

# **MATERIALES PARA INGENIERÍA 2**

**Introducción a la microestructura, el procesamiento y el diseño**

**Michael F. Ashby \ David R. H. Jones**

Department of Engineering, University of Cambridge, UK



**EDITORIAL  
REVERTÉ**

**Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México**

*Título de la obra original:*

**Engineering Materials 2. An Introduction to Microstructures, Processing and Design**

*Edición original en lengua inglesa:*

**Elsevier Butterworth-Heinemann**

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

Copyright © 2006, Michael F. Ashby and David R. H. Jones.

*All rights reserved.*

Edición en español:

© Editorial Reverté, S. A., 2009

ISBN: 978-84-291-7256-0 Volumen 2

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

*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

**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

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

Fax: (34) 93 419 51 89

reverte@reverte.com

www.reverte.com

Impreso en España - *Printed in Spain*

Depósito Legal: B-1353-2009

Impreso por Liberdúplex, S. L. U.

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.

ASHBY, MICHAEL F.

[Engineering Materials 2 : An Introduction to Microstructures, Processing and Design. Español]

Materiales para ingeniería 2 : introducción a la microestructura, el procesamiento y el diseño / Michael F. Ashby ; [versión española traducida por Juan Baselga Llidó ... [et al.] - Barcelona : Reverté, 2009

XV, 490 p. : il., gráf. ; 24 cm.

Traducción de: Engineering Materials 2. An Introduction to Microstructures, Processing and Design. - Índice

B-1353-2009. - ISBN 978-84-291-7256-0 (vol. 2)

1. Ensayo de materiales. I. Jones, David R. H., coaut. II. Baselga Llidó, Juan, coord., trad. III. Título.

620

# Índice

<i>Introducción general</i>	xi
Recursos adicionales	xiv
<b>A. Metales</b>	<b>1</b>
1. Metales	3
1.1 Introducción	4
1.2 Metales para un prototipo de un motor de tracción	4
1.3 Metales para latas de bebidas	9
1.4 Metales para articulaciones de cadera artificiales	11
1.5 Datos de metales	14
2. Estructuras metálicas	15
2.1 Introducción	16
2.2 Estructuras cristalinas y amorfas	16
2.3 Estructura de soluciones sólidas y compuestos	18
2.4 Fases	20
2.5 Fronteras de grano y de fase	21
2.6 Forma de los granos y las fases	22
2.7 Resumen: constitución y estructura	25
3. Constitución de equilibrio y diagramas de fase	27
3.1 Introducción	28
3.2 Definiciones	28
3.3 Diagrama de fases plomo-estaño	29
3.4 Regiones con una constitución no completamente definida	32
3.5 Otros diagramas de fases	34
4. Casos prácticos de diagramas de fases	39
4.1 Introducción	40
4.2 Elección de soldaduras blandas	40
4.3 Silicio puro para microchips	44
4.4 Fabricación de hielo sin burbujas	49
5. La fuerza motriz para el cambio estructural	53
5.1 Introducción	54
5.2 Fuerzas motrices	54
5.3 Reversibilidad	57
5.4 Estabilidad, inestabilidad y metaestabilidad	58

## vi Índice

5.5	La fuerza motriz para la solidificación	59
5.6	Cambios de fase en estado sólido	62
5.7	Crecimiento de precipitados	62
5.8	Crecimiento de grano	64
5.9	Recristalización	64
5.10	Valores de las fuerzas motrices	64
6.	Cinética del cambio estructural: I – Transformaciones difusivas	67
6.1	Introducción	68
6.2	Solidificación	68
6.3	Efectos del flujo de calor	74
6.4	Cambios de fase en estado sólido	75
6.5	Cinética de los cambios controlados por difusión	75
6.6	Forma de granos y fases	76
7.	Cinética del cambio estructural: II – Nucleación	81
7.1	Introducción	82
7.2	Nucleación en líquidos	82
7.3	Nucleación heterogénea	83
7.4	Nucleación en sólidos	88
7.5	Resumen	88
7.6	Epílogo	89
8.	Cinética del cambio estructural: III – Transformaciones desplazativas	91
8.1	Introducción	92
8.2	La transformación difusiva fcc → bcc en el hierro puro	92
8.3	El diagrama transformación-temperatura-tiempo	96
8.4	La transformación desplazativa fcc → bcc	98
8.5	Detalles de la formación de martensita	99
8.6	La transformación martensítica en los aceros	101
8.7	Una miscelánea sobre la martensita	103
9.	Casos prácticos de transformaciones de fase	107
9.1	Introducción	108
9.2	Provocar lluvia	108
9.3	Piezas coladas de tamaño de grano pequeño	110
9.4	Monocristales para semiconductores	113
9.5	Metales amorfos	116
10.	Aleaciones ligeras	119
10.1	Introducción	120
10.2	Endurecimiento por solución sólida	120
10.3	Endurecimiento por maduración (precipitación)	124
10.4	Endurecimiento por deformación	131
10.5	Estabilidad térmica	132

