con las teorías "modernas" de mecánica de fractura (capítulo 5) en los departamentos actuales de ingeniería.

producidos por falta de estabilidad y entradas en pérdida, sin embargo los colapsos estructurales eran igual de frecuentes. Dado que los primeros pilotos usaban pocas veces paracaídas, estos accidentes eran prácticamente siempre fatales.

La necesidad de conseguir una estructura ligera y realmente fiable era algo, por supuesto, más o menos nuevo. En primer lugar, las alas de un avión están sometidas a cargas que le producen flexiones, igual que un puente. Como esto es evidente, y como se tenía ya una gran experiencia en la construcción de puentes, se pudo resolver el dimensionado a flexión de las alas con más o menos seguridad. Sin embargo, ya no era tan evidente que las alas de los aviones están, además, sometidas a grandes esfuerzos de torsión, es decir, a esfuerzos que tienden a retorcer las alas. Si no se prevé algo para resistir esas torsiones, las alas girarán alrededor de su eje y romperán.

La expansión de la aviación militar a partir del estallido de la guerra de 1914, produjo un alarmante porcentaje de accidentes. En Inglaterra, afortunadamente, estos problemas se dejaron en manos de un pequeño grupo de brillantes jóvenes en Farnborough que se hicieron más tarde famosos como lord Cherwell, sir Geoffrey Taylor, sir Henry Tizard y "Jehovah" Green. Gracias a sus esfuerzos el biplano tradicional llegó a ser, hacia 1918, una de las estructuras más seguras de las que estaban en uso y se llegó a considerar como irrompible. Los alemanes tuvieron menos suerte. Las autoridades de la aeronáutica en ese periodo tenían la reputación de ser técnicamente bastante deficientes. En cualquier caso, sufrieron una larga serie de accidentes estructurales, muchos de ellos debidos a carencias en el conocimiento del problema de la torsión en las alas de los aviones.

A comienzos de 1917 los Aliados habían conseguido bastante superioridad aérea en el frente occidental, en parte como resultado de la calidad técnica de su aviación. Sin embargo, mientras tanto, el muy dotado proyectista de aviones Antony Fokker estaba desarrollando un monoplano de combate, muy avanzado —el Fokker D8— con cualidades técnicas superiores a las de cualquier avión existente o en proyecto en el lado Aliado. Debido a la crítica situación militar, se aceleró la producción de unidades del D8 y se suministraron a los escuadrones de combate alemanes de primera línea sin realizar ningún proceso adecuado de pruebas de vuelo.

Una vez se empezó a utilizar el D8 en acciones de combate se descubrió que, cuando el avión tenía que salir girando hacia arriba después de un descenso en picado, durante las batallas aéreas, las alas saltaban fuera del avión. Se perdieron muchas vidas —entre las que podían incluirse las de muchos de los mejores y más experimentados pilotos alemanes de combate— y produjo una muy grave preocupación en los alemanes de la época; todavía puede ser instructivo estudiar las causas de esas dificultades.

En aquella época la mayoría de los aviones eran biplanos —es decir, con dos alas superpuestas a cada lado—, porque este tipo de estructura era más ligera y más fiable. Sin embargo, para una potencia de motor dada, un monoplano es en general más rápido que un biplano, ya que no sufre la resistencia al aire adicional que producen las interferencias aerodinámicas entre dos alas superpuestas. Existía por tanto una pulsión muy fuerte a construir monoplanos. Sin embargo, aunque no entendieran el origen de las innumerables caídas que se produjeron, era de dominio público que los monoplanos eran estructuralmente inseguros desde que las alas del histórico aeroplano de Samuel Langley se rompieron encima del río Potomac en Estados Unidos en 1903.

Las alas del Fokker D8, como las de casi todos los monoplanos de la época, estaban cubiertas de tela. La tela se colocaba sólo para darle al ala la forma aerodinámica que se necesitaba. Estaba tensada sin más sobre un entramado estructural y no soportaba ninguna carga importante. Los esfuerzos de flexión se resistían con dos largueros horizontales paralelos que funcionaban como los voladizos empotrados en el fuselaje. Los dos largueros horizontales estaban conectados entre sí por una serie de costillas ligeras de madera, que daban la forma al ala, separados entre sí pocos centímetros, sobre los que a su vez se fijaba la tela (figura 10).

Tan pronto como los accidentes del D8 llegaron a su conocimiento, las autoridades alemanas del Ejército del Aire ordenaron hacer ensayos técnicos con la estructura. Según la costumbre de la época, se montó un avión completo bocabajo en un laboratorio y se cargaron las alas con sacos de perdigones de plomo para simular las cargas aerodinámicas que actuaban en el vuelo. Durante los ensayos las alas no mostraron ninguna falta de resistencia, y rompieron bajo una carga que

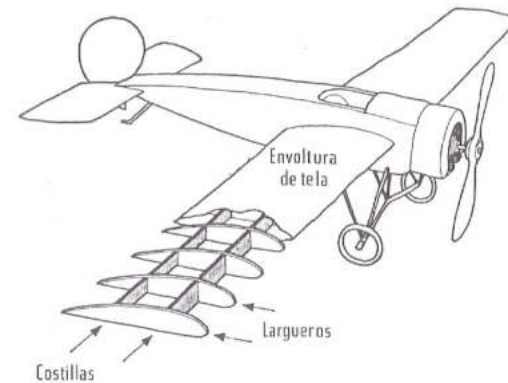


Figura 10. Ala de avión cubierta de tela.

equivalía a seis veces el peso del aeroplano cargado. Aunque en nuestros días se exige que los aviones de guerra sean capaces de soportar una carga equivalente a doce veces el peso del avión cargado, en 1917 un "coeficiente de seguridad" de seis se consideraba perfectamente adecuado y ciertamente representaba una carga mayor de la máxima posible en las peores condiciones de combate de la época. En otras palabras, el aeroplano debería ser perfectamente seguro.

Sin embargo se observó que cuando el D8 se quebraba en el laboratorio, la rotura empezaba por el larguero posterior. Para aumentar su seguridad las autoridades ordenaron que se fabricaran largueros posteriores más gruesos y fuertes. Desgraciadamente, una vez sustituidos, los accidentes se volvieron más, no menos, frecuentes y el Ministro del Aire alemán tuvo que afrontar el hecho de que "reforzar" el ala añadiéndole más material, en realidad, la debilitaba.

En aquellos momentos estaba empezando a estar claro para Antony Fokker que no iba a obtener mucha ayuda útil de la mentalidad oficial. Por lo tanto, cargó otro D8 bajo su propia supervisión en su fábrica. Esta vez tuvo buen cuidado en medir las deformaciones que sufría el ala cuando entraba en carga. Descubrió que el ala cuando está cargada no sólo se deforma a flexión (es

decir, los extremos de las alas se levantan paralelos en relación al fuselaje cuando el avión está saliendo de un descenso en picado), sino también que las alas giraban alrededor de su eje a torsión aunque aparentemente no existía ningún tipo de carga que produjera torsión. Lo que era especialmente importante es que la dirección de la torsión era tal que aumentaba significativamente la inclinación aerodinámica o ángulo de ataque del ala.

Esa noche, mientras ponderaba estos datos, se le ocurrió súbitamente a Fokker que ahí estaba la explicación de los accidentes del D8 y también de muchas de los otros problemas que presentaban los monoplanos. Cuando el piloto tira de la palanca de control el morro del avión sube, e igual ocurre con las cargas que actúan en las alas. Pero al mismo tiempo las alas giran a torsión, de forma que las cargas que produce el aire en las alas crecen desproporcionadamente; por tanto, las alas giran más a torsión, con lo que las cargas vuelven a crecer y así sucesivamente, hasta que el piloto pierde el control del aparato y las alas saltan a torsión. Fokker había descubierto lo que se llama "condición divergente" —que puede llegar a ser bastante letal—.

¿Qué es lo que realmente ocurre desde el punto de vista de la elasticidad?

Centros de torsión y centros de presión

Supongamos que tenemos un par de voladizos iguales y paralelos, o largueros de ala, unidos entre sí a intervalos por un conjunto de costillas separadas entre sí un intervalo fijo (figura 10). Supongamos que aplicamos una carga puntual hacia arriba en uno de los nervios. A no ser que esta fuerza esté aplicada exactamente en el punto medio entre los dos largueros en voladizo (figura 11), se repartirá de forma desigual entre los dos largueros y por lo tanto uno de los largueros soportará más carga que el otro. El larguero más cargado se desplazará hacia arriba más que el menos cargado (figura 12). En tal caso las costillas que unen los paneles cesarán de mantenerse horizontales y el conjunto del ala sufrirá torsiones. El punto en el que la carga debe estar aplicada de forma que el ala no sufra torsiones se llama "centro de torsión".

Naturalmente, si existiesen más de dos largueros, o si los largueros tuviesen rigidez diferente, el centro de torsión no se encontraría en el punto medio sino en alguna otra posición más adelante o más atrás. Sin embargo, siempre existe un centro de torsión para cualquier viga o para cualquier estructura que trabaje como una viga a flexión. Si se aplica una carga vertical en ese punto la viga sufrirá flexiones pero no sufrirá torsiones; una carga aplicada en un punto distinto del centro de torsiones producirá torsiones además de flexiones.

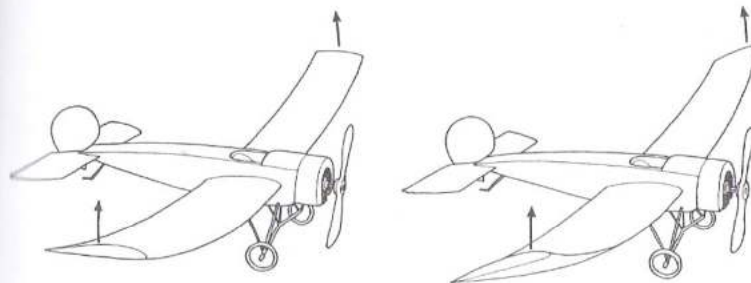


Figura 11. Si las fuerzas de sustentación actúan en el punto medio entre los dos nervios las alas se flexionan hacia arriba sin sufrir torsiones.

Hasta ahora hemos estudiado exclusivamente el caso de una carga puntual actuando en una viga o en un ala. Naturalmente, las fuerzas de sustentación aerodinámicas que, cuando el avión está volando, empujan hacia arriba contra el ala y mantienen el aparato en el aire, están repartidas en toda la superficie del ala. Sin embargo, a efectos de análisis y cálculo se puede suponer que la resultante de estas fuerzas actúa en un punto de la superficie del ala que se conoce como "centro de presiones".

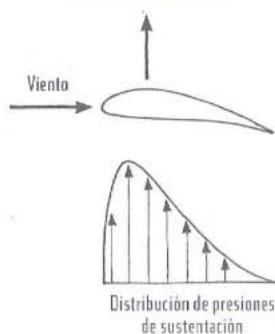
Se podría suponer por lo dicho que el centro de presiones está en el centro del ala, es decir, a mitad de camino entre su borde anterior y el borde posterior, es decir, en el eje del ala. Realmente, como es bien conocido en aeronáutica, esto no ocurre así. El centro de presiones de las fuerzas de sustentación está no muy lejos del borde anterior, normalmente cerca de lo que

Figura 12. Si las fuerzas de sustentación actúan en un punto distinto del centro de torsión (por ejemplo cerca del borde anterior del ala) el ala sufrirá torsiones además de flexiones. Si esto produce un aumento del ángulo de ataque puede ser fatal, como ocurrió el fockker D8.

se llama posición del "cuarto del ancho", es decir, a un 25 por ciento del ancho detrás del borde anterior⁵.

De esto se sigue que, a no ser que se diseñe un ala de forma que el centro de torsión se encuentre cerca del cuarto del ancho, el ala trabajará a torsión. El ángulo que gira el ala debido a la torsión dependerá naturalmente de cuán rígida es el ala a torsión, pero, en general, cualquier giro a torsión es algo malo y peligroso para un aeroplano y por tanto el objetivo del proyectista es reducirlo tanto como sea posible. Por esa razón, el cañón de una pluma de pájaro está situado habitualmente alrededor del cuarto del ancho (figura 13).

El centro de presiones está situado alrededor de un cuarto del ancho



En la pluma de un pájaro (principalmente del ala) el cañón está situado alrededor del cuarto del ancho para minimizar los esfuerzos de flexión combinada con torsión.

La posición del centro de torsión y también la rigidez a torsión, del ala de un monoplano recubierto de tela depende prácticamente por completo de la rigidez a flexión relativa de los dos largeros. En el Fokker D8 el centro de torsión estaba muy por detrás del centro de presiones, y demasiado cerca del centro del ancho. El ala no tenía la suficiente rigidez y resistencia como para resistir los esfuerzos de torsión que aparecían debido a que estos dos centros estaban separados

entre sí, y por tanto giraba sobre su eje y rompía a torsión. Cualquier modificación en las dimensiones que aumentara la resistencia y la rigidez del panel posterior desplazaba aún más atrás el centro de torsión y empeoraba la situación. Cuando todos estos hechos fueron claros para Antony Fokker, tomó la decisión, que ahora nos parece obvia, de reducir el espesor y la rigidez del largero posterior, desplazando así el centro de torsión hacia delante, más cerca del centro de presiones. Una vez hecho esto el D8 se transformó, relativamente, en una máquina segura y en una amenaza para las Reales Fuerzas Aéreas inglesas y la Fuerza Aérea francesa.

Debido a las leyes de la aerodinámica, el centro de presiones de las fuerzas de sustentación que actúan en el ala del avión debe estar cerca del cuarto del ala. Si queremos reducir las tensiones debidas a la flexión y a la torsión necesitamos por tanto proyectar una estructura tal que el centro de torsión esté adelantado y cercano al centro de presiones del ala.



Sin embargo, los alerones (que controlan al avión cuando se reduce la velocidad, es decir en los giros y los aterrizajes) producen grandes fuerzas hacia arriba y hacia abajo en puntos próximos al borde posterior y por lo tanto lejos del centro de torsión. De esta forma los alerones inevitablemente producen esfuerzos de torsión en las alas cada vez que el piloto aterriza. Se puede ver en la figura 14 que la dirección de este giro a torsión es tal que modifica la sustentación aerodinámica del ala, en conjunto, en el sentido opuesto a la que ejerce el alerón y por tanto reduciendo su efecto. Si el ala no tiene suficiente rigidez a torsión puede invertirse el efecto que produce el alerón, de forma que el piloto queriendo hacer girar a la derecha, manipulando los controles en ese sentido, se encuentra que el avión realmente gira a la izquierda.

Figura 14. Un alerón produce cargas verticales cerca del borde posterior de un ala, bien alejadas del centro de torsión. Tiende por tanto a producir torsiones en el ala tales que producen fuerzas aerodinámicas opuestas a las que necesita el piloto.

Este efecto, que es no sólo desconcertante sino también muy peligroso, se llama *inversión del mando* y no es en absoluto desconocido. Es un problema serio del diseño de un avión rápido moderno. Para prevenirlo o evitarlo debe aumentarse la rigidez a torsión de la estructura del ala.

En los primeros monoplanos recubiertos de tela, como el DB, la rigidez a torsión del ala dependía prácticamente por completo de lo que se llamó *flexión diferencial* de los dos largueros principales. No se podía hacer mucho más, y el valor de rigidez a torsión que puede obtenerse con este sistema —aun con la ayuda de arriostramientos con cables— es bastante limitado. Por esta razón, estos aeroplanos siempre eran más o menos peligrosos, tanto que las autoridades de muchos países ponían mala cara a la construcción de monoplanos, y en algunos casos la prohibían directamente.

No se debía la preferencia por los biplanos a alguna clase de estupidez reaccionaria por parte de los ministros del Aire, sino a que un biplano proporcionaba una forma de construcción esencialmente más rígida y más resistente, especialmente a torsión. En la práctica, los biplanos fueron durante muchos años más ligeros y más seguros que los monoplanos, además en los primeros años tampoco existía una gran diferencia en velocidad de vuelo.

Cuando se triangula y acodala una estructura en biplano se obtiene, en efecto, una especie de cajón triangulado por las cuatro caras, un "cajón a torsión" que es muy fuerte y muy rígido, no sólo a flexión sino también a torsión. En la figura 15 se puede observar que los cuatro largueros principales (dos en cada ala) forman las esquinas del cajón, mientras que los espacios que quedan entre ellos se transforman en celosías trianguladas. No se pueden ver, por supuesto, los triangulados de planos superior e inferior porque están tapados por la tela de las alas. Sin embargo, este triangulado horizontal existe y funciona muy bien, ya que tiene el papel de resistir los cortantes que producen los esfuerzos de torsión a que están sometidas las alas. La forma de resistir torsiones del cajón se muestra esquemáticamente en la figura. Se puede ver que en cada cara del cajón las diagonales trabajan a cortante, de forma parecida a si estuviese sometida al cortante asociado a la flexión, producida por una carga puntual. Nótese que las cuatro caras

trabajan a la vez con el mismo cortante y que ninguna puede trabajar sin las otras. Si se retirase una de las cuatro caras la resistencia a torsión de la estructura desaparecería.

En un biplano estos paneles a cortante están necesariamente hechos de cordales y cables. Sin embargo, si la estructura no tuviese que volar, sino simplemente resistir torsiones en el suelo, podría reemplazarse el triangulado de cordales y cables por unos paneles continuos metálicos o por hojas de madera laminada. Desde el punto de vista puramente estructural, el efecto sería el mismo, igual que ocurre con las almas de las vigas de alma llena y de las celosías. La torsión puede pues resistirse con cualquier tipo de tubo o cajón cuyos lados sean continuos o bien con una estructura triangulada espacial cerrada. En los dos casos las paredes o lados del tubo están sometidas a tensiones de cortadura. En términos de resistencia y rigidez esto es mucho más eficaz que depender de la rigidez a flexión diferencial de dos vigas.

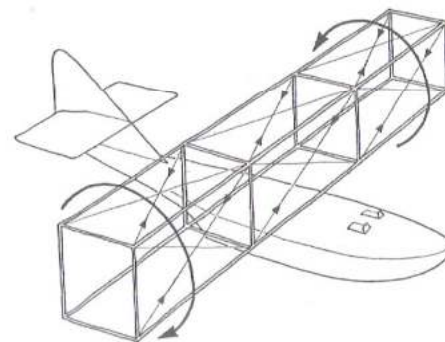


Figura 15. Diagrama de la estructura principal de las alas de un biplano sometido a esfuerzos de torsión, por ejemplo, de las alerones. El conjunto se llama cajón de torsión.

Se pueden encontrar las fórmulas de la resistencia y rigidez a torsión de distintos tipos de secciones y tubos en el Apéndice 3. Entre otras cosas, debe señalarse que la resistencia depende del área encerrada por la sección transversal, y que la rigidez depende del cuadrado del mismo área. Así, un cajón de torsión con sección transversal grande, como el viejo biplano, necesita

poco material y es muy ligero. Cuando construimos un monoplano moderno, lo que estamos haciendo es transformar el ala en un tubo a torsión con una capa continua de chapa de metal o madera laminada. Sin embargo, aunque, necesariamente, usemos alas más gruesas de las que se solían utilizar en los biplanos, el área encerrada por la sección del tubo a torsión, en conjunto, es mucho menor que la del biplano. De esta forma, para conseguir una resistencia y una rigidez a torsión adecuada nos vemos forzados a utilizar una piel relativamente gruesa y pesada. Se necesita por tanto gastar una proporción relativamente alta del peso de la estructura en resistir torsiones.

Aunque la carencia de rigidez a torsión no es tan peligrosa en los coches como en los aviones, la calidad de las suspensiones y de las sustentaciones de la ruedas de los coches dependen en gran medida de ello. Los coches descapotables de antes de la Segunda Guerra Mundial eran a veces objetos magníficos, pero, como los aviones descapotables, adolecían de haber prestado más atención al motor y a la transmisión que a la estructura de la carrocería.

Aquellas carrocerías, de hecho, confiaban su rigidez a torsión a la flexión diferencial de vigas bastante flexibles, de forma muy parecida al viejo Fokker D8. La falta de rigidez a torsión en la carrocería produjo en esos coches su característica inestabilidad en carretera y los hicieron muy fatigosos de conducir.

Para intentar mantener las ruedas más o menos en contacto con la tierra, las suspensiones y las ballestas de los coches descapotables deportivos fueron reforzadas hasta que se volvieron prácticamente macizas. El resultado fue, por supuesto, que la conducción se volvió casi insoportablemente dura y brusca. Como el ruidoso tubo de escape, este tipo de cosas eran indudablemente impresionantes para las pasajeras jóvenes, pero no contribuía mucho a mantener el coche dentro de la carretera. La solución que han elegido casi todos los diseñadores de coches modernos ha sido deshacerse de esa carrocería tan frágil y sustituirla por un habitáculo laminar de chapa que sea capaz de soportar las sollicitaciones a torsión y flexión. Ésta forma, gracias a su techo, un gran cajón a torsión no demasiado diferente del que forman las alas de un biplano.

Disponiendo de tanta rigidez a torsión los diseñadores se pueden concentrar en darla una suspensión científicamente diseñada que sea a la vez segura y confortable.

Como hemos dicho, la rigidez a torsión crece con el cuadrado del área encerrada por la sección transversal. Esto está más o menos bien con elementos voluminosos como las alas de los aviones, los cascos de los barcos y los coches con techo; pero cuando llegamos a las barras de los motores y de la maquinaria, el diámetro —y por tanto el área de la sección transversal— está en general muy limitado y, por tanto, estas piezas deben hacerse de acero macizo. Aun así, aunque a veces son muy pesadas, no siempre son lo suficientemente fuertes. Es ésta una de las razones por las que los motores y la maquinaria son normalmente tan pesadas. Los proyectistas experimentados os contarán que cualquier petición de una mayor resistencia o rigidez a torsión es equivalente a una blasfemia o una plaga. Hace crecer a la vez el peso y el costo y todo esto produce una cantidad desproporcionada de dificultades y de ansiedad al ingeniero.

A la naturaleza no parece importarle gastar tiempo y trabajo y carece totalmente del concepto del valor del dinero; pero está intencionalmente preocupada por el "coste metabólico" —es decir, el gasto de la estructura en términos de alimentos y energía— y además es muy consciente del problema del peso propio. No es sorprendente, por tanto, que evite a la torsión como a la peste. De hecho, casi siempre procura soslayar cualquier necesidad seria de resistencia o rigidez a torsión. Mientras no estén sometidos a cargas "antinaturales", la mayoría de los animales pueden sobrevivir siendo débiles a torsión. A ninguno de nosotros nos gusta que nos retuerzan un brazo, y en los avatares de una vida normal, pocas veces una pierna sufre una torsión. Sin embargo, cuando fijamos a nuestros pies esos largos brazos de palanca llamados esquís y procedemos a esquiar mal, es desagradablemente fácil que produzcan en nuestras piernas una gran sollicitación de torsión. Debido a que ésta es la causa más común de la rotura de piernas mientras se esquía, se han desarrollado las modernas ataduras de seguridad, que eliminan automáticamente el esfuerzo de torsión.

Todos los huesos de nuestro cuerpo, no solo los de nuestras piernas, son sorprendentemente débiles a torsión. Si queremos matar una gallina —o cualquier otro pájaro— lo más fácil es retor-

cerle el cuello. Esto es bien conocido; lo que es menos conocido es lo muy débiles que son las vértebras a torsión, como el principiante puede comprobar para su disgusto y embarazo cuando se encuentra la cabeza de pollo entre las manos. Sin embargo retorcer cuellos, como esquiar, son actividades enteramente artificiosas y bastante fuera del curso ordinario de la naturaleza. A diferencia de los ingenieros, la naturaleza tiene poco interés en el movimiento rotatorio y (como los africanos) jamás se ha molestado en inventar la rueda.

CAPÍTULO 13

Las distintas formas de romper a compresión o sandwiches, cráneos y el Dr. Euler

Debido a la fragilidad de nuestra naturaleza no siempre podemos estar de pie.

COLECTA DEL CUARTO DOMINGO DE ADVIENTO

Como podría esperarse, las distintas formas de romper a compresión que tienen las estructuras son bastante diferentes en esencia de las de rotura a tracción. Cuando inducimos tensiones de tracción en un cuerpo sólido estamos intentando separar sus moléculas entre sí. Mientras lo hacemos, se alargan los enlaces interatómicos que mantienen el material unido, sin embargo sólo pueden alargarse con seguridad hasta un cierto límite. A partir de un 20 por ciento de deformación unitaria a tracción, los enlaces químicos se debilitan y pueden quedar deshechos. Aunque los verdaderos detalles del proceso de fractura a tracción son complicados, se puede decir de forma aproximada que, cuando un número suficiente de enlaces interatómicos se alargan más allá de su punto de rotura, el material rompe cortante a cortante. Estrictamente hablando, sin embargo, no existe un caso análogo de rotura de los enlaces atómicos cuando ésta se debe simple y puramente a una compresión. Cuando se comprime un cuerpo sólido, se presionan sus moléculas de forma que las acercamos más entre sí y, bajo cualquier condición normal, la repulsión entre las moléculas crece indefinidamente a medida que la tensión de compresión aumenta y las moléculas se aproximan más entre sí. Solamente si están sometidas a las enormes fuerzas gravitatorias que existen en las estrellas que los astronautas llaman "enanas negras" la resistencia a compresión entre átomos colapsa, con consecuencias de pesadilla.¹

Sin embargo, muchas de las estructuras que conocemos rompen con lo que se describe comúnmente como "compresión". En realidad, lo que pasa en las roturas de este tipo es que el

¹ El resultado puede ser una concentración de masa tan densa que su propio campo gravitatorio es lo suficientemente fuerte para impedir, no sólo que pueda escapar ningún tipo de materia, sino la emisión de cualquier tipo de radiación. Por lo tanto, no puede existir ningún camino de ida y vuelta en esa zona, y esas regiones del universo nos están prohibidas para siempre. Estos puntos se llaman "agujeros negros". Como la isla de la comedia de hadas de sir James Barrie *Maria Rosa*, son "posibles de visitar" pero nunca se puede volver de ellas.

material o la estructura encuentra una forma de evadir las excesivamente altas tensiones de compresión, moviéndose "por debajo" de la carga: es decir, huyendo por una dirección lateral, usando una de las rutas de escape que prácticamente siempre están disponibles. Si lo estudiamos desde el punto de vista de la energía, la estructura "quiere" librarse del exceso de energía de deformación a compresión, y lo hará por medio de cualquier tipo de intercambio energético que encuentre a mano en tales circunstancias.

Las estructuras a compresión tienen pues unas características bastante movedizas, y por consiguiente el estudio de la rotura a compresión es más o menos el estudio de las formas de huir de una presión. Como puede suponerse, existen muchas formas distintas de hacerlo. El sistema de fuga que utilice la estructura dependerá de su forma y proporciones y del material que la compone.

Hemos estudiado hasta cierto punto las fábricas. Aunque estos edificios son esencialmente estructuras comprimidas —y la fábrica debe mantenerse siempre comprimida— no puede decirse de ninguna manera que rompen a compresión. Paradójicamente, sólo pueden romper a tracción. Cuando esto ocurre, las fábricas tienen la mala costumbre de producir rótulas, a consecuencia de las cuales se desplazan hacia fuera y se vienen abajo. Aunque los arcos son estructuras más estables y más responsables que los muros, a veces pueden producir cuatro rótulas, después de lo cual disipan su energía de deformación a la vez que su energía potencial plegándose y reduciéndose a un montón de escombros. En cualquier caso, como calculamos en el capítulo 9, los valores reales de las tensiones de compresión en la fábrica son en general muy bajos, muy por debajo de la tensión de rotura oficial "por aplastamiento" del material.

Tensiones de rotura por aplastamiento o la rotura de barras y soportes cortos a compresión

Sin embargo, si tomamos un ladrillo o un bloque de hormigón de forma compacta y lo sometemos a una carga de compresión grande —en un ensayo de laboratorio o con cualquier otro método— el

material romperá de una forma que se llama convencionalmente "rotura a compresión". Aunque los cuerpos frágiles como la piedra, el ladrillo, el hormigón y el cristal en general quedan aplastados de forma que quedan reducidos a fragmentos, o a veces a polvo, la rotura continúa sin ser una rotura por compresión estrictamente hablando. La rotura real aparece producida por el cortante. Como dijimos en el anterior capítulo, tanto las tensiones a tracción como las de compresión producen a 45° los valores máximos de tensión de cortadura; son esas tensiones de cortadura inclinadas las que en general producen la rotura por compresión de los soportes cortos.

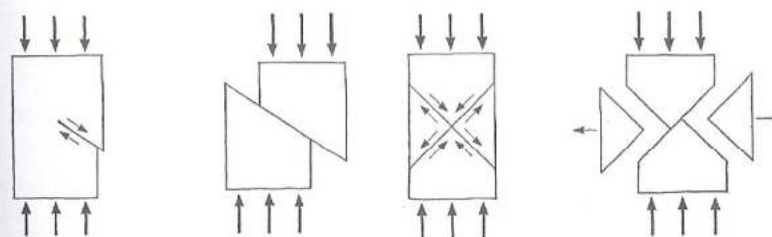


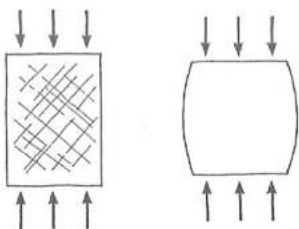
Figura 1. Típicas "roturas por compresión" de un cuerpo sólido frágil como el mortero o el cristal. La rotura se debe en realidad al cortante.

Como también dijimos antes, todos los cuerpos sólidos frágiles que se utilizan están llenos de grietas, rozaduras y defectos de todo tipo. Aunque no estén así recién fabricados, muy pronto quedan dañados por toda clase de causas virtualmente inevitables. Naturalmente, esas grietas y arañazos aparecen según cualquier dirección. De esto podemos deducir que siempre se puede encontrar una buena cantidad en una dirección inclinada respecto a la dirección de las tensiones de compresión, es decir, más o menos en la dirección de la tensión de cortadura máxima (figura 1).

Igual que las grietas a tracción, estas grietas a cortante tienen una "longitud crítica de Griffith". En otras palabras, una grieta de una longitud dada puede propagarse bajo un cierto valor crítico de la tensión a cortadura. Cuando un sólido frágil, como el hormigón, llega a esta situación, las grietas a cortante se propagan súbitamente, violentamente y quizá explosivamente. Si una grieta a cortante se propaga en diagonal atravesando el ancho completo de la

barra a compresión y dividiéndola en dos partes, éstas naturalmente deslizan entre sí, de forma que la barra ya no es capaz de soportar la carga de compresión. El colapso resultante puede producir una gran descarga de energía, y ésta es la razón por la que los materiales frágiles como el vidrio, la piedra o el hormigón suelten esquirlas, que pueden ser peligrosas, cuando se les aplasta o se les golpea con un martillo. De hecho, la descarga de energía de deformación es con frecuencia lo suficientemente grande como para "sufragar" la energía necesaria para que el material quede reducido a polvo. Esto es lo que ocurre cuando aplastamos terrones de azúcar con un martillo o una cucharilla.

Figura 2. Rotura de un material dúctil, como un metal, a compresión. De nuevo la rotura se debe al cortante, pero esta vez produce un abultamiento en el metal.



La rotura de un metal dúctil —igual que la de la mantequilla o la plastilina— bajo tensiones de compresión se debe a causas similares. Lo que ocurre es que el metal se desliza (debido al mecanismo de dislocación) a lo largo de su propio espesor empujado por las tensiones de cortadura. Otra vez ocurre esto a lo largo de planos inclinados 45° respecto a la carga de compresión: de esta forma un metal corto se ensancha hacia afuera en forma de barril (Figura 2). Debido al alto valor del trabajo de fractura de los metales dúctiles, estos materiales son menos dados a lanzar esquirlas durante la rotura a compresión, y las consecuencias inmediatas de la fractura son posiblemente menos dramáticas y bastante menos peligrosas. Es, en efecto, la tendencia a ensancharse bajo compresión, lo que aprovechamos cuando aplastamos la cabeza de un roblón metálico martilleándola o apretándolo bajo una prensa hidráulica.

Los materiales como las maderas y los compuestos artificiales de fibras, como la fibra de vidrio y la de carbono, rompen a compresión de una forma bastante diferente. En estos casos las fibras de refuerzo "pandean" o se doblan a la vez con la misma deformación bajo la carga de compresión, de forma que aparece lo que se llama una "onda de compresión" atravesando el material. Éstas pueden estar inclinadas en diagonal o perpendiculares respecto a la dirección de la carga que las comprime o a veces estar inclinadas un ángulo intermedio cualquiera (Figura 3).

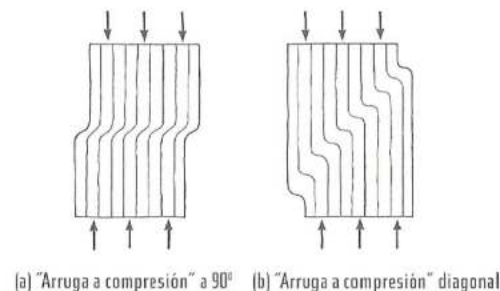


Figura 3. Rotura a compresión de un material fibroso como la madera o la fibra de vidrio. Nótese que la onda a 90° implica una contracción volumétrica y que por tanto sólo puede tener lugar si el material contiene huecos, como en la madera. Los compuestos "macizos" se rompen en la forma (b) que no implica cambio de volumen.

Desgraciadamente, las ondas de compresión pueden aparecer en un material fibroso bajo tensiones muy bajas. Estos materiales pueden pues ser a veces "débiles a compresión", y esto debe ser tenido en cuenta cuando se utilizan.

