



MATERIALES PARA INGENIERÍA 1

Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño

Michael F. Ashby \ David R. H. Jones

EDITORIAL REVERTÉ

CONSTANTES FÍSICAS (SI)

Cero absoluto de temperatura	-273,2 °C
Número de Avogadro, N_A	$6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Base de los logaritmos naturales, e	2,718
Constante de Boltzmann, k	$1,381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
Carga del electrón	$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
Constante de Faraday, F	$9,649 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$
Constante de los gases, R	$8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Momento magnético del electrón	$9,274 \times 10^{-24} \text{ A m}^{-2}$
Permisividad en el vacío, ϵ_0	$8,854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
Constante de Planck, h	$6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}$
Masa en reposo del electrón	$9,110 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masa en reposo del neutrón	$1,675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Masa en reposo del protón	$1,673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Unidad atómica de masa unificada*	$1,661 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Velocidad de la luz en el vacío	$2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Volumen de un mol de gas perfecto en condiciones normales (a 0 °C y una atmósfera de presión o $1,013 \times 10^5 \text{ N m}^{-2}$)	$22,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$ aprox.

CONVERSIÓN DE UNIDADES - GENERAL

Ángulo	1 rad	= 57,30°
Divisa	UK £1	~ US \$1,7 en 2005
Densidad	1 g cm ⁻³	= 1 Mg m ⁻³
Coefficiente de difusión	1 cm ² s ⁻¹	= 10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
Viscosidad dinámica	1 P	= 0,1 N m ⁻² s
Fuerza	1 kgf 1 lbf 1 dina	= 9,807 N = 4,448 N = 10 ⁻⁵ N
Longitud	1 milla 1 pie 1 pulgada 1 Å	= 1,609 km = 304,8 mm = 25,4 mm = 0,1 nm
Masa	1 tonelada larga (<i>long ton</i>) 1 tonelada métrica (Tm) 1 tonelada corta (<i>short ton</i>) 1 flask (Hg)** 1 libra (masa) 1 onza, oz (<i>troy</i>)*** 1 onza, oz (<i>avoirdupois</i>)*** 1 carat****	= 1,017 Mg = 1,000 Mg = 0,908 Mg = 34,50 kg = 0,454 kg = 31,103 g = 28,35 g = 0,20 g
Intensidad de tensiones	1 ksi √in	= 1,10 MN m ^{-3/2}
Energía superficial	1 erg cm ⁻²	= 1 mJ m ⁻²
Temperatura	1 °F 32 °F equivale a 0°C	= 0,556 K
Volumen	1 galón UK 1 galón US 1 litro	= 4,546 × 10 ⁻³ m ³ = 3,785 × 10 ⁻³ m ³ = 10 ⁻³ m ³

* N. del T. No es una unidad del SI.

** N. del T. Antigua unidad de peso empleada para medir mercurio líquido.

*** N. del T. *Troy* y *Avoirdupois*, son sistemas históricos ingleses de unidades de masa. *Troy* se sigue empleando para pesar metales preciosos. *Avoirdupois* es el sistema habitual en Estados Unidos.

**** N. del T. El carat es una unidad de masa empleada para medir piedras preciosas.

MATERIALES PARA INGENIERÍA 1

Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño

Michael F. Ashby \ David R. H. Jones

Department of Engineering, University of Cambridge, UK



EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

Título de la obra original:

Engineering Materials I. An Introduction to Properties, Applications and Design

Edición original en lengua inglesa:

Elsevier Butterworth-Heinemann

Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 30 Corporate Drive, Burlington, MA 01803

Copyright © 2005 *All rights reserved.*

Edición en papel:

© Editorial Reverté, S. A., 2008

ISBN: 978-84-291-7255-3 Volumen 1

ISBN: 978-84-291-7257-7 Obra completa

Edición e-book (PDF):

© Editorial Reverté, S. A., 2019

ISBN: 978-84-291-9432-6

Versión española traducida por:

Juan Baselga Llidó* (*Coordinador*)

Dr. Ciencias Químicas

Julio Bravo de Pedro**

Dr. Ciencias Químicas

Javier González Benito**

Dr. Ciencias Químicas

Elena Gordo Odériz**

Dr. Ingeniero de Minas

Catedráticos (*) y Profesores Titulares (**) de Universidad del Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos III de Madrid

MAQUETACIÓN: Reverté-Aguilar, S. L.

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15. Local B

08029 Barcelona. ESPAÑA

Tel: (34) 93 419 33 36

reverte@reverte.com

www.reverte.com

Belén Levenfeld Laredo**

Dr. Ciencias Químicas

José Manuel Torralba Castelló*

Dr. Ingeniero de Minas y Dr. Ingeniero de Armamento y Material

Alejandro Várez Álvarez**

Dr. Ciencias Químicas

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, queda rigurosamente prohibida, salvo excepción prevista en la ley. Asimismo queda prohibida la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo públicos, la comunicación pública y la transformación de cualquier parte de esta publicación (incluido el diseño de la cubierta) sin la previa autorización de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto a los citados derechos.