11. Aceros: I – Aceros al carbono	135
11.1 Introducción	136
11.2 Microestructuras obtenidas por enfriamiento moderado (“normalizado”)	137
11.3 Propiedades mecánicas de los aceros al carbono normalizados	140
11.4 Aceros al carbono templados y revenidos	142
11.5 Fundiciones	143
11.6 Algunas anotaciones acerca del diagrama TTT	146
12. Aceros: II – Aceros aleados	149
12.1 Introducción	150
12.2 Templabilidad	150
12.3 Endurecimiento por solución sólida	153
12.4 Endurecimiento por precipitación	154
12.5 Resistencia a la corrosión	154
12.6 Aceros inoxidable	155
13. Casos prácticos con aceros	159
13.1 Trabajo de investigación metalúrgica después de la explosión de una caldera	160
13.2 Soldar aceros de forma segura	163
13.3 Caso de un martillo roto	166
14. Técnicas de producción, conformado y unión de metales	171
14.1 Introducción	172
14.2 Colada	172
14.3 Procesos de conformado	177
14.4 Recuperación y recristalización	181
14.5 Mecanizado	184
14.6 Unión	185
14.7 Ingeniería de superficies	186
14.8 Conformado de alta eficiencia energética	186
<b>B. Cerámicas y vidrios</b>	<b>191</b>
15. Cerámicas y vidrios	193
15.1 Introducción	194
15.2 Las cerámicas y los vidrios genéricos	195
15.3 Materiales compuestos cerámicos	197
15.4 Datos de las cerámicas	198
16. Estructura de las cerámicas	201
16.1 Introducción	202
16.2 Cerámicas iónicas y covalentes	202
16.3 Cerámicas iónicas sencillas	203

## viii Índice

16.4	Cerámicas covalentes sencillas	205
16.5	Sílice y silicatos	206
16.6	Vidrios de silicato	207
16.7	Combinaciones de óxidos: “aleaciones cerámicas”	208
16.8	Microestructura de las cerámicas	209
16.9	Cerámicas vítreas	210
16.10	Piedras o rocas	211
16.11	Materiales compuestos cerámicos	211
17.	Las propiedades mecánicas de las cerámicas	213
17.1	Introducción	214
17.2	El módulo de elasticidad	214
17.3	Resistencia, dureza y resistencia de red	215
17.4	Resistencia a la fractura de las cerámicas	217
17.5	Resistencia al choque térmico	220
17.6	Fluencia de las cerámicas	220
18.	Estadística de la fractura frágil y estudios de casos prácticos	223
18.1	Introducción	224
18.2	La estadística de la resistencia y la distribución de Weibull	224
18.3	Dependencia de la resistencia de las cerámicas respecto al tiempo	229
18.4	Caso práctico: el diseño de ventanas de presión	230
19.	Obtención, conformado y unión de cerámicos	237
19.1	Introducción	238
19.2	Producción de cerámicos de ingeniería	238
19.3	Conformado de cerámicos de ingeniería	238
19.4	Obtención y conformado del vidrio	243
19.5	Obtención y conformado de loza, porcelana y ladrillos	246
19.6	Mejora de las prestaciones de los cerámicos	247
19.7	Unión de cerámicos	249
20.	Tema especial: cementos y hormigones	253
20.1	Introducción	254
20.2	La estructura del cemento Portland	256
20.3	Hormigón	259
20.4	La resistencia del cemento y del hormigón	260
20.5	Cementos de alta resistencia	263
<b>C.</b>	<b>Polímeros y materiales compuestos</b>	<b>265</b>
21.	Polímeros	267
21.1	Introducción	268
21.2	Los polímeros genéricos	269
21.3	Datos de materiales	275

22. Estructura de los polímeros	279
22.1 Introducción	280
22.2 Longitud molecular y grado de polimerización	280
22.3 La arquitectura molecular	282
22.4 Empaquetamiento de moléculas de polímero y transición vítrea	285
23. Comportamiento mecánico de los polímeros	291
23.1 Introducción	292
23.2 Rigidez: dependencia del módulo con el tiempo y la temperatura	293
23.3 Resistencia: deformación en frío y agrietamiento	303
24. Producción, transformación y unión de polímeros	311
24.1 Introducción	312
24.2 Síntesis de polímeros	312
24.3 Aleaciones de polímeros	313
24.4 Unión de polímeros	320
25. Materiales compuestos: con fibras, partículas y espumas	323
25.1 Introducción	324
25.2 Materiales compuestos con fibras	324
25.3 Módulo	326
25.4 Materiales compuestos con partículas	333
25.5 Sólidos celulares o espumas	334
25.6 Materiales de diseño ingenieril	338
26. Tema especial: la madera	341
26.1 Introducción	342
26.2 La estructura de la madera	342
26.3 Propiedades mecánicas de la madera	346
26.4 Resumen: la madera comparada con otros materiales	351
<b>D. Diseño con metales, cerámicas, polímeros y materiales compuestos</b>	<b>353</b>
27. Diseño con materiales	355
27.1 Introducción	356
27.2 Metodología del diseño	358
28. Casos prácticos de diseño	363
28.1 Diseño con metales: tambores de una cinta transportadora en una planta de mineral de hierro	364
28.2 Diseño con cerámicos: la fuerza del hielo en las estructuras en mar abierto	372
28.3 Diseño con polímeros: una rueda de plástico	377
28.4 Diseño con materiales compuestos: materiales para cuerpos de violín	382

## **x** Índice

29. Fallos y desastres en ingeniería – El último test del diseño	391
29.1 Introducción	392
29.2 Caso práctico 1: el accidente ferroviario de Tay Bridge, 28 de diciembre de 1879	393
29.3 Caso práctico 2: los desastres aéreos del Comet, 10 de enero y 8 de abril de 1954	401
29.4 Caso práctico 3: el desastre ferroviario de Eschede, 5 de junio de 1998	408
29.5 Caso práctico 4: un accidente fatal de puentismo	412
<i>Apéndice 1 Aprenda por sí mismo diagramas de fase</i>	419
<i>Apéndice 2 Símbolos y fórmulas</i>	473
<i>Referencias</i>	483
<i>Índice</i>	485