Tensiones de rotura de los materiales a tracción y a compresión

Los libros, técnicos y teóricos, hacen generalmente con gran alarde la tabulación de las "tensiones de rotura a tracción" de los materiales técnicos más comunes. Sin embargo, estos libros, como norma, son mucho más reticentes sobre las tensiones de rotura a compresión. Esto se debe en parte a que los valores experimentales de las tensiones de rotura a compresión varían mucho

más con la forma de la probeta que se haya empleado que las tensiones de rotura a tracción. A veces este efecto es tan grande que deja de tener sentido fijar un valor. Sin embargo, aunque esté justificada una actitud cauta respecto a los valores de la rotura a compresión, al menos permiten comentar algunas características interesantes de las estructuras.

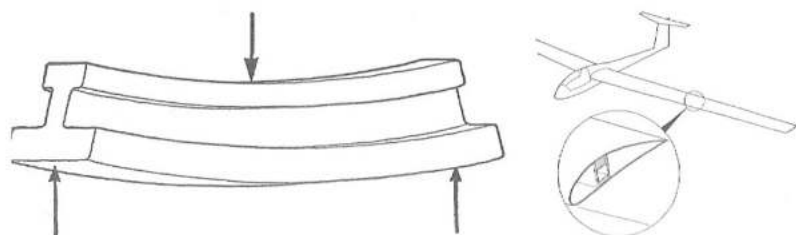


Figura 4. (izquierda) Las vigas de hierro colado tienen más gruesa el ala a tracción que el ala a compresión, debido a que el hierro colado es más débil a tracción.

Figura 5. (derecha) Los largueros del ala de un planeador de madera se hacen más gruesas en la cara a tracción que en la cara a compresión porque la madera es débil a compresión.

Una de éstas consiste en que realmente no existe una relación justificable entre las tensiones de rotura a tracción y compresión del material¹. Pueden encontrarse valores bastante aproximados para materiales de uso común en la tabla 5.

Los valores de la tensión de rotura a compresión que se encuentran allí corresponden a los que se obtienen con una probeta que tiene una relación entre largo y ancho más o menos de tres o cuatro por uno. Para ejemplares más gruesos o más delgados las tensiones de rotura pueden ser muy diferentes. Una de las consecuencias obvias que se pueden sacar de la tabla 5 es que cuando tenemos que proyectar algo como una viga que simultáneamente trabaja a compresión y tracción, debemos medir bien nuestros pasos. Puede ser necesario proyectar una viga con una sección altamente asimétrica. En las vigas victorianas de hierro colado, la cabeza a tracción es habitualmente mucho más gruesa que la cabeza a compresión, debido a que el hierro colado es mucho menos resistente a tracción que a compresión (figura 4). Al contrario, el larguero de un aeroplano de madera, como un planeador, es siempre más grueso en la cara superior o cara de compresión, ya que la madera es más débil a compresión que a tracción (figura 5)

Si tanto la rotura a tracción como a compresión parecen producirse debido al cortante —como en los metales dúctiles— las tensiones de rotura a tracción y compresión deberían ser idénticas. Sin embargo, existen tantas excepciones a esta regla que en la práctica queda invalidada.

Material	Tensión de rotura a tracción MN/m ²	Tensión de rotura a compresión MN/m ²
Madera	100	27
Hierro colado	40	340
Aluminio colado	40	270
Aleaciones de zinc	35	270
Baquelita, poliestireno y otros plásticos frágiles	15	55
Hormigón	4	40

Tabla 5. Algunos materiales con tensiones de rotura distintas a tracción que a compresión (los valores son aproximados).

La tensión de rotura a compresión de la madera y de los materiales compuestos

Dijo que llevaba unos cincuenta años haciendo mástiles, y, por lo que sabía, siempre habían estado hechos con palos enteros. Dijo que yo era la única persona que conocía que deliberadamente intentaba destrozar un buen mástil quitándole el corazón de la madera en el punto más delicado. Dijo que un hombre que fuera capaz de hacer algo así (y aquí suavizó mucho su vocabulario), rezaría en voz alta en la iglesia, se limpiaría las narices con el mantel, mediría a brazas una madriguera y se comería las provisiones de un barco.

...y eso fue todo. George y yo pensamos secretamente que el palo era demasiado firme para ser satisfactorio, pero delante de esos expertos decidimos que sería mejor guardarnos nuestras opiniones. Lo que estuvo bien. Ya que los expertos eran muy expertos. Más tarde, cuando nuestros trapos principales tuvieron que soportar un maligno vendaval en la corriente del Golfo, aquel mástil se dobló —y dobló— y dobló, hasta que parecía una S, pero no rompió.

WESTON MARTYR, EL NAVEGANTE DE LOS MARES DEL SUR

En la vida real, tan pronto como empezamos a trabajar con pilares de cualquier longitud, la diferencia entre pilar y viga empieza a volverse algo confusa. Un pilar alargado —como el hueso de la pata de un animal— está prácticamente siempre sometido a alguna flexión, y debido a esto el material del lado cóncavo está más comprimido que en el resto de la pieza. A la inversa, en una

viga o una celosía, en especial las de diseño elaborado, el "nervio de compresión" debe ser considerado como un pilar. En ambos casos, si el material tiende a ser más débil a compresión, llamemos a la estructura "viga" o "pilar", la rotura empezará cuando la tensión de compresión alcance un valor peligroso. Los casos más significativos son los árboles y los mástiles de los veleros tradicionales. Los troncos de árbol tienen que soportar el peso de los distintos elementos y partes que componen el árbol directamente a compresión, pero, en la práctica, las tensiones que producen los esfuerzos a flexión debidos a la presión del viento son prácticamente siempre mayores y más importantes. También, los mástiles son nominalmente pilares que soportan sólo compresión según su eje, pero, debido al tensado del aparejo, y a otras causas, están de hecho sometidos a una buena cantidad de flexiones, especialmente si se rompe alguna parte del aparejo.

Los mástiles de los barcos grandes como el buque *Victory* tuvieron que ser contruidos uniendo varios palos de madera entre sí con abrazaderas metálicas. Sin embargo, cuando se trataba de mástiles de menor tamaño los constructores de mástiles preferían usar un sólo tronco o palo de pino, dejándolo en su primitiva condición tanto como fuera posible. Estos artesanos no sólo se resistieron vigorosamente a cualquier sugerencia sobre como debía hacerse o agujerearse el mástil para conseguir una sección tubular más eficiente: tuvieron mucho cuidado en quitar lo menos posible por debajo de la corteza de la superficie exterior del árbol. En otras palabras, intentaban, tanto como podían, utilizar el árbol en su estado natural.

Durante muchos años, los ingenieros profesionales, que sabían todo sobre la teoría de la flexión, fibras neutras y momentos estáticos, despreciaron todo esto como un sinsentido tradicionalista. De hecho lo primero que hace un ingeniero con un árbol es cortarlo en trozos pequeños, que después vuelven a pegar entre sí, preferentemente con la forma de algún tipo de sección hueca. Sólo recientemente hemos descubierto que, después de todo, los árboles saben algunas cosas que desconocíamos. Entre otras sutilezas, la madera de las distintas partes del tronco crece de tal manera que queda "pretensada".

En una viga, como el larguero del ala de un planeador, donde la carga que produce la flexión máxima actúa siempre en la misma dirección, es posible, aunque no muy eficaz, hacer el cordón de compresión más grueso que el de tracción debido a que la madera es mucho más débil a compresión que a tracción.

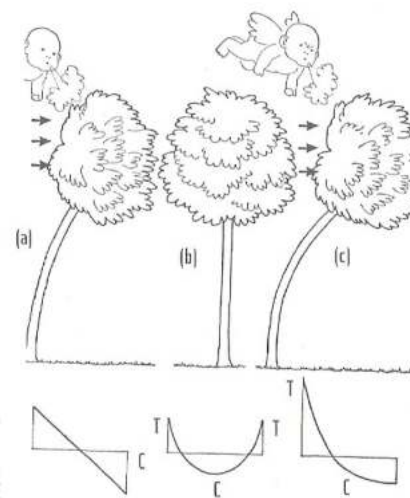


Figura 6. (a) Árbol flexionado por el viento sin pretensado en la madera. La distribución de tensiones en la sección del tronco es lineal y las tensiones máximas de compresión y tracción son iguales entre sí.

(b) Árbol pretensado en calma. Las fibras exteriores del tronco están a tracción, las interiores a compresión.

(c) Árbol pretensado sometido a un fuerte viento. La tensión de compresión máxima se ha reducido a la mitad y el árbol puede flexionar el doble que el árbol de (a).

Los objetos como los árboles o los mástiles, sin embargo, tienen que resistir cargas que actúan en cualquier dirección —de acuerdo con los caprichos del viento— y por lo tanto no es posible utilizar esta solución. Los árboles, en cualquier caso, deben tener una sección simétrica, normalmente circular. En una sección sin pretensar la distribución de las tensiones que produce la flexión es lineal, como en la figura 6a. En tal caso, cuando la tensión máxima de compresión alcance el valor de 27 MN/m^2 la viga, es decir el árbol, empezará a romper.

Aquí es donde aparece el pretensado. De una forma u otra el árbol consigue crecer de manera que la parte exterior de su madera está trabajando a tracción (hasta algo así como 14 MN/m^2), mientras que el centro del árbol, para poder equilibrar la carga vertical, trabaja a compresión. De esta forma, la distribución de las tensiones en una sección del tronco, bajo condiciones normales, se parece a la de la figura 6b. [una de las consecuencias más importantes del comportamiento elástico hookeano es que se puede superponer un estado de tensiones a otro sin error y con seguridad]. De forma que si sumamos la figura 6a, a la 6b, obtenemos la figura 6c.

Con este sistema el árbol prácticamente reduce a la mitad la tensión máxima de compresión ($27 \text{ MN/m}^2 - 14 \text{ MN/m}^2 = 13 \text{ MN/m}^2$) y, por lo tanto, duplica su resistencia real a flexión. Es cierto que el valor de la tensión máxima a tracción ha aumentado, pero justamente lo que le sobra a la madera es resistencia a tracción. El pretensado que hace el árbol para protegerse es exactamente lo opuesto de lo que hacemos cuando estamos proyectando una viga de hormigón pretensado. En este caso el hormigón es débil a tracción y relativamente fuerte a compresión; el peligro que se debe evitar es que, cuando la viga flecta, puede fisurarse el hormigón por su cara de tracción. Para evitarlo colocamos un armado de redondos de acero, dentro de la viga, que tensamos de forma permanente para producir compresiones en el hormigón. De este modo, la viga tiene que flexionar de forma considerable antes de que las tensiones de compresión inducidas al hormigón queden anuladas por las tensiones de tracción producidas por la flexión de la viga. Así se pospone la fisuración del hormigón: la viga debe flexionar mucho más para ello, mucho más que si estuviera simplemente armada³.

Como hemos dicho, la madera y los materiales compuestos de fibras rompen a compresión, en general, mediante la formación de ondas o bandas de fibras dobladas a flexión y a pando. Mi colega el Dr. Richard Chaplin señala que estas ondas de compresión tienen mucho en común con las grietas que aparecen a tracción. Igual que ellas pueden empezar en las concentraciones de tensiones que aparecen en los agujeros y otros defectos del material. En general, las uniones clavadas, como los clavos y los remaches, no debilitan excesivamente la madera, siempre que se

mantengan en su sitio sin huelgos. Una vez retiradas, sin embargo, el agujero resultante puede producir efectos graves; y sin duda ocurre lo mismo con los nudos de la madera. En una estructura de madera muy tensionada, como el larguero de un planeador o el mástil de un yate, es por tanto sabio dejar en paz los remaches y clavos no deseados y no tratar de extraerlos. Si es necesario, se pueden cortar o aplastar contra la superficie de la madera.

Además, como dice Richard Chaplin, la formación de ondas de compresión en un material fibroso exige energía. De hecho la cantidad de energía que se necesita es mayor que el trabajo de fractura del material a tracción. De esto se sigue que la propagación de las ondas de compresión exige energía de deformación suplementaria y que su comportamiento se semeja al de una grieta de Griffith. Existen, sin embargo, algunas diferencias importantes.

Como hemos dicho, en el tipo de material que estamos estudiando, las ondas de compresión aparecen a 45° pero también a 90° de la dirección de la carga (pueden también aparecer según un ángulo entre 45° y 90°). La onda a 45° es en realidad una grieta o cortante, y, si las condiciones son adecuadas, se propagará a través del material, igual que una grieta de Griffith a cortante. Sin embargo, la onda a 90° es más corta —y por tanto consume menos energía— para una profundidad de penetración igual dentro del material.

Por esta razón es más fácil que aparezca la onda a 90° . Sin embargo, aunque sea más fácil que empiece a aparecer, es más fácil que se detenga después de recorrer una pequeña distancia. Esto ocurre porque, a medida que la onda avanza, sus dos lados tienden a unirse (o “volverse sólidos”) y, por lo tanto, dejan de disipar energía de deformación. Así que la rotura deja de ser posible, al menos de forma inmediata.

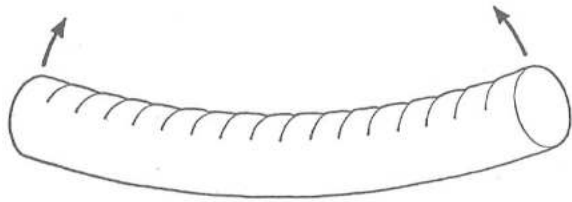
En esas circunstancias, lo que suele ocurrir es que se forman pequeñas ondas, una detrás de la otra, a lo largo de la zona comprimida de la viga. Esto se puede observar en la zona comprimida de un arco de madera, y a veces en los remos (figura 7).

Aunque los ingenieros suelen defender las “eficientes” secciones en doble T o en cajón, en muchos casos esto puede ser una equivocación. Por razones que pueden demostrarse fácilmente

³ Nótese que muchas algas marinas, que están hechas con ácido alguínico —una sustancia débil y frágil— están pretensadas en el mismo sentido que el hormigón armado. De la misma manera que el hormigón pretensado utiliza el acero, las algas marinas utilizan un escaso y fuerte componente, la celulosa.

te⁴, las condiciones para disipar energía son a menudo menos favorables para la propagación de las grietas y las ondas de compresión en una viga cuya sección es redondeada —como un árbol— y ésta es probablemente la causa que se encuentra detrás del hecho de que casi todos los arcos de madera tienen sección redondeada. Sin duda, también es significativo algo parecido con las secciones redondeadas de los huesos de los animales.

Figura 7. Ondas múltiples de compresión en la cara de compresión de una barra redonda de madera como un árbol, un mástil, un remo o un arco. Estas ondas no suelen ser capaces de propagarse, y por lo tanto la pieza no rompe por completo.



Mientras el material está tensionado de forma consistente a compresión, existirán múltiples obstáculos para la propagación de las ondas de compresión. Es ésta una de las razones por la que la madera es un material tan seguro a compresión. Sin embargo, cuando la dirección de la carga se invierte, este proceso se vuelve realmente peligroso. En efecto, las fibras pandeadas que forman las ondas de compresión tienen muy poca o ninguna resistencia a tracción, y por tanto, cuando se las tracciona, la onda se transforma en una grieta. Esto es especialmente peligroso dado que, a tracción, no existe ninguna restricción a la disipación de energía ya que los dos lados de la grieta tienen libertad para separarse.

Una de las mejores formas de conseguir que salte por los aires el ala de un planeador de madera mientras vuela es hacer un aterrizaje brusco. Si uno hace descender el avión con un bote realmente malo, las alas momentáneamente flecharán hacia abajo, hacia la tierra. Esto puede producir ondas de compresión en la madera del larguero principal en la zona que normalmente trabaja a tracción. Si esto ocurre, estas ondas serán muy difíciles de descubrir durante las ins-

⁴ Cuando una grieta o una onda de compresión con frente recto (como un corte de sierra) penetra en una sección circular, el área de su superficie crece más deprisa que el incremento de disipación de energía de deformación del material que se encuentra detrás, y por lo tanto Griffith queda frustrado.

pecciones de rutina. El larguero podrá romper a tracción por esta zona en el siguiente vuelo, después de lo cual, por supuesto, el ala saltará por los aires.

Leonhard Euler y el pandeo de barras y paneles delgados

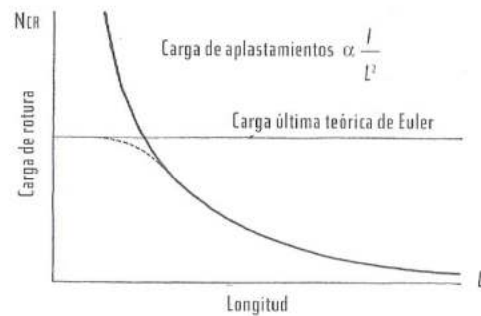
Todo lo que hemos dicho hasta ahora es aplicable a barras y otras piezas a compresión cuando son suficientemente cortas y gruesas. Como hemos visto, rompen habitualmente a compresión mediante el mecanismo del cortante en diagonal, o a veces con la formación de ondas locales en las fibras. Sin embargo, muchos tipos distintos de estructuras a compresión contienen partes que son largas y delgadas y que rompen de una forma totalmente distinta. Un redondo largo, o una membrana como una chapa delgada metálica o una página de este libro, rompen a compresión pandeando, como puede observarse fácilmente realizando el más sencillo experimento (tomar una hoja de papel y tratar de comprimirla en el sentido de su longitud). Esta forma de rotura —que tiene importantes consecuencias técnicas y económicas— se llama “pandeo de Euler”⁵ ya que fue analizado por primera vez por Leonhard Euler (1707-83).

Euler provenía de una familia suiza alemana bien conocida por sus habilidades matemáticas, y pronto adquirió fama como matemático; tanta que, cuando todavía era bastante joven, fue invitado por la emperatriz Isabel a vivir en Rusia. Pasó casi toda su vida en la corte de San Petersburgo, salvo una temporada en que buscó refugio en Postdam con Federico el Grande cuando la situación política en Rusia se volvió excesivamente emocionante. La vida en la corte de los déspotas ilustrados durante la mitad del siglo XVIII debió ser a la vez interesante y llena de color, sin embargo poco de esto se refleja en los voluminosos escritos de Euler. Por lo que he podido encontrar, no existe ningún incidente de algún interés humano que fuera recogido por él o por cualquiera de sus biógrafos⁶. Simplemente se dedicó durante mucho tiempo a hacer análisis matemáticos y a transcribirlos en un enorme número de escritos, los últimos de los cuales todavía continuaban publicándose cuarenta años después de su muerte.

⁵ Pronóciase “Oiler”

⁶ Excepto, por supuesto, la ceguera progresiva al final de su vida.

De hecho, Euler no intentó nunca hacer un estudio sobre soportes. Lo que ocurrió fue que, entre muchos otros descubrimientos matemáticos, había inventado algo llamado "cálculo variacional" y estaba buscando un problema para aplicarlo. Un amigo le sugirió que utilizase este método para calcular la altura que necesita una barra delgada para pandear bajo su propio peso. Era necesario hacer uso del cálculo variacional para resolver este bastante hipotético problema porque, como mencionamos en el capítulo 3, los conceptos de tensión y deformación unitaria no fueron descubiertos hasta muchos años después.



Puesto en términos modernos, Euler obtuvo lo que ahora llamamos "fórmula de Euler de la carga crítica por pandeo de un soporte", que es:

$$N_{cr} = \pi^2 \frac{EI}{L^2} \quad (\text{véase figura 9})$$

donde: N_{cr} = carga para la que el soporte o el panel rompa a pandeo

E = Módulo de Young del material

I = momento de inercia de la sección transversal del pilar o el panel (capítulo 11)

L = longitud del soporte

Naturalmente, todos estos valores deben estar en unidades coincidentes. (Es curioso, aunque conveniente, que tantas de estas fórmulas importantes de estructuras sean tan sencillas algebraicamente).⁷ Se puede aplicar la fórmula de Euler a todo tipo de pilares y soportes delgados y largos —macizos o huecos— y, quizá lo que tiene más importancia, a los paneles, placas y membranas delgadas que aparecen en los aviones, los barcos y los automóviles.

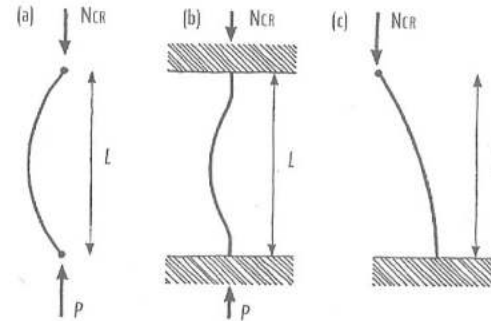


Figura 9. Distintas condiciones de borde de Euler.

a) Los dos extremos articulados:

$$N_{cr} = \pi^2 \frac{EI}{L^2}$$

b) Los dos extremos empotrados:

$$N_{cr} = 4\pi^2 \frac{EI}{L^2}$$

c) Un extremo empotrado, el otro libre de desplazarse hacia un lado y de girar:

$$N_{cr} = \pi^2 \frac{EI}{4L^2}$$

Si colocamos en abscisas la longitud de un soporte o un panel y en ordenadas la carga de rotura obtenemos un diagrama parecido al que aparece en la figura 8, que muestra dos formas de rotura. En un soporte corto, la rotura se deberá al aplastamiento. Cuando aumenta la relación entre la longitud y el espesor de la sección hasta un valor entre cinco y diez, esta línea cruzará la curva que representa la carga crítica de Euler por pandeo. El pandeo se vuelve la forma más fácil de rotura, y por lo tanto los soportes largos pueden romper así. En la práctica, la transición entre rotura por aplastamiento y rotura por pandeo de Euler no es angular y existe una zona de transición, algo parecido a la línea de puntos del diagrama.

La forma que hemos dado de la fórmula de Euler supone que el soporte o el panel está "articulado", o libre para girar, en sus dos extremos (figura 9). Si algo trata de impedir que el soporte o

⁷ Existen varias pruebas modernas de la fórmula de Euler que se pueden encontrar en los libros técnicos. Ver, por ejemplo, Las Propiedades Mecánicas de la Materia de Sir Alan Cottrell.

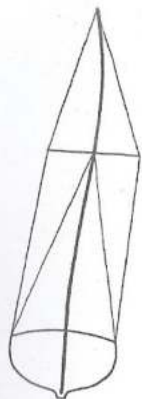


Figura 10. Si un pilar se empotra en sus extremos de forma que se fuerza su geometría fuera de su alineación, su carga crítica puede bajar de valor, ya que el cordaje del aparejo se suele tensar y producir flexiones en el mástil. Por eso ya no se fijan los mástiles a la vez al puente y a la quilla.

el panel gire en sus extremos, la carga crítica crecerá. En el caso extremo, en que los dos bordes están empotrados, la carga crítica de Euler se multiplica por tanto como por 4. Con mucha frecuencia, sin embargo, conseguir restricciones grandes al movimiento de los extremos redundan en peso adicional, complicaciones y costos que no vale la pena sostener. Además las conexiones en los extremos "rígidas" transmiten cualquier error de alineación de sus bordes al soporte. Si esto ocurre, el soporte quedará flectado prematuramente y, en la práctica, debilitado. Por esta razón ya no se utiliza la colocación "rígida" de los mástiles en la que se fijaba el mástil a la vez al puente y a la quilla (figura 10).

Debe hacerse notar que, en la fórmula de Euler que acabamos de escribir, no existe ningún término que describa la tensión de rotura. La carga crítica de un soporte o un panel de longitud dada depende sólo de " I " (o el momento de inercia) de la sección y del módulo de Young, o de la rigidez del material. Además, el hecho de que un soporte pandee no quiere decir necesariamente que "rompa". Sencillamente se deforma elásticamente para quitarse del camino de la carga, hasta que llega a una posición de equilibrio. Si no se supera el "límite elástico" del material durante el proceso de pandeo, entonces el soporte no romperá y además cuando se retire la carga, el soporte simplemente volverá a ponerse recto, recobrando su forma original, bastante descansado después de esa experiencia. Esta característica puede a menudo ser una buena cosa, porque es posible proyectar estructuras "irrompibles" así.

De una forma tosca, es así como funcionan las alfombras y los felpudos. Predeciblemente la naturaleza hace amplio uso de este principio, especialmente en plantas pequeñas como las hierbas que inevitablemente se tienen que pisar. Por eso es posible andar encima del césped sin producirle ningún daño. La ingeniosa combinación de espinas punzantes y del principio del Dr. Euler hace a los setos prácticamente indestructibles e impenetrables para las personas y los animales. Al contrario, los mosquitos y los otros insectos que usan largas y delgadas armas punzantes tienen que emplear una indecible cantidad de ingenio estructural para conseguir que estas finas barras no pandeen cuando nos pican.

Durante la vida de Euler tuvo muy poco uso técnico su fórmula. Prácticamente sólo hubiera sido posible aplicarla al proyecto de mástiles de barco y otros tipos de postes. Sin embargo, los constructores de barcos habían ya resuelto el problema de forma pragmática. Los magníficos libros técnicos del siglo XVIII sobre construcción de barcos, como los *Elementos de construcción de mástiles, velas y jarcias*, contienen tablas completas de las dimensiones de cualquier tipo de aparejo, basado en la experiencia. Es bastante dudoso que el cálculo fuera capaz de mejorar estas recomendaciones.

Sólo se empezó a sentir interés serio en el problema del pandeo un siglo más tarde de la época de Euler, debido principalmente al uso cada vez mayor que se hacía de las planchas de hierro colado. Naturalmente, estas planchas eran mucho más delgadas que la fábrica o la madera que acostumbraban a utilizar los ingenieros de aquella época. El problema se hizo notar seriamente por primera vez en el puente de ferrocarril sobre el Menai, en 1848. El proyecto de este puente era responsabilidad conjunta de tres grandes hombres: Robert Stephenson (1803-1859), Eaton Hodgkinson (1789-1861), matemático y uno de los primeros profesores de la Escuela de Ingenieros, y Sir William Fairbairn (1789-1874), pionero en la utilización para estructuras de planchas de hierro colado.

Los puentes colgantes de ferrocarril de Stephenson habían sido un fracaso porque eran demasiado deformables. Además, el Almirantazgo, no sin razón, insistió en que se dejase una altura de 30 metros libre por debajo del puente para dejar pasar los barcos. La única forma de combinar una rigidez general con la altura libre que se pedía era construir el puente a base de una viga mucho más larga de lo que jamás se había hecho antes. Por distintas razones parecía mejor construir varias vigas de 140 metros de largo, en forma de cajones fabricados con planchas de hierro colado, de forma que los trenes pasaran por su interior.

Bastante pronto se volvió evidente que uno de los peores problemas que presentaba este proyecto era el pandeo de las placas que formaban la cabeza superior, o de compresión, de la viga. Aunque la fórmula de Euler es lo suficientemente exacta para paneles y soportes sencillos, la



Figura 10. Si un pilar se empotra en sus extremos de forma que se fuerza su geometría fuera de su alineación, su carga crítica puede bajar de valor, ya que el cordaje del aparejo se suele tensar y producir flexiones en el mástil. Por eso ya no se fijan los mástiles a la vez al puente y a la quilla.

el panel gire en sus extremos, la carga crítica crecerá. En el caso extremo, en que los dos bordes están empotrados, la carga crítica de Euler se multiplica por tanto como por 4. Con mucha frecuencia, sin embargo, conseguir restricciones grandes al movimiento de los extremos redundará en peso adicional, complicaciones y costos que no vale la pena sostener. Además las conexiones en los extremos "rígidas" transmiten cualquier error de alineación de sus bordes al soporte. Si esto ocurre, el soporte quedará flectado prematuramente y, en la práctica, debilitado. Por esta razón ya no se utiliza la colocación "rígida" de los mástiles en la que se fijaba el mástil a la vez al puente y a la quilla (figura 10).

Debe hacerse notar que, en la fórmula de Euler que acabamos de escribir, no existe ningún término que describa la tensión de rotura. La carga crítica de un soporte o un panel de longitud dada depende sólo de I (o el momento de inercia) de la sección y del módulo de Young, o de la rigidez del material. Además, el hecho de que un soporte pandee no quiere decir necesariamente que "rompa". Sencillamente se deforma elásticamente para quitarse del camino de la carga, hasta que llega a una posición de equilibrio. Si no se supera el "límite elástico" del material durante el proceso de pandeo, entonces el soporte no romperá y además cuando se retire la carga, el soporte simplemente volverá a ponerse recto, recobrando su forma original, bastante descansado después de esa experiencia. Esta característica puede a menudo ser una buena cosa, porque es posible proyectar estructuras "irrompibles" así.

De una forma tosca, es así como funcionan las alfombras y los felpudos. Predeciblemente la naturaleza hace amplio uso de este principio, especialmente en plantas pequeñas como las hierbas que inevitablemente se tienen que pisar. Por eso es posible andar encima del césped sin producirle ningún daño. La ingeniosa combinación de espinas punzantes y del principio del Dr. Euler hace a los setos prácticamente indestructibles e impenetrables para las personas y los animales. Al contrario, los mosquitos y los otros insectos que usan largas y delgadas armas punzantes tienen que emplear una indecente cantidad de ingenio estructural para conseguir que estas finas barras no pandeen cuando nos pican.

Durante la vida de Euler tuvo muy poco uso técnico su fórmula. Prácticamente sólo hubiera sido posible aplicarla al proyecto de mástiles de barco y otros tipos de postes. Sin embargo, los constructores de barcos habían ya resuelto el problema de forma pragmática. Los magníficos libros técnicos del siglo XVIII sobre construcción de barcos, como los *Elementos de construcción de mástiles, velas y jarcias*, contienen tablas completas de las dimensiones de cualquier tipo de aparejo, basado en la experiencia. Es bastante dudoso que el cálculo fuera capaz de mejorar estas recomendaciones.

Sólo se empezó a sentir interés serio en el problema del pandeo un siglo más tarde de la época de Euler, debido principalmente al uso cada vez mayor que se hacía de las planchas de hierro colado. Naturalmente, estas planchas eran mucho más delgadas que la fábrica o la madera que acostumbraban a utilizar los ingenieros de aquella época. El problema se hizo notar seriamente por primera vez en el puente de ferrocarril sobre el Menai, en 1848. El proyecto de este puente era responsabilidad conjunta de tres grandes hombres: Robert Stephenson (1803-1859), Eaton Hodgkinson (1789-1861), matemático y uno de los primeros profesores de la Escuela de Ingenieros, y Sir William Fairbairn (1789-1874), pionero en la utilización para estructuras de planchas de hierro colado.

Los puentes colgantes de ferrocarril de Stephenson habían sido un fracaso porque eran demasiado deformables. Además, el Almirantazgo, no sin razón, insistió en que se dejase una altura de 30 metros libre por debajo del puente para dejar pasar los barcos. La única forma de combinar una rigidez general con la altura libre que se pedía era construir el puente a base de una viga mucho más larga de lo que jamás se había hecho antes. Por distintas razones parecía mejor construir varias vigas de 140 metros de largo, en forma de cajones fabricados con planchas de hierro colado, de forma que los trenes pasaran por su interior.

Bastante pronto se volvió evidente que uno de los peores problemas que presentaba este proyecto era el pandeo de las placas que formaban la cabeza superior, o de compresión, de la viga. Aunque la fórmula de Euler es lo suficientemente exacta para paneles y soportes sencillos, la

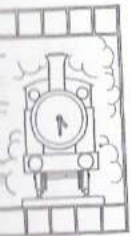


Figura 11. Puente
tannia: viga en cajón

forma de los cajones del puente era necesariamente complicada, y no se encontró en aquel tiempo ninguna forma adecuada de resolver el problema matemático. La única opción posible para los tres autores del puente era ensayar sobre modelos. Como podría esperarse, éstos demostraron ser confusos y de poca confianza, tanto que los tres hombres se pelearon y pareció durante algún tiempo que se rompería la asociación sin haber encontrado ningún diseño seguro para los cajones. Sin embargo, si se consiguieron más tarde poner de acuerdo con un tipo de viga en cajón celular (figura 11). Para el inmenso alivio de todos demostró ser satisfactorio; duró hasta 1970.

A partir de la época de Stephenson, se han llevado a cabo gran cantidad de investigaciones matemáticas sobre el pandeo de láminas delgadas; pero el proyecto de estas estructuras sigue lastrado por incertidumbres aún mayores de lo que suele ser lo normal. Por esta causa, la realización de estructuras muy delgadas de este tipo suele ser costosa, ya que es necesario realizar ensayos sobre modelos a escala para poder definir el proyecto con seguridad.

Tubos, barcos y bambúes y algo sobre el pandeo de Brazier

Como, de acuerdo con Euler, la carga crítica de pandeo de Euler varía con $E I / L^2$, la tensión de compresión segura de un soporte puede llegar a ser realmente pequeña. Lo único que se puede hacer para evitarlo es aumentar $E I$ —si es posible— en la misma proporción que aumenta L^2 . Para casi todos los materiales E , el módulo de elasticidad de Young, es extraordinariamente constante, por lo que lo único que podemos hacer en la práctica es aumentar I , el momento de inercia de la sección. Es decir, que debemos hacer más grueso el soporte. Esto, por supuesto, es exactamente lo que hacemos en los soportes de fábrica, por ejemplo, en las corpulentas columnas dóricas de un templo griego. El resultado, sin embargo, es excesivamente pesado. Si queremos hacer una estructura ligera tendremos que proyectar alguna especie de sección con el área muy separada del eje del soporte. Este toma a veces la forma de una "H", o doble T de ala ancha, y a veces la de un tubo cuadrado. Sin embargo, los tubos redondos son habitualmente mejores y más eficaces.