Índice

<i>Introducción general</i>	xi
1. Los materiales de ingeniería y sus propiedades	1
1.1 Introducción	2
1.2 Ejemplos de selección de materiales	4
A. Precio y disponibilidad	15
2. El precio y la disponibilidad de los materiales	17
2.1 Introducción	18
2.2 Datos sobre los precios de los materiales	18
2.3 Utilización de los materiales	20
2.4 Materiales ubicuos	21
2.5 Crecimiento exponencial del consumo de los materiales	22
2.6 Disponibilidad de recursos	23
2.7 El futuro	25
2.8 Conclusión	26
B. Los módulos de elasticidad	29
3. Los módulos de elasticidad	31
3.1 Introducción	32
3.2 Definición de tensión	32
3.3 Definición de deformación	35
3.4 Ley de Hooke	36
3.5 Medida del módulo de Young	37
3.6 Valores del módulo de Young	39
4. Enlace atómico	43
4.1 Introducción	44
4.2 Enlaces primarios	45
4.3 Enlaces secundarios	49
4.4 Estado condensado de la materia	51
4.5 Fuerzas interatómicas	51
5. Empaquetamiento atómico en los sólidos	55
5.1 Introducción	56
5.2 Empaquetamiento de átomos en cristales	56
5.3 Estructuras compactas y energías del cristal	56

vi Índice

5.4	Cristalografía	58
5.5	Índices de los planos	60
5.6	Índices de las direcciones	61
5.7	Otras estructuras cristalinas sencillas importantes	62
5.8	Empaquetamiento de átomos en polímeros	64
5.9	Empaquetamiento de átomos en vidrios inorgánicos	65
5.10	La densidad de los sólidos	66
6.	Bases físicas del módulo de Young	73
6.1	Introducción	74
6.2	El módulo de los cristales	74
6.3	Elastómeros y temperatura de transición vítrea	76
6.4	Materiales compuestos	78
6.5	Resumen	81
7.	Casos prácticos de diseño limitado por el módulo	85
7.1	Caso práctico 1: el espejo de un telescopio, incluyendo la selección del material para minimizar la deflexión del disco por su propio peso	86
7.2	Caso práctico 2: selección de materiales para producir una viga de una rigidez dada con el mínimo peso	91
7.3	Caso práctico 3: selección de materiales para minimizar el coste de una viga de una rigidez dada	93
C.	Límite elástico, resistencia a la tracción y ductilidad	97
8.	Límite elástico, resistencia a la tracción y ductilidad	99
8.1	Introducción	100
8.2	Elasticidad lineal y no lineal; comportamiento anelástico	100
8.3	Curvas de carga-alargamiento características del comportamiento no elástico (plástico)	101
8.4	Curvas de tensión-deformación verdaderas para flujo plástico	103
8.5	Trabajo por deformación plástica	106
8.6	Ensayo de tracción	106
8.7	Datos	107
8.8	Ensayo de dureza	108
8.9	Revisión de los términos mencionados en este capítulo y algunas relaciones útiles	111
9.	Dislocaciones y deslizamiento en cristales	119
9.1	Introducción	120
9.2	Resistencia de un cristal perfecto	120
9.3	Dislocaciones en cristales	122
9.4	La fuerza que actúa sobre una dislocación	128
9.5	Otras propiedades de las dislocaciones	129

10. Métodos de endurecimiento y deformación plástica de policristales	131
10.1 Introducción	132
10.2 Mecanismos de endurecimiento	132
10.3 Endurecimiento por disolución sólida	132
10.4 Endurecimiento por precipitación y dispersión	133
10.5 Endurecimiento por trabajo en frío	135
10.6 Resistencia al deslizamiento de las dislocaciones	135
10.7 Deformación plástica en policristales	136
10.8 Consideraciones finales	139
11. Aspectos vinculados al flujo plástico	141
11.1 Introducción	142
11.2 La aparición de cedencia y el límite elástico a cizalladura, k	142
11.3 Análisis del ensayo de dureza	144
11.4 La inestabilidad plástica: estricción en cargas a tracción	145
12. Casos prácticos de diseño según el límite elástico	153
12.1 Introducción	154
12.2 Caso práctico 1. Diseño elástico: materiales para muelles	154
12.3 Caso práctico 2. Diseño plástico: materiales para una vasija a presión	159
12.4 Caso práctico 3. Plasticidad con gran deformación: laminación de metales	160
D. Fractura rápida y tenacidad	167
13. Fractura rápida y tenacidad	169
13.1 Introducción	170
13.2 Criterio energético para la fractura rápida	170
13.3 Valores de G_c y K_{Ic}	175
14. Micromecanismos de la fractura rápida	181
14.1 Introducción	182
14.2 Mecanismos de propagación de una grieta, 1: desgarro dúctil	182
14.3 Mecanismos de propagación de una grieta, 2: clivaje	184
14.4 Materiales compuestos, incluida la madera	186
14.5 Fragilidad de las aleaciones	187
15. Casos prácticos de fractura rápida	191
15.1 Introducción	192
15.2 Caso práctico 1: fractura rápida en un tanque de amoníaco	192
15.3 Caso práctico 2: explosión de una ventana de presión de polimetacrilato de metilo durante un ensayo hidrostático	195
15.4 Caso práctico 3: agrietamiento de una camisa de espuma de poliuretano en un tanque de metano líquido	198
15.5 Caso práctico 4: colapso de la barandilla de madera de una terraza	202