# Introducción general

Los materiales evolucionan hoy más rápido que en cualquier otro momento de la historia. Las naciones industrializadas ven el desarrollo de materiales nuevos y mejorados como una “tecnología de apoyo”, algo que puede estimular la innovación en todas las ramas de la ingeniería, haciendo posibles nuevos diseños para estructuras, electrodomésticos, motores, dispositivos electrónicos y eléctricos, equipos de conservación de la energía, y mucho más. Algunas de estas naciones han potenciado iniciativas de patrocinio gubernamental para promocionar el desarrollo y la explotación de nuevos materiales; sus listas generalmente incluyen materiales compuestos de “altas prestaciones”, nuevas cerámicas de ingeniería, polímeros de alta resistencia, metales vítreos y nuevas aleaciones resistentes a altas temperaturas para aplicación en turbinas de gas. Estos proyectos se están notando ahora en todas las facetas de la ingeniería, y ya han estimulado el diseño de una nueva e innovadora gama de productos de consumo.

Así, el ingeniero debe ser más consciente que nunca de los materiales y su potencial. La innovación a menudo aporta la manera de remplazar un componente hecho de un material (digamos un metal) por uno hecho de otro (un polímero, por ejemplo), y entonces rediseñar el producto para explotar al máximo el potencial ofrecido por el cambio. El ingeniero debe comparar y sopesar con precisión las propiedades de los materiales que compiten; a veces el balance es algo delicado. Implica un entendimiento de las propiedades básicas de los materiales y del modo en que éstas se controlan por el procesado, de cómo se forman los materiales, se unen y se acaban, y de la cadena de razonamientos que dan lugar a una adecuada decisión.

La intención de este libro es suministrar este entendimiento. Complementa nuestro otro libro sobre las propiedades y aplicaciones de los materiales de ingeniería,<sup>1</sup> pero no es necesario haberlo leído para entender éste. Aquí los materiales se agrupan en cuatro clases: metales, cerámicos, polímeros y materiales compuestos, y se examina cada uno cuando corresponde. En cualquiera de las clases existen características estructurales comunes subyacentes (las moléculas de cadena larga en los polímeros, la fragilidad intrínseca de los cerámicos, la mezcla de materiales en los compuestos), que son las que finalmente determinan la resistencia o la debilidad (las propiedades “limitantes de diseño”) de cada uno en el campo de la ingeniería.

Por tanto, como se puede apreciar en el Índice, los capítulos están ordenados en *grupos*, con un grupo de capítulos para describir cada una de las cuatro *clases* de materiales. En cada grupo, primero se introducen las familias más importantes de materiales que van a constituir cada clase de material; después se señalan las principales características microestructurales de la clase de materiales, y cómo se procesan o tratan para obtener las estructuras (en realidad, al final, las *propiedades*) que se requieren. Cada grupo de capítulos está ilustrado por *Casos prácticos* diseñados para ayudar a entender el material

---

<sup>1</sup> M.F. Ashby y D.R.H. Jones, *Materiales para ingeniería 1: Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño*, Editorial Reverté, 2008.

básico. Y finalmente se presta atención al papel de los materiales en el diseño de dispositivos o aparatos de ingeniería, mecanismos y estructuras, y se desarrolla un método para la selección de materiales. Un tema –*Diagramas de fase*– puede ser difícil de llevar. Hemos intentado superarlo dando un curso corto de aprendizaje programado sobre diagramas de fase. Si se trabaja en él, cuando se llegue al capítulo sobre los diagramas de fase se conocerá todo lo necesario sobre el tema en cuestión. Esto llevará en torno a cuatro horas.

Al final de cada capítulo se puede encontrar una serie de problemas. Se recomienda intentar resolverlos mientras el tema todavía está fresco en la mente; de esta manera será posible consolidar, y desarrollar, ideas sobre la marcha.

### **Para el lector**

Este libro ha sido escrito para un segundo curso de estudiantes de ingeniería. Provee una introducción concisa sobre las *microestructuras y el procesado de materiales* (metales, cerámicos, polímeros y materiales compuestos), y muestra cómo se relacionan con las propiedades requeridas para el diseño en ingeniería. Está concebido como continuación de nuestro texto de primer nivel sobre las propiedades y las aplicaciones de los materiales de ingeniería; no obstante, se sustenta en sí mismo y puede utilizarse sin necesidad de otros.

Cada capítulo está diseñado para proveer el contenido de una clase de unos 50 minutos. Cada bloque de unos cuatro capítulos viene apoyado por un conjunto de *Casos prácticos*, que ilustran y consolidan el material que contienen. Hay secciones especiales sobre diseño, y sobre materiales como la madera, el cemento y el hormigón. Además, hay problemas para el estudiante al final de cada capítulo. Con objeto de facilitar la enseñanza de los diagramas de fase (a menudo un tema difícil para los estudiantes de ingeniería) se ha incluido un texto de aprendizaje programado que ha probado ser útil para nuestros estudiantes.