El uso de tubos está muy extendido entre los ingenieros y en la naturaleza y los pilares de tubo se utilizan con mucha frecuencia para usos muy variados. Sin embargo, un tubo a compresión puede elegir entre *dos* formas de pandear. Puede pandear de la forma que hemos descrito: es decir, formando una larga onda con toda su longitud, al modo de Euler. Además, puede pandear formando una onda pequeña, es decir, localmente, produciendo una especie de onda o arruga en la pared del tubo. Si el radio del tubo es grande y la pared es delgada, puede ocurrir que el tubo sea seguro frente al pandeo de Euler o de onda larga, pero rompa con un quebrantamiento local de su piel. Se puede demostrar esto fácilmente en un tubo de papel de paredes finas. Uno de los modos de este pandeo local o quebradura se conoce por "Pandeo de Brazier" (figura 12). Este efecto limita el uso de tubos o cilindros de paredes delgadas trabajando a compresión.⁸

La forma más habitual de evitar el pandeo de Brazier es rigidizar la envoltura de una estructura de pared delgada adosándole piezas suplementarias, como los nervios y las costillas. Los rigidizadores que van en dirección de las circunferencias se podrían llamar *costillas*, mientras que los que corren en dirección de la longitud se llaman *nervios*. La envoltura laminar del casco de un barco se han rigidizado tradicionalmente con "cuadernas" o costillas transversales, aunque, recientemente, los grandes petroleros se construyen con el sistema "Isherwood", que consiste en gran medida en nervios longitudinales. Una estructura laminar complicada, como el fuselaje de un avión, se suele rigidizar a la vez con costillas y con nervios. Los tallos huecos de las hierbas y los bambúes, que tienden a aplastarse cuando se doblan, están rigidizados muy elegantemente mediante "nudos", particiones o abultamientos, separadas a intervalos a lo largo del tallo (figuras 13 y 14).

Las hojas, los sandwiches y los paneles de las abejas

Placas, paneles y láminas delgadas están continuamente apareciendo en la naturaleza y en la técnica, y, cuanto más grandes y más delgadas sean, más fácil será que flecten o quiebren bajo



Figura 12. Pandeo local o de "Brazier" de un soporte de tubo de pared delgada bajo compresión centrada.

⁸ En un tubo circular de pared delgada el pandeo local aparece generalmente cuando la tensión en la pared alcanza un valor equivalente a:

$$\frac{1}{4} E \frac{b}{r}$$

donde:

b = espesor de la pared

E = módulo de Young

r = radio del tubo

esfuerzos de flexión o compresión. En principio, cualquier cosa que rigidice un soporte o un panel a flexión aumentará su resistencia al pandeo y por lo tanto la hará más resistente a compresión. Se puede conseguir arriostrando el soporte o el panel con cuerdas o con cables; es una solución que nunca usan las plantas. Como alternativa, quizá preferible, se puede rigidizar la pieza por medio de nervios o costillas, plegarlo o bien hacer celular su estructura.

Figura 13. Dos formas de rigidizar el tallo hueco de una planta contra el pandeo local. (a) Nervios longitudinales. (b) Nudos o abultamientos (habituales en las hierbas y los bambúes).

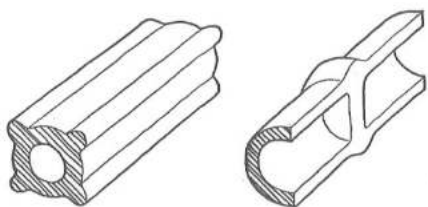
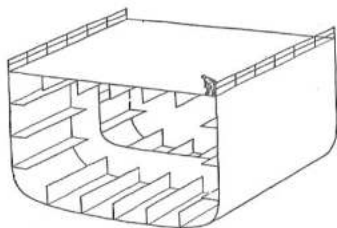


Figura 14. Las estructuras laminares técnicas como los barcos y los aviones en general usan a la vez nervios y costillas o cuadernas. Éste es un esquema del sistema Isherwood de construcción, utilizado a menudo en los petroleros.



La madera es un material celular, como casi todos los tejidos vegetales, en particular las paredes de los tallos de las hierbas y los bambúes. Además, cuando compiten en la lucha por la vida, muchas plantas dependen de forma crítica de la eficacia estructural de sus hojas, porque deben intentar exponer el máximo de superficie a la luz solar con el mínimo coste metabólico. Las hojas son, por tanto, paneles estructurales importantes, y parecen haber hecho uso de casi todos los tipos estructurales conocidos para conseguir incrementar su rigidez a flexión. Casi todas están

provistas de una elaborada estructura de nervios³, las membranas entre los nervios están rigidizadas mediante una construcción celular, y en algunos casos se le añaden plegaduras para aumentar su rigidez. Además de todo esto, todo el conjunto de la hoja está hidrostáticamente rigidizado por la presión osmótica de la savia.

En las estructuras utilizadas en la técnica, se usan muy frecuentemente costillas o nervios para rigidizar paneles y láminas, que están pegadas, roblonadas o soldadas a la chapa, aunque no sea siempre la forma más ligera o más barata de conseguirlo. Otra forma de resolver el problema es formar una lámina con dos hojas separadas entre sí mediante un soporte continuo que queda pegado a esas hojas. Este material mixto estructural se conoce como "panel sandwich".

Los paneles sandwich fueron por primera vez utilizados en la época moderna por Mr. Edward Bishop, el famoso ingeniero jefe de Havilland, para el fuselaje del ahora olvidado avión *Comet* en los años 30¹⁰. Probablemente es más conocido el uso de aquel panel en el sucesor de ese aeroplano, el *Mosquito* de la Segunda Guerra Mundial. En los dos aviones se usó un relleno de ligera madera de balsa para el sandwich, con hojas de contrachapado de madera más pesada y fuertemente pegadas a los dos lados.

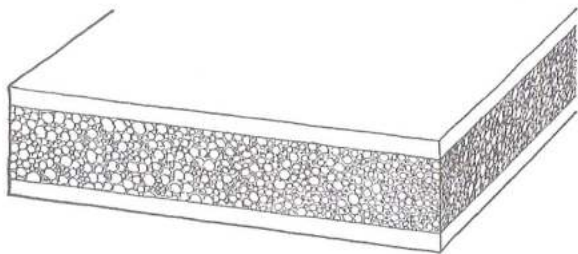
Aunque el *Mosquito* fue un éxito, la madera de balsa puede absorber agua y pudrirse; además, el suministro de esta madera tropical tan blanda y frágil es limitado en cantidad y variable en calidad. Con el paso del tiempo, las investigaciones sobre materiales de relleno para estos paneles recibieron un estímulo por un factor añadido: la instalación del radar en los aviones. Con este equipo el reflector móvil del radar o "escáner" tiene que ser alojado y protegido en una bóveda aerodinámica. Naturalmente, este alojamiento debe ser transparente a las ondas de radio de alta frecuencia y esto exigía, en la práctica, que tenían que fabricarse con algún tipo de plástico. Podía aumentarse la transparencia de la cúpula aerodinámica al radar —al menos en teoría— utilizando un panel sandwich cuyo espesor estuviese cuidadosamente proporcionado a la longitud de onda de la radiación que se quería transmitir, exactamente igual que el grosor del recubrimiento de una lente de cámara moderna está proporcionado con la longitud de onda de la luz visible.

³ Se supone tradicionalmente que los nervios de la hoja del *Victoria Regia* inspiraron a Sir Joseph Paxton el diseño estructural del "Crystal Palace" en 1851.

¹⁰ Que no tiene ninguna relación con el avión de pasajeros a propulsión posterior del mismo nombre.

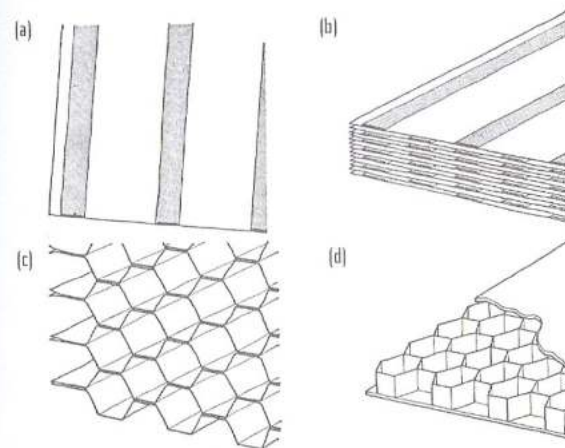
La madera de balsa mojada, como cualquier otra madera mojada, es casi opaca al radar; y en situación de guerra la madera de balsa está prácticamente siempre mojada. Esto excluyó su utilización para el alojamiento del radar y fue necesario conseguir materiales ligeros más estancos. Esto se hizo "expandiendo" varios tipos de resinas sintéticas. El material resultante se parece al merengue o al turrón de chocolate (figura 15). Se obtuvo una gran cantidad de resinas expandidas de ese tipo; tenían muchas virtudes, y fueron utilizadas no sólo para el relleno de los sandwichs de los alojamientos del radar, sino también para toda clase de paneles estructurales. Algunos se siguen utilizando. Se usan, por ejemplo, para hacer barcas porque las paredes de sus cavidades son totalmente impermeables al agua. Sin embargo, las resinas expandidas son más pesadas y más blandas de lo que sería deseable, para rellenar paneles sandwich estructurales de alta resistencia. En otras palabras, el mercado de materiales de relleno ligeros, continuaba abierto a nuevos descubrimientos.

Figura 15. Las resinas expandidas se utilizan frecuentemente como relleno ligero de los paneles sandwich.



Un día, a finales del año 1943, el dueño de un circo que se llamaba George May, me telefoneó para ver si podía recibirle en Farnborough. Después de contarme varias historias, tipo Gerald Durrell, sobre las dificultades que tenía para guardar los monos en un circo ambulante, me enseñó algo que parecía un cruce entre un libro y una concertina. Cuando tiró de los extremos de su invento, todo el

objeto se abrió como los papeles recortados que usamos de adornos de Navidad. De hecho era una especie de panel para abejas muy ligero pero con una bastante sorprendente resistencia y rigidez. ¿Creía que esto tendría algún uso en los aviones? Tenía el inconveniente, como admitió modestamente George May, de que estaba hecho sólo con papel de envolver y cola de pegar ordinaria, no tenía ninguna resistencia a la humedad y se podía caer en pedazos si se mojaba.



Debió de ser ésta una de las relativamente escasas ocasiones en la historia en la que un grupo de ingenieros aeronáuticos está seriamente tentado de arrojar colectivamente sus brazos alrededor del cuello del dueño de un circo y besarlo. Sin embargo, resistimos la tentación y dijimos a May que no había ninguna dificultad seria en impermeabilizar el panel mediante resinas sintéticas.

Y eso fue exactamente lo que hicimos (figura 16).

El papel con el que se iba a hacer el panel, se impregnó antes de usarlo con una solución de resina fenólica. Una vez hecho y extendido el panel, la resina se secaba y se endurecía expo-

Figura 16. Construcción de un panel de papel.

(a) Al papel impregnado de resina se le imprimen tiras paralelas de pegamento.

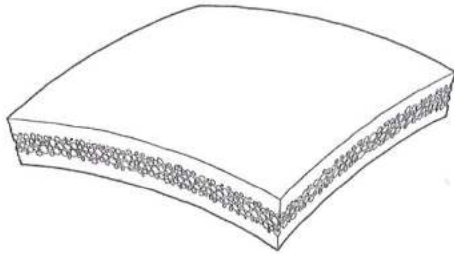
(b) Un conjunto de hojas quedan pegadas entre sí formando un paquete de capas. Las tiras de pegamento alternadas.

(c) Cuando el pegamento fragua, el paquete se comprime, transformándose en un panel. Después de esto se endurece la resina.

(d) Las láminas en papel se pegan entre sí formando un contrachapado, plástico-metal para formar un panel estructural sandwich.

niéndola al calor. El resultado fue que el papel no sólo quedaba impermeabilizado, sino que también aumentaba su resistencia y rigidez. Este material funcionó con mucho éxito y fue usado como relleno de sandwich para todo tipo de propósitos militares. Aunque no se usa mucho en la construcción aeronáutica actual, algo así como la mitad de las puertas de viviendas del mundo están hechas a base de pegar dos hojas delgadas de contrachapado, o plástico, a ambos lados de un panel de papel. Se usa mucho más en otros países, en especial en América, que en Inglaterra, y la producción mundial de panales de papel debe ser bastante considerable.

Figura 17. Hueso esponjoso.



Aunque el uso técnico de paneles sandwich, rellenos de resina y panales es relativamente nuevo, la biología ha hecho uso de esto durante mucho tiempo. Lo que se llama *hueso esponjoso* (figura 17) explota este principio. Cada uno de nosotros lleva una buena cantidad de ejemplares de este hueso en nuestro cráneo, que está, por supuesto, sometido a esfuerzos de flexión y a pandeo.

CUARTA PARTE:

Y la consecuencia fue...

CAPÍTULO 14

La filosofía del proyecto o la forma, el peso y el coste

La filosofía no es sino discreción.

JOHN SALDEN (1584-1654)

Como hemos visto, prácticamente toda la teoría de las estructuras se invierte en analizar el comportamiento de las estructuras específicas: o bien la que se proyecta construir, o una existente cuya seguridad se cuestiona o a la que, en fin, de forma bastante embarazosa, acaba de hundirse. En otras palabras, si conocemos las dimensiones de una estructura dada y las propiedades de los materiales que la componen, podemos al menos predecir su resistencia y su deformabilidad. Sin embargo, aunque los cálculos de este tipo son evidentemente útiles en estos casos particulares, este tipo de planteamiento nos es de poca ayuda cuando intentamos comprender por qué las cosas tienen una determinada forma, o cuando queremos elegir cuál, de los distintos tipos de estructura, será más adecuado para un uso determinado. Por ejemplo, si queremos hacer un avión o un puente, ¿sería mejor utilizar una estructura laminar continua formada por chapas o paneles, o bien un triangulado formado por barras o tubos y arriostrado, quizá, con cables? O bien ¿por qué tenemos tantos músculos y tendones, y relativamente tan pocos huesos? Aún más, ¿cuál de la gran cantidad de materiales disponibles debe elegir un ingeniero? ¿Haremos esta estructura de acero o aluminio, o quizá de plástico o madera?

Las plantas, los animales y los artefactos tradicionales, no han sido realizados por un acto que podíamos llamar "diseño". La forma y los materiales de una estructura que ha ido evolucionando a lo largo de un dilatado período de tiempo están normalmente optimizados respecto al

peso que deben soportar y el coste metabólico, por la lucha por la vida, no por un trabajo en concreto. Nos gustaría conseguir este tipo de optimización con la tecnología moderna; pero no nos sale muy bien.

En general no está reconocido que este tema, que a veces se llama "filosofía del proyecto", se pueda estudiar científicamente.

Es una pena, porque se podrían conseguir resultados importantes, en biología y en la técnica de la construcción. Aunque no ha sido muy reconocido, el estudio de la filosofía del diseño lleva mucho tiempo en marcha. El primer estudio técnico serio sobre el tema fue realizado por A. G. M. Michell alrededor del año 1900¹. Aunque los biólogos han hecho varias observaciones sobre la "ley cuadrado-cubo" (capítulo 9) prácticamente desde que fue propuesta por Galileo, no fue hasta 1917 que Sir D'Arcy Thompson publicó su bella obra *Sobre el Crecimiento y la Forma* (todavía editándose), la primera descripción general de la influencia de las exigencias estructurales en la forma de las plantas y animales. A pesar de sus muchas virtudes, a la obra le falta análisis numérico, y las observaciones técnicas que contiene no siempre tienen solvencia. Aunque ha sido, con justicia, muy elogiado, *El Crecimiento y la Forma* no tuvo mucha influencia en el pensamiento biológico, ni su tiempo ni mucho después. Tampoco parece que haya tenido mucha influencia entre los ingenieros, sin duda porque no era el tiempo para una interacción entre el pensamiento técnico y el biológico.

En tiempos recientes el principal estudioso desde el punto de vista matemático de la filosofía de las estructuras ha sido H. L. Cox. Además de ser un distinguido teórico de la elasticidad, el Sr. Cox tiene el mérito adicional de ser un experto en Beatrix Potter. Espero que me perdone si digo que de alguna forma se parece al gran Thomas Young. Porque tiene con él en común no sólo algo del genio de Young, sino también bastante de su oscuridad en la exposición. Me temo que los simples mortales que se enfrenten con su obra lleguen a la conclusión de que los razonamientos de Cox difícilmente se pueden seguir sin la ayuda de un evangelista o de un intérprete. Esto debe de haber influido en el hecho de que su obra haya recibido menos atención de

¹ Por ejemplo, A.G.M. Michell, *Los límites de la economía de material en redes estructurales*. Phil. Mag. Serie, 6, 8, 589 (1904).

la que merece. Mucho de lo que sigue se basa en Cox, directa o indirectamente. Empecemos con el análisis de las estructuras a tracción.

Diseño de estructuras a tracción

Es una curiosidad del diseño técnico que sea imposible llevar a cabo un elemento a tracción sin añadirle alguna pieza de unión en el extremo para aplicarle la carga: la distribución de tensiones en la pieza extrema de unión será mucho más complicada que la tracción simple, sea cual sea, hierro colado, lianas, cables trenzados o cuerdas, el material que la compone. Queda todavía mucho campo libre para la teoría del diseño de esas piezas de unión, aunque también exista mucha experiencia; y ésta a menudo ha dictado el diseño de estas piezas desde la maestría de los antiguos pigneos para realizar nudos de lianas a los logros de Brunel con sus eficaces uniones en ojal. Todavía los teóricos tienen la última palabra.

H.L. COX. EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PESO MÍNIMO. (PERGAMON, 1965)

Si nouviésemos en cuenta el efecto de la piezas extremas de unión, la filosofía de las estructuras a tracción sería verdaderamente sencilla. En efecto, el peso de una estructura a tracción, que sólo debe soportar una carga dada, sería proporcional a su longitud. Es decir, una cuerda lo suficiente fuerte como para soportar una carga de una tonelada una distancia de cien metros pesa exactamente cien veces el peso de la misma cuerda que soporta el mismo peso una distancia de un metro. Además, suponiendo que se puede subdividir la carga, no habría ninguna diferencia en que la carga fuera soportada por una sola cuerda o barra, o por dos cuerdas o barras cada una de ellas con la mitad de área de sección.

Esta sencilla observación se complica por la necesidad de piezas extremas de unión: es decir, por la necesidad de llevar la carga de un extremo al otro del elemento. Aun una simple cuerda necesita tener un nudo o un lazo en cada extremo. El nudo o el lazo será relativamente pesado y costará dinero. Si se quiere hacer un recuento honrado este peso y este costo debe ser añadido al del elemento de tracción. El peso y el costo de las piezas de extremo será exactamente el mismo, para una carga dada, sea cual sea la longitud de la cuerda. Así, si todo lo demás se man-

tiene constante, el peso y el costo de un elemento traccionado *por unidad de longitud* será menor para un elemento largo que para un elemento corto. En otras palabras, el peso *no* es directamente proporcional a la longitud.

Además se puede demostrar, mediante el álgebra y la geometría de este sistema, que el peso total de las piezas de extremo de *dos* barras a tracción, trabajando en paralelo, es menor que el de las piezas de extremo de *una sola* cuerda o barra de sección transversal equivalente¹. De aquí se sigue que, en general, se ahorra peso subdividiendo la carga entre tres o más elementos a tracción en lugar de soportarla con un solo elemento.

Como señala Cox, la distribución de tensiones en las piezas de extremo es siempre compleja y además puede contener fácilmente concentraciones de tensiones más o menos fuertes, a partir de las cuales se pueden propagar grietas si encuentran la oportunidad. De esta forma, el peso y el costo de esas piezas extremas depende de la habilidad de su diseñador y también de la ductilidad —es decir, del trabajo de fractura— del material. Cuanto mayor sea el trabajo de fractura, más ligera y barata será la pieza extrema de unión. Sin embargo, como vimos en el capítulo 5, la ductilidad tiende a disminuir a medida que la resistencia a tracción aumenta. En el caso de los materiales metálicos comunes, como el acero, el trabajo de fractura baja fuertemente a medida que crece la resistencia a tracción.

De esta forma, al elegir el material de un elemento a tracción debemos afrontar dos exigencias incompatibles entre sí. Para reducir el peso de la parte central de un tirante nos gustaría utilizar un material de alta resistencia. Para las piezas extremas de unión necesitaremos un material dúctil, que exigirá seguramente una resistencia baja. Como muchos otros problemas, éste se resuelve con un compromiso, que en este caso depende fuertemente de la longitud de la barra traccionada. Si éstas son muy largas, como los cables trenzados de un moderno puente colgante, valdrá la pena elegir acero de alta resistencia, aun si debemos soportar peso adicional y complicaciones en la conexión entre las piezas extremas de unión y los anclajes de los cables. Después de todo, sólo existen dos, una a cada extremo del puente, mientras que quizá exista

kilómetro y medio de cable entre ellas. Así, el ahorro de peso en la parte central de la estructura compensa cualquier pérdida en los extremos.

Cuando llegamos al examen de cosas como cadenas con eslabones cortos, la situación se vuelve totalmente diferente. En cada eslabón el peso de las uniones extremas puede ser mayor que el de la parte central y debe ser tenido cuidadosamente en consideración. Éste es el caso de las cadenas de los puentes colgantes más antiguos. Estaban hechas de dúctil hierro colado que tenía una resistencia a tracción muy baja. Como dijimos en el capítulo 10, la tensión de trabajo a tracción de las placas de unión de las cadenas del Puente de Menai de Telford es menor de un décimo de la de los cables de un puente colgante moderno, por esta excelente razón. Se pueden utilizar razonamientos similares con estructuras laminares como los barcos, los tanques, las calderas y las vigas que están compuestas de placas relativamente pequeñas de hierro o acero. También pueden utilizarse para estructuras de aluminio remachadas, como los aviones convencionales. Todas ellas pueden considerarse como cadenas de una o dos dimensiones con eslabones relativamente pequeños. En estos casos *conviene* usar un material más débil pero más dúctil; de otros modo el peso de las uniones sería prohibitivo (véase capítulo 5, figura 13, pág. 118).

Multiplicar cuerdas y cables en los barcos, los biplanos, y las tiendas de lona produce en general un ahorro, en lugar de un aumento de peso². Naturalmente, todo este lío de cables incurre en las penalizaciones que produce la excesiva exposición al viento, los altos costos de mantenimiento y la general complicación de la estructura. Es éste el precio que debemos pagar para conseguir un bajo peso estructural. Un principio similar puede ser observado en los animales, donde la naturaleza no duda en multiplicar los elementos a tracción como músculos y tendones. Realmente adopta los mismos procedimientos que los marinos isabelinos para reducir el peso de los anclajes. Los extremos de muchas jarcias se expandían formando un abanico que al parecer Sir Francis Drake llamaba "pies de tripulación". Cada rama del abanico tenía su pequeña unión por separado. Así el peso (y quizá el coste metabólico) se minimiza.

¹ Pensando algebraicamente, podemos describir el volumen de material que se necesita para soportar una carga P , a lo largo de una longitud L , por medio de n barras paralelas de la forma:

$$Z = \frac{P}{S} \left(1 + \frac{K}{WL \sqrt{n}} \sqrt{\frac{P}{S}} \right)$$

donde:
 Z = volumen total por unidad de longitud de todos los elementos traccionados.
 P = carga total soportada.
 S = tensión segura de trabajo.
 K = coeficiente relacionado con la habilidad del diseñador.
 W = trabajo de fractura del material.
 n = número de elementos a tracción empleados.

La prueba de esta fórmula se puede encontrar en la obra de Cox *El Diseño de estructuras de Peso Mínimo*. He modificado ligeramente la fórmula de Cox.

² Ya que la sección transversal de la barra a tracción es proporcional a la carga, mientras que el volumen de las piezas de extremo crece con la carga elevada a 3/2.

El peso relativo de las estructuras a tracción y a compresión

Como vimos en el capítulo anterior, las tensiones de rotura a tracción y a compresión de un sólido dado son a menudo diferentes, pero en muchos materiales corrientes, como el acero, la diferencia entre ambas no es muy grande, y por lo tanto debería ser semejante el peso de elementos cortos a tracción y a compresión. De hecho, dado que un elemento a compresión no necesita pesadas uniones en los extremos —mientras que un elemento a tracción sí las necesita— una barra corta a compresión debería ser más ligera que una a tracción.

Sin embargo, a medida que el pilar se hace más largo, el Dr. Euler empieza a hacerse notar. Debemos recordar que la carga crítica por pandeo crece con $1/L^2$ (donde L es la longitud) y esto implica que en una barra con sección transversal constante, y por tanto con I constante, la resistencia disminuye rápidamente a medida que crece la longitud. De esta forma, para soportar una carga dada, un pilar largo debe ser mucho más grueso, y por tanto más pesado, que un pilar corto. Como hemos dicho en el apartado anterior, esta consideración *no tiene aplicación* a elementos traccionados.

Es revelador estudiar el problema de soportar una tonelada (1.000 kg o 10.000 newtons) a lo largo de una distancia de 10 metros, primero a tracción y después a compresión.

A tracción. En una barra o un cable de acero podemos permitirnos una tensión de, digamos, 330 MN/m² a tracción. Teniendo en cuenta las piezas de unión de los extremos, el peso total viene a ser unos 3,5 kg.

A compresión. Intentar soportar esa carga a lo largo de esa distancia con una barra maciza de acero sería estúpido, porque para que una barra maciza sea lo suficientemente gruesa para evitar el pandeo se necesita que sea realmente muy pesada. En la práctica, será mejor usar un tubo de acero, que debería tener unos 16 cm de diámetro con un espesor de pared de, digamos, 5 mm.

Este tubo tendría un peso alrededor de 200 kg. En otras palabras, pesará entre cincuenta y sesenta veces el peso de la barra a tracción. El costo puede muy bien estar en la misma proporción. Además, si queremos subdividir en parte una estructura a compresión la situación no se vuelve mejor, sino mucho peor. Si hubiésemos querido soportar la carga de 10 toneladas, no mediante un solo pilar, sino con una especie de ensamblaje en forma de mesa con cuatro pilares, cada uno de 10 metros de largo, el peso total de los pilares sería dos veces mayor: es decir 400 kg. El peso continúa incrementándose a medida que subdividimos en partes la estructura, de hecho como raíz de n , donde n es el número de pilares (véase Apéndice 4).

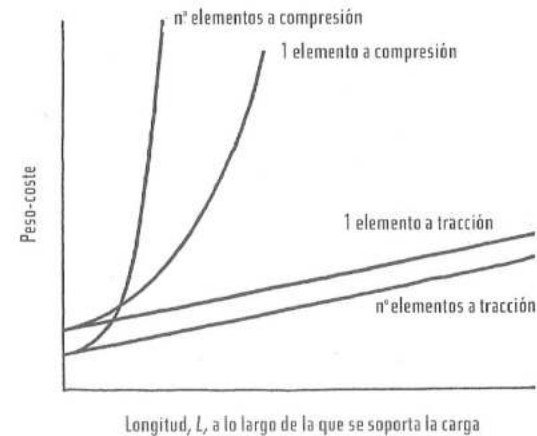


Figura 1. Diagrama que ilustra el peso-coste relativo para soportar una determinada carga a lo largo de una distancia L .

Por otro lado, si aumentamos la carga, manteniendo constante la distancia, el peso de la estructura comprimida baja en comparación con la traccionada. Por ejemplo, si aumentamos la carga cien veces, es decir, de una tonelada a 100 toneladas, entonces, aunque el peso de la barra a tracción ha subido cien veces, de 3,5 kg a 35 kg, el peso del pilar aumenta sólo diez veces, es

decir, de 200 kg a 2.000 kg. Por lo tanto, en compresión, es relativamente más económico soportar una carga pesada que una ligera (figura 1). Todas estas consideraciones son igual de válidas para paneles, láminas, placas y barras (Apéndice 4).

Consideraciones de este tipo permiten comprender la razón de ser de cosas como tiendas de lona y barcos de vela. En estos mecanismos se consigue concentrar los esfuerzos de compresión en un pequeño número de mástiles o postes, intentando que sean lo más cortos posible. Al mismo tiempo, los esfuerzos de tracción, como hemos dicho, se difunden favorablemente entre el máximo de tirantes y membranas posible. Así, una tienda circular, que tenga un solo poste y muchos tirantes, podría ser según esto la "edificación" más ligera posible en proporción a su volumen. Sin embargo, casi cualquier tienda será en general más ligera y barata que un macizo edificio hecho de madera y fábrica. Del mismo modo, un balandro, que tiene un solo mástil, tiene un aparejo más ligero y eficaz que el de una goleta que tiene dos mástiles, o de cualquier otro barco con más mástiles. Es ésta la razón por la que los mástiles en forma de A o de tripode que fueron utilizados por los antiguos egipcios y por los ingenieros de los acorazados victorianos (capítulo 11) eran pesados e ineficaces.

Aún más, el típico animal vertebrado, como el hombre, se parece bastante a una tienda de lona circular o a un barco de vela. Existen pocos elementos a compresión, es decir, huesos, más o menos en el centro, y están rodeados por un amasijo de músculos, tendones y membranas —aún más complicado que las jarcias y las velas del aparejo completo de un barco— que soportan tracciones. O bien, desde el punto de vista estructural, es mejor tener dos piernas que cuatro, y al ciempiés quizá sólo le salva de la ineficacia total el hecho de que sus patas son muy cortas.

Efectos de escala o a vueltas con la "ley cuadrado-cubo"

Se recordará que, hace mucho tiempo, se le ocurrió a Galileo que, mientras el peso de una estructura crece con el cubo de sus dimensiones, el área de la sección transversal crece sólo con el cuadrado, y por lo tanto las tensiones que sufre el material de estructuras con geometría similar

deben crecer en proporción directa a sus dimensiones. De esta forma, una estructura que pueda romper por tracción producida, directa o indirectamente, por su propio peso, adquirirá proporciones cada vez más gruesas y robustas a medida que crece su tamaño. De hecho, sus miembros se volverán desproporcionadamente más gruesos y pesados de lo que simplemente indica la regla, porque existe una especie de efecto de "interés compuesto". De esta forma se puede esperar que el tamaño de las estructuras esté estrictamente limitado.

Esta ley cuadrado-cubo ha sido blandida por biólogos e ingenieros durante mucho tiempo. Herbert Spencer, y más tarde D'Arcy Thompson, decían que limitaba el tamaño de los animales, como los elefantes, y los ingenieros solían explicar que hacía imposible la construcción de barcos o aviones de tamaño apreciablemente mayor de los que existían. Sin embargo, los barcos y los aviones continúan haciéndose más y más grandes.

De hecho la ley cuadrado-cubo parece tener sólo completa aplicación a los dinteles de los templos griegos (que están hechos con piedra débil y a la vez pesada), los icebergs y las placas de hielo (que están hechos de hielo débil a la vez que pesado) y cosas como las gelatinas o los merengues.

Como hemos visto, en muchas estructuras complicadas el peso de los elementos de compresión puede ser muchas veces mayor que el de los de tracción. Como los elementos a compresión pueden romper por pandeo se volverán más eficaces cuanto más grande sea la carga que tienen que soportar, es decir, cuanto más grande sea la estructura. Por esta razón, aunque *existe* un desproporcionado crecimiento del peso a medida que crece el tamaño, la penalización por ello es mucho más pequeña de lo que implica la ley cuadrado-cubo. En la práctica, esta penalización está más que superada por diversas "economías de escala". Por ejemplo, un barco o un pez, un avión o un pájaro, sufren una resistencia a sus movimientos que está prácticamente en relación directa al área de su contorno, y esta área disminuye en proporción al peso a medida que el tamaño aumenta. El conocimiento de este principio impulsó a Brunel a proyectar el *Great Eastern*. La intuición de Brunel era buena, aunque su gran barco fuera un fracaso, y por esta razón ahora

construimos barcos enormes, como los super-petroleros. En cualquier caso, como vimos en el capítulo 5 el tamaño de los animales grandes parece más bien estar limitado por consideraciones relacionadas con "la longitud crítica de grieta de Griffith" de sus huesos que por la ley cuadrado-cubo.

Mallas espaciales contra monocascos

Con bastante frecuencia el ingeniero se encuentra enfrentado a la elección entre estructuras trianguladas, como un mecano, por el ensamblaje de barras a tracción o a compresión —que se llama "malla espacial"—, y una estructura laminar en la que la carga se soporta mediante placas planas o curvas más o menos continuas, que llaman "monocasco". A veces, la distinción entre los dos sistemas constructivos está oscurecida por el hecho de que las "mallas espaciales" están cubiertas por algún tipo de revestimiento continuo que en realidad prácticamente no soporta cargas. Éste es el caso de las cabañas de madera tradicionales, las modernas naves y almacenes de estructura metálica (que están cubiertos en realidad con chapa plegada) y, por supuesto, de los animales que están recubiertos de piel o escamas.

La decisión sobre la forma que debe usarse viene dictada algunas veces por exigencias que no son del todo estructurales. Así, una torre de alta tensión ofrece menos resistencia al viento y tiene menos superficie de acero que pintar cuando tiene la forma de un triángulo espacial de barras. O también puede ser más conveniente hacer un depósito de agua, por ejemplo, con una lámina de hormigón o con gruesas planchas de acero, que con la forma de una bolsa o membrana que contiene agua, soportada por un triangulado metálico, aun cuando esta última solución es más ligera y, de hecho, la que elige normalmente la naturaleza para los estómagos y vejigas.

Algunas veces la diferencia en costo y peso entre estas dos formas constructivas es marginal y no importa demasiado cuál de las dos se vaya a utilizar. En otros casos la diferencia es muy grande. Como hemos visto, una tienda de lona puede ser más ligera y barata que cual-

quier construcción equivalente de fábrica u hormigón. En construcción de coches, la vieja carrocería del Weymann, hacia 1930, que consistía en un armazón de madera recubierta con tela impermeabilizada, era mucho más ligera que cualquiera de las carcasas de acero prensado que se han usado desde entonces. En estos tiempos de petróleo caro la carrocería del Weymann podría ser reciclada.