viii Índice

16. Probabilidad de fractura en los materiales frágiles	209
16.1 Introducción	210
16.2 Estadística de la resistencia y distribución de Weibull	212
16.3 Caso práctico: agrietamiento de la camisa de espuma de poliuretano de un tanque de metano líquido	216
E. Fallo por fatiga	221
17. Fallo por fatiga	223
17.1 Introducción	224
17.2 Comportamiento a fatiga de componentes sin grietas	224
17.3 Comportamiento a fatiga de componentes preagrietados	228
17.4 Mecanismos de fatiga	230
18. Diseño según la fatiga	237
18.1 Introducción	238
18.2 Datos de la fatiga en componentes sin grietas	238
18.3 Concentración de tensiones	239
18.4 Factor de sensibilidad a la entalla	240
18.5 Datos de la fatiga en uniones soldadas	241
18.6 Técnicas para mejorar el comportamiento a fatiga	242
18.7 Diseño para evitar ciclos a fatiga	244
18.8 Comprobación de vasijas a presión frente al agrietamiento por fatiga	246
19. Casos prácticos de diseño a fatiga	251
19.1 Introducción	252
19.2 Caso práctico 1: fatiga a alto número de ciclos de un componente no agrietado –fallo de un tubo de órgano	252
19.3 Caso práctico 2: fatiga a bajo número de ciclos de un componente no agrietado –fallo de la argolla de sujeción de un sumergible	259
19.4 Caso práctico 3: fatiga de un componente agrietado –la seguridad de la máquina Stretham	264
F. Deformación por fluencia y fractura	271
20. Fluencia y fractura por fluencia	273
20.1 Introducción	274
20.2 Ensayo de fluencia y curvas de fluencia	277
20.3 Relajación por fluencia	280
20.4 Daño por fluencia y fractura por fluencia	282
20.5 Materiales resistentes a la fluencia	283
21. Teoría cinética de la difusión	287
21.1 Introducción	288
21.2 La difusión y la ley de Fick	289

21.3	Coefficientes de difusión	293
21.4	Mecanismos de difusión	294
22.	Mecanismos de fluencia y materiales resistentes a la fluencia	299
22.1	Introducción	300
22.2	Mecanismos de fluencia: metales y cerámicos	300
22.3	Mecanismos de fluencia: polímeros	307
22.4	Selección de materiales resistentes a la fluencia	309
23.	El álabe de una turbina: un caso práctico de diseño limitado por la fluencia	311
23.1	Introducción	312
23.2	Propiedades del álabe de una turbina	313
23.3	Superaleaciones base níquel	314
23.4	Desarrollos de ingeniería: enfriamiento del álabe	318
23.5	Desarrollos futuros: metales y materiales compuestos de matriz metálica	319
23.6	Desarrollos futuros: cerámicas de alta temperatura	321
23.7	Rentabilidad	322
G.	Oxidación y corrosión	325
24.	Oxidación de los materiales	327
24.1	Introducción	328
24.2	La energía de oxidación	328
24.3	Velocidades de oxidación	329
24.4	Datos	332
24.5	Micromecanismos	332
25.	Casos prácticos de oxidación seca	337
25.1	Introducción	338
25.2	Caso práctico 1: fabricación de aleaciones inoxidables	338
25.3	Caso práctico 2: protección de álabes de turbina	339
25.4	Operaciones de unión: un apunte final	343
26.	Corrosión húmeda de los materiales	345
26.1	Introducción	346
26.2	Corrosión húmeda	346
26.3	La diferencia de potencial como fuerza impulsora de la oxidación húmeda	347
26.4	Velocidad de oxidación húmeda	350
26.5	Ataque localizado	350
27.	Casos prácticos de corrosión húmeda	357
27.1	Introducción	358
27.2	Caso práctico 1: protección de tuberías subterráneas	358
27.3	Caso práctico 2: materiales para un tejado ligero de una fábrica	360
27.4	Caso práctico 3: sistemas de escape de gases en automóviles	363

x Índice

H. Fricción, abrasión y desgaste	367
28. Fricción y desgaste	369
28.1 Introducción	370
28.2 Fricción entre materiales	370
28.3 Valores de los coeficientes de rozamiento	373
28.4 Lubricación	374
28.5 Desgaste de materiales	375
28.6 Propiedades superficiales e intrínsecas	377
29. Casos prácticos de fricción y desgaste	381
29.1 Introducción	382
29.2 Caso práctico 1: diseño de cojinetes lisos	382
29.3 Caso práctico 2: materiales para esquíes y trineos	385
29.4 Caso práctico 3: elastómeros de alta fricción	387
I. Diseñando con metales, cerámicos, polímeros y materiales compuestos	391
30. Diseño con materiales	393
30.1 Introducción	394
30.2 Metodología del diseño	396
31. Caso práctico final: materiales y energía en el diseño de coches	399
31.1 Introducción	400
31.2 Coches y energía	400
31.3 Medios para economizar la energía	400
31.4 Materiales en el coche	402
31.5 Materiales alternativos	402
31.6 Métodos de producción	408
31.7 Conclusiones	410
<i>Apéndice: Símbolos y fórmulas</i>	411
<i>Referencias</i>	419
<i>Índice</i>	421

Introducción general

Al estudiante

La innovación en ingeniería a menudo significa el uso inteligente de un nuevo material –nuevo para una aplicación determinada, pero no necesariamente nuevo (aunque sí algunas veces) en el sentido de desarrollado recientemente. Los clips de plástico y los álabes cerámicos de las turbinas representan intentos de mejorar con polímeros y con cerámicos lo que previamente se hacía con metales. Y los desastres en ingeniería con frecuencia están causados por un mal uso de los materiales. Cuando una cucharilla de plástico se comba mientras se remueve el té, o cuando un avión cae al suelo porque aparecen fisuras en su cola, se debe a que los ingenieros que los diseñaron emplearon materiales equivocados o no entendieron las propiedades de éstos. Por ello es vital que el ingeniero profesional conozca cómo se seleccionan los materiales y sepa cuál se ajusta a las demandas del diseño –demandas económicas y estéticas, así como de resistencia y durabilidad. El diseñador debe comprender las propiedades de los materiales y sus limitaciones.

Este libro presenta una amplia introducción a estas propiedades y limitaciones. No nos hace expertos en materiales, pero puede enseñarnos cómo hacer una elección sensata de un material, cómo evitar los errores que, en el pasado, han producido bochorno o tragedia, y dónde encontrar una ayuda más detallada.