Hemos intentado presentar el material de una manera no complicada, y hacer los ejemplos entretenidos, mientras se establecen los conceptos físicos básicos y sus aplicaciones al procesado de materiales. Nos pareció que la mejor manera de hacerlo era identificar un pequeño conjunto de materiales “genéricos” de cada clase (de metales, de cerámicos, etc.), que de forma amplia tipificaran la clase y fundamentaran su desarrollo; son como las pinzas de las que cuelgan la discusión y los ejemplos. Pero el lector que desee considerar otros materiales no debería encontrarlo difícil.

### **Agradecimientos**

Queremos dar las gracias al Prof. G.A. Chadwick por el permiso para reproducir la Figura A1.34 (p. 455), y a K.J. Pascoe y Van Nostrand Reinhold Co. por el permiso para reproducir la Figura A1.41 (p. 460).

Las Figuras 29.1 y 29.4 han sido reproducidas por cortesía de la Universidad de St. Andrews.

La Figura 29.6 ha sido reproducida por cortesía de la Biblioteca Central de Dundee.

La Figura 29.2 ha sido reproducida de *Engineering Failure Analysis*, Jones, D.R.H., The Tay Bridge disaster, con permiso de Elsevier.

Las Figuras 29.11 y 29.14 han sido reproducidas de *Engineering Failure Analysis* 12, Richard *et al.*, Fracture in a rubber-sprung railway wheel, 986-999, © 2005, con permiso de Elsevier.

La Figura 29.13 ha sido reproducida de *Engineering Failure Analysis* 11, Esslinger *et al.*, The railway accident at Eschede, 515-535, © 2004, con permiso de Elsevier.

Las Figuras 29.15 a 29.19 han sido reproducidas de *Engineering Failure Analysis* 11, Jones, D.R.H., Analysis of a fatal bungee-jumping accident, 857-872, © 2004, con permiso de Elsevier.

### ***Sobre los autores de los tutores***

***Alan Crosky*** es Profesor Asociado en la School of Materials Science and Engineering, UNSW. Sus especialidades docentes incluyen metalurgia, materiales compuestos y fractografía.

***Belinda Allen*** es gerente del Educational Graphics y diseñadora de recursos docentes en el Educational Development and Technology Centre, UNSW. Ofrece consultoría y apoyo a la producción para la comunidad académica, y diseña y presenta talleres y recursos sobre producción de imágenes y diseño de páginas en “Internet”.

***Mark Hoffman*** es Profesor Asociado en la School of Materials Science and Engineering, UNSW. Su especialidad docente incluye fractura, modelado numérico, comportamiento mecánico de materiales y organización (gestión de ingeniería).

***Paul Munroe*** es Profesor en la School of Materials Science and Engineering y Director del Electron Microscope Unit, UNSW. Sus especialidades docentes son los mecanismos de deformación y refuerzo de materiales, y la caracterización cristalográfica y microestructural.



Parte A

## **Metales**

# Capítulo 1

## Metales

### Contenidos

1.1	Introducción	4
1.2	Metales para un prototipo de un motor de tracción	4
1.3	Metales para latas de bebidas	9
1.4	Metales para articulaciones de cadera artificiales	11
1.5	Datos de metales	14
	Ejemplos	14

## 1.1 Introducción

El primer grupo de capítulos se denomina metales. Hay muchos metales diferentes (literalmente cientos) y es imposible recordarlos todos. No es necesario, pues casi todos proceden de unos pocos metales “genéricos” y son modificaciones de las recetas básicas. Si conoce los metales genéricos, conoce todo lo que necesita.

Este capítulo introduce los metales genéricos, pero en vez de aburrirle con un catálogo los introducimos mediante tres ejemplos reales de ingeniería. Nos permiten no sólo mostrar ejemplos de las aplicaciones de los principales metales sino también introducir el importante tema de cómo las características de cada metal determinan su empleo en la práctica.

## 1.2 Metales para un prototipo de un motor de tracción

El diseño de prototipos se ha convertido en un gran negocio. Los ensayos de maquetas a escala proporcionan un modo económico de obtener información sobre el diseño crítico de objetos, desde los cascos de los yates olímpicos hasta los diques. Los arquitectos venden sus nuevas creaciones con la ayuda de versiones en miniatura que reproducen de forma precisa detalles como los picaportes o los arbustos del jardín. Y en una época en que se incrementa el tiempo de ocio, mucha gente encuentra una vía de escape realizando modelos, quizá construyendo un avión en miniatura con piezas de plástico o, en el otro extremo, una maqueta completamente funcional de un motor de vapor a partir de los componentes básicos que puede encontrar en su garaje.

La Figura 1.1 muestra una maqueta de un motor de vapor del siglo XIX construido en casa a partir de los planos publicados en una conocida revista de modelismo. Cada parte funciona como lo hace en el original; la caldera incluso quema el mismo tipo de carbón para generar vapor, ¡y el modelo es capaz de arrastrar un automóvil! Pero lo que nos interesa aquí es la gran cantidad de metales diferentes que se pueden utilizar en su construcción y la manera en que se seleccionan basándose en los requisitos de diseño. Empezaremos por las aleaciones basadas en *hierro* (aleaciones *férreas*). La Tabla 1.1 muestra las principales aleaciones férricas.

¿Cómo se utilizan estos metales en el motor de tracción? Las cargas de diseño en componentes como las ruedas y el chasis son lo suficientemente bajas para que un *acero dulce*, con un límite elástico alrededor de 220 MPa, sea lo suficientemente resistente. También es fácil cortarlo, plegarlo o mecanizarlo para darle forma. Y finalmente, aunque no menos importante, es barato.