Existe, sin embargo, la creencia de que las láminas monolíticas son más avanzadas y "modernas" que las mallas espaciales, que están consideradas algunas veces como primitivas o robinsonianas. Aunque a muchos ingenieros les gustaría tener una base más firme para sostener esta opinión, no existe de hecho ninguna justificación estructural objetiva para ello. Cuando se está tratando de soportar cargas primordialmente a compresión, la malla espacial es *siempre* más ligera y habitualmente más barata que el monocasco. Sin embargo, la penalización en peso por usar láminas es menos severa cuando las cargas son altas en relación a las dimensiones, y esto, unido a otras consideraciones, pueden justificar el uso de láminas en algunos casos. Sin embargo, si la estructura es grande y con cargas pequeñas, como los dirigibles "rígidos", la malla espacial o estructura triangulada es la única posible. La alternativa al transporte más ligero que el aire no es un dirigible laminar realizado según los ensueños de un ingeniero con relucientes placas de aluminio, sino una membrana presurizada a "globo".

La transición de las primeras construcciones aeronáuticas de palos, cables y telas a los modernos monocascos, no ha sido dictada por la súbita aparición de una moda, sino que ha sido un paso estrictamente lógico en el diseño de aviones al haber sido alcanzados ciertos valores de cargas y de velocidades. Como hemos dicho, desde el punto de vista de soportar compresiones y flexiones, la lámina es siempre más pesada que la malla espacial; pero el peso adicional que exige aquella se vuelve proporcionalmente más pequeño a medida que crece la carga sobre la estructura. Por otro lado, desde el punto de vista de la resistencia a cortante y torsión, el monocasco es más eficaz que la malla espacial⁴. A medida que crece la velocidad de los aviones, crece la necesidad de resistencia y rigidez a torsión. Hubo pues un punto de transición, que fue alcan-

⁴ Por ejemplo, la sección transversal de un cajón continuo a torsión.

zado en 1930, a partir del cual empezó a valer la pena, en términos de peso estructural, pasar de construir las estructuras de los aviones con mallas espaciales a hacerlo con monocascos. Éste fue en especial el caso de los monoplanos. De esta forma los modernos aviones eran construidos con láminas continuas, usando chapa de aluminio, contrachapado o fibra de vidrio. Podemos observar una vuelta lógica a la construcción de mallas espaciales en los modernos "parapentes", que son extraordinariamente ligeros.

La necesidad de resistir esfuerzos de torsión grandes, está prácticamente confinada a las estructuras artificiales como los barcos y los aviones. Como dijimos en el capítulo 12, la naturaleza casi siempre consigue evitar la torsión y, por lo tanto, al menos en lo que concierne a animales grandes, son poco comunes los exo-esqueletos y los caparazones. Los vertebrados, que son animales que pueden alcanzar mayor tamaño, son en realidad mallas espaciales elaboradas y altamente eficaces, no muy diferentes en cuanto a su filosofía estructural a los biplanos y de los barcos de vela. Es muy notable la capacidad de evitar la necesidad de resistencias a torsión que tienen los pájaros, murciélagos y pterodáctilos. Esto ha permitido a estos animales conservar su ligera estructura espacial cuando vuelan por el aire. *Proyectistas de aviones, por favor tomad nota.*

Estructuras hinchables

A veces es interesante especular sobre los "sís" y "peros" de la historia de la técnica. Si Isambard Kingdom Brunel hubiese influido en los avatares del ferrocarril unos pocos años antes de los que lo hizo, probablemente todas las vías de ferrocarril del mundo tendrían un ancho fijo de 7 pies en lugar de utilizar el ancho de 4 pies y 8 1/2 pulgadas que impuso su rival George Stephenson, imitando el de los carruajes romanos. El ancho de Stephenson ha demostrado ser un problema, como predijo Brunel. Si tuviésemos un ancho de vía mayor, los ferrocarriles estarían en una situación, teórica y económica, mejor de la que están. Si esto hubiese ocurrido, el mundo sería ligeramente diferente*.

* (N. de T.) En España se adoptó un ancho de vía mayor, con las molestias consiguientes de ser el único país que no tenía el ancho de vía de Stephenson.

Por otro lado, si hubiera estado disponible una rueda neumática eficaz hacia 1830, habríamos pasado directamente al transporte por carretera sin pasar por el estado intermedio de los ferrocarriles. En tal caso, el mundo de hoy en día habría sido aún más diferente. De hecho, la rueda neumática fue inventada con 15 años de retraso. Fue patentada por un joven llamado R. W. Thompson, cuando tenía treinta y tres años. La rueda de Thompson era sorprendentemente eficaz desde el punto de vista técnico, pero en aquellos tiempos los ferrocarriles estaban firmemente asentados, con lo que los grupos de presión de los ferrocarriles se aliaron a los de los coches de caballos para promover una legislación absurda y restrictiva, que tuvo el efecto de retrasar la aparición del automóvil hasta el final del siglo XIX.

Al suponer que la bicicleta nunca podía convertirse en una amenaza seria tanto para los trenes como para los coches de caballos, su desarrollo fue legalmente permitido en los tiempos victorianos. J. B. Dunlop revivió con éxito considerable la rueda neumática para ser utilizada en bicicletas en 1888. Dunlop se hizo rico gracias a ello, ya que en aquella época Thompson había muerto y su patente había expirado. Un camión con ruedas macizas no puede superar los 27 km/h, y los coches no podrían ir mucho más deprisa. El invento de Thompson no sólo permitió un transporte rápido y barato por carretera, ha permitido a los aviones poder despegar desde tierra firme. Sin ruedas neumáticas probablemente tendríamos que usar algún tipo de hidroavión.

Los neumáticos, por supuesto, tienen la función de disipar y amortiguar la carga que actúa debajo de las ruedas del vehículo, y lo han conseguido perfectamente. Sin embargo, son realmente sólo un miembro de toda una familia de estructuras hinchables. Además de los efectos de amortiguación, las estructuras hinchables permiten evitar las serias penalizaciones en peso y costo que sufren las estructuras cuando deben transportar una determinada carga a lo largo de una gran distancia trabajando a flexión o a compresión. Estas estructuras trabajan a compresión no a través de un pilar o panel que pueda correr el riesgo del pandeo, sino comprimiendo un fluido, como el aire o el agua. De esta forma, la parte sólida de la estructura sólo

debe soportar esfuerzos de tracción, que, como hemos visto, suponen un precio y un costo mucho menor que los de compresión.

La idea de utilizar estructuras hinchables de forma inteligente en la técnica no es nueva. Alrededor del año 1000 a.C. los barqueros de la parte superior del Tigris y el Éufrates hacían barcas y balsas con pellejos de piel de animales llenos de aire. Estas barcas viajaban aguas abajo transportando no sólo productos para comerciar con las ciudades de los llanos, sino también mulos y burros. Cuando llegaban a su destino, se desinflaban los pellejos y se devolvían a sus puertos de partida, tierra adentro, a lomos de animales. En la actualidad son muy corrientes los botes hinchables así como las tiendas y los muebles hinchables. A menudo se empaquetan y se transportan en un coche.

La cubierta soportada por la presión del aire fue inventada por el gran ingeniero F. W. Lanchester en 1910. Consiste simplemente en una membrana hinchable, con sus bordes fijados al terreno. Se mantiene mediante el aire a baja presión que produce un sencillo ventilador. Aunque hay que entrar y salir por un vestíbulo estanco, esto no resulta en general un inconveniente serio, en comparación con las ventajas que ofrece. La cubierta de Lanchester permite cubrir grandes superficies muy fácil y económicamente, pero su uso está actualmente limitado a invernaderos y pistas cubiertas de tenis; su utilización para fábricas y viviendas está impedida por una normativa de la construcción anticuada.

Por supuesto, no siempre hay que utilizar aire. Los sacos de tierra son en realidad otra forma de hacer lo mismo, y también lo son las almadías "Dracone", que son simplemente largos y aplastados sacos flotantes, llenos de aceite o agua. Se usan en el alto Amazonas para transportar aceite, y vuelven desinfladas (pero no a lomos de burros), de una forma muy parecida a los botes de piel del Éufrates. También se usan para llevar agua fresca a los hoteles de las islas griegas para que los turistas se bañen.

Las estructuras hinchables merecen probablemente ser desarrolladas para usos técnicos más de lo que lo han sido. Sin embargo, los grandes usuarios de este tipo de construcción son las

plantas y animales. Las plantas y los animales funcionan como fábricas químicas y tienen, en consecuencia, una gran cantidad de fluidos complicados y enredados entre sí. Nada puede ser más "natural" y económico, por ejemplo, que hacer un gusano en forma de bolsa alargada rellena, por decirlo de algún modo, con sus tripas.

Evidentemente, esto funciona muy bien, y de hecho parece tan natural y económico que uno se pregunta por qué los animales se molestaron en conseguir esqueletos hechos de frágiles y pesados huesos. ¿No sería mucho más conveniente, por ejemplo, que los hombres estuviesen hechos como los pulpos, las anguilas o las trompas de los elefantes? El profesor Simkiss me dio una explicación para este problema; consiste en que los animales nunca intentaron obtener esqueletos; lo que en realidad ocurrió fue que los huesos primitivos eran simples estercoleros seguros para los átomos metálicos no deseados por el cuerpo. Una vez los animales produjeron sólidos basureros de mineral dentro de sus cuerpos, los utilizaron para afianzar a ellos sus músculos.

Ruedas de radios de alambre

No será un casamiento de postín/No pueda permitirme un carruaje/¡Pero parecerás muy dulce en el sillón/de una bicicleta para dos!

HARRY DACRE. DAISY BELL.

En las ruedas de madera de los carruajes tradicionales, el peso del vehículo es soportado por turno por cada uno de los radios. Un carruaje se parece por tanto a un ciempiés con una gran cantidad de patas de madera que, vistas en conjunto, son pesadas y poco eficaces. Este hecho parece que se hizo evidente por primera vez a un hombre notable y excéntrico, Sir George Cayley (1773-1857). Cayley fue uno de los primeros y más brillantes pioneros de la aviación y estaba interesado en hacer ruedas de aterrizaje mejores y más ligeras para sus aviones. En una época tan temprana como el año 1808 se le ocurrió que se podía ahorrar una gran cantidad de peso si conseguía ruedas en las que los radios trabajaran a tracción en lugar de a compresión. Este razo-

namiento condujo, más adelante, al desarrollo de la moderna rueda de bicicleta, en la que los radios están a tracción y en la que los esfuerzos de compresión los resiste la llanta, que puede ser bastante ligera y delgada, al estar bien arriostrada contra el pandeo.

El conjunto que forman la cubierta neumática y los radios de alambres hace posible ir en bicicleta a mucha gente, con consecuencias sociales considerables, de Daisy Bell en adelante. El ahorro de peso está, sin embargo, casi limitado a ruedas grandes y poco cargadas, como las ruedas de bicicleta. Cuando la rueda se vuelve más pequeña y sufre cargas mayores no existe ninguna ventaja en usar radios a tracción. Las ruedas de acero prensado de los coches modernos son poco más pesadas que las ruedas de radios de alambre, por lo que no compensan las molestias y los gastos que originan.

Elegir un material mejor o ¿qué es en cualquier caso un material “mejor”?

Se supone que la naturaleza sabe lo que hace cuando elige entre todos los tejidos biológicos posibles, pero los hombres, aún los grandes hombres, parecen tener las más extrañas ideas sobre los materiales. De acuerdo con Homero, el arco de Apolo era de plata⁵ —un material cuya capacidad de almacenar energía de deformación es despreciable—. En una época muy posterior nos han contado que las flores del cielo son de oro, o de cristal; sustancias muy poco adecuadas. Los poetas son bastante desesperantes cuando hablan de materiales; pero la mayoría de nosotros tampoco somos mucho mejores. De hecho, ha existido poca gente que haya pensado alguna vez de forma racional sobre el tema.

Más bien parece que los impulsos de la moda y el prestigio han desempeñado un papel más importante en esta materia. El oro no es realmente un buen material para fabricar relojes, ni el acero para muebles de oficina. Los victorianos se empeñaron en hacer toda clase de artículos absurdos, como fundas de paraguas hechos de hierro fundido, y existe una historia sobre un jefe africano que tenía un palacio hecho de la misma sustancia.

⁵ *Neque semper arcum tendit Apollo!* (Ni siquiera Apolo tiene el arco siempre tendido) *Odas II, X, 19*. Quizá Horacio sabía que la plata fluye casi tan peligrosamente como el plomo.

A pesar de que la elección de materiales sea muchas veces irracional y excéntrica, en la mayoría de los casos peca de excesivamente tradicional y conservadora. Por supuesto, hay una sólida razón detrás de la selección de un buen número de materiales tradicionales, pero están tan mezcladas con la sinrazón que es difícil separarlas. Los artistas, desde Lewis Carroll a Dalí, han descubierto que es posible producir un considerable choque psicológico simplemente suponiendo que un objeto familiar pueda estar hecho de un material aparentemente imposible, como la goma, el pan o la mantequilla. Los ingenieros son muy sensibles a estas cosas; en nuestros días quedarían sorprendidos ante la idea de un barco grande de madera. Nuestros antepasados quedarían mucho más sorprendidos ante la idea de uno de hierro.

La aceptabilidad de los distintos materiales varía con el tiempo de forma curiosa e interesante. Las cubiertas de brezo son un caso significativo. El brezo fue primero el material de cubrición más barato y menos valorado, sin embargo en las comarcas más pobres se veían obligados a colocarlo incluso en las cubiertas de las iglesias. Durante el siglo XVIII, cuando estas parroquias se hicieron más ricas, se hicieron suscripciones para sustituir el brezo por pizarra o teja. Algunas veces no había suficiente dinero para toda la obra, y se dejaba el brezo en las zonas de la iglesia que no eran visibles para los visitantes; sólo el lado que se veía desde la carretera principal era cubierto de teja. En nuestros días el prestigio se ha invertido, y en todas las comarcas las cubiertas de brezo son el orgullo y la alegría de la fraternidad más rica del mundo de los negocios.

Materiales, combustible y energía

El siglo XX será conocido en la posteridad como la “edad de acero y el hormigón”. También puede llegar a ser conocido como la “era de la fealdad”, y quizá también con otros nombres desagradables, como la “era del derroche”. No sólo los ingenieros están obsesionados con el acero y el hormigón (y muy indiferentes al aspecto que presentan estos materiales), parece que los políticos y el hombre de la calle sufran la misma infección. Parece ser que la epidemia se originó hace dos-

cientos años con la Revolución Industrial y el carbón a bajo precio —que produjo hierro a bajo precio— que produjo las máquinas de vapor de hierro hechas para convertir el carbón en energía mecánica de bajo precio; y así una y otra vez dando vueltas en ciclos de cada vez mayor intensidad de energía. El carbón y el petróleo almacenan una gran cantidad de energía en pequeño volumen. Las máquinas procesan una gran cantidad de esa energía muy deprisa y dentro de un pequeño espacio. Después expulsan esa energía en forma de electricidad o trabajo mecánico de forma concentrada. En esta concentración de energía descansa toda la tecnología contemporánea. Los materiales de esa tecnología, acero, aluminio y hormigón, a su vez necesitan una gran cantidad de energía para su propia fabricación; el valor de esa cantidad de energía se encuentra recogido en la tabla 6. Como se necesita tanta energía para fabricarlos, estos materiales sólo pueden ser utilizados con provecho en una economía intensiva en energía. No sólo estamos invirtiendo capital monetario en un aparato técnico; también estamos invirtiendo capital energético, y en los dos casos es necesario asegurarle un buen beneficio a esta inversión.

A pesar del alto costo y de la escasez creciente de la energía, la tendencia a intensificar el uso de energía está creciendo más que disminuyendo. La maquinaria avanzada, como las turbinas de gas, consumen más y más energía, más y más enfebrecidas, dentro de un espacio cada vez menor. Los instrumentos avanzados requieren materiales avanzados, y los materiales más nuevos, como las aleaciones de alta temperatura y los plásticos de fibra de carbono, consumen más y más energía en su fabricación.

Muy probablemente este tipo de cosas no puede continuar durante mucho tiempo, porque todo el sistema depende de fuentes de energía baratas y concentradas, como el petróleo. Podemos considerar a la naturaleza como un enorme sistema para extraer energía, no de fuentes concentradas sino difusas, y utilizar esta energía para mantener la enorme economía del planeta. Existen muchos proyectos en marcha para recoger energía de fuentes difusas, como el sol, el viento y el aire. Muchas de ellas probablemente van a fracasar porque la inversión de energía que necesitan, utilizando instrumentos de recolectar energía contruidos con acero u hormigón,

no pueden tener una adecuada rentabilidad económica. Se necesitaría plantear de forma totalmente diferente el concepto de "eficacia". La naturaleza parece enfrentarse a este problema en términos de su "inversión metabólica", y debemos hacer algo parecido.

Material	Energía de fabricación Julios x 10 ⁹ por tonelada	Equivalencia en petróleo Toneladas
Acero (dulce)	4	40
Titanio	800	20
Aluminio	250	6
Cristal	24	0,6
Ladrillo	6	0,15
Hormigón	4,0	0,10
Compuestos de fibra de carbono	4.000	100
Madera	1	0,025
Poetileno	45	1,1

Y es que no sólo los metales y el hormigón necesitan de una gran cantidad de energía *por tonelada* para poderlos fabricar (tabla 6), sino que, en las estructuras poco cargadas que son en general necesarias en los sistemas de baja energía, el peso real de los aparatos realizados con acero u hormigón es posiblemente varias veces mayor de lo que debería tener si se hubiesen hecho de materiales más ingeniosos y más civilizados.

Como veremos enseguida, la madera es uno de los materiales más "eficaces" en sentido estrictamente estructural. Cuando se trata de hacer una estructura de grandes dimensiones y poco peso, una estructura de madera es muchas veces más ligera que una de acero u hormigón. Uno de los problemas que presentaba la madera, en el pasado, ha sido siempre que los árboles tardan mucho en crecer y que la madera tarda mucho en secar y que esto es caro.

Tabla 6. Energía necesaria aproximada para producir diversos materiales.

Nota: Todos estos valores son aproximados y sin duda discutibles; pero creo que están cerca de su orden de magnitud. El valor dado para los compuestos de fibra de carbono debo admitir que es una suposición; pero es una suposición basada en la experiencia de muchos años desarrollando estas fibras.

En los últimos años el desarrollo probablemente más importante que se ha realizado con los materiales se debe a los genetistas especializados en plantas que han cultivado variedades de árboles de crecimiento rápido para producir madera comercial. Así, las variedades del *Pinus radiata* (pino de Monterrey) que se están ahora cultivando pueden, en condiciones favorables, aumentar su diámetro 12 centímetros al año, y están listos para ser talados, como madera utilizable, a los seis años. Por lo tanto, existe una buena posibilidad de convertir la madera en una cosecha que puede ser recogida en un ciclo temporal muy corto. Casi toda la energía que necesita para crecer la da, gratis, el sol. Posiblemente, cuando una estructura de madera deja de ser útil, puede quemarse para recoger toda la energía que acumuló mientras crecía. Esto, por supuesto, no es de ninguna manera cierto cuando hablamos de acero u hormigón.

Volviendo a la madera, necesita pasar una gran cantidad de costoso tiempo en una planta de secado, que utiliza una gran cantidad de energía. Investigaciones recientes han conseguido que sea posible secar piezas de longitud razonable de madera blanda en veinticuatro horas, a muy bajo costo. En la actualidad se han realizado importantes avances estructurales y energéticos, y debemos tenerlos en cuenta.

Algunos análisis algebraicos de la eficacia estructural en varios casos y en términos de peso, de materiales diferentes, pueden encontrarse en el Apéndice 4. El diseño de una serie de estructuras de alta tecnología, como los aviones, está controlado en gran parte por el criterio E/ρ : es decir, el "módulo específico de Young" del que depende el costo en términos de peso de limitar las deformaciones globales. Ocurre que, en la mayoría de los materiales estructurales tradicionales, el molibdeno, el acero, el titanio, el aluminio, el magnesio y la madera, el valor de E/ρ se mantiene sensiblemente constante. Por esta razón, durante los últimos quince o veinte años, los gobiernos han gastado grandes sumas en desarrollar nuevos materiales basados en fibras exóticas como el boro, el carbono o el carbonato de silicio.

Este tipo de fibras pueden ser o no útiles en la técnica aeroespacial; en cualquier caso, parece claro que no sólo son caras sino que necesitan una gran cantidad de energía para su fabricación.

Por esta razón parece bastante limitado su uso futuro y, desde mi propio punto de vista, no parece que puedan transformarse en los "materiales del pueblo" de un futuro visible.

Material	Módulo de Young E MN/m ²	Densidad específica ρ gramos/cm ³	$\frac{E}{\rho}$	$\sqrt[3]{\frac{E}{\rho}}$	$\sqrt[4]{\frac{E}{\rho}}$
Acero	210.000	7,8	27.000	59	7,7
Titanio	120.000	4,5	27.000	77	11,0
Aluminio	73.000	2,8	26.000	99	15,0
Magnesio	42.000	1,7	25.000	120	20,5
Vidrio	73.000	2,4	30.000	114	17,5
Ladrillo	21.000	3,0	7.000	48	9,0
Hormigón	15.000	2,5	6.000	49	10,0
Compuesto de fibra de carbono	200.000	2,0	100.000	225	29,0
Madera (limpia)	14.000	0,5	28.000	240	48,0

Tabla 7. La eficacia de varios materiales estructurales de distintos usos.

La exigencia de un costoso y estricto control de las deformaciones globales parece estar bastante limitada: sin embargo, como hemos visto, el costo en peso —y a menudo el costo en dinero— de soportar esfuerzos de compresión es con frecuencia muy elevado. El costo en peso de soportar una carga a compresión depende, no de E/ρ sino de $\sqrt[3]{E/\rho}$. El costo en peso de un panel, de $\sqrt[4]{E/\rho}$ (Apéndice 4). Estos valores están resumidos en la tabla 7.

Puede observarse que existe un gran incentivo para la densidad baja; por ello, el acero queda en muy mal lugar, aun comparado con el ladrillo y el hormigón. Además, la madera es aún más adecuada que los materiales de fibra de carbono para muchos usos de peso ligero —como dirigibles— sin contar con que es mucho más barata.

En la tabla 8 se expresan estas virtudes en términos de coste de energía.

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

Material	Energía necesaria para asegurar una determinada rigidez al conjunto de la estructura	Energía necesaria para producir un panel de una tensión de rotura a compresión determinada
Acero	1,0	1,0
Titania	13,0	9,0
Aluminio	4,0	2,0
Ladrillo	0,4	0,1
Hormigón	0,3	0,05
Madera	0,02	0,002
Compuesto de fibra de carbono	17,0	17,0

Para estos valores se ha tomado el acero dulce como unidad. Son únicamente muy aproximados. Aquí la ventaja de los materiales tradicionales —madera, ladrillo y hormigón— es descolante. Esta tabla nos hace preguntarnos si la consecución de materiales basados en fibras exóticas está realmente justificada. Lo que realmente es rentable para muchos de los usos comunes de la vida no son las fibras de carbono, sino los huecos. La naturaleza se dio cuenta hace mucho tiempo de esto cuando inventó la madera: y lo mismo se puede decir de los romanos cuando empezaron a construir iglesias rellenas de ánforas vacías. Los huecos son enormemente más económicos, en dinero y energía, que cualquier material concebible de alta rigidez. Probablemente sería mejor dedicar más tiempo y dinero a desarrollar materiales celulares o porosos y menos al boro y a las fibras de carbono.

CAPÍTULO 15

Un capítulo sobre accidentes. Un estudio del pecado, el error y la fatiga de los metales

*Has oído hablar de la maravillosa silla cutre? Que fue hecha de forma tan lógica? Aguantó cien años hasta que un día/
De repente, se...*

OLIVER WENDELL HOLMES. LA SILLA CUTRE

Se puede contemplar adecuadamente todo el mundo físico como un gran sistema energético: un enorme mercado donde un tipo de energía está continuamente siendo intercambiado por otro de acuerdo a reglas y valores fijos. Lo que en términos de energía implique un ahorro acabará ocurriendo más pronto o más tarde. En este sentido, una estructura es algo que está aplazando un proceso que es favorable para la energía.

Es ventajoso, energéticamente hablando, que una carga caiga sobre la tierra, porque así se disipa la energía de deformación, y así sucesivamente. Más pronto o más tarde la carga *debe* caer al suelo y la energía de deformación *debe* ser disipada; la función de la estructura es aplazar estos acontecimientos durante una estación, una vida o cien años. Al final, todas las estructuras se romperán o se destruirán. El papel de la medicina o la ingeniería es posponer este acontecimiento un intervalo de tiempo decente.

Nos podemos preguntar: ¿qué puede considerarse como un intervalo "decente"? Todas las estructuras se deben construir para ser "seguras" durante lo que puede considerarse razonablemente como una vida útil apropiada. En el caso de un cohete, aquella puede ser pocos minutos, para un coche o un avión, diez o veinte años, para una catedral quizá cien años. La "silla cutre" de Oliver Wendell Holmes fue construida para durar cien años —ni más ni menos— y se disgregó exactamente como estaba planeado, el 1 de noviembre de 1855, exactamente cuando el vicario

había terminado de componer la quinta parte de su sermón. Claro que, por supuesto, esto no tiene sentido. De la misma forma, el egregio y sin embargo heroico Mr. Honey de *Sin carreteras* de Nevil Shute predice que la cola del avión de pasajeros de Reindeer romperá debido a la "fatiga de los materiales" exactamente cuando haya cumplido 1.440 horas de vuelo, con un error de más o menos un día. De nuevo esto carece de sentido, como debería saber Nevil Shute, ya que era un proyectista de aviones experimentado.

En la práctica es imposible planificar que una vida "segura" tenga exactamente tantas horas o tantos años. Podemos sólo plantearnos el problema en términos estadísticos y a la luz de una acumulación de registros y de experiencias. Construimos entonces con un margen de seguridad que parece razonable. Siempre basándonos en probabilidades y estimaciones. Si hacemos una estructura excesivamente débil ahorraremos peso y dinero, pero se volverá excesivamente grande la probabilidad de que rompa demasiado pronto. Al contrario, si hacemos una estructura tan resistente que, en términos humanos, parezca que va a durar "para siempre" —que es lo que le gustaría al público— probablemente será excesivamente pesada y costosa. Como veremos, existen muchos casos donde la inseguridad está producida por un incremento de peso que no está equilibrado por un aumento de resistencia. Dado que necesariamente tenemos que trabajar basándonos en las estadísticas, cuando proyectamos una estructura real para una vida útil determinada tenemos que aceptar que siempre va a existir un riesgo acotado, aunque pequeño, de una rotura prematura.

Como señala Sir Alfred Pugsley en su obra *La Seguridad de las Estructuras*¹, precisamente en esa interesante etapa debemos abandonar el planteamiento estrictamente lógico del problema. Como dice Pugsley, los sentimientos humanos son excepcionalmente proclives a temer la rotura de las estructuras, y el profano se aferra con extraordinaria tenacidad a la convicción de que cualquier estructura o instrumento con la que esté personalmente asociado debe ser "irrompible". Ocurre esto en toda clase de situaciones; algunas veces no es dañino, a veces el efecto es contraproducente. Durante la última guerra mundial los proyectistas de

aviones tenían la opción, hasta cierto punto, de rebajar la seguridad estructural del avión a cambio de aumentar otras cualidades del aparato. En efecto, las pérdidas de bombarderos por acciones del enemigo eran muy altas, algo así como uno de cada veinte en cada salida². En cambio, las pérdidas debidas a roturas estructurales eran muy pequeñas, mucho menos de un avión cada cien mil. Dado que la estructura del avión suponía un tercio de su peso, hubiera sido perfectamente racional haber adelgazado la estructura de los bombarderos para así conseguir otras ventajas.

Si se hubiese hecho esto habría habido un ligero aumento de la tasa de accidentes estructurales, pero el peso ahorrado se podía haber invertido en cañones más eficaces o en una coraza de protección más gruesa. En tal caso habría habido una significativa reducción en la tasa neta, o global, de bajas. Pero los aviadores no querían saber nada de esto. Preferían el alto riesgo de ser derribados por el enemigo, al riesgo menor de que el avión rompiera en el aire por razones estructurales.

Pugsley sugiere que este concepto de que es de alguna manera ultrajante que una estructura se rompa, la hemos heredado de nuestros antepasados arborícolas, que estaban aterrorizados, por encima de todas las cosas, con que el árbol en el que vivían se rompiera debajo de ellos, cayéndose los niños, las cunas y todo lo demás. Y además, nuestros antepasados y sus hijos caerían dentro de la boca de los enemigos que les esperaban en tierra, como el tigre de dientes de sable o cualquier otro ser semejante. Sea todo esto la verdadera razón o no, los ingenieros deben tener en cuenta estos sentimientos, aunque el peso propio adicional que exija produzca en sí otros peligros.

La exactitud del cálculo de las estructuras

En cualquier planteamiento racional del problema de la resistencia y la seguridad está implícito que el ingeniero debe ser capaz de predecir con la suficiente exactitud, la resistencia de la estruc-

² Cada "turno" para un aviador del Mando de Bombarderos consistía en treinta salidas o misiones de vuelo. Este servicio era por lo tanto extremadamente peligroso. La pérdida en vidas del Mando de Bombarderos era comparable a la de las tripulaciones de los submarinos alemanos, que era notoriamente alta.

tura propuesta una vez acabada, aunque no se esté seguro de cuánto tiempo va a durar. Aunque este es aproximadamente el caso cuando se trata de estructuras sencillas como las cuerdas o las cadenas y pilares y vigas elementales, como vimos en el capítulo 4, no lo es de ninguna manera cuando se trata de artefactos elaborados y audaces como los aviones y los barcos.

Dado que tenemos a nuestra disposición una gran cantidad de experiencia acumulada sobre distintos tipos de estructuras, y existe una amplia literatura altamente matemática sobre el tema, y puesto que los teóricos académicos de la elasticidad, para su orgullo, dan lecciones interminables sobre la teoría de las estructuras, esa afirmación podría parecer una tomadura de pelo. Sin embargo es cierta.

Examinemos, por ejemplo, las estadísticas de las resistencias de los aviones. Ya que el ahorro en peso es importante y como las consecuencias de una rotura pueden ser horribles, se proyecta la estructura de los aviones con gran cuidado y reflexionando mucho, y cada detalle se comprueba meticulosamente. Los dibujos y los cálculos están realizados por ingenieros, calculistas y delineantes de gran pericia, utilizando los métodos más científicos. Cuando esta gente entrega sus cálculos, éstos son comprobados, independientemente, por un equipo de expertos totalmente diferente. Por lo tanto, las predicciones de resistencia a las que finalmente se llega son tan exactas y tan cuidadosamente obtenidas como es humanamente posible. Finalmente, para estar totalmente seguros, se ensaya un avión real hasta su rotura total.

No es posible dar resultados reales puestos al día de la seguridad de los aviones, porque se han elaborado en los tiempos recientes tan pocos tipos de aviones que sus valores no son estadísticamente significativos. Sin embargo, cuando los aviones eran más sencillos y más baratos, un número relativamente grande de diseños distintos, llegaron a la etapa de prototipo. Entre 1935 y 1955 se construyeron y ensayaron hasta su rotura algo así como cien tipos distintos de aviones en Inglaterra. Sin embargo, se decía que cada equipo de proyectos intentaba conseguir la resistencia que se conoce en la jerga de la aeronáutica comercial como de "un 120 por ciento de la carga mayorada"¹.

¹ El 20 por ciento adicional fue exigido por las autoridades aeronáuticas para tener en cuenta las variaciones en material y en los procedimientos de montaje.

Si el proyectar estructuras fuese algo parecido a una profesión exacta se podría esperar que los resultados de los ensayos, cuando se representan gráficamente mediante una curva llamada de "distribución de frecuencias", se debían aproximar mucho al valor del 120 por ciento del valor de la carga mayorada, poco más o menos. En otras palabras los resultados deberían producir una distribución "normal" en forma de campana alargada, como la de la figura 1.

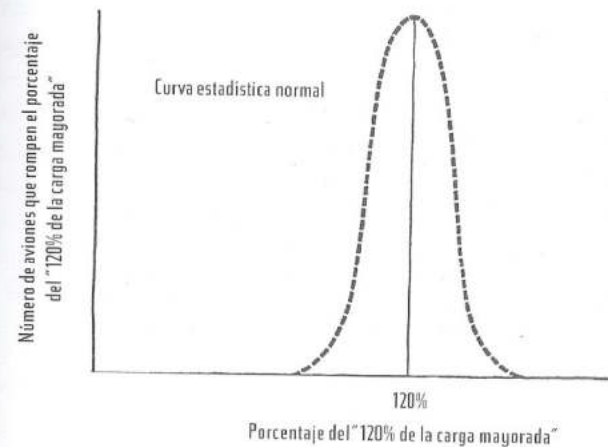
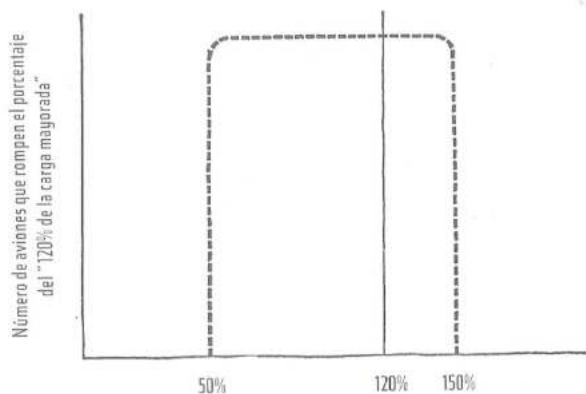


Figura 1. Distribución estadística que se debería esperar de las resistencias a rotura de los aviones.