En el índice se aprecia que los capítulos están organizados en *grupos*, de los que cada uno describe una clase particular de propiedades: módulo elástico, tenacidad a la fractura, resistencia a la corrosión, etcétera. Cada grupo de capítulos comienza con la *definición de la propiedad*, explicando cómo se *mide* y proporcionando los *datos* que se emplearán para resolver problemas relacionados con el diseño con materiales. Luego se pasa a la *ciencia básica* que subyace detrás de cada propiedad y se muestra cómo se puede usar este conocimiento fundamental para seleccionar los materiales con mejores propiedades. Cada grupo finaliza con un capítulo de *casos prácticos* en los que la comprensión y los datos para cada propiedad se aplican a problemas ingenieriles prácticos que atañen a los materiales.

Al final de cada capítulo hay una serie de ejemplos; cada uno de ellos se ha elegido para consolidar o desarrollar algunos aspectos específicos tratados en el texto. Mientras un capítulo determinado esté todavía fresco en la mente se debe intentar hacer los ejemplos propuestos. De esta forma estaremos seguros de dominar cada aspecto tratado.

Ningún ingeniero pretende aprender o recordar tablas y listas de valores de propiedades de los materiales, pero se *debería* intentar recordar los órdenes de magnitud de estas cantidades. Los fruteros saben que “un kilo de manzanas es aproximadamente 10 manzanas” –las pesan, pero su conocimiento les evita cometer errores tontos que les podrían costar dinero. De forma análoga, un ingeniero debería conocer que “la mayoría de los módulos de elasticidad están comprendidos entre 1 y 10^3 GN m⁻² y en torno a 10^2 GN m⁻² para los metales” –en cualquier diseño real se necesita un valor exacto, que se obtiene a partir de las especificaciones de los suministradores, pero el conocimiento de los órdenes de magnitud evita errores de unidades o cometer equivocaciones absurdas y costosas. Para ayudar en esta tarea, al final del libro se ha añadido una lista de definiciones importantes y fórmulas que se deberían conocer, o ser capaz de deducir, y un resumen de los órdenes de magnitud de las propiedades de los materiales.

Al profesor

Este libro es un curso de Materiales de Ingeniería para estudiantes de ingeniería sin conocimientos previos en la materia. Está diseñado para enlazar con las enseñanzas de diseño, mecánica y estructuras, y para satisfacer las necesidades de los estudiantes de ingeniería de un primer curso de materiales, enfatizando las aplicaciones de diseño.

El texto es conciso a propósito. Cada capítulo está diseñado para cubrir el contenido de unos 50 minutos de clase, y deja tiempo para demostraciones y gráficos. El texto ofrece casos prácticos que aplican el material de las clases precedentes. Hay ejemplos para el estudiante al final de cada capítulo.

Se ha hecho un esfuerzo para reducir el análisis matemático al nivel más sencillo posible, aunque manteniendo la comprensión física esencial y llegando a resultados que, aunque aproximados, son útiles. Pero se han evitado descripciones sencillas: la mayoría de los casos prácticos y de los ejemplos realizan análisis y utilizan datos para llegar a las soluciones numéricas de problemas reales o postulados. Este nivel de análisis, y estos datos, son similares a los que deberían emplearse en los estudios preliminares para la selección de un material o en los análisis de un diseño (o del fallo de un diseño). Es necesario indicar a los estudiantes que el siguiente paso debería requerir un *análisis mecánico más preciso y detallado* y el empleo de *datos de los suministradores de materiales o hallados en ensayos de laboratorio*. Los datos de los materiales varían de una forma notoria. Las tablas de datos aproximados, como las que se dan aquí, aunque útiles nunca deberían utilizarse en los diseños reales.

Agradecimientos

Los autores y los editores agradecen a los propietarios de los derechos de reproducción el permiso para reproducir sus fotografías en las siguientes figuras: 1.3, Rolls-Royce Ltd; 1.5, Catalina Yachts Inc; 7.1, Photo Labs, Royal Observatory, Edinburgh; 9.11, Dr Peter Southwick; 31.7, Group Lotus Ltd; 31.2 Photo credit to Brian Garland © 2004, cortesía de Volkswagen.

Recursos adicionales

Los siguientes recursos adicionales están disponibles en Internet para los profesores que adopten o recomienden este libro de texto para su uso en clase. Los detalles y el acceso a estos recursos están disponibles en <http://books.elsevier.com/manuals>

Manual del profesor

El manual con las respuestas a los ejercicios del texto principal está disponible para ser descargado.

Banco de imágenes

Para su empleo en diapositivas y presentaciones de clase está disponible un banco de imágenes descargables de las figuras del libro en versión PDF.

Seminarios *on-line* sobre ciencia de los materiales

Acompañan al libro una serie de seminarios *on-line* sobre ciencia de los materiales. Han sido desarrollados en la Universidad New South Wales (UNSW), de Australia, por Alan Crosky, Mark Hoffman, Paul Munroe y Belinda Allen, basándose en ediciones previas. Este grupo está particularmente dedicado al uso efectivo e innovador de la tecnología en la enseñanza. Se dieron cuenta del potencial del entorno *on-line* para enseñar materiales de ingeniería a sus estudiantes, y han desarrollado y utilizado estos seminarios durante varios años en la UNSW. Los resultados de este trabajo también han sido publicados y presentados extensamente.

Los seminarios se han diseñado para estudiantes de ciencia de los materiales y de otras disciplinas, como ingeniería civil o mecánica, que desean cursar Materiales como asignatura optativa o de libre configuración. Son ideales como material auxiliar para los programas de enseñanza reglada y pueden utilizarse como repaso rápido para estudiantes de cursos más avanzados de ciencia de los materiales. Una selección adecuada de los seminarios disponibles puede servir también como texto elemental o de iniciación para estudiantes de otras facultades o escuelas.