Las tensiones en la maquinaria (los piñones y las bielas de transmisión) son mucho mayores, y estas piezas están hechas de *aceros con alto o medio contenido en carbono* o de *aceros débilmente aleados* para obtener una resistencia extra.

Sin embargo, hay algunos componentes para los que incluso la resistencia de los aceros de alto contenido en carbono comerciales ( $\sigma_y \approx 400$  MPa) no es suficiente. Un buen ejemplo es el lubricador mecánico mostrado en la Fig. 1.2, que es esencialmente una bomba de aceite de alta presión. Se mueve mediante un engranaje. Tiene dientes afilados que se desgastarían rápidamente si se hicieran de una aleación blanda. ¿Cómo podemos alcanzar una dureza por encima de la de los aceros de alto conte-

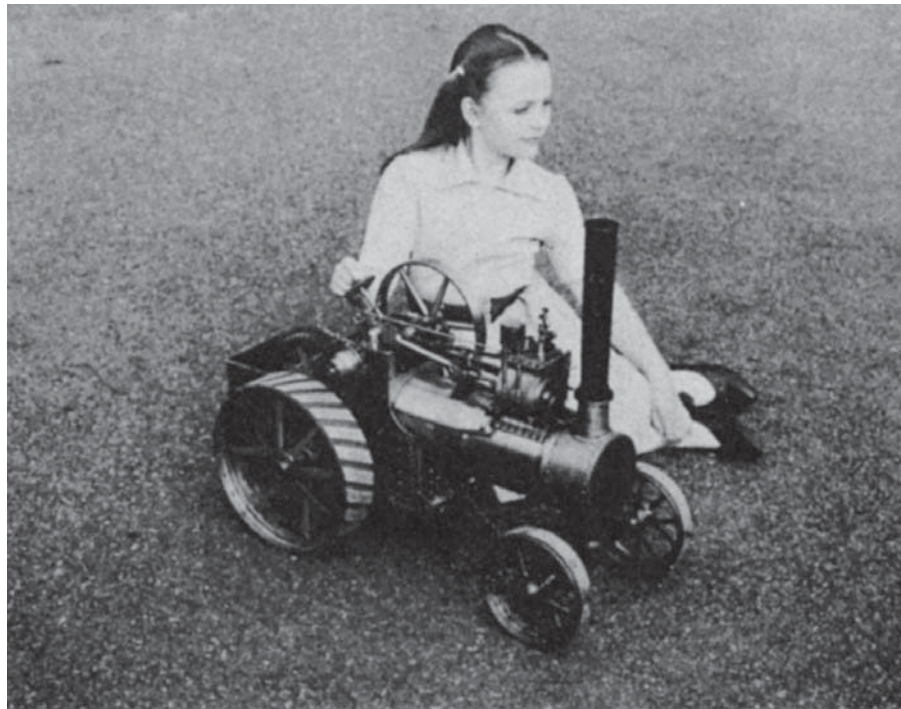


Figura 1.1 Un modelo completamente funcional, a escala 1:6, de un motor de tracción a vapor como los que se utilizaban en las granjas hace cientos de años. El modelo puede tirar de un automóvil con unos pocos litros de agua y un puñado de carbón. Pero también es un bonito ejemplo de selección de materiales y diseño.

Tabla 1.1 Aleaciones basadas en hierro.

<i>Aleación</i>	<i>Composición típica (% peso)</i>	<i>Aplicaciones típicas</i>
Aceros bajos en carbono (aceros "dulces")	Fe + 0,04 a 0,3 C (+ $\approx$ 0,8 Mn)	Uso con tensiones bajas. Aceros de construcción, adecuados para soldadura
Aceros de contenido medio en carbono	Fe + 0,3 a 0,7 C (+ $\approx$ 0,8 Mn)	Uso con tensiones medias: piezas de maquinaria, tornillos y tuercas, ejes y transmisiones
Acero de alto carbono	Fe + 0,7 a 1,7 C (+ $\approx$ 0,8 Mn)	Aplicaciones con tensiones altas: muelles, herramientas de corte, matrices
Aceros débilmente aleados	Fe + 0,2 C 0,8 Mn 1 Cr 2 Ni	Aplicaciones de alta tensión: recipientes a presión, piezas de aviones
Aceros de alta aleación ("inoxidables")	Fe + 0,1 C 0,5 Mn 18 Cr 8 Ni	Aplicaciones de alta temperatura o anticorrosión: plantas químicas y centrales térmicas
Fundiciones	Fe+ 1,8 a 4 C (+ $\approx$ 0,8 Mn 2 Si)	Uso con tensiones bajas: bloques de cilindros, tuberías de drenaje