Como es bastante bien conocido, no ocurrió nada de esto. Cuando los resultados se representaron gráficamente la curva asemeja más bien a la de la figura 2. Las resistencias a rotura en los laboratorios tienden a distribuirse aleatoriamente entre el 50 y el 150 por ciento de la carga exigida o la carga mayorada. Es decir, no se puede confiar ni siquiera en los más eminentes proyectistas para que puedan predecir la resistencia a rotura de un aeroplano en un rango de tres a uno. Algunos de estos aviones tenían menos de la mitad de la resistencia a

rotura exigida; otros eran excesivamente fuertes y por consiguiente mucho más pesados de lo necesario.

Cuando pasamos a los barcos, nos encontramos con que no existen registros en los que puedan basarse este tipo de juicios, sencillamente por la razón de que los barcos no se ensayan nunca en laboratorio hasta su rotura. Por tanto, es imposible saber lo bien o lo mal que los ingenieros navales hacen su trabajo por lo menos en lo que se refiere a predecir su resistencia. Sin embargo, como dijimos en el capítulo 5, el número de accidentes debidos a las estructuras en los barcos es considerable, y parece muy posible que el número de accidentes por tonelada y milla esté aumentando en la actualidad.



En lo que se refiere a los puentes, el problema de calcular resistencias es más sencillo que el de los barcos y los aviones, ya que las condiciones de carga no son tan variables. En cualquier caso, los puentes modernos se hunden en una cantidad bastante significativa.

Figura 2. Distribución real de las resistencias a rotura de los aviones ensayados de 1935-1955 (diagrama esquemático muy aproximado).

Proyectar experimentalmente

Ahora, hablando de hacer sillas, les contaré que / Siempre existe en alguna parte un punto más débil / En el eje, la badana, la llanta, o el muelle, o la vara / En el panel, o el codal, o el suelo, o el dintel / En el cabestrante, el cerrojo, el tirante, todavía escondido / Encontradlo en alguna parte, debéis y podéis.

OLIVER WENDELL HOLMES, LA SILLA CUTRE.

La fiabilidad del proceso teórico del proyecto es, por supuesto, la razón de la insistencia en los ensayos experimentales para todos los aviones. Sin embargo, los beneficios de un método experimental llegan más lejos. Hemos asumido que el objetivo del proyectista de estructuras es que la estructura rompa, en el primer ensayo, exactamente con la carga que se exige. Pero será muy difícil que aun la estructura más científicamente proyectada tenga la misma resistencia en todas y cada una de sus elementos, como la silla legendaria, en la que:

*Las ruedas eran tan fuertes como lo ejes
Y el suelo era tan fuerte como los dinteles
Y las paredes eran tan fuertes como los suelos...*

Y así sucesivamente a lo largo de muchos componentes y muchas estrofas.

La estructura rompe durante los ensayos por el punto más débil, el resto de la estructura tiene por tanto más resistencia. Si el entramado de un avión rompe en el primer ensayo con la carga del 120 por ciento que se ha calculado, podemos deducir que la mayor parte de la estructura es demasiado resistente para el propósito que se ha construido, y que esta resistencia adicional está totalmente desperdiciada. Sin embargo, no disponemos de ningún criterio para saber dónde y cómo debemos aligerar la estructura. Multiplicar ensayos en estructuras grandes es costoso y consume tiempo pero, si el tiempo y el dinero lo permiten, es mejor conseguir, si es posible, que la primera rotura ocurra con un valor de la carga confortablemente por debajo del 120 por ciento.

El punto débil que hemos encontrado puede reforzarse y el resto de la estructura vuelto a ensayar, y así sucesivamente.

El bombardero *Mosquito* de la 2ª Guerra Mundial, que fue uno de los aviones que dio mejor resultado de la historia, rompió inicialmente con el 88 por ciento de la carga mayorada por el larguero posterior del ala. A partir de entonces fue progresivamente reforzado hasta que alcanzó un valor del 118 por ciento de la carga de rotura. El comportamiento sobresaliente de este avión se debió, en parte, a su entramado estructural extraordinariamente ligero y resistente.

Éste es, hablando de forma aproximada, el método darwiniano, en el que la naturaleza parece confiar para desarrollar sus propias estructuras, aunque parece que tiene menos prisa y que le preocupa menos el valor de la vida que a la mayoría de los civilizados ingenieros humanos. Es también, en notable proporción, el método empleado por los fabricantes de coches y otros bienes de consumo de masas baratos. Esta gente tiende a fabricar sus productos deliberadamente poco fuertes para su objetivo y confiar en las quejas de los consumidores para detectar los defectos significativos.

Por tanto, una gran parte del cálculo de la resistencia durante el proyecto, se reduce a una especie de juego en el cual intentamos encontrar el eslabón más débil de todo el sistema que debe soportar las cargas. Cuanto más complicada sea la estructura, se volverá más difícil y menos fiable. Afortunadamente, al proyecto de muchas estructuras, desde los muebles a los edificios y a los aeroplanos, le salva del ridículo el hecho de que las exigencias de rigidez son más rigurosas que las de resistencia. De esta forma, si se hace una estructura suficientemente rígida para su uso, será suficientemente resistente en la mayoría de los casos. Dado que las deformaciones de una estructura dependen de su configuración general más que de la existencia del "eslabón más débil", predecir deformaciones es más fácil, y más fiable, que predecir resistencias. Esto es realmente lo que queremos decir cuando hablamos de proyectar algo "a ojo".

¿Cuánto durará?

También dijo Facilités/Una ciudadela pequeña hecha en la roca/Es mejor, si está bien ordenada/Que toda vuestra frenética Ninive

FACILIDES

Cuando estudiaba la resistencia y la estabilidad de las catedrales de fábrica, el profesor Jacques Heyman estableció el principio de que "si una estructura se mantiene en pie cinco minutos, lo hará durante quinientos años". Esto es cierto, en general, para estructuras construidas sobre roca. Sin embargo, muchas catedrales y muchos otros edificios han sido cimentados en suelo blando. Si el suelo blando fluye —lo que ocurre muy a menudo— pueden ocurrir cosas curiosas, como la inclinación de la Torre de Pisa. Estos movimientos toman tiempo y pueden predecirse a menudo, pero es muy caro corregirlos, con lo que cierto número de edificios, antiguos y modernos, se hunden o tienen que ser demolidos por esta razón.

En la mayoría de los tipos estructurales, la oxidación o la putrefacción pueden ser agentes muy activos de ruina. El miedo a la podredumbre ha vuelto a los arquitectos e ingenieros ingleses hostiles a la madera. Sin embargo, los ignorantes y pobres extranjeros de América, Canadá, Escandinavia y Suiza, que construyen alrededor de 1.500.000 de casas de madera por año, no parecen preocupados en la misma medida por la podredumbre, y sería una buena idea estudiar su forma de trabajar estas cosas. El uso de la madera está incrementándose mucho en esos países.

La resistencia a las enfermedades es muy variable según el tipo de madera; las normas de la aseguradora Lloyd dan un número fijo de años de vida a cada una de las distintas maderas que se utilizan para construir barcos. Sin embargo, gracias a los conocimientos modernos y a los métodos de tratamiento, sería posible conseguir una vida prácticamente indefinida para casi todos los tipos de madera.

La mayoría de los metales se corroen en servicio. El acero dulce moderno se oxida mucho más que el hierro colado o fundido victoriano, y, por lo tanto, la oxidación es un problema moderno.

Como el costo de la mano de obra es alto, el costo de pintura y mantenimiento de una estructura metálica es alto. Ésta es una buena razón para utilizar el hormigón armado, ya que el acero embebido en el hormigón no se oxida, si el hormigón no se fisura demasiado. De hecho, los grandes barcos modernos, como los petroleros, están contruidos para una vida útil de alrededor de quince años; en general es más barato tirarlos que pintarlos. La vida de los coches es aún más corta, normalmente por la misma razón. Es cierto que se podría usar acero inoxidable en algunas estructuras, pero este material no está de ninguna manera a prueba de corrosiones, y además el acero inoxidable es caro y difícil de fabricar. Encima, las "características de fatiga" de los aceros inoxidables son normalmente malas.

Existen algunas razones para utilizar aleaciones de aluminio; sin embargo, aparte de un costo adicional, hay muchos casos en los que la rigidez del aluminio no es la adecuada. Algunos países del Este ven un gran futuro en el aluminio y han invertido mucho en plantas para fabricarlo. La Bolsa de Londres estuvo extraordinariamente interesada por la fusión entre "Tube Investments" y la "British Aluminium" en 1961. Sin embargo, el mercado del aluminio ha aumentado bastante menos de lo que esperaban los hombres de negocios involucrados en esta operación. En cualquier caso, se necesita más energía para hacer aluminio que para hacer acero.

Aun cuando no se deteriorara el material de la estructura, su vida está sometida a agresiones estadísticas que a veces son calculables y otras no. Muchas estructuras parece que sólo pueden romper en circunstancias excepcionales, y puede pasar mucho tiempo antes de que surjan estas circunstancias. A éstas corresponden las olas caprichosamente altas para los barcos, y los golpes de viento ascendente excepcionalmente fuertes para los aviones. Algunas estructuras sólo pueden romper por una combinación poco usual de acciones. En un puente podría tratarse de la combinación de una presión de viento muy fuerte con cargas de tráfico excepcionalmente altas. Aunque estos acontecimientos es posible que ocurran, pueden pasar muchos años antes de que sean posibles. Así, una estructura esencialmente poco segura puede durar mucho tiempo, sencillamente porque nunca ha sufrido una prueba seria.

Los ingenieros responsables tratan, por supuesto, de predecir este tipo de cosas y de evitarlas con la estructura, pero en muchos casos estos valores excepcionales de cargas entran dentro de lo que las compañías de seguros llaman "Actos de Dios"⁴. Si un barco choca con un gran puente, destruyéndose a la vez el barco y el puente, como ocurrió recientemente en Tasmania, es muy difícil entrever qué podían haber hecho desde el punto de vista estructural para corregirlo tanto el ingeniero naval como el ingeniero de caminos que proyectó el puente. El problema no concierne a los ingenieros sino a la asociación local de pilotos. Más aún, un avión no puede ser proyectado para que pueda chocar contra una montaña. Proyectamos, hasta cierto punto, coches que puedan chocar contra un muro de ladrillos sin que se maten los pasajeros, pero no esperamos que el coche siga en uso después del accidente.

La fatiga de los materiales, Mr. Honey y todo lo demás

Una de las causas más insidiosas de la pérdida de resistencia en los metales es la "fatiga", es decir, el efecto acumulativo de cargas oscilantes. Los terribles efectos que pueden producir la fatiga de los metales fueron explotados por primera vez en la literatura popular por Kipling en 1895 cuando relató que la hélice del *Grotkau* se hundió en algún lugar del mar Cantábrico debido a una grieta producida por la fatiga del eje⁵. Kipling se pasó de moda, sin embargo el interés del público por la fatiga revivió en 1948 debido a *Sin Carreteras* de Nevil Shute. El éxito de este relato, como libro y como película, se debía sin duda en parte al carácter de Mr. Honey, el típico sabiondo, pero quizá mucho más a los tres desastres del *Comet*, que ocurrieron no mucho tiempo después. Como dijo Whistler hace algún tiempo, la Naturaleza supera al Arte. Las circunstancias de los accidentes del *Comet* no eran muy distintas de aquellas imaginadas en *Sin Carreteras*, excepto en que se perdieron muchas más vidas y que produjo gran daño a la industria aeronáutica británica.

De hecho, el descubrimiento por los ingenieros de los efectos de la fatiga se remonta a cien años atrás. En realidad, muy poco después del inicio de la Revolución Industrial se empezaron a

⁴ Un Acto de Dios ha sido definido por A.P. Herbert como "aquello que no puede esperar un hombre razonable".

⁵ *Críado sobre las aguas* (publicado en *Los Trabajos del Día*).

dar cuenta de que las partes móviles de la maquinaria podían a veces romper bajo cargas y tensiones que serían perfectamente seguras en estado estacionario. Esto era especialmente peligroso en los convoyes del ferrocarril, cuyos ejes podían romperse bruscamente y sin razón aparente después de mantenerse en servicio cierto tiempo. Este efecto fue pronto conocido como "fatiga"; las investigaciones clásicas sobre el tema fueron llevadas a cabo a la mitad del siglo XIX por un oficial de los ferrocarriles alemanes llamado Wöhler (1819-1914). En la fotografía Herr Wöhler tiene exactamente el aspecto que puede esperarse de un oficial alemán de los ferrocarriles del siglo XIX; sin embargo hizo un trabajo muy útil.

Como dijimos en el capítulo 5, aun cuando la tensión en el extremo de una entalladura o una grieta pueda ser muy alta, la grieta no se propagará —mientras sea más corta que la "longitud crítica de Griffith"— porque continuar propagándose exige la aportación de un trabajo que venza "el trabajo de fractura" del material. Sin embargo, si la tensión del material es oscilante, se producen pequeñas modificaciones en la estructura cristalina del metal, sobre todo en la zona donde aparecen las concentraciones de tensiones. Estas modificaciones reducen el trabajo de fractura del metal y por tanto permiten que la grieta se propague, muy despacio, aunque sea mucho más corta que la "longitud crítica".

De esta forma, una grieta pequeña e invisible puede aparecer en cualquier agujero, o entalladura o irregularidad de un metal tensionado y propagarse a través del material, que, en conjunto, no aparenta modificación alguna. Más pronto o más tarde, esta "grieta por fatiga" llegará a la longitud crítica de una grieta normal. Cuando esto ocurra, la grieta tomará velocidad y atravesará el material, a menudo con consecuencias serias. Normalmente es bastante fácil diagnosticar después de la rotura una grieta por fatiga debido a su característica apariencia rallada o en bandas. Antes de la rotura, sin embargo, puede ser imposible detectar una rotura incipiente por fatiga.

Naturalmente los metalúrgicos y demás especialistas hacen un gran número de ensayos de fatiga de sus materiales, y existe ahora una gran cantidad de máquinas diferentes para ensayar este fenómeno. Habitualmente se define la magnitud de la fatiga de un metal con una tensión

alternante (S), es decir, el tipo de tensiones que aparecería en un voladizo giratorio, como el eje de un vehículo (existen métodos para transformar estos resultados en los de otras condiciones de tensión oscilante). Esta tensión alternante (S) se dibuja normalmente en ordenadas y, en abscisas, el logaritmo del número (n) de veces que se ha tenido que producir tensión en la probeta para conseguir su rotura. El resultado es el "diagrama S - n ".

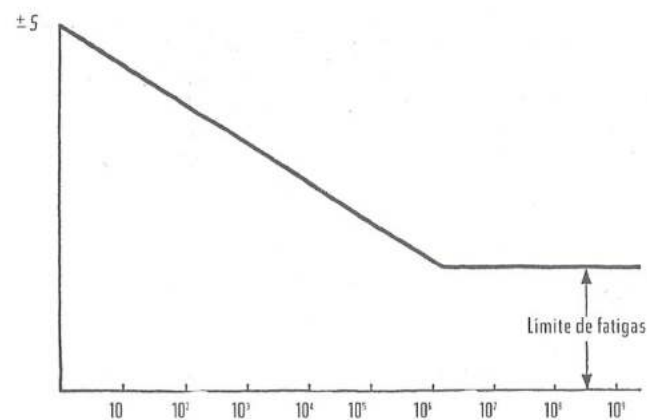


Figura 3. Curva de fatiga típica del hierro o el acero.

El diagrama S - n para un acero típico puede ser semejante al de la figura 3. Puede observarse que la curva resultante tiene forma de un embudo que se adelgaza después de un millón de alternancias de carga, que puede equivaler a alrededor de 5.000 kilómetros en servicio para el eje de un coche o un tren, o a unas diez horas de funcionamiento para un motor de coche ordinario, ya que por supuesto gira mucho más deprisa que las ruedas. La existencia de un "límite de fatiga" definido de esta forma en materiales como el hierro o el acero es muy cómoda para los ingenie-

ros. Si su motor o su vehículo funciona durante 10^6 o 10^7 revoluciones, —que puede ocupar unas pocas horas— existe una gran probabilidad de que continúe funcionando indefinidamente. Sin embargo, la fatiga es un peligro que siempre debe ser tenido en cuenta.

Las aleaciones de aluminio no tienen un límite de fatiga definido, el diagrama de este material tiende a ahusarse, de forma parecida a la figura 4. Esto hace que su utilización sea más peligrosa y justifica algunos prejuicios aparentemente pasados de moda a favor de la utilización del acero en maquinaria y en otras estructuras.

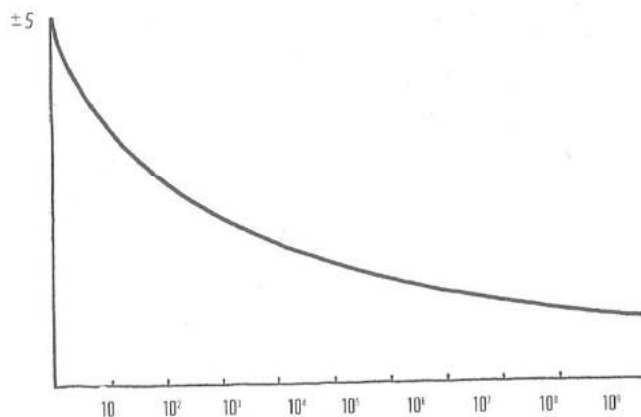


Figura 4. Las aleaciones no férreas como el bronce y el aluminio no muestran frecuentemente un límite de fatiga definido.

Los accidentes del *Comet* que ocurrieron entre 1953 y 1954, produjeron naturalmente consternación y alarma muy justificadas. La investigación llevada a cabo por Sir Arnold Hall y su gran equipo de expertos está considerada como una hazaña clásica, no sólo de la capacidad de investigación de los ingenieros, sino del rescate en las profundidades del mar. Los restos rotos de uno de los aviones, que había caído en el Mediterráneo, tuvieron que ser sacados de hasta profundi-

dades de más de 100 metros. Los equipos de rescate consiguieron recuperar casi todo el aeroplano, sus innumerables fragmentos llegaron a cubrir el suelo de un gran hangar en Farnborough. Tal y como lo recuerdo, ninguna pieza medía más de 1 metro de largo.

El *Comet* fue uno de los primeros aviones de pasajeros con fuselaje presurizado. El propósito de hacer esto en un avión es librar a los pasajeros de la incomodidad y el peligro que producen los cambios de la presión atmosférica cuando se varía la altura del vuelo. En los viejos tiempos, sobre las Montañas Rocosas, se solía comer con la máscara de oxígeno puesta: esto ha quedado ahora como una de las habilidades perdidas. En un avión presurizado el fuselaje se convierte, en efecto, en un depósito cilíndrico a presión, no muy distinto de una caldera muy delgada, que aumenta y disminuye su presión a la vez que el avión sube o baja.

El error fatal en el diseño del *Comet* fue el no darse cuenta suficientemente del peligro de "fatiga" que corrian los puntos con concentración de tensiones del fuselaje del avión en estas circunstancias. El *Comet* estaba hecho con aleaciones de aluminio, cuando toda la experiencia previa de Havilland estaba basada en la construcción de aviones de madera, como su gran triunfo, el *Mosquito*. No estoy de ninguna manera sugiriendo que el muy capaz equipo de Havilland no supiera mucho sobre fatiga; pero es posible que nunca estuviese enraizado en la conciencia colectiva del equipo el gran peligro de fatiga que corren las aleaciones de aluminio. La madera es mucho menos susceptible a este peligro que los metales, lo que es una de sus grandes ventajas.

Las grietas parecían haber empezado en cada uno de estos accidentes a partir del mismo pequeño agujero del fuselaje y parecía haberse propagado, despacio y sin que pudiera ser detectada, hasta que alcanzaba la "longitud crítica de Griffith". A partir de entonces la envolvente se rasgó catastróficamente, y el fuselaje explotó como un globo hinchado. Sir Arnold Hall fue capaz de reproducir este efecto, como si dijéramos, a cámara lenta, presurizando repetidamente un fuselaje de *Comet* en un gran depósito de agua en Farnborough.

Parte del problema de los accidentes del *Comet* era que las grietas por fatiga que debieron existir nunca fueron detectadas por un inspector, quizá porque no esperaban encontrarlas, pero

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

más probablemente porque debían ser demasiado cortas para ser observadas con facilidad. En nuestros días los fuselajes de los aviones están calculados para poder soportar con seguridad grietas de hasta algo así como sesenta centímetros de largo, con lo que se puede esperar que una grieta tan larga será difícil que no pueda ser detectada a tiempo. Existe, sin embargo, una historia sobre dos mujeres de la limpieza del aeropuerto de Londres. Estas señoras terminaron de barrer las cabinas de un avión vacío tarde, por la noche. Cerraron la puerta y bajaron por las escaleras hasta la pista.

“Te has olvidado de apagar la luz de los aseos, Mary.”

“¿Por qué lo sabes?”

“¿No ves la luz que atraviesa las grietas del fuselaje?”

Accidentes de barcos de madera

Antes de la época de los ferrocarriles casi todo el tráfico pesado iba por agua. Además del comercio por altamar, del comercio de altura y del que se hacía tierra adentro a través de ríos y canales, existía un comercio costero aún mayor. Muchos miles de pequeñas goletas y de pequeños bergantines de madera, del tipo que caricaturizó W. W. Jacobs, transportaban cualquier cosa y de todo, no sólo a las pequeñas ensenadas y puertos de la costa sino prácticamente a cualquier playa posible. Se podía dejar varado el barco en la playa con marea alta y, cuando bajaba la marea, se le podía descargar su carbón, ladrillo, cal o muebles en carretas que llegaban a la orilla. Cuando subía de nuevo la marea, se le podía empujar de nuevo al mar, alejarse y volver a hacer lo mismo en otra parte.

Naturalmente, éste era un trabajo arriesgado, sin embargo, durante el siglo XVIII podían permitirse que casi todos los barcos pequeños pudieran ser puestos a seco y reparados durante lo peor del invierno —mientras las tripulaciones visitaban a sus familias y las tabernas locales—. Este estado de cosas escasamente idílico pero no excepcionalmente peligroso fue superado por

UN CAPÍTULO SOBRE ACCIDENTES

la situación de competencia que apareció en el siglo XIX. Bajo la presión del comercio los barcos tenían que navegar durante todo el invierno y no podían permitirse, como norma, esperar el buen tiempo. Realmente la regularidad de algunos de estos pequeños veleros podría avergonzar a muchos trenes de mercancías modernos.

Pero, evidentemente, esto tenía un precio. Durante la primera mitad de los años 30 del siglo pasado, hubo una media de 567 naufragios en la costa de Inglaterra al año; como resultado se perdieron una media de 894 vidas al año. Que estas cifras sean mejores o peores, por tonelada y kilómetro recorrido, que las que producen los camiones modernos, es algo que ignoro. En cualquier caso, esto conmovió a la conciencia pública de la época, por lo que el Parlamento nombró un selecto Comité para investigar las “causas de naufragio”. Después de escuchar gran número de testimonios, el Comité informó que, aparte de causas menores, los naufragios en Inglaterra podían ser atribuidos a los siguientes defectos en los barcos:

1. Construcción defectuosa.
2. Equipo poco adecuado.
3. Reparaciones imperfectas.

Proclamaron que “la construcción defectuosa de los barcos parece haber sido grandemente estimulado por el sistema de clasificación (es decir, las normas que regían la construcción y reparación de los barcos asegurados) que, del año 1784 hasta el año 1834, ha seguido la aseguradora Lloyds”.

El Comité añadió que el sistema de medir el tonelaje de los barcos que seguía el gobierno estimulaba formas de casco muy poco marineras. La mentalidad burocrática parece no cambiar mucho a lo largo de los siglos.

Para ser sinceros, el problema de definir normas que requieren la resistencia y seguridad de los barcos, o de cualquier otro tipo de estructura, es extraordinariamente difícil. Sin duda

se han hecho una cierta cantidad de progresos en la materia desde la década de 1830. Al mismo tiempo, y en sentido opuesto, se ha impedido bastante progreso técnico, especialmente por las normas de edificación. Como señala Pugsley en *La Seguridad de las Estructuras*, es esencialmente imposible hacer normas sobre la resistencia de las estructuras que estén a prueba de locos e ignaros sin impedir, o como poco lastrar, el desarrollo y la innovación. Las normas sobre seguridad de estructuras son presumiblemente necesarias. Sin embargo, algunas de ellas no sólo son absurdas, sino que pueden convertirse en causa real de accidentes.

Volviendo a los barcos de madera: no sólo los clipers, las pequeñas goletas, bergantines y fragatas —que eran tan bellos y tan satisfactorios— han desaparecido completamente y los astilleros que los solían construir están ahora dedicados a los yates. El problema estructural del casco de un yate de madera es a la vez algo más y algo menos grave que el de los navíos grandes. Los cascos de los yates no se encallan en playas pedregosas llevando cargas de piedra o carbón, sin embargo, sufren el problema más difícil de los impactos locales que sus finas envolventes no son capaces de resistir.

Ahora que se han puesto de moda los largos viajes en pequeños yates se ha vuelto importante el problema de la resistencia al impacto del casco. Muchos yates que viajaban por altamar han sido repetidamente atacados y hundidos por orcas. Estos animales pesan seis toneladas y pueden nadar a una velocidad de alrededor de treinta nudos. Parecen tener un odio especial a los yates pequeños, a los que golpean y agujerean debajo de la línea de flotación. Esto ha ocurrido tan a menudo que esta posibilidad no puede seguir siendo clasificada como un “acto de Dios” (presumiblemente Poseidón) sino como un peligro serio que se debe prever.

Probablemente, debe ser imposible hacer los flancos de los yates pequeños lo suficientemente gruesos como para resistir ese ataque. Lo mejor que se podría hacer sería equiparles con un flotador hinchable para que el barco se pueda mantener a flote —y preferiblemente pueda continuar navegando a vela— una vez haya sido perforado. Hasta ahora, los que han sobrevivido

a estos ataques lo han conseguido con el bote salvavidas hinchable, que naturalmente, les ha hecho pasar una temporada muy desagradable hasta que han sido rescatados por un crucero después de muchos días o muchas semanas.

Más sobre calderas y depósitos de presión y algo sobre freír aceite en ellas

Durante un número considerable de años antes de que se completara el sistema ferroviario, gran parte del tráfico de pasajeros y mercancías era llevado a cabo por los barcos de vapor. Durante la primera mitad del siglo XIX, no sólo había muchos más vapores recorriendo más puertos europeos de los que hay ahora, sino que existían muchos más servicios entre ciudades de Gran Bretaña. El viaje más barato con diferencia —y a menudo el más rápido y más confortable— desde Londres a sitios como Newcastle, Edimburgo o Aberdeen era en barco de vapor.

Los accidentes en los vapores eran más escasos que en los veleros sólo porque aquéllos eran inferiores en número. Sin embargo, entre 1817 y 1839, hubo noventa y dos accidentes graves en vapores navegando por aguas británicas. De éstos, veintitrés fueron debidos a explosiones de calderas. No es tan mala cifra como la de los vapores de río americanos de pocos años después; pero es suficientemente mala.

Algunas de las primeras calderas estaban hechas de material inadecuado, como el hierro fundido. Por lo menos una caldera de fundición, la del buque *Norwich*, reventó directamente y mató a varias personas. Aun cuando estuviesen adecuadamente hechas con hierro colado, normalmente estaban muy mal cuidadas y se permitía que se oxidaran hasta que reventaban. Ésta fue la causa de la pérdida del *Forfarshire* en las islas Farne en 1839. Gracias a la soberbia hazaña marina de Grace Darling, cinco personas fueron rescatadas⁶.

De nuevo fue nombrado un Comité Parlamentario, que informó en 1839 y produjo un extenso, meditado, objetivo y casi increíble documento. Durante los años punta de la expansión de la

⁶ Murió de tuberculosis a los veintisiete años. Lo que hizo en realidad fue más inteligente y mucho más marino de lo que se puede deducir de los relatos populares y los cuadros.

máquina de vapor, era prácticamente imposible encontrar alguna oficina de ingeniería sobria, competente sin ayudas externas, responsable o inteligente, ni siquiera en los niveles muy altos de la profesión. Esta gente trataba a sus máquinas y sus calderas con un nivel de ignorancia y descuido que casi no se puede creer. Por ejemplo:

En un vapor, durante el viaje entre Irlanda y Escocia, advirtió un comandante durante la noche, y con mar calma, que iba a mucha más velocidad de lo normal por el agua. El jefe de máquinas no estaba en su puesto; el Capitán preguntó al fogonero por qué las máquinas iban tan deprisa: el hombre dijo: "Que no lo entendía, porque tenía muy poco vapor y que sin embargo había estado manteniendo mucho fuego". El Capitán empezó a inspeccionar por los alrededores y, al acercarse a la chimenea donde estaban situadas las válvulas de seguridad al descubierto, encontró a un pasajero completamente dormido con la mayor parte del peso de su cuerpo descansando en los contrapesos planos, con forma de queso, de la válvula de seguridad. Este hombre había decidido, con algún equipaje, dormir allí para encontrar calor. Cuando lo levantó y lo quitó de allí, la válvula se levantó, y el vapor escapó con un rugido que denotaba que se había llegado a una presión elevada.

No había ningún instrumento de medida para informar de la presión del vapor al fogonero que estaba acostumbrado a mantenerla tan cerca como podía de la presión necesaria para que explotara: como no había oído escapar el vapor, aumentó la potencia del fuego, creyendo que el vapor estaba bajo; y era demasiado ignorante para darse cuenta de este hecho, aunque el aumento en velocidad de las máquinas debería haberle indicado que pasaba algo fuera de lo normal

Varios de nuestros corresponsales han mencionado que los maquinistas, fogoneros y aun los jefes de máquinas han sido sorprendidos frecuentemente "sentándose", o aun "estando en pie", encima de las válvulas de seguridad, o colgando pesos y descansando con sus cuerpos en sus brazos de palanca para conseguir subir la presión del vapor en el momento de empezar a funcionar la máquina.

El informe continúa diciendo que también se tiene la costumbre de colocar el carbón sobrante encima de la válvula de seguridad. El vapor *Hercules* voló por esta causa. Después de todo, es bastante notable que sólo se perdieran setenta y seis vidas por explosiones de caldera de los vapores británicos durante el período investigado.

El registro de accidentes en los ferrocarriles era tan malo como el de los barcos de vapor y debido a muchas de las mismas causas. Existe una sucesión de accidentes muy serios extendiéndose a lo largo de un período de setenta u ochenta años. Los últimos de éstos ocurrieron alrededor de 1909. La caldera de una locomotora voló aunque el medidor de presión parecía mostrar presión nula. Resultó que un operario había colocado la válvula de seguridad al revés, de forma que era absolutamente imposible que saltara. El medidor parecía no mostrar ninguna presión porque la aguja había dado toda la vuelta, y se encontraba al otro lado del punto que marcaba cero. Murieron tres personas y otras tres quedaron gravemente heridas.

En estos últimos años ha bajado enormemente el número de explosiones de calderas. Esto se debe en parte a que la manufactura y el mantenimiento de las calderas de vapor está ahora estrechamente controlado por ley y por las compañías de seguros, pero quizá más a que el número de máquinas de vapor que actualmente están en servicio es bastante pequeño y las que existen están en fábricas grandes, como centrales eléctricas, que posiblemente están mantenidas por personas competentes.

Sin embargo ¿cuándo una caldera deja de ser una caldera? Esto es una pregunta legal muy interesante. Existe en la industria una gran cantidad de depósitos a presión de un tipo u otro que son utilizados en el proceso de la manufactura. Muchos de estos depósitos tienen un diseño más complicado y menos convencional que las calderas tradicionales y deberían ser evidentemente menos peligrosos. En general, el control sobre su uso y manufactura es menos estricto que en las calderas normales. Sin embargo, muchos de estos depósitos se calientan con vapor o con aceite caliente a baja presión, de forma que las consecuencias de una fractura pueden ser casi igual de malas. Sería bueno tener en la cabeza que el límite de fatiga del metal soldado en las estructuras

de acero dulce expuestas al vapor mojado puede llegar tan bajo como $\pm 14 \text{ MN/m}^2$ o $\pm 140 \text{ kg/cm}^2$.

En un caso en el que tomé parte, dos grandes tambores rotatorios, que se usaban para fabricar papel plastificado, habían pasado de ser calentados con aceite a baja presión a serlo con vapor, usando vapor a una presión más alta. Para curarse en salud, el inspector de la Compañía aseguradora insistió que los tambores fueran "reforzados" internamente uniendo las placas extremas planas con la superficie del cilindro mediante una serie de cartabones, o refuerzos triangulados, hechos con acero dulce y soldados *in situ*.

Los dos tambores explotaron en servicio después de utilizarlos durante poco tiempo con la presión del vapor. A partir de los dibujos calculé que, en los dos tambores, existían cuarenta y ocho localizaciones donde podía haberse producido la rotura. De hecho, era una estimación pesimista; la rotura ocurrió sólo en cuarenta y siete puntos. Debido a la Bondad Divina, nadie murió ni quedó seriamente herido: todo el asunto se debió a una estupidez del inspector de la compañía, que supongo, era un hombrecillo diligente y bien intencionado.

Otro caso fue más trágico. Una empresa de contratistas de ingeniería química había comprado en alguna parte un depósito para mezclas que fue instalado en una planta que estaban construyendo para un usuario. Como este depósito debía ser calentado con aceite bajo presión, la doble pared de la cámara donde debía introducirse el aceite a presión fue sometida a una "prueba de carga" con agua fría. Fue sometida a una presión de $0,45 \text{ MN/m}^2$ sin daños visibles antes de ser instalada. Sin embargo, cuando la planta fue entregada y la cámara fue llenada con aceite muy caliente a sólo unos $0,15 \text{ MN/m}^2$, la cámara reventó después de unas pocas horas de servicio, empapando a un hombre con aceite a 280° , a causa de lo cual murió pocos días después.