El *software* se ha desarrollado como una herramienta de autoaprendizaje por pasos; está separado en módulos de aprendizaje basados en los conceptos clave de la ciencia de materiales. Para una mayor información sobre el acceso a estos seminarios y las condiciones de su uso, visitar la página *web* <http://books.elsevier.com/manuals>

Sobre los autores de los seminarios

Alan Crosky es profesor asociado de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales en la UNSW. Sus especialidades como docente incluyen metalurgia, materiales compuestos y fractografía.

Belinda Allen es diseñadora y responsable de Material Gráfico para Educación en el Educational Development and Technology Centre, UNSW. Da soporte de producción, es consultora de la comunidad académica, y diseña y presenta talleres y recursos *online* en producción de imágenes y diseño de páginas *web*.

Mark Hoffman es profesor asociado en la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales en la UNSW. Sus especialidades docentes incluyen fractura, simulación numérica, comportamiento mecánico de materiales y gestión.

Paul Munroe ejerce como profesor en la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales y es Director de la Unidad de Microscopía Electrónica en la UNSW. Sus especialidades como docente son los mecanismos de deformación y endurecimiento de los materiales, y la caracterización cristalográfica y microestructural.

Capítulo 1

Los materiales de ingeniería y sus propiedades

Contenidos

1.1	Introducción	2
1.2	Ejemplos de selección de materiales	4

1.1 Introducción

Se dice que existen más de 50 000 materiales disponibles para el ingeniero. En el diseño de una estructura o dispositivo, ¿cómo elegirá el ingeniero entre un menú tan amplio el material más adecuado? Los errores pueden causar desastres. Durante la Segunda Guerra Mundial, un tipo de barco mercante fabricado por soldadura sufrió grandes pérdidas pero no causadas por el enemigo, sino a causa de que se partió por la mitad en el mar: la *tenacidad a la fractura* del acero, en particular la de las soldaduras 1-1, era muy pequeña. Más recientemente, tres aviones Comet se perdieron antes de que se cayera en la cuenta de que el valor de diseño de la *resistencia a la fatiga* –para los marcos de las ventanillas– era superior a la del material elegido. El lector mismo tendrá experiencias negativas a causa de un mal diseño en aparatos de plástico: sus frecuentes fallos se deben a que el que los diseñó probablemente no consideró el *bajo módulo* que tienen los polímeros. En la Tabla 1.1 se listan estas propiedades de los materiales junto con otras que debe considerar el diseñador a la hora de elegir un material. Muchas de estas propiedades seguramente serán familiares al lector y se presentarán con algunos ejemplos en este capítulo. Son la base de este primer curso de materiales.

Tabla 1.1 Tipos de propiedades.

Económicas	Precio y disponibilidad Reciclabilidad
Físicas	Densidad
Mecánicas	Módulos Límite elástico y resistencia a la tracción Dureza Tenacidad a la fractura Resistencia a la fatiga Resistencia a la fluencia Amortiguamiento de las vibraciones
Térmicas	Conductividad térmica Calor específico Coeficiente de expansión térmica
Eléctricas y magnéticas	Resistividad Constante dieléctrica Permeabilidad magnética
Interacción con el entorno	Oxidación Corrosión Desgaste
Producción	Facilidad de fabricación Unión Acabado
Estéticas	Color Textura Aspecto

En este primer curso también trataremos los distintos *tipos de materiales* que se muestran en la Tabla 1.2 y en la Figura 1.1. La mayoría de los componentes de ingeniería están fabricados con *metales y aleaciones*, más que con ningún otro tipo de material. Pero, de forma creciente, los *polímeros* son cada vez más atractivos para el diseñador a causa de que ofrecen una buena combinación de propiedades. Y basta con leer un periódico para cerciorarse de que las *cerámicas*, aún en desarrollo en el mundo, son un tipo de material de ingeniería emergente que permite fabricar motores más eficientes desde el punto de vista térmico, cuchillos más afilados y cojinetes con menos fricción. El ingeniero puede combinar las mejores de estas propiedades para producir *materiales compuestos* (el más típico es la fibra de vidrio), que también ofrecen un atractivo conjunto de propiedades. Y finalmente no podemos ignorar los *materiales naturales*, como la madera o la piel, que poseen propiedades que –incluso con los desarrollos científicos actuales en ciencia de materiales– son difíciles de superar.

Tabla 1.2 Tipos de materiales.

Metales y aleaciones	Hierro y aceros Aluminio y sus aleaciones Cobre y sus aleaciones Níquel y sus aleaciones Titanio y sus aleaciones
Polímeros	Polietileno (PE) Polimetacrilato de metilo (PMMA) Poliámidas –nylon– (PA) Poliestireno (PS) Poliuretano (PU) Policloruro de vinilo (PVC) Politereftalato de etilenglicol (PET) Polieteretercetona (PEEK) Resinas epoxi (EP) Elastómeros, como el caucho natural (NR)
Cerámicos y vidrios*	Alúmina –esmeril, zafiro– (Al_2O_3) Magnesia (MgO) Sílice (SiO_2), vidrio y silicatos Carburo de silicio (SiC) Nitruro de silicio (Si_3N_4) Cemento y hormigón
Materiales compuestos	Polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP) Polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP) Polímeros cargados Cermets
Materiales naturales	Madera Piel Algodón, lana, seda Hueso

*Las cerámicas son cristalinas, inorgánicas, no metálicas. Los vidrios son sólidos no cristalinos (o *amorfos*). La mayoría de los vidrios para ingeniería son no metálicos, pero hoy existe un gran número de vidrios metálicos con propiedades útiles.