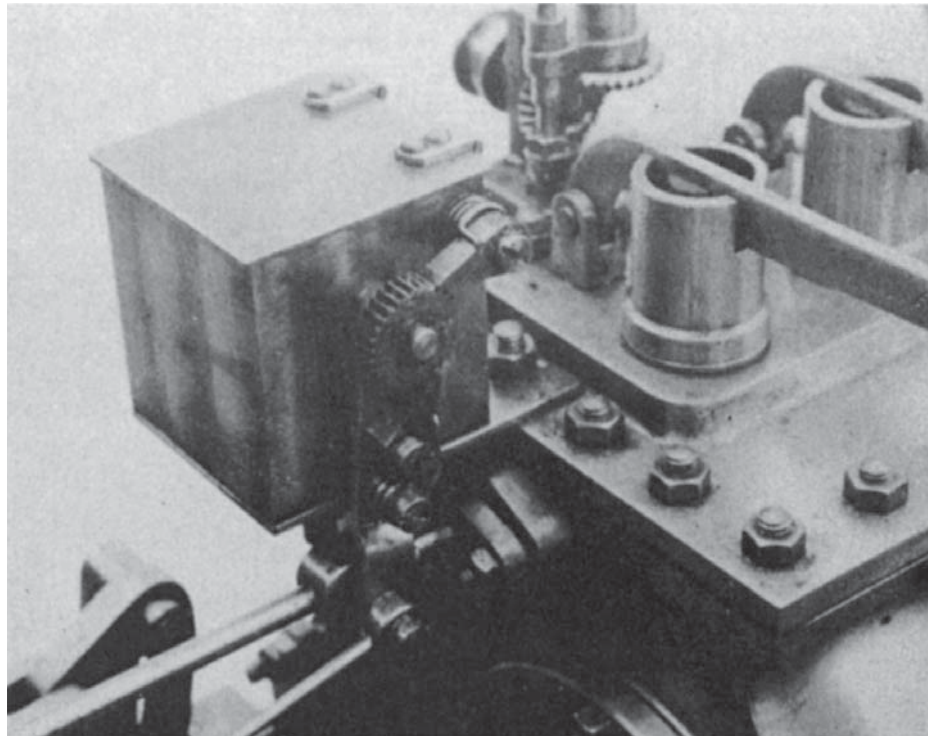


Figura 1.2 Un primer plano del lubricador mecánico del motor de tracción. Si el agujero del vapor no se mantiene engrasado se desgastará y se rayará. Las bombas del lubricador introducen pequeñas cantidades de aceite en forma de vapor en el cilindro para frenar este hecho. El movimiento se transmite del engranaje al vástago del pistón.

nido en carbono ordinarios? Bien, los aceros con medio y alto contenido en carbono pueden endurecerse para obtener un límite elástico de hasta 1000 MPa mediante calentamiento al rojo y posterior enfriamiento rápido (temple) en agua fría. Aunque el temple hace que el acero endurecido se fragilice, podemos hacerlo tenaz de nuevo (aunque todavía con una elevada dureza) mediante un *revenido*, un proceso que implica el calentamiento del acero de nuevo, pero a una temperatura mucho más baja. Las piezas del engranaje están fabricadas con aceros de alto contenido en carbono templados y revenidos.

Los *aceros inoxidables* se utilizan en muchas aplicaciones. La Figura 1.3 muestra la parrilla del horno: barras metálicas que introducen el carbón ardiendo dentro de la cámara de combustión. Cuando el motor está trabajando, el carbón está incandescente, por lo que se presentan problemas de oxidación y fluencia. Las barras de acero dulce pueden fundirse con el tiempo, pero las barras de acero inoxidable duran indefinidamente.

Finalmente, ¿qué podemos decir de las fundiciones? Aunque son muy frágiles, son adecuadas para componentes sometidos a bajas tensiones, como el bloque del cilindro. De hecho, como las fundiciones tienen mucho carbono presentan algunas ventajas con

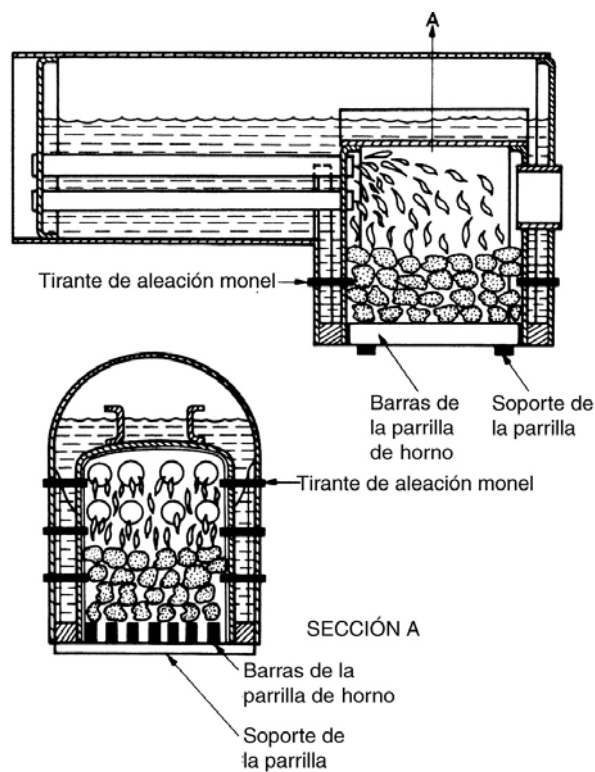


Figura 1.3 La parrilla que introduce el carbón incandescente en la cámara de combustión tiene que resistir la oxidación y la fluencia. Lo mejor para esta aplicación son los aceros inoxidable. Para que la cámara de combustión resista la presión originada por el vapor se colocan a los lados unos tirantes de aleación monel.

respecto a los aceros dulces. Los componentes complicados, como el bloque del cilindro, se procesan mejor por colada. Las fundiciones funden mucho más fácilmente que los aceros (la adición de carbono reduce la temperatura de fusión de la misma manera que la adición de anticongelantes actúa con el agua) y esto hace que el vertido en el molde sea mucho más fácil. Durante el moldeo, el carbono puede separarse en diminutas partículas de grafito, distribuidas en el acero, actuando como un lubricante ideal. Los cilindros y los pistones fabricados con fundiciones se comportan bien frente al desgaste; mire en el interior de los cilindros del motor de su coche la próxima vez que los desmonten y se quedará asombrado del aspecto pulido y casi brillante del interior, y esto después de unos  $10^8$  desplazamientos del pistón.