De acuerdo con el informe del inspector oficial, el accidente había ocurrido a consecuencia de una mala manipulación de la maquinaria por mis clientes, la firma de ingenieros químicos. A resultas de esto, esta gente se vio envuelta en un litigio muy complicado y caro en el Tribunal Supremo.

De hecho el informe oficial del accidente estaba basado en observaciones erróneas sobre los restos rotos e inducía bastante a confusión. El depósito había reventado, no por haber sido mal manipulado por mis clientes, sino debido a su incompetente diseño y su mala manufactura. Aunque la causa técnica del accidente era, en realidad, de una naturaleza ligeramente sutil, mis clientes y los que fabricaron el depósito habían supuesto que el diseño de este objeto era un problema trivial. De hecho, el depósito no fue nunca realmente "diseñado" en cualquier sentido refinado del término, fue sencillamente montado "a ojo" en un taller de soldadura en un callejón.

En realidad lo que ocurrió fue que durante la "prueba de carga" las soldaduras vitales que mantenía la cámara presurizada sujeta se distorsionaron considerablemente, aunque nadie se dio cuenta de ello entonces. Estas soldaduras estaban tan cerca de la rotura que unas pocas alterancias de carga, como resultado de bajar la presión de la cámara, fueron suficientes para producir la rotura por fatiga, con consecuencias desastrosas. Cualquier ingeniero competente se habría dado cuenta de esta posibilidad. Según la ley, y quizá en justicia, la culpa recaía principalmente en los que hicieron el depósito; pero no pude evitar pensar que el peligro podía haber sido previsto en una empresa competente de ingenieros químicos. Cuando fui a visitarlos el director gerente me invitó a comer. Para abrir la conversación le pregunté: "¿Cuántos ingenieros de carrera tiene Ud. en su organización, Mr....?".

"¡Ninguno, gracias a Dios!"

Cortando huecos en cosas

Aunque en general es temerario cortar un hueco en una estructura existente, alguna gente parece incapaz de resistir la tentación de hacerlo. Un caso relacionado con esto ocurrió con el avión *Master*. Este avión fue construido para el entrenamiento avanzado de las Reales Fuerzas Aéreas Británicas, justo después de la guerra. Tenía muchas de las cualidades, y muchas de las características de conducción del *Hurricane* y el *Spitfire*. A principios de 1940 se transformaron algunos

Masters en cazas de combate intalándoles seis ametralladoras en las alas. En la versión original de entrenamiento del aparato, el desplazamiento de las partes móviles se controlaba mediante cables que, aunque eran perfectamente satisfactorios, daban una reacción ligeramente "más floja" de la que debía tener un verdadero avión de combate. Alguien decidió por tanto cambiar los cables por barras de control. Para dejarles sitio a las barras que movían los alerones de cola, se le hicieron unas escotillas adecuadas en la parte trasera del fuselaje.

Poco después nos tuvimos que enfrentar con una serie de tres accidentes fatales. En todos los casos la cola se desprendió durante el vuelo. Cuando estudiamos el fuselaje en el laboratorio descubrimos que la resistencia estaba reducida a sólo un 45 por ciento de la carga mayorada. Podemos dejar, supongo, la moraleja a un lado.

El accidente del barco de transporte de tropas *Birkenhead*, fue de este tipo y mucho más conocido, y en él se perdieron muchísimas vidas. Este vapor de hierro había empezado a existir como barco de guerra en 1846 con resistencia adecuada y muy bien provisto de compartimentos estancos continuos. Cuando fue transformado en transporte de tropas, sin embargo, la Oficina de Guerra insistió en hacer grandes aperturas en los mamparos transversales de los compartimentos estancos⁷, con objeto de dar más luz, aire y espacio aparente a las tropas.

En 1852 el *Birkenhead* fue enviado a la India, por la ruta de el cabo de Buena Esperanza, con 648 personas a bordo, en las que estaban incluidos veinte mujeres y niños. Por un error de pilotaje, el barco chocó con una roca aislada a unas cuatro millas de la costa de Sudáfrica. El navío sufrió una perforación en la proa, y, como se habían cortado los compartimentos estancos, todos los puentes de tropa de la parte delantera del barco se inundaron tan deprisa que se ahogaron muchos hombres de la tropa que descansaban en sus literas (eran las dos de la madrugada).

Bajo el peso del agua la parte delantera del barco se rompió y se hundió casi inmediatamente, dejando a los supervivientes amontonados en la parte trasera, que empezó a hundirse más despacio. Estaba oscuro, el mar estaba lleno de tiburones, y los botes salvavidas eran insuficientes. La tropa se comportó con gran coraje y gran disciplina, y se mantuvieron firmemente en

⁷ Excepto, por supuesto, los de la sala de máquinas.

el puente trasero, mientras las mujeres y los niños eran mandados a la costa con los botes que quedaban. Se salvaron todas las mujeres y los niños y 173 hombres: el resto se ahogó o fue devorado por los tiburones.

El efecto más evidente que produjo cortar huecos en los mamparos fue, por supuesto, que se inundaron rápidamente los distintos compartimentos del barco, e indudablemente fue la causa principal de su pérdida. Sin embargo, se hubieran perdido menos vidas si el barco no se hubiera partido en dos, y esto debe atribuirse, por lo menos en parte, al debilitamiento del conjunto del casco al cortar los mamparos de los que dependía su resistencia.

La pérdida del *Birkenhead* se hizo inmediatamente famosa como un ejemplo de disciplina y heroísmo (y lo merecía). Cuando las noticias llegaron a Berlín, el rey de Prusia ordenó que el relato de los hechos fuese leído en voz alta a todas las unidades de su ejército, formadas especialmente para este propósito. Sin embargo, hubiera sido todavía mejor si hubiese dado instrucciones a su Oficina de Guerra de no intervenir en la estructura de los barcos, algo que los militares no siempre entienden.

De acuerdo con Mr. K.C. Barnaby, un distinguido ingeniero naval, el concepto de que el espacio abierto era más importante que la seguridad de las tropas duró muchos años. Dice que, en una época tan tardía como el año 1882, los constructores de barcos se quejaban de que, cuando añadían compartimentos estancos por exigencia del Almirantazgo, los mandos de la tropa no aceptaban los barcos, basándose en que los espacios entre mamparos eran demasiado pequeños⁸.

Ser sobrecargado

Casi cualquier estructura tiene tendencia a volverse más pesada de lo que quiso su proyectista. Esto puede ser debido en parte a una situación excesivamente optimista de las cargas durante el proyecto, pero también se debe a la tendencia que tiene casi todo el mundo a "estar seguro" haciendo cada componente mucho más grueso y pesado de lo que es necesario. A los ojos de

⁸ K.C. Barnaby, *Algunos Desastres en Barcos Cascos*. (Hutchinson)

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

mucha gente esto es una especie de virtud —un signo de honradez e integridad— y hablamos de las cosas que están “sólidamente construidas” como una alabanza, mientras que las “construcciones ligeras” es casi un sinónimo de “endeble” o “destartalado”.

Algunas veces esto no importa, pero hay casos donde esto importa realmente mucho. En los aviones el peso tiende a crecer continuamente, a partir del tablero de dibujo. Naturalmente, el peso adicional restringe la capacidad de combustible y de carga del aeroplano, pero, además de este aumento general de peso, el centro de gravedad de un aeroplano de alguna manera siempre consigue abrirse camino hacia la parte trasera del aparato. En otras palabras, el peso de la cola tiende a aumentar más que el del resto del avión. Esto puede convertirse en un tema serio. Si el centro de gravedad se desplaza demasiado hacia atrás, el avión adquirirá peligrosas características de vuelo. Puede llegar a tener tendencia a producir un giro hacia atrás del que no pueda recobrase. Por esta razón, un sorprendente número de aviones —en los que están incluidos algunos muy famosos— han pasado su vida cargando enormes pesos muertos permanentes en su morro; esto era necesario para mantener el centro de gravedad en una posición tolerablemente segura. No se necesitará decir que esto es malo.

Los efectos del sobrepeso son igual de malos, quizá peores, en los barcos. No sólo los cascos de los barcos tienden a ser excesivamente pesados, sino que el centro de gravedad tiende, en este caso, a deslizarse, no hacia atrás sino hacia arriba. Ahora bien, la estabilidad del barco, es decir, su tendencia a flotar derecho, en lugar de boca abajo o tumbado en sus costados, depende de algo que se suele llamar su *altura de metacentro*. Es decir, la distancia vertical entre un punto místico pero importante llamado “metacentro” y el centro de gravedad del casco. Debido a excelentes razones, la altura del metacentro hasta de un barco grande suele ser una distancia muy pequeña, de hecho del orden de sesenta centímetros, quizá menos. De esta forma, la posición del centro de gravedad tiene sólo que subir unos centímetros para reducir la altura del metacentro en proporción muy significativa y así poner en peligro la seguridad del barco. Varios barcos han zozobrado al botarlos por esta razón, y sin duda los responsables de los astilleros, o quien quie-

ra que fuese responsable de colocar peso adicional en la parte superior del barco, consideraban que no había nada censurable en ello.

Mencionamos la pérdida del buque *Captain* en el capítulo 11. Toda la historia del *Captain* fue en su época intensamente política y polémica; supongo que pocos accidentes han tenido consecuencias históricas de tan largo alcance. El *Captain* representó un hito en la evolución del barco de vapor de guerra y quizá en el concepto moderno del poder mundial. Historiadores que saben muy poco de barcos han criticado a menudo al Almirantazgo por su lentitud en pasar de la vela al vapor. Son precisamente estos historiadores los que se muestran más críticos con la expansión imperialista inglesa.

Debe tenerse en cuenta que, hasta hace relativamente poco, las máquinas poco fiables, el alto consumo de carbón y la poca autonomía de los vapores de guerra les hacían depender de bases, de estaciones de suministro de carbón y de “colonias” tan pronto como dejaban las aguas territoriales. La conservación del poder mundial mediante navíos a vapor es muy distinta de la que se hacía mediante la estrategia y la logística de las flotas a vela del siglo XVIII. Básicamente por estas razones el Almirantazgo británico insistía en conservar la propulsión a vela, combinada con las máquinas de vapor, en casi todos sus buques de guerra desde tiempos inmemoriales.

Las dificultades técnicas de combinar la propulsión a vela con la de vapor derivan menos de la naturaleza de las máquinas y las velas que del desarrollo de los cañones y las corazas que tuvo lugar a lo largo del siglo XIX. Los cañones de torreta exigen grandes ángulos de tiro, además de ser muy pesados. La necesaria coraza de protección era aún más pesada. Compaginar los ángulos de tiro necesarios y también la estabilidad adecuada, con una propulsión a vela completa era un problema de ingeniería naval extremadamente difícil. En la década de 1860 el Almirantazgo estaba comprensiblemente inclinado a proceder con cautela. Si le hubieran permitido continuar haciéndolo, podría haber ido todo bien y la historia podría haber sido considerablemente diferente.

El estropicio fue llevado a cabo por cierto capitán Cowper Coles. Coles era un hombre de ingenio con un excepcional talento para la polémica y la publicidad. Después de inventar un nuevo

tipo de torreta para cañones, se lanzó a persuadir al Almirantazgo para que se construyera un buque de guerra equipado con su cañón y con aparejo de velas completo, y por tanto con autonomía ilimitada. Coles consiguió enredar, no sólo al Almirantazgo, sino a las dos Cámaras Parlamentarias, a la Familia Real, al editor del *The Times* y prácticamente a todo el aparato del poder, en lo que se convirtió en uno de los mayores trabajos publicitarios de este tipo.

Cansado de ser llamado "reaccionario" por la mitad de los periódicos y más de la mitad de los políticos de Inglaterra, el Almirantazgo dio vía libre. Hicieron lo que nunca habían hecho antes, y ciertamente no volverán a hacer: permitieron a un oficial en activo de la Marina, sin ningún estudio de ingeniería naval, proyectar su propio buque de guerra privado y construirlo con el dinero público.

El buque fue construido por Lairds en Birkenhead bajo la responsabilidad de Cole y sin ninguno de los controles usuales al proyecto. Fue construido, además, entre un estallido de vituperaciones y polémicas. Durante la mayor parte del tiempo Coles estuvo enfermo e incapaz de dejar su casa de la isla de Wight para atender el astillero. Como resultado de todo este desorden, el barco terminó teniendo un 15 por ciento de sobrepeso. Si esto no hubiera ocurrido puede ser al menos posible que el barco hubiese triunfado y hubiese sido relativamente seguro.

Tal y como quedó, el *Captain* estaba demasiado hundido dentro del agua y su centro de gravedad estaba demasiado alto. Cálculos posteriores demostraron que el barco zozobraría si quedaba ladeado más de 21°. Sin embargo, el barco fue puesto en servicio en 1869 con gran publicidad. Hizo dos cruceros por alta mar con gran satisfacción del *The Times* y del Primer Lord del Almirantazgo, que tenía a su propio hijo enrolado en él como guardamarina. Parecía que los problemas del poderío mundial, sin el lastre y las complicaciones potenciales de un sistema mundial de bases, iban a continuar siendo solubles.

En su tercer viaje, al volver de Gibraltar en 1870 en compañía del resto de la flota del Canal, el buque *Captain* zozobró súbitamente bajo un golpe de viento bastante moderado en el mar Cantábrico. Se perdieron 472 vidas, más que las bajas británicas en la Batalla de Trafalgar. Tanto

Cowper Coles como el hijo del Primer Lord del Almirantazgo perecieron ahogados. Sólo se salvaron diecisiete hombres y un oficial.

Aunque no fue, por supuesto, el único factor, la pérdida del *Captain* tuvo un poderoso efecto para acelerar el cambio de vela por vapor, o más bien en la supresión de aparejos de vela completos en los grandes buques de guerra. Fueran las que fueran las consecuencias técnicas, las consecuencias políticas fueron muy grandes. Se recordará que el Canal de Suez, que se había abierto antes de que el *Captain* fuese botado, pertenecía al principio a Francia. Disraeli compró la explotación del canal para el Gobierno Británico en 1874, y la adquisición de una cadena de estaciones de suministro de carbón por todo el mundo se transformó en un imperativo político. Toda la historia del desastre del *Captain* es complicada. Sin embargo, la causa técnica inmediata fue sin duda la insistencia en asegurarse que los mástiles y el casco del barco tuvieran una gran resistencia, aunque sin tener en cuenta el peso. Fue uno de los muchos accidentes estructurales en los que nada realmente rompe, pero las causas son tan estructurales como si algo hubiese roto.

Mecánica de fluidos o un junco mecido por el viento

Cuando un fluido, como el aire o el agua, fluye a través de un obstáculo, que puede ser un árbol o una cuerda, se forman remolinos de fluido detrás suyo. Muy a menudo, si se observa a un junco o una mimbrera creciendo dentro de un río con corriente lenta, se puede ver que los remolinos que forma el agua que se desliza aparecen primero a un lado, después en el otro, alternándose. Como resultado de esto se produce una variación rítmica de la presión del fluido, de un flanco del obstáculo al otro. Esta sucesión "calle" de remolinos se llaman una "Karman Strasse", en honor al teórico de la mecánica de fluidos Von Karman, que fue el que la describió por primera vez. Es bastante fácil observar los remolinos en la superficie lisa del agua. Sin embargo, los remolinos de aire son invisibles a menos que los deje al descubierto el humo, las hojas caídas o cualquier

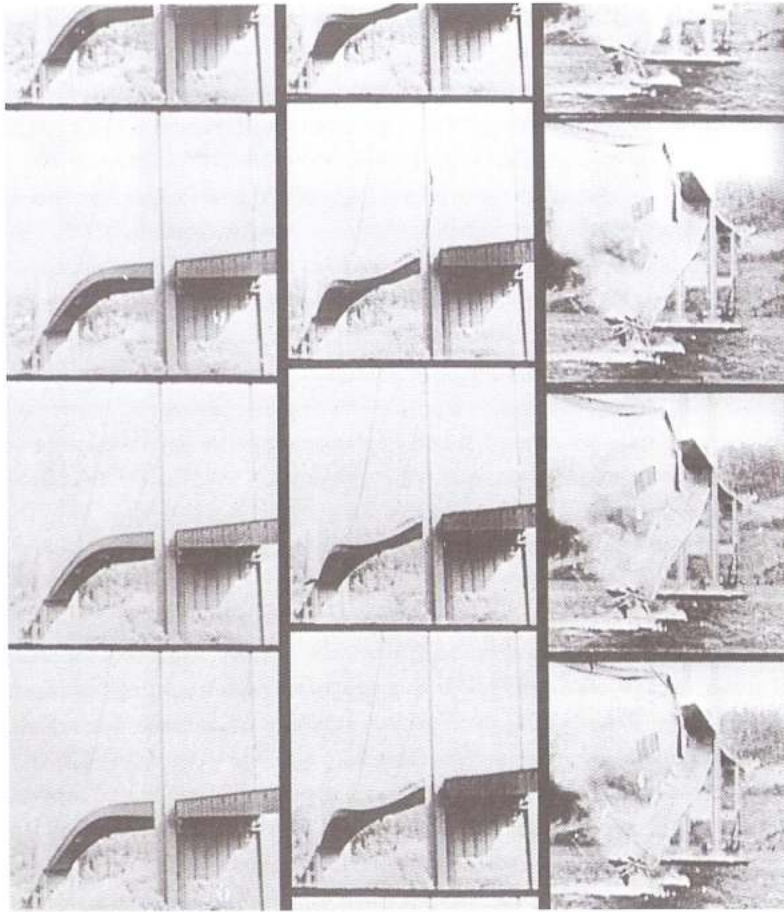


Lámina 20. El puente de Tacoma es un ejemplo clásico de puente colgante hecho con rigidez a torsión insuficiente. Conocido como "Gertie galopante" mostraba una oscilación seria cuando estaba expuesto a vientos bastante moderados, y muy pronto se retorció y pandeó hasta hundirse con un viento de sólo 42 km/h.

indicador similar. De hecho, sin embargo, los mismos "Karman Strasse" de remolinos aparecen cuando el aire sopla a través de una bandera, un árbol o un cable. El efecto que producen estos remolinos alternantes, actuando primero a un lado y después a otro, es que las banderas ondean, los árboles se mecen y los cables de telégrafo cantan y zumban bajo el viento. De esta forma, una vela flamea tan pronto como se sueltan las jarcias y puede muy bien saltar y herir a alguien. Recuerdo haber visto a un hombre perder el sentido por el latigazo de un cabo de vela; hay mucha energía contenida en todo esto. Cuando un barco grande de vela toma una brisa, el ruido es tan fuerte como un cañonazo y mucho más impresionante.

Si la frecuencia del estímulo aerodinámico producido por los remolinos coincide con uno de los períodos propios de vibración del obstáculo, la amplitud del movimiento empieza a crecer hasta que algo se rompe. Son este tipo de cosas, más que una presión de viento estable, lo que generalmente cuenta cuando un árbol es derribado por el viento. Esto también puede ocurrir de forma algo más complicada en los aviones y en los puentes colgantes. Debe ser evitado haciendo la estructura adecuadamente rígida, especialmente a torsión. Como hemos subrayado antes, la exigencia de rigidez a torsión domina generalmente el diseño y el peso de la estructura de los aviones modernos.

Aunque el puente colgante de Menai de Telford fue fuertemente dañado por oscilaciones debidas al viento poco después de ser construido, pasó un siglo antes que los proyectistas de puentes se diesen claramente cuenta de la realidad de este peligro. La catástrofe clásica fue la del puente de los estrechos de Tacoma en América en 1940. Este puente, que tenía una luz de 840 metros, fue construido sin la necesaria rigidez a torsión. El resultado fue que se balanceaba hasta tal punto, aun con brisas moderadas, que las gentes del lugar lo bautizaron como *Gertie Galopante*. Muy pronto después de ser terminado se balanceó y retorció hasta venirse abajo con un viento de sólo 42 km/hora. Afortunadamente resultó que alguien estaba presente con un carrito en su cámara de cine. La cámara se puso a trabajar y lo que costó la película se convirtió en una buena inversión, ya que ha sido pasada repetidamente en casi cualquier escuela de ingenieros del mundo desde entonces (lámina 20).

Como consecuencia, los puentes colgantes modernos están contruidos con rigidez adecuada, en especial, rigidez a torsión. Como ocurre en aeronáutica, las exigencias de rigidez suman una buena proporción del peso del puente. En el caso del puente de carretera de Severn (lámina 12), por ejemplo, el tablero está formado por un gran tubo de acero de sección hexagonal aplanada, hecho con chapas de acero dulce. Durante la construcción este tubo fue llevado flotando por secciones, montado en posición, y soldado para formar una estructura continua.

El proyecto de ingeniería como teología aplicada

En todos los accidentes debemos distinguir entre dos niveles de causalidad. El primero es la causa técnica o mecánica inmediata del accidente; el segundo es la causa humana subyacente. Es cierto que el diseño no es una tarea muy precisa, que pueden ocurrir cosas inesperadas, que se cometen verdaderas equivocaciones y así sucesivamente; pero mucho más a menudo la "verdadera" razón por la que ocurre un accidente es un error humano evitable.

Actualmente está bastante de moda suponer que el error es una de esas cosas de las que no está bien acusar a la gente, que, después de todo "hacen lo que pueden" o son víctimas de su educación o circunstancias, o del sistema social, y así sucesivamente. Sin embargo, el error forma parte de lo que, aunque está muy mal visto, se llama "pecado". En el transcurso de una larga vida profesional pasada, o perdida, en el estudio de la resistencia de materiales y las estructuras he tenido que examinar muchos accidentes, muchos de ellos fatales. Me he visto forzado a llegar a la conclusión de que muy pocos accidentes simplemente "ocurrieron" en el sentido neutralmente moral del término. Nueve de cada diez estaban producidos, no por causas técnicas más o menos abstrusas, sino por el viejo y pasado de moda pecado humano, muchas veces rozando la pura iniquidad.

Por supuesto, no me estoy refiriendo a los pecados más aparatosos y jugosos, como el asesinato deliberado, el fraude a gran escala o el sexo. Son pecados escuálidos, como la falta de cui-

dado, la incompetencia, no-aprender-y-no-tener-necesidad-de-preguntar, no-me-puedes-enseñar-nada-sobre-mi-trabajo, el orgullo, los celos y la rapacidad lo que mata gente. Aunque algunas oficinas de ingenieros tienen equipos magníficos, existe en Inglaterra un número excesivo de ellas que son técnicamente incompetentes —a menudo hasta un extremo criminal—. Mucha de esta gente ha salido del taller, y, con una mezcla de orgullo y falta de sentido, rechazan airadamente cualquier sugerencia sobre buscar información apropiada o emplear personal preparado.

Según mi experiencia, ocurren muchos más accidentes a la semana de los que vienen en los periódicos; en general, están producidos por falta de cuidado y de competencia profesional. Dudo muy mucho que el remedio esté en imponer todavía más normas. Me parece que lo que se necesita es crear más conciencia pública y un estado de opinión que considere estas "equivocaciones" como moralmente culpables. El hombre que perforó un agujero en un sitio no adecuado del larguero de un aeroplano de madera, lo rellenó después, y no se lo comunicó a nadie, fue absuelto. Posiblemente el jurado supuso que la responsabilidad moral era despreciable.

Se necesita mucha más publicidad; la dificultad estriba en la ley del libelo. En la mayoría de los casos, si se hacen públicas las auténticas causas del accidente, alguien se pondrá colorado, y es posible que su negocio o su reputación profesional sufra por ello. La mayoría de los ingenieros profesionales son extremadamente conscientes de esto y tienen que mantenerse callados sino quieren arriesgarse a daños graves. En mi opinión, la solución puede buscarse en algo de este estilo, porque el interés general exige que los accidentes y los descuidos sean hechos públicos.

Aunque la gran mayoría de los accidentes estructurales sean asuntos sórdidos y arrabaleros de los que nos enteramos poco, existe, desde luego, un cierto número de accidentes dramáticos que, durante un cierto tiempo, monopolizan las cabeceras de los periódicos. A esta categoría pertenecen el derrumbe del puente de Tay en 1879, el hundimiento del *Captain* en 1870 y el desastre del *R101* en 1930. Eran a menudo asuntos intensamente humanos e intensamente políticos, producidos básicamente por la ambición y el orgullo. De esta naturaleza fue el naufragio del

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

Captain: los dos hombres que debían sobrellevar la responsabilidad moral más pesada, pagaron pesadamente por sus faltas, uno con su propia vida, otro con la de su hijo. Desgraciadamente, también se perdieron muchas otras vidas.

La destrucción del dirigible *R101*, que se estrelló contra el suelo y ardió en Beauvais en 1930, fue un caso básicamente similar. Existe un espléndido relato sobre ello de Nevil Shute en su libro *Regla de Cálculo*. La causa técnica inmediata del accidente fue el desgarramiento de la tela de su envoltura externa; parece que se había hecho más frágil esta tela mediante un tratamiento por impregnación inadecuado. La verdadera razón del desastre fue, sin embargo, el orgullo y la ambición política.

El Ministro del Aire del Gobierno Laborista, Lord Thompson, que era quien cargaba con la responsabilidad última, murió abrasado en el accidente, junto a su ayuda de cámara y cerca de cincuenta hombres de la tripulación.

El relato que hace Nevil Shute de los acontecimientos que condujeron al accidente se corresponde extraordinariamente con mi experiencia sobre sucesos bastante comparables. Se reconoce inmediatamente un cierto tufo de podredumbre de poder flotando sobre todo ello. Bajo la presión del orgullo, la envidia, la ambición y la rivalidad política, la atención se concentra exclusivamente en los detalles menudos. El juicio global, la visión general del ingeniero, terminan por hacerse imposibles. Todo empieza a ser imparables y se desliza hacia el desastre delante de nuestros ojos. Tal es la consecución de los propósitos de Zeus. Los hombres no son inmunes a las clásicas y teológicas debilidades humanas sólo porque actúen dentro de un proceso técnico, muchas de estas catástrofes tienen mucho del drama y la inevitabilidad de las tragedias griegas. Algunos de nuestros libros técnicos deberían haber sido escritos por gente como Esquilo o Sófocles: estos escritores no eran humanistas.

CAPÍTULO 16

Eficacia y estética o el mundo en que nos ha tocado vivir

—“¿Por qué no tiene a Mr. Smith en su gabinete, Sr. Presidente?”

—“No me gusta su cara.”

—“Pero es que el pobre hombre no puede cambiar su cara.”

—“Cualquiera con más de cuarenta años ha podido cambiar una cara.”

HISTORIA SOBRE EL PRESIDENTE LINCOLN

Érase una vez un tiempo lejano en el que yo solía trabajar en un laboratorio de explosivos. Naturalmente, las autoridades impusieron precauciones muy rigurosas para impedir la entrada de personas extrañas al laboratorio, ya que no sólo podían robar los explosivos y venderlos después con grandes beneficios, sino que también podían hacer volar todo por los aires. Por lo tanto, esta institución fue rodeada con alambre de espino y se colocaron alarmas, guardias armados, perros policía y casi cualquier cosa que se les pasara por la cabeza a los oficiales de seguridad.

Ahora bien, muchos de los explosivos que se utilizan están basados en la nitroglicerina, que, en estado puro, es un líquido excepcionalmente peligroso de almacenar o manejar. El más pequeño descuido en su uso, como sacudir la botella, puede hacerle detonar con resultados sumamente devastadores. Los explosivos seguros, como la dinamita, contienen una gran cantidad de nitroglicerina que se ha conseguido hacer poco peligrosa de manejar mediante la adición de varias sustancias desarrolladas a lo largo de muchos años por una serie de científicos bastante valientes como Abel y Nobel. Los que se ven obligados a experimentar con nitroglicerina pura tiene que tomar toda suerte de fantásticas precauciones, y aun así el peligro es tal que no sin frecuencia sufren ataques de nervios. Los laboratorios de nitroglicerina están no sólo físicamente separados de los otros laboratorios por taludes de tierra y amplios espacios

despejados, sino que además el personal debe llevar trajes especiales, incluyendo unas botas especiales que están hechas de forma que pisan suavemente y no producen descargas eléctricas, evitando algo tan peligroso como una chispa.

Un fin de semana, algunos de los niños del lugar consiguieron reptar por debajo de la valla de seguridad y pasar al interior del recinto sin que los guardias y sus perros los percibieran. Como se encontraron en un lugar aparentemente solitario, entraron en uno de los laboratorios de nitroglicerina. Allí no había, sin embargo, mucho que les interesara, por lo que volcaron varias botellas y varias probetas con nitroglicerina por el suelo, robaron dos pares de botas especiales y huyeron, por donde habían venido, sin que hasta ahora hayan sido detectados.

Ésta es una historia real; y creo que puede también servir como una especie de parábola, porque es posible que los ingenieros, los planificadores, los burócratas, los fabricantes de productos y todo el conjunto de la vanguardia sean como niños jugando en una nave llena de nitroglicerina, sublimemente inconscientes de que pueden producir una gran explosión. Está muy bien eso de dedicarse a la "eficacia" y a que todo funcione, y por supuesto, hay que satisfacer nuestras necesidades materiales, aunque de hecho nuestras necesidades materiales son más flexibles de lo que pensamos. Sin embargo, el hombre tiene necesidades subjetivas que son más importantes y más capaces de producir explosiones sociales cuando se las desprecia o se abusa de ellas.

De forma que, cuando escucho hablar a muchos de mis colegas ingenieros, a veces me entran sudores fríos. No sólo consideran que las consecuencias estéticas de su trabajo son de menor importancia, sino que consideran que preocuparse por ello es básicamente frívolo. Sin embargo, creo que cuanto más aumenta nuestra prosperidad material, más trascendental será la catástrofe final si el hombre no puede obtener satisfacciones estéticas.

Cuando era estudiante de ingeniería solía escaparme de mis clases, buscando aire puro, y deslizarme culpablemente hasta el museo local. Me perdí muchas lecciones matemáticas, mientras pasaba el tiempo mirando los cuadros de la Galería de Arte de Glasgow. Sin duda, los cuadros de los museos son una ayuda, sin embargo en cierta medida los objetos artísticos son

una necesidad patética, un refugio para la desesperación, no sólo producida por la aridez de las lecciones analíticas sino, lo que es más importante, por la fealdad dominante en ciudades como Glasgow.

Por supuesto, mantener el "arte" en compartimentos separados llamados "museos", es una clara muestra del filisteísmo de la mentalidad de la administración, y es sugestivo que los regímenes orwellianos de 1984 proveyeran a sus súbditos no sólo de galerías de arte sino de música y ballet. Pero estos modos de disfrutar de las "bellas artes" sólo aparecen ocasionalmente en la vida ordinaria de una persona. Pueden darle un respiro, pero en realidad no sustituyen un ambiente que sea en sí satisfactorio y que siempre está presente. Muchos encontramos en el campo una especie de respiro, pero estamos bien resignados a la grisura de ciudades, fábricas, estaciones llenas, aeropuertos y casi todos los lugares en los que pasamos el día. Seguramente los peces que tienen que pasar su vida en agua sucia terminarán por acostumbrarse más o menos a ello, sin embargo los seres humanos que son obligados a esto pueden rebelarse. Nosotros "perdonamos los pecados por los que nos sentimos inclinados/condenando los que no nos interesan". Y, como el profesor Macneile Dixon dijo una vez:

...el contraste de los siglos medievales, ese período único en los anales europeos, con los siglos que siguieron al Renacimiento. ¡Qué diferentes eran sus respectivas concepciones del universo! Sin embargo, cada una de estas doctrinas supuestamente universales se creían inevitables, inasibles. Cada época se cree en posesión de la verdad y como la única opción posible para el hombre inteligente.¹

Así, en lo que concierne a cosas importantes, cada época tiene una mentalidad totalmente cerrada. En nuestros días, materialistas, nos sentimos horrorizados porque nuestros antepasados fuesen capaces de soportar la pobreza y el dolor físico. Sin embargo, estos mismos antepasados se quedarían igual de horrorizados viendo a tantos millones de personas sufriendo los

¹ W.M. Dixon, *La situación humana* (Penguin, 1958).

medios de transporte de Londres o Nueva York; y de que aquellos que trabajan en nuestros oscuros y satánicos talleres tengan que ser bien pagados para obtener entre el ruido y la fealdad cosas que son totalmente innecesarias. Aun la decoración y la atmósfera "clínicas" de nuestros modernos hospitales, les parecería que añaden un nuevo espanto a la muerte. Por eso, muchos buscamos algún tipo de respiro y consuelo en la "naturaleza" y huimos, cuando podemos, al campo porque nos parece la campiña más agradable que las ciudades, las carreteras y las fábricas. Realmente existe mucha gente que cree que la naturaleza es esencialmente hermosa y, quizá, esencialmente "buena". Esta forma de ver las cosas conduce, llevada al extremo, al panteísmo, a los *Bosques de Westminster* de Meredith. Sin embargo, a mi me parece que si fuésemos capaces de librarnos de nuestros románticos prejuicios y fuésemos capaces de estudiar todos los aspectos del problema, nos veríamos forzados a admitir que la naturaleza es tan estéticamente neutra como moralmente neutra. Las montañas, los lagos y las puestas de sol pueden ser hermosas, sin embargo el mar puede ser amenazador y feo, y, por lo que hemos experimentado, los bosques primitivos eran a menudo lugares donde habitaba el horror. La mayoría del paisaje europeo no tiene realmente nada de "natural". Las especies de plantas y árboles a las que se ha permitido crecer han sido cuidadosamente seleccionadas y controladas, y muchas especies han sido cultivadas artificialmente hasta alcanzar su forma actual, igual que los animales domésticos. Las formas con las que crecen las plantas, todo el conjunto visible que forman los campos, los bosques, los setos y los pueblos —por no mencionar el drenaje y la mejora de campos cultivados— son el resultado de la decisión y el esfuerzo humano.