4 Capítulo 1 *Los materiales de ingeniería y sus propiedades*

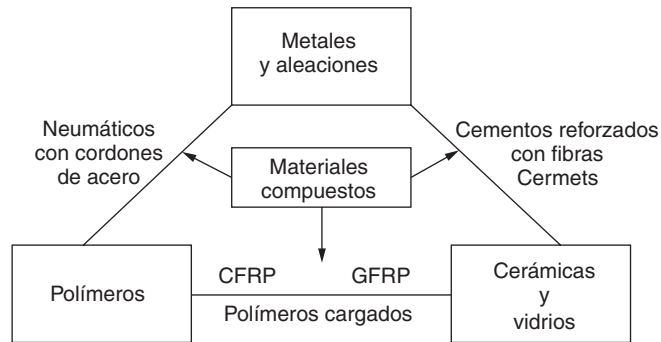


Figura 1.1 Tipos de materiales de ingeniería de los que están hechas las cosas.

En este capítulo ilustraremos con varios ejemplos cómo el diseñador selecciona los materiales que le proporcionan las propiedades necesarias.

1.2 Ejemplos de selección de materiales

Un típico destornillador (Figura 1.2) tiene una varilla, acabada plana, de acero al carbono, un metal. El acero se elige por su alto *módulo*. El módulo refleja la resistencia del material frente a la deflexión elástica o el doblado. Si se hace la varilla de un material distinto, por ejemplo un polímero como el polietileno, tendería a doblarse dema-



Figura 1.2 Destornilladores típicos, con varilla de acero y mango de polímero (plástico).

siado. Un alto módulo es uno de los criterios de selección de un material para esta aplicación, pero no el único. La varilla ha de tener, además, un alto *límite elástico*. Si no lo tiene se doblará o torcerá cuando se gire con fuerza (los malos destornilladores lo hacen). Además, debe tener una gran *dureza*, porque si no se dañará con la cabeza del tornillo. En conjunto, el material de la varilla, incluyendo su extremo plano, no sólo debe cumplir estos requisitos sino que además ha de soportar una posible rotura —el vidrio, por ejemplo, tiene un alto módulo, un alto límite elástico y una gran dureza, pero no es una buena elección para esta aplicación porque es muy frágil. De forma más precisa, diremos que posee una baja *tenacidad a la fractura*; la del acero es alta, pues se deforma antes de romperse.

El mango del destornillador es de un polímero o plástico, en este caso polimetacrilato de metilo, también conocido como PMMA, “plexiglas” o “perspex”. El mango tiene una sección mayor que la varilla, por lo que su posible torsión, y por tanto su módulo, importan menos. No sería muy conveniente un elastómero blando (otro polímero) porque su módulo es demasiado bajo, aunque un recubrimiento fino de caucho podría ser útil gracias a su elevado *coeficiente de fricción*, evitando que se deslice. Antiguamente, por supuesto, los mangos de las herramientas se hacían de otro polímero natural —madera— y, quitando importancia al volumen consumido por año, la madera aún es el polímero más importante disponible para el ingeniero. La madera se reemplaza por PMMA porque éste se reblandece con la temperatura y se puede moldear de forma sencilla y darle formas complejas. Es *fácil de fabricar* para esta aplicación. También se elige por cuestiones estéticas: su *aspecto*, su *textura*, son adecuados; además, su *densidad* es baja, por lo que no hace pesado al destornillador. Por último, el PMMA es barato, lo que permite que el producto final tenga un *precio* razonable.

Vayamos a un segundo ejemplo (Figura 1.3), tomado de la ingeniería de diseño de materiales avanzados para turbinas de motores de grandes aviones. El aire es forzado a pasar (y entrar) al motor a través de la turbina, suministrando empuje aerodinámico. El aire se comprime en los álabes del compresor, se mezcla con el combustible y se quema en la cámara de combustión. Los gases expansionados mueven los álabes, que proporcionan energía a la turbina y a los álabes de compresión, y finalmente pasan a la parte posterior y contribuyen al empuje.

Los *álabes de turbina* son de una aleación de titanio, un metal. Tienen suficiente módulo, límite elástico y tenacidad a la fractura. Pero el metal también tiene que resistir a la *fatiga* (causada por cargas alternativas rápidas), debe tener buena *resistencia al desgaste superficial* (provocado por el golpeteo de gotas de agua o pájaros) y ser *resistente a la corrosión* (importante en ambientes próximos al mar por la posible entrada de sal pulverizada al motor). Por último, la *densidad* es un factor extremadamente importante por razones evidentes: cuanto más pesado sea el motor, menos carga podrá llevar el avión. En un esfuerzo por reducir aún más el peso se han probado álabes de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP), cuya densidad es la mitad que la del titanio. Pero los CFRP no cubren todos los requerimientos de un álabes de turbina, ya que el golpe de un pájaro los rompería. La solución podría ser *revestir* con metal un álabes de CFRP.

Volviendo a los álabes de turbina de la zona más caliente del motor, éstos deben satisfacer aún más requerimientos. El combustible debe quemarse a la temperatura más alta posible, para optimizar el rendimiento. La primera fila de álabes (los llamados HP1)



Figura 1.3 Corte transversal de una turbina de motor de aviación.

soporta temperaturas de 950 °C, por lo que se requiere de ellos una buena resistencia a la *fluencia* y a la *oxidación*. Para esta exigente aplicación se utilizan superaleaciones a base de níquel, de composición y estructura compleja, que son la cúspide de la pirámide de esta avanzada tecnología.

Un ejemplo que también permite analizar distintos requisitos son las *bujías* de un motor de combustión interna (Figura 1.4). Los *electrodos* que producen la *chispa* deben soportar *fatiga térmica* (cambios bruscos de temperatura), *desgaste* (causado por la erosión de la chispa), y *corrosión* y *oxidación*, a causa de los gases de la parte alta de los cilindros, que contienen compuestos nocivos como el azufre. Para estos electrodos se utilizan aleaciones de wolframio porque cumplen todas estas propiedades.