Estos son los tipos básicos de aleaciones férricas. Su composición y sus aplicaciones se muestran en la Tabla 1.1, y podrá aprender más acerca de ellas en los Capítulos 11 y 12. Ahora vamos a ver los otros grupos de aleaciones.

Un grupo importante de aleaciones son las basadas en cobre (Tabla 1.2).

La parte más importante del motor de tracción fabricada en cobre es la caldera y sus tubos (ver Fig. 1.1). A escala real podría haber sido fabricada en acero dulce, pero el uso del cobre en la maqueta es un bonito ejemplo de cómo la elección de un material puede

## 8 Capítulo 1 Metales

Tabla 1.2 Aleaciones de cobre.

<i>Metal</i>	<i>Composición típica (% peso)</i>	<i>Aplicaciones típicas</i>
Cobre	100 Cu	Dúctil, resistente a la corrosión y buen conductor eléctrico: tuberías de agua, cables eléctricos
Latón	Zn	Más resistente que el cobre, mecanizable, resistencia a la corrosión razonable: accesorios, instalaciones de agua, tornillos, componentes eléctricos
Bronce	Cu+ 10-30 Sn	Buena resistencia a la corrosión: cojinetes, hélices de barco, campanas
Cuproniquel	Cu + 30 Ni	Buena resistencia a la corrosión: monedas

dependen de la escala de la estructura. Las paredes de la caldera del motor a tamaño real tienen un espesor de 10 mm, de los que quizá sólo se necesitan 6 mm para resistir la presión del vapor de forma segura (los otros 4 mm son la tolerancia frente a la corrosión). A pesar de que un espesor de 1 mm en la pared de la caldera de acero soportaría la presión, se necesitaría la misma tolerancia de 4 mm para la corrosión, en total 5 mm. Esto daría lugar a una caldera muy pesada y a que una gran cantidad del espacio para el agua estuviera ocupado por paredes y tubos gruesos. Como el cobre difícilmente se corroe en agua limpia, éste es el material que hay que usar. Aunque es más débil mecánicamente que el acero, un espesor de pared de 2,5 mm es suficiente para resistir la presión de trabajo, sin que sea necesaria una tolerancia adicional para la corrosión. El cobre, por supuesto, es caro (sería prohibitivo para una caldera a tamaño real), pero esto se compensa con su ductilidad (es muy fácil doblarlo para darle forma) y con su alta conductividad térmica (lo que significa que la caldera genera vapor más fácilmente).

El *latón* es más resistente que el cobre, más fácil de mecanizar y bastante resistente a la corrosión (aunque puede sufrir “descincificación” en contacto con el agua durante un largo periodo de tiempo). Un buen ejemplo de su utilización en el motor es en las válvulas de vapor y en otros accesorios de la caldera (ver Fig. 1.4). Estos componentes tienen formas complicadas y es necesario que se puedan mecanizar fácilmente; la “descincificación” es una posibilidad a largo plazo, por lo que se necesitan inspecciones ocasionales. Como alternativa, se puede evitar la corrosión utilizando bronce, pero son más caros y algunos se mecanizan con mucha dificultad.

El *níquel* y sus aleaciones forman otro grupo importante de metales no féreos (Tabla 1.3). La excelente resistencia a la fluencia de las superaleaciones basadas en níquel es un factor fundamental en el diseño de las modernas turbinas de gas de los motores de aviación. Incluso también aparecen en el prototipo del motor de vapor. Las paredes de la cámara de combustión deben resistir la presión interna del vapor (ver Fig. 1.3). Algunos fabricantes de modelos de calderas fabrican los refuerzos de piezas de monel porque es mucho más resistente que el cobre, se puede roscar mucho mejor y es muy resistente a la corrosión.