Antes del siglo XVIII, cuando el paisaje del campo era mucho más salvaje, los hombres educados temían a la "naturaleza", que para ellos significaba no sólo incomodidades físicas, sino crudo salvajismo. Para esas gentes eran las ciudades las que eran atractivas y habitables, y el campo lo que era inhóspito y feo. Hoy, cuando admiramos la deliciosa campiña inglesa estamos realmente admirando algo que ha sido creado deliberadamente por los inteligentes y civilizados propietarios de la tierra en el siglo XVIII.

Si el campo ha mejorado desde el punto de vista estético, las ciudades ciertamente han empeorado. En la actualidad, cuando nos quejamos de las ciudades y fábricas inglesas, estamos quejándonos en realidad de la obra de reformistas filisteos, ingenieros, arquitectos, negociantes, de los hombrecillos grises que se sientan en las oficinas de los Ayuntamientos, y de los hombres grises algo mayores que se sientan en el Parlamento. Sobre los pecados de esta gente basta con decir que no saben lo que hacen; porque hacemos lo que es inherente a nuestra naturaleza, como sabía bien Platón. Se podría argumentar como poco que la campiña es más atractiva que la ciudad no porque el campo sea más "natural" sino porque el campo y la ciudad fueron hechos, cada uno de ellos, por gente muy distinta. Sin embargo, lo primero que se debe hacer es darse cuenta de la fealdad, porque de otro modo la aceptamos como parte del orden natural de las cosas.

Hacemos lo que es inherente a nuestro modo de ser. En un mundo que tiene una irracional admisión por la razón nos podemos olvidar que la mente humana es como un iceberg. La parte racional de nuestra mente, de la que somos conscientes, es bastante pequeña, e, igual que la parte visible del iceberg, se sostiene desde abajo por la mente subconsciente, que es mucho mayor.

Llegados a este punto soy muy consciente de que estamos alcanzando un nivel de pensamiento que es el campo acotado de los artistas, los filósofos y los psicólogos, y de que mi nivel está miserablemente por debajo de lo necesario para entrometerme en terrenos donde incluso los espíritus angélicos de la crítica del arte temen introducirse. Yo sólo puedo disculparme diciendo que la necesidad no conoce de leyes, que el mundo moderno que ha dado el hombre es hediondo, que la desesperación más aguda me induce a mí —un limitado ingeniero naval— a levantar la cabeza. Creo que es realmente importante que algún tipo de opinión sobre la estética de la tecnología, la ingeniería y las estructuras sea claramente expuesta a los ingenieros y técnicos por uno de ellos, por poco fiable que sea. En todo lo que sigue me encomiendo a Atenea y a Apolo, para que su gracia haga que alguien más competente que yo mismo sea inducido a realizar mejor esta tarea.

Empecemos estudiando el proceso de la percepción estética humana; es decir, por qué reaccionamos como lo hacemos ante un objeto inanimado. Dentro de nuestro subconsciente se encuen-

tran almacenadas una gran cantidad de reacciones potenciales y de recuerdos "olvidados". Este material es en parte heredado genéticamente a partir de un remoto pasado (el "inconsciente colectivo" de Jung) y es en parte adquirido por el propio individuo a lo largo de su vida, principalmente a partir de experiencias aparentemente olvidadas, algunas de ellas desagradables. Ahora bien, nuestros sentidos físicos —vista, oído, olfato y tacto— pasan sin cesar a nuestro cerebro mucha más información sobre nuestro entorno de lo que nuestra mente consciente puede aceptar o anotar. Sin embargo, el subconsciente está continuamente manipulando esta información, para lo que existen una gran cantidad de receptores y canalizaciones que son sensibles a cada forma y cada línea, cada color y cada olor, cada textura y cada sonido. Podemos ser totalmente inconscientes de todo esto, pero en cualquier caso realmente está sucediendo y está produciendo experiencias emocionales subjetivas dentro de nosotros, sean sus efectos buenos o malos.

Este proceso depende de algún modo subjetivo de la apariencia de los objetivos inanimados y de los artefactos, especialmente en el contexto actual. Los artefactos están fabricados por hombres, y alguien —en alguna etapa del proceso—, toma algún tipo de decisión sobre su forma y su diseño.

En efecto, es imposible fabricar un objeto sin tomar una serie de decisiones durante el proceso. Aun una línea recta está diciendo: "Mira, soy recta, no estoy torcida". Aun el artefacto más sencillo contiene un conjunto de esas decisiones tomadas por hombres.

De la misma manera que no existe algo como una experiencia totalmente objetiva, tampoco existe algo como una decisión totalmente objetiva, una que no tenga algún tipo de connotación emocional. Esto es cierto esté la decisión tomada para escritura, música, color, forma, línea, textura o para lo que los ingenieros llaman diseño.

Esto nos hace pasar de lo que podría llamarse "proceso de percepción estética" al "proceso de transmisión estética". En otras palabras, ¿por qué proyectan las cosas como lo hacen? ¿Qué es lo que el fabricante o el proyectista pone en un artefacto para que produzca los efectos estéticos que

produce? La respuesta elemental es, en gran medida "su propio carácter y sus propios valores". De esta forma, hagamos lo que hagamos impregnamos siempre a la acción o al objeto con nuestra personalidad, escrita en un código que sólo puede ser descifrado a nivel subconsciente. Por ejemplo, nuestras voces, nuestra letra o nuestra forma de caminar son muy características y muy difíciles de ocultar o imitar. Pero este tipo de cosas se extiende mucho más allá de estos ejemplos familiares. Un oscuro atardecer estaba en un yate anclado en una remota enseada escocesa. Alrededor de la punta de la tierra, tres o cuatro millas más lejos, apareció otro yate a vela que nunca había visto antes y del que no tenía noticias. Aunque era imposible discernir su nombre o su tripulación le dije a mi mujer: "ese barco está pilotado por el profesor Thom". Y así era, porque la forma que tiene un hombre de llevar un barco a puerto es tan personal como su voz o su escritura, y, una vez vista, es difícil de olvidar. De la misma forma se puede decir cuál de los amigos está volando en un avión ultraligero, ya que la forma de volar muestra, inequívocamente, la huella del carácter. En el campo de la pintura o del dibujo, aun el trabajo de los aficionados nos dice más sobre los autores que sobre el objeto representado. De nuevo se requiere una habilidad extraordinaria para imitar de forma plausible el trabajo de determinado artista. Naturalmente, no existe una clara línea divisoria entre la pintura, el dibujo y el diseño técnico, por lo que prácticamente todo lo que se fabrica lleva *algo* de la personalidad de su hacedor.

Lo que es cierto para los individuos es cierto para las sociedades, las culturas o las épocas. Los arqueólogos pueden llegar a datar objetos como fragmentos de cerámica, con un margen de muy pocos años mediante su estilo "estilístico". Si nos paseamos por Pompeya y Herculano, podemos salir con una visión sorprendentemente clara del tipo de gente que las habitaba. Esto tiene poco que ver con la tecnología de, por ejemplo, la fontanería, y es algo que ningún tipo de estudio histórico puede transmitir. Hasta ahora este tipo de conocimiento a través de las cosas es inaccesible al ordenador; y pasará mucho tiempo hasta que deje de serlo.

Recientemente, estaba bebiendo cerveza de barril con un muy respetable colega. Dije —bastante torpe y pedantemente, supongo— "Realmente me parece que algo como un barril metálico

de cerveza compendia toda la grisura y el mercantilismo que padece nuestra época tecnológica”.

Mi muy respetado colega se echó encima de mí como una tonelada de ladrillos: “Supongo que querrás que se venda la cerveza en cántaros, o barriles de madera, o pellejos de vino o cualquier cosa semejante. ¿Cómo se puede transportar la cerveza si no es en barriles metálicos? ¿Cómo puedes ser tan estúpido, poco práctico y reaccionario?”.

Pero, con todo respeto, mi muy respetable colega no se había enterado del problema. Lo que importa no es lo que se hace, sino cómo se hace. Los contenedores de cerveza no son bonitos o feos por el material con que se hacen, o ni siquiera porque están fabricados en serie. Sea cual sea la materia de la que están hechos contienen, inevitablemente, los valores de los hombres que los han fabricado. Lo que ocurre es que pertenecemos a una sociedad que es incapaz de hacer barriles metálicos de cerveza atractivos. Realmente vivimos, me temo, en una época notablemente carente de gracia y encanto inherente.

Las ánforas griegas eran bellas, no porque contuviesen vino y estuviesen hechas con cerámica, sino porque fueron fabricadas por los griegos. Eran, en su tiempo, sencillamente los contenedores de vino más baratos. Si los griegos hubiesen hecho barriles metálicos de cerveza quizá tendríamos en los museos colecciones de barriles metálicos clásicos, muy admirados por los artistas.

Creo que pocos artefactos son intrínsecamente bellos o feos sencillamente debido a su función², son sencillamente los espejos de una época, de una serie de valores. En el siglo dieciocho ocurrieron cosas bastante parecidas a lo que ocurrió en la Antigua Grecia, en parte, sin duda, porque fue una edad clásica conscientemente hecha según el modelo del mundo antiguo. Casi todo lo que tocaba un artesano del siglo XVIII era elegante. Esto no se reducía a los objetos de lujo; se extendió por toda la sociedad.

Por supuesto todo esto da pie a la cuestión de los valores “absolutos” de la estética. ¿Son “mis” valores tan buenos como los “tuyos”, aunque consideres mis gustos los más deplorables y faltos de educación posibles? Bien, yo creo firmemente que *existen* valores absolutos en estética que sólo cambian gradualmente a lo largo del tiempo. La moda moderna de la “democracia

estética”, me parece perversa y nihilista y debida en gran medida al prurito de aplastar lo establecido. Me gusta creer que existe una tradición continua de valores estéticos, como existe otra de valores éticos. El proceso va paso a paso, avanzando lenta y cuidadosamente de época en época y de moda en moda, haciéndose, como la ciencia, a partir de la experiencia del pasado. De otro modo, ¿cómo se han construido los valores civilizados?

Otro punto en disputa es que, “suponiendo que los objetos de uso común como las ánforas griegas son bellos en sentido absoluto, ¿eran conscientes los griegos de que eran bellos?” Recuerdo un comentario de un importante artículo de *The Times*, que venía a decir algo así como: “la buena tipografía se podría describir como un cristal limpio: se puede ver a través de ella sin distraerse. Pero para que esto ocurra, la tipografía debe tener el tipo de discreta elegancia y belleza que no llama la atención por sí misma”. Creo que es ésta la razón por la que tenemos aprecio por muchos artefactos de uso común aunque hayan quedado fuera de uso. Esto no quiere decir que no sean absoluta y permanentemente bellos.

Y entonces el siglo XVIII inventó la Revolución Industrial. Creo importante señalar que muchos de los padres de la Revolución Industrial no eran filisteos sino hombres con sensibilidad y buen gusto. A este tipo pertenecían Matthew Boulton (1728-1809) y Josiah Wadgwood (1730-1795). Ganaron mucho dinero, las cosas que fabricaron eran hermosas, y, por lo menos ellos dos, eran patronos modélicos. Sin duda eran ovejas negras, pero los demonios de la Revolución Industrial no se escondían en la cultura y el clasicismo del siglo XVIII, sino más bien en la vulgaridad y la codicia recién aparecidas que estaban producidas, creo, por algo externo a ese espíritu.

Ni la maquinaria de producción en serie ni sus productos son intrínsecamente feos. La primera maquinaria auténtica para la producción en serie, los bien conocidos equipos para producir piezas de madera instalados alrededor del año 1800 en los astilleros de Portsmouth por Sir Marc Brunel, es bonita y satisfactoria. Estas máquinas no sólo tenían buen aspecto sino que además eran muy eficaces, ya que fabricaron automáticamente todos los millones de piezas de madera que necesitó la Armada Inglesa durante las Guerras Napoleónicas, y mucho después. Ahorraron

² Véase la moda reciente de coleccionar orinales. Aristófanes consideraba que las botellas de aceite griegas eran esencialmente ridículas, pero nunca supuso que fueran feas; en realidad, las que se encuentran en los museos, son muy admiradas.

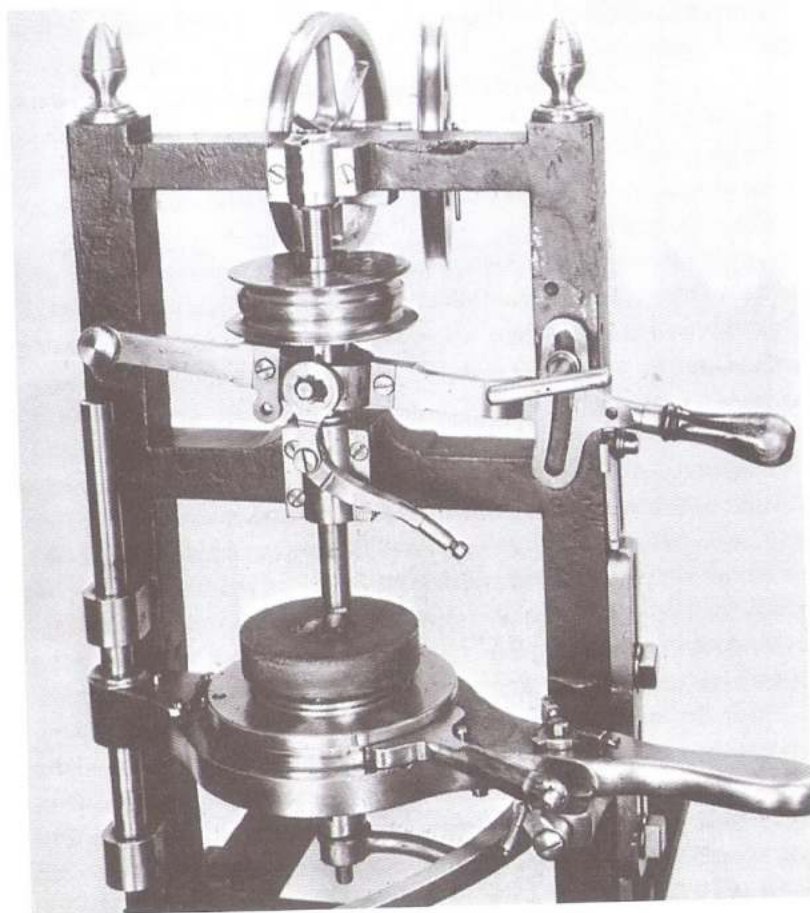


Lámina 21. La primera maquinaria verdadera para la producción en masa que se utilizó fue el equipo para fabricar piezas de madera para los astilleros de Portsmouth. Tanto las piezas fabricadas como la propia maquinaria pueden considerarse atractivos, quizá bellos.

una gran cantidad de dinero, ya que las piezas son caras y un sólo buque de guerra necesita 1.500. Parte de esta maquinaria puede verse en el Museo de Ciencias de Londres (lámina 21), pero mucha de ella continúa estando en servicio en Portsmouth después de 180 años, satisfaciendo las decrecientes necesidades de piezas de la Armada moderna. No sólo la maquinaria, sino el producto, las propias piezas, son sólidas y bonitas; el que se pueda decir que una pieza de madera es hermosa puede ser opinable, pero ciertamente son agradables a la vista.

Sir Marc, el padre del gran Isambard Kingdom Brunel, era un exiliado realista francés, y todos los relatos coinciden en que era un hombre encantador. Se dijo que:

Nuestro querido anciano, que era mucho más amable que los que pertenecían a aquella escuela con los modales, el porte, la conversación e incluso la forma de vestir de un caballero francés del antiguo régimen, porque había mantenido un estilo bastante anticuado pero encantador. Quedé totalmente seducido por él desde nuestro primer encuentro. Lo que me gustaba del viejo Brunel era su gusto sin prejuicios, y su amor o ardiente simpatía por cosas que no comprendía o que no había tenido tiempo de aprender. Lo que yo admiraba sobre todo era su sencillez y su carácter desprendido, su indiferencia ante el mero lucro, y su genuina falta de preocupaciones. Evidentemente, había vivido como si en el mundo no existieran los canallas.

Sin duda un carácter poco práctico que habría tenido dificultades en encontrar empleo en una empresa puntera moderna. Pero su maquinaria continúa produciendo piezas, casi doscientos años después de fabricarla, y es hermosa.

Los grandes ingenieros que trabajaron antes e inmediatamente después del año 1800 pusieron los cimientos, no sólo de la prosperidad industrial británica, sino del mundo técnico moderno. Muchos de estos hombres eran gente de gusto. Sin embargo, hacia la época en la que fue entronizada la Reina Victoria el gusto general se estaba deteriorando claramente: hacia 1851 había alcanzado su nivel más bajo. Agudos observadores, como Lord Playfair (1818-98) ya estaban, sin embargo,

haciendo notar, en época tan temprana como la de la Gran Exposición de Londres, que la industria británica estaba perdiendo su ímpetu y su creatividad. Aunque se cree generalmente —en realidad se tiene por axiomático— que la fealdad vino con la industrialización y es una consecuencia inevitable de la producción en masa, dudo que este punto de vista resista un examen científico.

Creo que es más razonable suponer que la elegancia y el espíritu de empresa decayeron más o menos a la vez como resultado de algo bastante nefasto y complaciente que emergió del carácter británico durante la época del Acta de Reforma en 1839.

La apasionada protesta del movimiento estético de las décadas de 1870 y 1880 contra la fealdad de casi todo, tuvo poco efecto. Creo que esto se debió menos a que esta gente fuera ridiculizada por Gilbert y Sullivan en *Paciencia* y en las páginas del *Punch* que a que el movimiento era en gran parte un movimiento escapista que atacó objetivos equivocados. Estos “hijos de María” no fueron capaces de darse cuenta de que la raíz de todos los impúdicos horrores que odiaban no era la maquinaria en sí misma, sino las actitudes mentales. Como muchos reformadores estéticos, rechazaron la técnica en lugar de unirse a ella. Quizá si hubiesen tenido una formación técnica o de ingeniero hubiesen intentado actuar dentro del sistema. Pero esto es una disciplina laboriosa que las gentes del mundo del Arte rechazan como algo inferior. Por supuesto, William Morris y sus seguidores estudiaron y practicaron algunos oficios técnicos en pequeña escala; sin embargo, se necesitaba enfrentarse con la maquinaria real de producción en masa y con los problemas económicos de las sociedades de producción a gran escala.

Sobre la eficacia y el funcionalismo

Al verla se enojaron los discípulos y dijeron: ¿A qué este derroche? Podría haberse vendido a gran precio y dárselo a los pobres.

MATEO 26, 8-9

Aunque acabamos de acusar a los ingenieros modernos de filisteísmo, casi todos están preocupados por valores que están pasados de moda y no son muy populares en nuestra permisiva

época. Estos consisten principalmente en la objetividad y la responsabilidad. Los ingenieros tienen que enfrentarse no solo a las gentes y a todas sus manías y debilidades, sino también a los hechos físicos. Se puede discutir con la gente, y no es difícil engañarla; pero no sirve de nada discutir con un hecho físico. No se puede amedrentar, o corromper o legislar en contra suya, o pretender que la verdad es distinta o que algo nunca ocurrió. Los legisladores y los políticos pueden crear todas las fantasías que quieran, pero, para los ingenieros, “son responsables de que los equipos funcionen; son responsables de que las conexiones cierren”. En esencia, estos artilugios del pueblo deben funcionar, y continuar funcionando con seguridad y economía. La tarea del ingeniero es señalar que el emperador no lleva vestidos y, sea tan embarazoso como se quiera, necesitamos claramente más, no menos, de este tipo de realismo.

Durante el ejercicio de su objetiva profesión, los ingenieros han desarrollado una serie de conceptos que tienen utilidad para estimular el realismo. Uno de ellos es la “eficacia”. Así, es muy útil saber qué fracción de la costosa energía que se inyecta a una máquina como combustible emerge en forma de trabajo utilizable. Esto puede expresarse como una sencilla relación o porcentaje, y nos indica un factor muy importante de una de las características del trabajo de una máquina. Como vimos, es muy útil ser capaz de comparar los pesos y los costos con la capacidad de soportar cargas de los distintos tipos de estructuras. Como vimos en el capítulo 14, existen varios métodos numéricos para conseguirlo.

Sin embargo, el concepto de eficacia es tan útil, y a veces tan poderoso económicamente hablando, que existe el peligro de ser desbordado por él. Si tratamos de aplicar el concepto de eficacia a la totalidad del problema, estamos suponiendo que poseemos una sabiduría, un conocimiento de todos los factores, que es prácticamente imposible para los mortales. Deberíamos hablar honradamente de la eficacia de una máquina en términos de consumo de combustible y capacidad de trabajo: si hablamos de la “eficacia de la máquina” —*tout court*— somos unos insensatos. No tenemos en cuenta, por ejemplo, el ruido o el olor que produce. O si el hombre que tiene que ponerla en marcha puede acabar con un fallo cardíaco. O el placer que se puede obtener de su aspecto exterior.

Aunque conociésemos todos los hechos relevantes que pueden derivar de una instalación técnica, lo que es imposible, muchos de ellos no podrían ser pesados o cuantificados, porque son inconmensurables. No hace mucho tiempo hubo una gran agitación debida al proyecto de construir un gran aeropuerto en la costa de Essex. Este proyecto consistía en instalar una hedionda masa de hormigón, almacenes y maquinaria sobre las húmedos y ondulados arenales del estuario del Támesis, donde las gaviotas chapotean, revolotean y graznan. Los políticos, administradores, economistas e ingenieros rebosaban de datos y números que demostraban la necesidad del aeropuerto. Sin embargo es imposible comparar mediante algún criterio numérico las demandas de los planificadores y los economistas con los derechos de las gaviotas o la belleza de los húmedos arenales. Personalmente, estoy apasionadamente al lado de las gaviotas, y me produce un inmenso placer imaginarme todas estos kilómetros de arena mojada y barro, que, lo digo encantado, son realmente inútiles e improductivas. Hasta ahora, las gaviotas y los arenales parecen estar ganando.

Supongo que se puede medir la "eficacia" de un aeropuerto en términos de cuántos aviones y pasajeros pueden circular en relación a los costes de inversión y mantenimiento, y estas cifras tienen algún valor práctico, aunque no tienen ninguna relación en este mundo con las gaviotas marinas y las húmedas arenas. En muchos casos, el concepto de eficacia es sencillamente irrelevante. Carece de sentido hablar de la "eficacia" de un mueble decorativo o de una catedral. A pesar de ello, los ingenieros persisten en el concepto de que "debe" ser posible medir de alguna forma la "eficacia" de casi cualquier cosa. Pero esto es un sinsentido.

"Muy bien", dice el ingeniero, "pero los objetos deben ser funcionales, y la belleza de la técnica reside en su funcionalismo." Si esto quiere significar que las cosas deben funcionar y realizar su tarea apropiadamente, lo único que está haciendo es definir lo evidente. Sin embargo, si queremos convertir el funcionalismo en un criterio estético, estamos entrando en un tema profundo. Existen ciertas estructuras, como los puentes, donde la función estructural es sencilla, evidente y se representa como mucho a sí misma. Muchos de ellos son hermosos, pero algunos

no lo son. Existe también una serie de artefactos muy caros que ciertamente tienen buena apariencia, como un Concorde o un Rolls-Royce. Pero, ¿estamos seguros de que no estamos solamente admirando la perfección de un trabajo, desarrollado sin mirar el precio?, ¿podríamos no tener el costo en cuenta cuando definimos el funcionalismo?

Ahora bien, se puede comprar un Ford por la décima parte del coste de un Rolls, y en el mundo real, donde las cosas cuestan dinero, mucha gente encontrará el Ford más "funcional" que el Rolls. Además, la apariencia exterior del Ford tiene poca relación con su instrumental mecánico; lo que vemos es más o menos una caja de chapa, que envuelve la maquinaria, hecha por los carroceros y los estilistas. Las partes mecánicas, es decir, funcionales, de cualquier coche de serie moderno no tienen ningún atractivo, ya que están hechas principalmente de trozos de hilo y metal doblado que son difíciles de admirar, por muy útiles que sean.

Del mismo modo, muchos de los instrumentos eléctricos, como los receptores, son horribles desnudos, con los cables a la vista, y estamos obligados a esconderlos dentro de cajas negras, grises o color dátil. En general, sería honrado reconocer que, a medida que la técnica moderna se vuelve más y más funcional, nos es menos soportable contemplarla.

Sin embargo, ¿es que no tenemos buenos precedentes en la naturaleza? El exterior de una persona o un animal puede parecer bello; su interior es generalmente repulsivo. Nuestra admiración por la naturaleza, es altamente selectiva. Nos gustan ciertas etapas del crecimiento (jóvenes, no fetos); nos horripilan la vejez y los gusanos. Sin embargo, la vejez es tan necesaria y tan funcional como el crecimiento.

En lo que atañe al problema del funcionalismo y la "eficacia", la naturaleza parece tener sentido del humor, o quizá solamente sentido de la proporción. Podrá construir el tallo de una planta, por ejemplo, dentro de la más estricta disciplina de la economía metabólica; estas cosas son un milagro de eficiencia estructural. Una vez hecho esto, colocará una enorme flor encima, para divertirse, o al menos eso nos parece. Del mismo modo, los loros tienen colas, y las muchachas cabelleras, que no pueden de ninguna manera ser consideradas como estrictamente funcionales.

Alguna persona vulgar podría sugerir que estas cosas están hechas para estimular la reproducción, esto es sencillamente dar un paso atrás al argumento. Porque ¿por qué deben ser esos ornamentos sexualmente atractivos, o atractivos de alguna manera?

Aunque para muchos ingenieros es un artículo de fe creer en la estrecha relación entre "eficacia" funcional y apariencia, soy, personalmente, escéptico. Por supuesto, lo que es groseramente ineficaz puede, y debe, ofender a la vista, pero dudo mucho que los refinamientos del desarrollo técnico mejoren sensiblemente la apariencia de las cosas. Muy a menudo ocurre lo contrario; arrancar el último gramo posible de efectividad para un propósito conduce a apariencias bastantes vulgares, como puede observarse en los yates modernos. Personalmente, me reafirmo en la creencia de que la estética que puede conseguirse con un artefacto es una cierta combinación de la personalidad de su hacedor y los valores reconocidos de su época. Si caminamos por cualquier calle con los ojos y la mente abiertos se puede formar un juicio sobre ambas.

La "Ciencia" ha sido atacada desde todos los puntos de vista concebibles a partir del Renacimiento, la mayoría de estos ataques eran más o menos deleznable. Pero me resulta extraño que se haya esgrimido tan pocas veces lo que parece el auténtico argumento contra la ciencia, al menos de forma directa. Éste consiste en que la ciencia ha pervertido sutilmente nuestro sistema de valores enseñándonos a juzgar siempre en un terreno excesivamente funcional. El hombre moderno se pregunta: "¿para que *sirve* este hombre o esta cosa?" en lugar de "¿qué *es* este hombre o esta cosa?". Aquí, sin duda, residen las causas de muchas de nuestras dolencias modernas. El juicio estético busca, bien o mal, responder a la pregunta más general y más importante. Nuestro juicio subjetivo se topa demasiado a menudo en estos tiempos con nuestro juicio científico. Sin embargo, escondemos bajo la alfombra el juicio estético, sin saber que es peligroso.

Naturalmente, nada de todo esto impide que un objeto hermoso sea a la vez útil. Lo que quiero resaltar es que estas dos cualidades son lo que los matemáticos llaman "variables independientes". Me recuerda la observación de un patrón de yate irlandés: "Un barco feo no es más atractivo que una mujer fea, por muy rápido que sea".

Sobre el formalismo y las tensiones

El arte y la arquitectura modernos hacen gran ostentación de su libertad frente a las convenciones y las formas tradicionales, lo que posiblemente sea la razón por la que han conseguido tan poco. Sin embargo la formalidad en el diseño y en los modales no es un lastre, esas convenciones protegen al débil y ayudan al fuerte. Los barcos más bonitos han sido diseñados dentro de una tradición estilística, y no puedo creer que sus autores se hayan sentido frustrados por ello. Los dramaturgos griegos escribieron dentro de un entramado estricto de reglas, sin embargo, sería tan absurdo pensar que la *Antígona* está limitada por las unidades dramáticas como que Jane Austen podría de alguna manera haber hecho mayores obras maestras si hubiese sido libre de utilizar palabrotas y sexo explícito. Por supuesto, para poder apreciar por completo los logros formales es necesario tener un conocimiento de sus reglas. Esto es aplicable por igual tanto a la apreciación de los valores de una catedral, un puente o un barco como al disfrute de un partido de fútbol. Todo esto nos da una buena razón para conocer algo de los principios de ingeniería al igual que de la historia del arte y de la arquitectura.

Cuando Ictino proyectó el Partenón en el 446 a.C., trabajó dentro de los límites del muy bien definido orden dórico de arquitectura. El Partenón, el Templo de la Doncella, es indiscutiblemente uno de los más bellos edificios del mundo, probablemente el más magnífico artefacto del mundo. A pesar de estar dedicado a la divina Atenea es, para mí, la suprema afirmación del humanismo, de lo que el científico Humphry Davy llamó "los brillantes pero irreales sueños del hombre que tratan sobre la infinita incapacidad de perfección del hombre". Además, fue construido en el período álgido del poder y de la gloria de Atenas y nos habla de la ciudad de la Doncella:

*Rica y renombrada y coronada de violetas,
Atenas es la envidia de las naciones*

Némesis, por supuesto, esperaba en un rincón, de forma muy parecida a como lo hizo en 1914. Cuando estaba recién hecho, con todo su mármol blanco, pintado de rojo y azul y sus broncees dorados, el Partenón debía parecer un poco vulgar, como algunas cosas de Kipling. Pero ¿no es el gran arte siempre un poco vulgar? Si el Partenón es un monumento del humanismo, creo que algunos de los templos dóricos primitivos, como los de Paëstum, expresan un conmovedor sentimiento religioso. Al contrario, el templo de Efaistos de Atenas, creo, conmueve muy poco, excepto por un ligero tufo a mercantilismo, como el Ayuntamiento de Birmingham. Sin embargo, estos efectos tan diferentes fueron producidos por arquitectos trabajando dentro de los límites del mismo rígido lenguaje.

Como ocurre siempre con el gran arte, hay muchas formas de interpretar el Partenón. Lo que está fuera de duda es la magnitud de este logro. Pero ¿cómo lo consiguió Ictino, trabajando dentro de los límites de una estricta convención estilística? Naturalmente, sólo un hombre conoce en realidad la respuesta: el propio Ictino; escribió un libro sobre ello, pero se ha perdido. Podemos, sin embargo, hacer unas observaciones analíticas algo toscas.

En el gate a vapor tradicional, la gracia y la majestad están producidas por la extrema delicadeza, sutileza y armonía de las curvas del casco y por la elegancia de su perfil, por la exacta y exquisita posición de sus mástiles, sus conductos de ventilación y su superestructura (lámina 22). *Mutatis mutandis*, es lo mismo que la exacta y exquisita colocación de las palabras de la creación literaria. El diseño de barcos sólo difiere de la creación poética en su contenido simbólico. Por tanto, volviendo al estilo dórico, lo que es importante es la delicadeza y el cuidado en los detalles. Aunque parece rectangular, prácticamente no existen líneas rectas en el Partenón, y pocas son realmente paralelas. Las setenta y dos columnas están inclinadas unas hacia las otras de forma que, si crecieran, se encontrarían todas en un punto del cielo, ocho kilómetros más arriba. La mirada, que espera encontrar sólo una estructura en forma de caja, está engañada y seducida por la sucesión de una sutileza tras otra. Como una mujer inteligente, el Partenón influye en nosotros y nos seduce, aunque no nos demos cuenta de cómo lo ha hecho, o ni siquiera qué es lo que está ocurriendo (lámina 23).

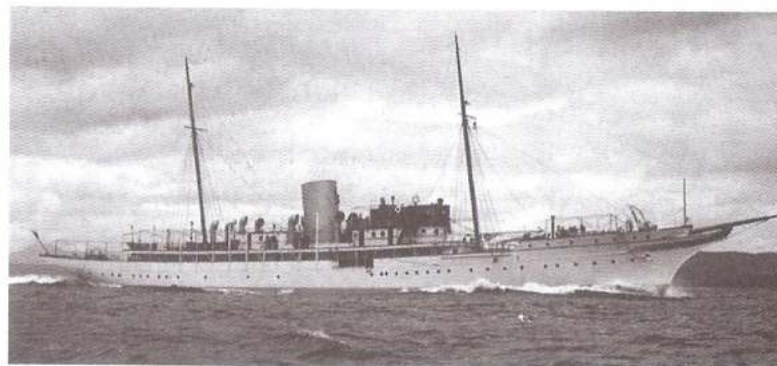


Lámina 22. La forma clásica del gate a vapor diseñada por George Lennox Watson es una de las más bellas configuraciones que ha existido para un barco. Pero es enormemente poco funcional. Las formas extremas del casco y especialmente la proa y su mastelero corresponden a un barco de vela.



Lámina 23. Ninguna fotografía puede hacer justicia al Partenón, pero esta imagen de la esquina suroeste puede dar una ligera idea. (Nótese que el dintel de la derecha está agrietado; por esta razón se han triplicado los arquivates.)