El *aislante* de la zona central del electrodo es un ejemplo de material no metálico –en este caso alúmina, una cerámica. Se elige por sus propiedades como aislante eléctrico y porque posee una buena resistencia a la fatiga térmica, a la corrosión y a la oxidación (ya es un óxido).

El uso de materiales no metálicos ha crecido de manera rápida en la industria de consumo. Nuestro siguiente ejemplo, un barco de recreo (Figura 1.5), muestra cómo los polímeros, los materiales compuestos artificiales y las fibras han sustituido a los materiales “tradicionales” como el acero, la madera y el algodón. Un *casco* de yate típico es de GFRP, fabricado en un molde único; el GFRP tiene un buen *aspecto* y, a diferencia del acero o la madera, no se oxida ni sirve de alimento a moluscos y gusanos. El *mástil* se hace de aleaciones de aluminio, más ligeras que la madera para una resistencia dada; los



Figura 1.4 Bujía de motor de gasolina, con cuerpo cerámico y electrodo de wolframio.

mástiles de alta tecnología se hacen hoy reforzando la aleación con fibra de carbono o de boro (materiales compuestos artificiales). Las *velas*, antiguamente hechas con algodón natural, ahora se hacen de nailon, Teryleno o Kevlar, y para el cordaje se han sustituido los hilos de algodón por polímeros. Por último, polímeros como el PVC se utilizan de manera generalizada en guardabarros, anoraks, boyas y cubrebotes.

Se han mencionado tres materiales compuestos artificiales: GFRP, CFRP (más caro) y las aleaciones reforzadas con fibra de boro (BFRP, mucho más caras). La variedad de materiales compuestos es cada vez mayor y sigue creciendo (Figura 1.1); durante la próxima década crecerá aún más, compitiendo con el acero y el aluminio en muchas aplicaciones tradicionales de estos metales.

Se han mencionado las propiedades mecánicas y físicas de los materiales de ingeniería, pero ahora se han de comentar otros aspectos de igual importancia: el *precio y la disponibilidad*.

La Tabla 1.3 muestra una clasificación somera de los precios de los materiales. Los materiales estructurales utilizados a gran escala –madera, cemento, hormigón y acero estructural– cuestan entre 50 y 500 libras esterlinas (entre 90 y 900 dólares norteamericanos) por tonelada. Muchos materiales que pueden satisfacer los requerimientos estructurales –níquel o titanio, por ejemplo– quedan totalmente excluidos para estas aplicaciones por su precio.

El valor añadido en la ingeniería ligera o media es mayor, por lo que las restricciones económicas a la hora de elegir los materiales son menores –la mayor proporción del coste de una estructura está asociada a los costes de personal o a su producción y fabricación. Los aceros inoxidables, la mayoría de las aleaciones de aluminio y casi todos los polímeros cuestan entre 500 y 5000 libras esterlinas (entre 900 y 9000 dólares norteamericanos).



Figura 1.5 Un yate de recreo, con casco de material compuesto (GFRP), mástil de aleación de aluminio y velas de fibra sintética de polímero.

ricanos) por tonelada. Es en este sector del mercado donde existe mayor competencia entre los materiales y, por tanto, hay mayor espacio para la imaginación en el diseño. Aquí los polímeros y compuestos compiten directamente con los metales, y las nuevas cerámicas estructurales (carburo de silicio y nitruro de silicio) compiten con ambos en algunas aplicaciones.

El siguiente grupo a considerar son los materiales desarrollados para aplicaciones de altas prestaciones, algunas de las cuales ya se han mencionado: superaleaciones a base de níquel (para álabes de turbina), wolframio (para electrodos de bujías) y materiales compuestos especiales, como el CFRP. El rango de precios de estos materiales es de 5000 a 50 000 libras esterlinas (entre 9000 y 90 000 dólares norteamericanos) por tonelada. Éstos son los llamados materiales de alta tecnología, en proceso de investigación activa, y de los que aún se pueden esperar avances y mejoras. Aquí también la competencia con los nuevos materiales es intensa.

Tabla 1.3 Clasificación de los materiales por precios.

Tipo de uso	Material	Precio por tonelada	
		Libras esterlinas	Dólares EE.UU.
Construcción	Madera, hormigón, acero estructural	50-500	90-900
Ingeniería ligera y media	Metales, aleaciones y polímeros para aviones, automóviles, electrodomésticos ...	500-5000	900-9000
Materiales especiales	Aleaciones para álabes de turbina, materiales compuestos avanzados (CFRP, BFRP), etc.	5000-50 000	9000-90 000
Metales preciosos, etc.	Cojinetes de zafiro, contactos de plata, microcircuitos de oro ...	50 000-10 000 000	90 000-18 000 000
Diamantes industriales	Herramientas de corte y pulido	>100 000 000	>180 000 000

Por último, tenemos los metales preciosos y las gemas, también utilizados ampliamente en ingeniería: oro para microcircuitos, platino en catalizadores, zafiros en cojinetes y diamantes en herramientas de corte. El rango de sus precios va de 50 000 a más de 100 000 000 libras esterlinas (entre 90 000 y 180 000 000 dólares norteamericanos) por tonelada.