Pero, ¿qué tiene que ver todo esto con las tensiones?. En cierto sentido, mucho; en otro muy poco. Ya en el siglo XVII Fénelon observó que la arquitectura clásica debe su efecto al hecho de que parece más pesada de lo que es en realidad; el gótico, al hecho de que parece más ligera de lo que es. En este sentido, no parece que exista ninguna ventaja estética en la honestidad funcionalista, en aparentar ser tan pesado como realmente se es.

Los órdenes clásicos, especialmente el dórico, parecen casi tambalearse bajo su propio peso. De hecho las columnas soportan muy poca carga, pero la curvatura o "éntasis" que se les ha dado producen el efecto de una especie de fenómeno debido al coeficiente de Poisson para convencerlos de que están aplastándose bajo las tensiones de compresión. El efecto de aplastamiento se lleva más allá mediante la forma curvada, en forma de almohadilla de los capiteles o *china* que transmiten la carga de compresión de los dinteles a la parte superior del fuste. El efecto de peso se acentúa aún más por el grueso excesivo de los arquivoltas.

Aunque la arquitectura clásica maneja nuestras emociones, al menos en parte por el sentido subjetivo de la tensión, su belleza tiene poco o nada que ver con las ideas modernas de eficacia estructural, en el sentido de la "silla cutre". Todos estos edificios son, de hecho, totalmente ineficaces. Las tensiones de compresión eran absurdamente bajas, mientras que las tensiones de tracción eran excesivamente altas, a menudo peligrosamente altas (capítulo 9). Las cubiertas de los edificios clásicos sólo pueden ser descritas como un galimatías estructural. Pero nada está equivocado en casi todos ellos desde el punto de vista estético.

Cuando pasamos a examinar la arquitectura gótica, las tensiones de compresión en la fábrica son, como norma, bastante más altas que las de los edificios clásicos, y la estructura en conjunto generalmente más estable, a pesar de la aérea ligereza de su apariencia. El efecto de ligereza está, sin embargo, conseguido en parte, por la utilización de arcos apuntados, que, de nuevo, son ineficaces. Estas estructuras góticas son, para la funcionalmente moderna, excesivamente complicadas. Los verdaderos héroes de la catedrales góticas parecen ser las estatuas, cuyo peso, subido encima de los pináculos y los arbotantes, mantiene estable la línea de presiones (capítulo 6).

Fueran o no los edificios antiguos estructuralmente "ineficaces", parece que la mirada exige algún sentido subjetivo de la tensión para encontrar placer al contemplar una estructura. En muchos edificios modernos la estructura sustentante, que es a menudo de hormigón armado, está escondida dentro del edificio. El observador puede ver sólo un muro cortina o un "aplacado" de fino ladrillo o cristal que es evidentemente incapaz de soportar ningún tipo de carga. No creo que sea el único en encontrar estos edificios desagradables de contemplar y a menudo directamente feos.

Sin embargo, aun suponiendo que tenemos una estructura cuyo significado como soporte sea claramente visible, y que sea a la vez altamente "eficaz" en el sentido moderno, ¿qué aspecto debemos esperar que tenga? Claramente, es éste un tema sobre el que se puede discutir largamente. Sin embargo, a juzgar por las estructuras que se han empleado para aterrizar en la Luna —en las que se ha ahorrado peso sin tener en cuenta el coste, llevando hasta el límite la "silla cutre" — la respuesta parece ser: "Horriblemente feo".

Sobre equimorfos, falsificaciones y ornamentos

Los edificios más antiguos que han sobrevivido en Grecia son los micénicos, que datan quizá de algún tiempo antes del 1500 a.C. Estos edificios están contruidos de piedra y parecen haber sido deliberada e inteligentemente proyectados como estructuras adaptadas a las características de esos materiales. Los micénicos eran perfectamente conscientes, por ejemplo, del peligro que suponía una tracción excesivamente alta en los dinteles de piedra, y llevaron a cabo las formas constructivas adecuadas para liberar de las cargas que producían flexiones a los dinteles de piedra, como se puede observar en la Puerta de los Leones de Micenas (lámina 24). Hasta aquí, la arquitectura micénica puede ser descrita como "estructuralmente funcional".

Cuando colapsó la civilización micénica, alrededor del 1400 a.C., los griegos volvieron a una edad oscura e iletrada, de la que no ha sobrevivido ningún edificio de importancia. Sin duda la gente vivió, y adoró a sus dioses, en chozas de madera de algún tipo. Cuando la arquitectura

Lámina 24. A diferencia de los griegos clásicos de mil años después, los griegos micénicos (hacia 1500 a. C.) proyectaron sus edificios teniendo en cuenta que la piedra tiene baja resistencia a tracción. El dintel de la Puerta de los Leones en Micenas tiene un bloque de piedra triangular que le alivia de las cargas que producen tracción. El arquitrabe es monolítico y soporta tensiones muy bajas.



de madera, mezcladas con algunas de piedra más recientes.

La arquitectura dórica es por tanto "adintelada", o arquitectura de vigas, basada en la construcción de madera; y aunque los templos tuviesen que ser construidos, *ex novo*, totalmente de piedra, los arquitectos continuaron adhiriéndose a las formas y proporciones que eran adecuadas para la madera. No sólo usaron vigas de débil piedra en lugar de dinteles de madera, los arquitectos clásicos del refinado siglo V llegaron a molestarse en copiar en mármol toda clase de detalles constructivos irrelevantes, como los extremos de los clavos de madera que habían alguna vez mantenido los edificios de madera trabados.

El resultado "debería" haber sido ridículo, pero no lo era; fue gloriosa y triunfalmente un éxito y ha servido de modelo al mundo civilizado, con interrupciones, durante dos mil años. Las supervivencias de esta clase se conocen como "equimorfos" (de igual forma), y de una forma u otra se

representativa empezó a revivir en la primera época arcaica, quizá alrededor del 800 a.C., los primeros templos fueron construidos de madera, como las iglesias de Nueva Inglaterra.

Naturalmente, no ha sobrevivido ninguno de los templos originales. Sin embargo, parece que la transición entre la madera y la piedra fue un proceso gradual, a medida que escaseaba la madera, las piezas estropeadas de madera eran reemplazadas por copias en piedra. Pausanias habla de un templo que todavía existía en Olimpia en el siglo II después de Cristo en el que continuaban manteniéndose algunas columnas

encuentran con bastante frecuencia en la técnica. Uno de estos casos es la supervivencia de la textura de la madera en las superficies de los muebles y los revestimientos de plástico.

Aunque sea contrario a toda la ética de la escuela funcionalista y del pensamiento estético de la ingeniería, los equimorfos no tienen necesariamente que ser grises y vulgares. En la actualidad, por supuesto, lo son a menudo; pero esto se debe a su ejecución deficiente, no a que exista algo esencialmente equivocado en la idea.

El desarrollo del yate de vapor de Watson es un espléndido ejemplo del éxito de un equimorfo. La forma clásica de los yates de vapor grandes fue desarrollada en la época victoriana tardía por el más grande de todos los constructores de yates, G. L. Watson (que dejó escrito para su epitafio "Justicia para la línea y equidad para la plomada"). En sus barcos totalmente propulsados por vapor Watson retuvo no sólo la graciosa proa tipo "clipper" de un barco de vela, sino también el ahora falto de función mastelero de proa. El resultado es una de las formas marineras más bellas que jamás se han realizado (lámina 22).

Si esto es así, ¿qué podemos pensar de la "honradez" en el diseño? La honradez me lleva a decir "no mucho". Si los equimorfos son admisibles en los templos griegos y en los yates de vapor, ¿qué podemos pensar de la "falsificación" total? ¿Existe alguna razón por la que no podemos disfrazar los puentes colgantes de castillo medievales, hacer automóviles que parezcan diligencias, o tejas que parezcan loros?

Personalmente estoy bastante a favor. Después de todo, los resultados difícilmente pueden tener apariencia peor o más deprimente que los del funcionalismo moderno, y pueden ser mucho más divertidos. ¿Qué hay de malo en los edificios "neogóticos" del siglo XVIII? Los mejores son tremendamente divertidos y perfectamente adorables. Horace Walpole no estaba loco, y el Pabellón de Brighton es una delicia.

Los hay que gimen con el "ornamento sin sentido", pero la frase seguramente es una contradicción entre los términos, porque ningún ornamento puede no tener sentido, aunque su sentido sea algo espantoso. Si el crítico desea decir "ornamento que no es adecuado o no tiene rela-

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

ción con su contexto", está bien; pero *todo* ornamento tiene algún tipo de efecto. Me parece que lo que queremos es más, no menos ornamento. En realidad, más bien parece que tememos expresarnos con el ornamento. No sabemos cómo manejarlo, y tememos que queden al desnudo nuestras mediocres y pequeñas almas. Los canteros medievales no tenían ninguna de esas inhibiciones, y probablemente eran por ello psicológicamente más sanos.

¿No es acaso honrado pedir al técnico, no sólo producir artefactos que funcionen, sino también producir belleza, aun en la calle, y, sobre todo, producir *diversión*? De otro modo la técnica se morirá de aburrimiento. Tengamos grandes cantidades de ornamentos. Tengamos mascarones de proa en los barcos, rosetas doradas en las vigas de los puentes, estatuas en los edificios, mantones en las mujeres, y, por todas partes, montones y montones de banderas. Ya que hemos creado un almacén lleno de nuestros artefactos, coches, neveras, receptores y Dios sabe qué, sentémonos a pensar cuánto nos podemos divertir buscando una decoración nueva para ellos.

Postdata (1980). Mientras escribía este capítulo me ha venido a la cabeza un dicho de Henry James: "¿Qué es el carácter sino la conclusión de un incidente? ¿Qué es el incidente sino la ilustración de un carácter?" Es una pena que Henry James fuese tan despectivo con la técnica, podía haber contribuido tanto a ella...

Apéndices

APÉNDICE 1

Manuales y fórmulas

A lo largo de los últimos años los teóricos de la elasticidad han analizado las tensiones y deformaciones en estructuras de casi todos los tipos concebibles cuando están sometidos a casi cualquier tipo y configuración de carga. Todo esto está muy bien, pero normalmente los resultados, tal y como están publicados por ellos, son demasiado matemáticos y complicados para poder usarlos directamente por seres humanos ordinarios que tienen prisa en calcular algo bastante sencillo.

Afortunadamente, una gran parte de esta información ha sido reducida a una serie de casos o ejemplos esenciales cuya solución puede ser expresada por una sencilla fórmula. Fórmulas de este tipo, que pueden cubrir los casos estructurales más usuales, se pueden encontrar en manuales, como *Formulas for Stress and Strain* (MacGraw-Hill) de R. J. Roark. Estas fórmulas pueden ser utilizadas por personas como usted y como yo equipados

con poco más que sentido común, un conocimiento elemental de álgebra y lo que contiene el capítulo 3. Unas pocas de estas fórmulas se dan en los Apéndices 2 y 3 que aparecen a continuación.

Si se usan con cuidado, estas fórmulas pueden llegar a ser realmente útiles y realmente forman parte del equipo de trabajo de la mayoría de los ingenieros proyectistas y delineantes. No existe la más leve necesidad de avergonzarse por usarlas; de hecho, las usamos todos. Pero *deben* ser usadas con precaución.

1. Asegurarse de que realmente entiende de qué se trata la fórmula.
2. Asegurarse de que es de aplicación a su caso particular.
3. Recuerde, recuerde, recuerde, que estas fórmulas no tienen en cuenta las concentraciones de tensiones y otras condiciones locales.

Después de esto, sustituya las cargas y dimensiones apropiadas en la fórmula, asegurándose de que las unidades son consistentes y de que las cifras están bien. Después haga un poco de aritmética elemental y aparecerá un número representando una tensión o una deformación.

A continuación observe ese número con un ojo aparatosamente suspicaz y piense si *parece* y *siente* que es correcto. En cualquier caso mejor revise otra vez las operaciones aritméticas. ¿Seguro que no se le ha caído un dos?

Naturalmente, ni las matemáticas ni las fórmulas de los manuales pueden "calcular" una estructura por nosotros. Tenemos que calcularlo nosotros mismos a la luz de toda la experiencia, sabiduría e intuición que podamos poseer; una vez realizados los cálculos debemos analizar el diseño obtenido por nosotros, y averiguar, por lo menos aproximadamente, qué tensiones y deformaciones podía esperarse que aparecieran.

Puede describirse como sigue la práctica del proceso del diseño y cálculo. Primero, se definen las cargas máximas que deben ser soportadas por la estructura, y el valor admisible de

sus deformaciones. Las dos están fijadas habitualmente por las normas vigentes, pero, cuando no es el caso, pueden no ser particularmente fáciles de definir. A esta clase de cosas se les llama estimaciones, y en caso de duda es claramente mejor equivocarse del lado de la seguridad, aunque, como hemos visto, puede ser muy posible ir demasiado lejos y correr peligro al colocar demasiado peso en los sitios equivocados.

Cuando las condiciones de carga han sido definidas se suele hacer, a escala, un croquis tosco —algunos proyectistas usan papel milimetrado en sus croquis preliminares— y entonces se puede aplicar la fórmula apropiada para ver qué clase de tensiones o deformaciones pueden aparecer. El primer tiro puede ser demasiado largo o demasiado corto, por lo que debemos modificar nuestros croquis hasta que todo parezca estar bien.

Una vez hecho esto, podemos pasar "a limpio" los dibujos para que el objeto pueda ser fabricado. El dibujo técnico exactamente realizado es muy necesario para fabricar componentes con procedimientos industriales, pero son laboriosos de hacer y pueden no ser nece-

sarios en trabajos sencillos o de aficionados. En cualquier encargo de naturaleza comercial o potencialmente peligrosa, sin embargo, mi experiencia me dice que una oficina de proyectos puede quedar bastante mal en los tribunales si el único "proyecto" que pueden enseñar es un dibujo en la parte trasera de un sobre.

Una vez haya llegado a conseguir un plano de trabajo, si la estructura propuesta es importante, lo siguiente que hay que hacer, y hacerlo es muy correcto y adecuado, es preo-

ocuparse por el proyecto angustiosamente. Cuando intervine en la introducción de componentes plásticos en los aviones solía quedarme despierto noche tras noche preocupándome de ellos, y atribuyo el hecho de que ninguno de estos componentes dio problemas, casi enteramente, a los benéficos efectos de la preocupación. Lo que produce accidentes es la confianza, y la preocupación es lo que los evita. Por lo tanto, repase las sumas no una o dos veces sino una y otra y otra vez.

APÉNDICE 2

Teoría de la flexión

La fórmula básica de la tensión S a un punto P distante y de la fibra neutra de la viga es:

$$\frac{S}{y} = \frac{M}{I} = \frac{E}{R}$$

por lo tanto $S = \frac{M_y}{I} \cdot R$

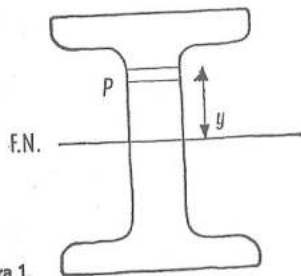


Figura 1.

donde:

S = tensión de tracción o compresión (N/m^2 , kg/cm^2 , etc.)

y = distancia a la fibra neutra (metros o centímetros)

I = momento de inercia de la sección desde la fibra neutra (m^4 o cm^4)

E = Módulo de Young (N/m^2 , kg/cm^2 , etc.)

R = radio de curvatura de la deformada en la sección calculada cuando está sometida a un momento flector M (M en metro \times newton, $M \times kg$, etc.).

Posición de la fibra neutra

La fibra neutra (F.N.) pasa siempre por el centro de gravedad de la sección. En secciones simétricas como rectángulos, tubos, secciones en doble T etc., el centro de gravedad está "en medio" o en el centro de simetría. En otras secciones, debe ser calculado con métodos matemáticos. En algunas secciones asimétricas sencillas (por ejemplo, carriles de tren) se puede definir el centro de gravedad con bastante aproximación equilibrando una sección de cartón sostenida por una aguja. En estruc-

turas más elaboradas, la posición de la fibra neutra debe realmente ser calculada mediante pura aritmética.

"I", momento de inercia de una sección

Al producto de las áreas de una sección por sus distancias a la fibra neutra elevadas al cuadrado se le llama "momento de inercia".

Por tanto, si una parte de la sección tiene un área A , y su centro de gravedad está situado a una distancia "y" de la fibra neutra, el momento de inercia de esa parte de la sección será: $A \cdot y^2$.

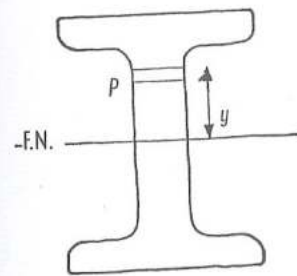


Figura 2.

APÉNDICE 2. TEORÍA DE LA FLEXIÓN

El momento de inercia total de todas las áreas que forman la sección será la *suma* de los momentos de inercia parciales de todas las áreas, es decir:

$$I = \sum_{int.} A \cdot y^2$$

Las secciones irregulares deben ser calculadas por aritmética o por la "regla de los trapecios Simpson".

En secciones simétricas sencillas: En un rectángulo:

$$I = \frac{bd^3}{12}$$

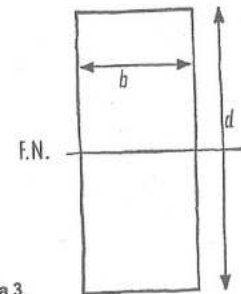


Figura 3.

En un círculo:

$$I = \frac{\pi r^3}{4}$$

Por lo tanto, las secciones sencillas en cajón o las secciones en doble T y los tubos huecos pueden calcularse mediante la sustracción de momentos de inercia parciales.

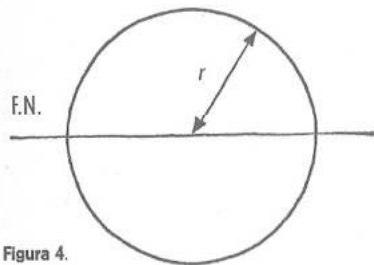


Figura 4.

En un tubo circular de pared delgada de espesor t , sin embargo puede utilizarse:

$$I = \pi r^3 t$$

Los momentos de inercia de muchas secciones normalizadas pueden encontrarse en los prontuarios.

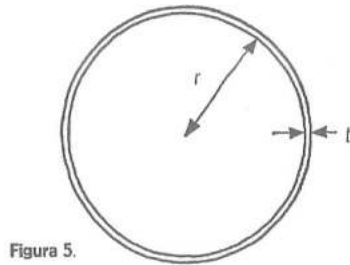


Figura 5.

Radio de giro "i"

En algunos casos, es útil conocer el valor del llamado "radio de giro" de la sección de una viga: es decir, la distancia a la fibra neutra del centro de gravedad de un área igual a la de la sección que produzca el mismo momento de inercia que la sección. Es decir:

$$I = A \cdot i^2$$

Donde:

I = momento de inercia de la sección

A = área total de la sección

i = radio de giro

En un rectángulo (véase más arriba) $i = 0,289 d$

En un círculo (véase más arriba) $i = 0,50 r$

En un tubo circular de pared delgada $i = 0,707 r$

Algunos casos básicos de vigas

Vigas en voladizo

1. Carga puntual P en el borde.

Esfuerzo a una distancia x del borde de la viga:

$$M = P \cdot x \quad M_{\max} = P \cdot L \text{ en } B$$

La deformación en x es

$$y = \frac{1}{6} \frac{P}{EI} (x^3 + 3L^2x + 2L^3)$$

Deformación max.

$$\omega_{\max} = \frac{1}{3} \frac{PL^2}{EI} \text{ en } A$$

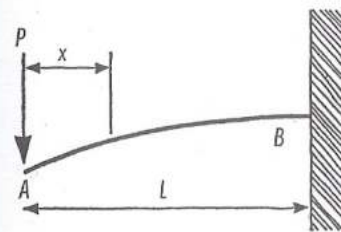


Figura 6.

2. Carga uniforme p haciendo $P = p \cdot L$:

$$M = \frac{1}{2} \frac{P}{L} x^2 \text{ en } x$$

$$M_{\max} = \frac{1}{2} PL \text{ en } B$$

la deformación en x es:

$$\omega = \frac{1}{24} \frac{P}{EI} (x^3 - 4L^2x + 3L^3)$$

la deformación máxima en la punta:

$$\omega_{\max} = \frac{1}{8} \frac{PL^2}{EI}$$

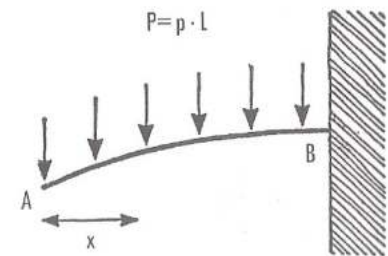


Figura 7.

Vigas apoyadas

3. Viga apoyada con carga puntual en el centro

Momento flector M en un punto x

(de A a B)

$$M = \frac{1}{2} P x$$

(de B a C)

$$M = \frac{1}{2} P (L - x)$$

$$M_{\max} = \frac{PL}{4} \text{ en B}$$

Deformación y en x

(de A a B)

$$\omega = \frac{1}{48} \frac{P}{EI} (3L^2 x - 4x^3)$$

$$\omega_{\max} = \frac{1}{48} \frac{PL^3}{EI} \text{ en B}$$

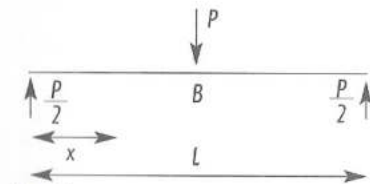


Figura 8.

4. Viga apoyada con una carga puntual actuando en un punto que no es el centro

Momento flector M en un punto x .

(de A a B)

$$M = P \frac{b}{L} x$$

(de B a C)

$$M = P \frac{a}{L} (L - x)$$

$$M_{\max} = P \frac{ab}{L} \text{ en B}$$

Max. deformación

$$\omega_{\max} = \frac{Pab}{27EI} (a+2b) \sqrt{3a(a+2b)}$$

$$x = \sqrt{\frac{1}{3} a (a+2b)}$$

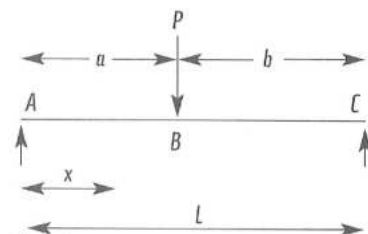


Figura 9.

5. Viga apoyada con carga uniforme.

$$P = p \cdot L$$

En el punto x :

$$M = \frac{1}{2} P \left(x - \frac{x^2}{L} \right)$$

$$M_{\max} = \frac{PL}{8} \text{ en el centro}$$

Max. deformación

$$\omega_{\max} = \frac{5}{384} \frac{PL^3}{EI} \text{ en el centro}$$

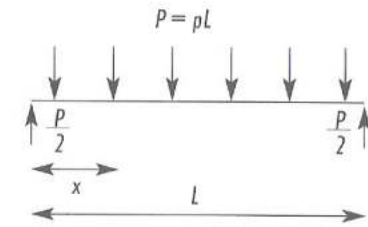


Figura 10.

Para más información, véase Roark, R.L. *Formulas for Stress and Strain*. (MacGraw-Hill).

APÉNDICE 3

Torsión

En una barra o prisma en voladizo sometida en la punta a un momento torsor T , el esfuerzo torsor se mantiene constante en toda la barra y vale T . El giro o deformación angular máxima por torsión aparece en el apoyo y tiene el valor:

$$\sigma = \frac{TL}{KG}$$

donde:

σ = giro por torsión máximo en radianes
 T = esfuerzo de torsión en metros · newton o metros · kilogramo
 L = longitud del voladizo (metros)
 G = módulo de rigidez (capítulo 12) N/m²
 K es un coeficiente que se puede encontrar en la tabla siguiente:

Sección	K	Tensión a cortadura máx. t
Cilindro macizo de radio r	$1/2 \pi r^4$	$T = \frac{2T}{\pi r^3}$ (en la superficie)
Tubo circular hueco de radio ext. r_1 e int. r_2	$1/2 \pi (r_1^4 - r_2^4)$	$t = \frac{2Tr_1}{\pi(r_1^4 - r_2^4)}$ (en la superficie exterior)
Tubo circular hueco de sección No cerrada (por ejemplo, sección en "C"). Espesor de la pared e y radio medio r	$2/3 \pi r e^3$	$t = \frac{T(6\pi r - 1,8 \cdot e)}{4\pi^2 r^2 e^2}$ (Valor constante)
Cualquier tubo de pared fina. Cerrado es espesor e de pared, perímetro S y área encerrada A	$\frac{4A^2 e}{S}$	$t = \frac{T}{2eA}$

De nuevo, se puede encontrar una información considerablemente más detallada en la obra de Roark.

APÉNDICE 4

La eficacia de columnas y pantallas bajo cargas de compresión

Una columna

Suponiendo que la columna tiene proporciones tales que puede romper por pandeo elástico (capítulo 13), la carga crítica de Euler N_{cr} , viene dada por:

$$N_{cr} = \pi^2 \frac{EI}{L^2}$$

Donde: E = módulo de Young
 I = momento de inercia de la sección
 L = longitud del pilar

Supongamos ahora que el pilar tiene una sección constante a lo largo de su longitud que puede aumentar o disminuir manteniéndose las proporciones relativas entre sus dimensiones, con lo que su tamaño es proporcional a una de sus dimensiones e , por ejemplo.

Entonces $I = A i^2 = cte \times e^4$
 Donde A = Área de la sección
 i = radio de giro (Apéndice 2)

Si hubiera n pilares, el peso total soportado, que produjera pandeo en los n pilares sería:

$$N_{cr} = \frac{n\pi^2 EI}{L^2}$$

por lo tanto:

$$I = \frac{N_{cr} L^2}{\pi^2 n E} \quad y: \quad e^2 = \sqrt{\frac{N_{cr} L^2}{\pi^2 n E}}$$

Sin embargo, el peso de las n columnas = $i = cte \cdot n \cdot e^2 \cdot L \cdot d = W$, donde d es la densidad del material.

Por tanto:

$$W = cte \cdot n \cdot L \cdot d \sqrt{\frac{L^2}{\pi^2 n E}} = cte \sqrt{n} \cdot L^2 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{N_{cr}}{E}}$$

Por lo tanto, la eficacia de la estructura es = Carga soportada / Peso de la estructura =

$$= \frac{P}{W} = cte \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\frac{\sqrt{E}}{d} \right) \left(\frac{\sqrt{N_{cr}}}{L^2} \right)$$

el parámetro

$$\left(\frac{\sqrt{N_{cr}}}{L^2}\right)$$

se conoce como "coeficiente de carga de la estructura" y depende únicamente de las dimensiones y de la carga de la estructura. El parámetro

$$\left(\frac{\sqrt[3]{E}}{d}\right)$$

se llama "criterio de eficacia estructural" y depende únicamente de las características físicas del material.

En pantallas planas

Los razonamientos anteriores se pueden aplicar a un pilar cuyo espesor varía en dos dimensiones.

El espesor de una pantalla plana sólo puede ser variado en una de las dimensiones.

Supongamos que el momento de inercia de la sección de la pantalla = $I = cte \times e^3 =$

$$\frac{N_{cr} L^2}{\pi^2 n E} = \text{para } n \text{ pantallas o muros}$$

Entonces:

$$e^3 = \frac{N_{cr} L^2}{\pi^2 n E} \text{cte}$$

Peso de n pantallas por unidad de ancho = W

$$\begin{aligned} W &= n \cdot e \cdot d \cdot L \cdot cte = n \cdot d \cdot L^2 \sqrt{\frac{N_{cr} L^2}{\pi^2 n E}} \text{cte} = \\ &= cte \cdot n^{2/3} \left(\frac{d}{\sqrt[3]{E}}\right) L^{5/3} \cdot \sqrt[3]{N_{cr}} \end{aligned}$$

Por lo tanto. Eficacia =

$$\text{Eficacia} = \frac{P}{W} = cte \cdot \frac{1}{n^{2/3}} \left(\frac{\sqrt[3]{E}}{d}\right) \left(\frac{N_{cr}^{2/3}}{L^{5/3}}\right)$$

De nuevo:

$$\left(\frac{N_{cr}^{2/3}}{L^{5/3}}\right)$$

es el "coeficiente de carga de la estructura".

Y $\frac{\sqrt[3]{E}}{d}$ es el "criterio de eficacia del material".

ALGUNAS SUGERENCIAS PARA AMPLIAR LOS TEMAS ESTUDIADOS

Después de todo, la forma mejor de aprender estructuras es a través de la observación y la experiencia práctica: esto es, estudiando las estructuras con mirada observadora, construyéndolas y posteriormente rompiéndolas. Por supuesto, son bastante limitadas las oportunidades que tiene el aficionado para construir aviones o puentes reales: pero no os avergoncéis de jugar con un mecano, o aun con los viejos bloques de los juegos de construcciones. Estas cosas, por cierto, son mucho más instructivas que los juguetes de plástico modernos en los que las piezas se enganchan entre sí de forma tan ingeniosa. Cuando tengáis que construir vuestro puente, cargadlo de forma realista y ved cómo rompe. Una vez hecho esto, los muy áridos libros de estructuras os pueden parecer bastante más interesantes.

Aunque no haya mucho campo libre para el constructor de puentes aficionado, siem-

pre me ha parecido que queda mucho por descubrir en biomecánica. Ésta es una materia nueva de la que se conoce poco, por los ingenieros y por los biólogos. Es muy posible que aquí encuentre una oportunidad el aficionado emprendedor para hacerse un nombre, aunque todavía hay muy pocos libros buenos de biomecánica, existe un número enorme de éstos sobre materiales y elasticidad. Una selección pequeña, y debo confesar que arbitraria, se da a continuación.

Bibliografía

Libros sobre materiales

The Mechanical Properties of Matter, de Sir Alan Cottrell. Ed. John Wiley.

Metals in the Service of Man, de W. Alexander y A. Street, Penguin Books.

Engineering Metals and their Alloys, de C.H. Samans. Macmillan. Nueva York, 1953.

ESTRUCTURAS O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN

Materials in Industry, de J. Patton.
Prentice - Hall, 1968

The Structure and Properties of Materials, Vol. 3 "Mechanical Behaviour", de H. W. Haydon, W. G. Moffatt y J. Wulff.
John Wiley, 1965.

Fibre - Reinforced Materials Technology, de N. J. Parratt. Van Nostrand, 1872.

Materials Science, de J. C. Anderson y K. D. Leaver. Nelson, 1969.

Elasticidad y teoría de las estructuras

Elements of the Mechanics of Materials (2ª ed.), de G. A. Olsen. Prentice-Hall, 1966.

The Strength of Materials, de Peter Black. Pergamon Press, 1966.

History of the Strength of Materials, de S.P. Timoshenko, McGraw - Hill, 1953.

Razón y Ser de los Tipos Estructurales, de E. Torroja. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.

Structure, de H. Werner Rosenthal.
Macmillan, 1972.

The Safety of Structures, de Sir Alfred Pugsley. Edward Arnold, 1966.

The Analysis of Engineering Structures, de A. J. S. Pippard y Sir Jhon Baker. Edward Arnold.

Structural Concrete, de R.P. Johnson.
McGraw - Hill, 1967.

Beams and Framed Structures, de Jacques Heyman. Pergamon Press, 1964.

Principles of Soil Mechanics, de R. F. Scott. Addison-Wesley, 1965.

The Steel Skelaton, (2. Vols.) de Sir John Baker, M.R. Horne y J. Heyman. Cambridge University Press, 1960-65.

Biomecánica

On Growth and Form, de Sir D'Arcy Thompson (edición abreviada) Cambridge University Press, 1961.

Biomechanics, de R. Mc.Neil Alexander.
Chapman and Hall, 1975.

Mechanical Design of Organisms, de S. A. Waincoright, W. D. Biggs, J. D. Currey y J. M. Gosline. Edward Arnold, 1976.

Arcos (armas)

Longbow, de Robert Hardy. Patrick Stephens, 1976.

ALGUNAS SUGERENCIAS PARA AMPLIAR LOS TEMAS ESTUDIADOS

Materiales de construcción

Brickwork, de J. Smith. Macmillan, 1972.

A History of Building Materials, de Norman Davey. Phoenix House, 1961.

Materials of Construction, de R.C. Smith.
McGraw-Hill, 1966.

Stone for Building, de H. O'Neill.
Heinemann, 1965.

Commercial Timbers (3ª edición), de F. H. Titmuss. Technical Press, 1965.

Arquitectura

Existen varios miles de libros de arquitectura. He elegido dos, casi al azar.

Panorama de la Arquitectura Europea, de Nikolaus Peusner. Buenos Aires.

The Appearance of Bridges (Ministry of Transport) H.M.S.O. 1964.

CALAMAR EDICIONES

C/ Gran Vía, 69. Oficina 412 • Tel: 91 548 77 47 • Fax: 91 548 77 48
E-mail: info@calamarediciones.com • www.calamarediciones.com

Este libro es un manual que explica, con un estilo ameno y desenfadado, la importancia y las propiedades de los distintos tipos de estructuras. Prescindiendo del aparato matemático, se describen con sencillez y precisión los conceptos estructurales básicos.

Arquitectos, ingenieros y estudiantes entenderán sin dificultad por qué los griegos quitaban las ruedas a sus carros por las noches, por qué tenemos lumbago, por qué los pájaros tienen plumas, cuánto hay de ciencia en la costura de un vestido; así como la resistencia de los puentes, los barcos y los aviones. El autor explica todo esto, demostrando cómo la necesidad de ser fuerte y soportar distintas cargas ha influido en el desarrollo de los seres vivos, incluido el hombre; y describe, con un lenguaje claro e informativo, los elementos estructurales que se dan en la naturaleza, la tecnología y nuestra vida diaria, desde un punto de vista absolutamente actual.

calamar ediciones



J. E. GORDON **ESTRUCTURAS** O POR QUÉ LAS COSAS NO SE CAEN