Como ejemplo de cómo el precio y la disponibilidad afectan a la selección de un material para una determinada aplicación, consideremos los materiales utilizados en la construcción de puentes en Cambridge y de qué modo han evolucionado al pasar los siglos. Tal y como nos muestra la foto del Queens' Bridge (Figura 1.6), hasta hace 150 años era bastante corriente el uso de la madera para la construcción de puentes. Era barata y se podían encontrar vigas de madera de alta calidad con grandes secciones procedentes de bosques naturales. También la piedra, como muestra la foto del Clare Bridge (Figura 1.7), era muy utilizada. En el siglo XVIII, la disponibilidad de la fundición, con un coste de ensamblado relativamente bajo, permitió construir numerosos puentes, como el Magdalene Bridge (Figura 1.8). El desarrollo de la metalurgia de finales del siglo XIX posibilitó la construcción de grandes estructuras de acero dulce para construir puentes como el Garret Hostel Lane Bridge (Figura 1.10). Esta evolución ilustra con claridad cómo la disponibilidad repercute en la selección de los materiales.

Hoy día, la madera, el acero y el hormigón armado se utilizan con frecuencia e indistintamente en estructuras, como consecuencia de la pequeña diferencia en su *precio*. La elección de uno de los tres materiales está directamente relacionada con el tipo de estructura que quiera construir el arquitecto: recia y sólida (piedra), estructuralmente eficiente (acero), ligera y elegante (hormigón pretensado).

El diseño en ingeniería, por tanto, implica muchas consideraciones (Figura 1.11). La elección de un material debe conciliar ciertos criterios vinculados a las propiedades de volumen y de superficie (p.ej. resistencia a la tracción y a la corrosión), pero también ha



Figura 1.6 Puente de madera en el Queens' College, de Cambridge, una reconstrucción de 1902 del puente original construido en 1749 con diseño de William Etheridge.



Figura 1.7 Clare Bridge, construido en 1640, uno de los puentes más antiguos de Cambridge; se supone que fue una ruta de escape de los "college" en tiempos de la peste.



Figura 1.8 Magdalen Bridge, construido en 1823 en el lugar del antiguo puente Saxon sobre el Cam. El actual puente de fundición soportaba, hasta hace muy poco, cargas muy superiores a las previstas por los diseñadores. Por fortuna, el puente ha sido bien restaurado recientemente.

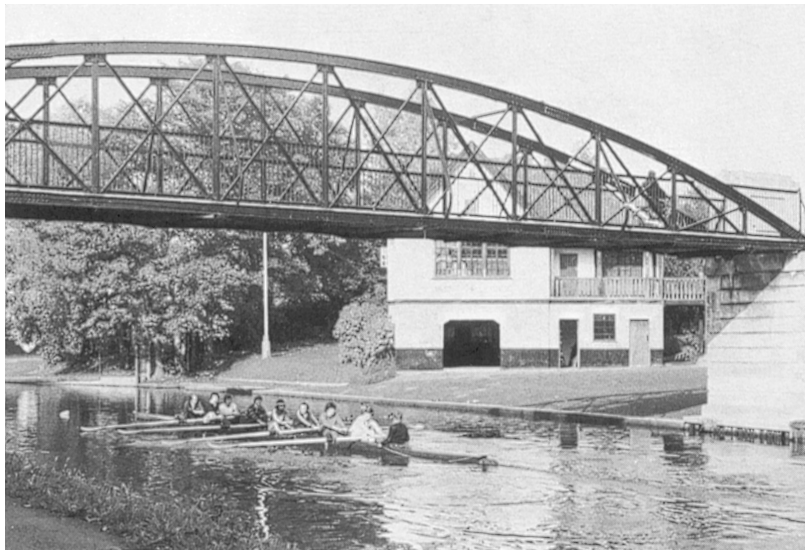


Figura 1.9 Típico puente de acero dulce de mediados del siglo XX; camino recomendado para llegar a la posada "Fort St. George".



Figura 1.10 Puente peatonal de hormigón armado en el camino de Garret Hostel. Una inscripción grabada en su proximidad reza: "Este puente fue donado en 1690 por la familia Trusted, miembros de Trinity Hall. Fue diseñado por Timothy Guy Morgan, un estudiante pregraduado del Jesus College que murió ese año".

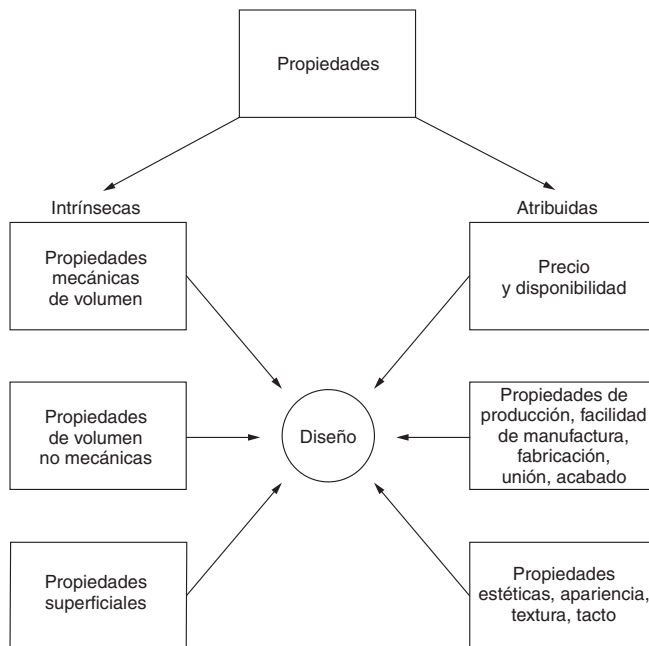


Figura 1.11 Cómo las propiedades de los materiales de ingeniería afectan la manera de diseñar productos.

de poder fabricarse con facilidad, ser atractivo para los potenciales consumidores y competir económicamente con otros materiales alternativos. En el próximo capítulo se consideran los aspectos económicos involucrados en la elección; en los últimos capítulos el análisis de las otras propiedades.

Parte A

Precio y disponibilidad