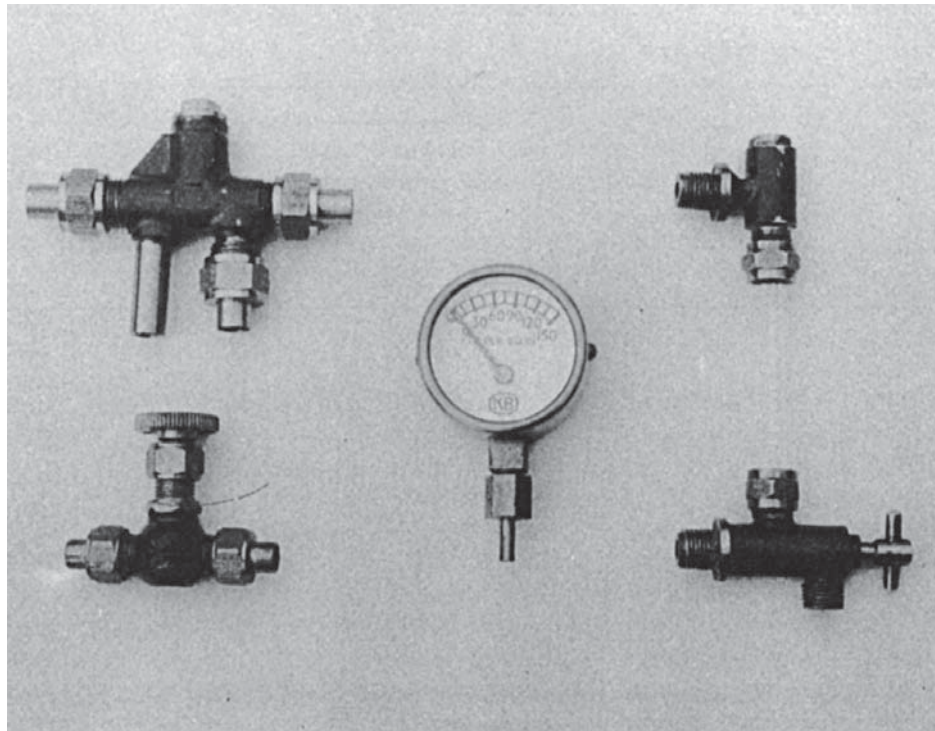


Figura 1.4 Accesorios de la caldera fabricados en latón: un indicador del nivel de agua, una válvula de vapor, un manómetro y un inyector de agua. El latón es muy fácil de mecanizar, por lo que es muy adecuado para fabricar piezas tan complicadas como éstas.

Tabla 1.3 Aleaciones basadas en níquel.

<i>Metal</i>	<i>Composición típica (% peso)</i>	<i>Aplicaciones típicas</i>
Monel	Ni + 30 Cu 1 Fe 1 Mn	Resistentes a la corrosión: intercambiadores de calor
Superalaciones	Ni + 30 Cr 30 Fe 0,5 Ti 0,5 Al	Resistencia a la fluencia y la corrosión: partes de hornos
	Ni + 10 Co 10 W 9 Cr 5 Al 2 Ti	Alta resistencia a la fluencia: álabes de turbina y discos

## 1.3 Metales para latas de bebidas

Poca gente pensaría que una simple lata de bebida (Fig. 1.5) sea algo especial. Pero para un ingeniero de materiales es alta tecnología. Fijémonos en los requerimientos. Siempre que sea posible se desea evitar la soldadura. La lata no debe tener fugas, se debería usar la menor cantidad de metal posible para fabricarla y debería ser reciclable. Tenemos que escoger un



Figura 1.5 La lata de aluminio es un producto innovador. El cuerpo está hecho a partir de una única pieza de una aleación de aluminio de la serie 3000. La parte superior de la lata es una pieza prensada que se fija al cuerpo una vez que la lata se ha llenado. Hay limitaciones para la construcción en una sola pieza.

metal que sea tan dúctil que pueda ser estirado para formar el cuerpo de una lata a partir de un pequeño cilindro de metal. No se tiene que corroer en contacto con cerveza o Coca-Cola, no tiene que ser tóxico, tiene que ser ligero y muy barato.

Las *aleaciones de aluminio* son las elegidas<sup>1</sup> (Tabla 1.4): son ligeras, resistentes a la corrosión y no son tóxicas. Pero se tardaron algunos años en desarrollar tanto el proceso de conformado de la lata como la aleación para fabricarla. El producto final es un gran avance con respecto a la botella de cristal y se ha creado un nuevo mercado para el aluminio (ahora amenazado, como veremos en el Capítulo 21, por los polímeros). Como el aluminio es más ligero que la mayoría de los metales, también es una buena elección para el transporte: aviones, trenes de alta velocidad, coches... La mayoría de las aleaciones que aparecen en la Tabla 1.4 se usan para estas aplicaciones. Analizaremos con más detalle el origen de su resistencia, y en el Capítulo 10 veremos sus aplicaciones.

<sup>1</sup> El aluminio se considera un material barato (las cucharas de aluminio eran tan baratas que se tiraban). Pero eso no fue siempre así. Napoleón tenía una cubertería hecha de este nuevo material. Costó más que si se hubiera hecho de plata maciza.

Tabla 1.4 Aleaciones basadas en aluminio.

<i>Metal</i>	<i>Composición típica (% peso)</i>	<i>Aplicaciones típicas</i>
Serie 1000 Al puro	>99 Al	Poco resistente, pero dúctil y buen conductor eléctrico: líneas de suministro eléctrico, papel de aluminio
Serie 2000 aditivo principal Cu	Al + 4 Cu + Mg, Si, Mn	Endurecibles por maduración: fuselaje de aviones, piezas forjadas, largueros, mástiles, remaches
Serie 3000 aditivo principal Mn	Al + 1 Mn	Resistencia moderada, dúctil, excelente resistencia a la corrosión: cubiertas y tejados, cacerolas, latas de bebida
Serie 5000 aditivo principal Mg	Al + 3 Mg 0,5 Mn	Endurecibles por trabajo en frío, soldables: recipientes a presión, estructuras de barcos
Serie 6000 aditivos principales Mg + Si	Al + 0,5 Mg 0,5 Si	Resistencia moderada por maduración: secciones extruidas y anodizadas, por ejemplo marcos de ventanas
Serie 7000 aditivos principales Zn + Mg	Al + 6 Zn + Mg, Cu, Mn	Endurecibles por maduración: piezas forjadas para aviones, largueros, carrocerías ligeras de vagones de ferrocarril
Aleaciones de moldeo	Al + 11 Si	Moldeo en arena y en coquilla
Aleaciones aluminio-litio	Al + 3 Li	Baja densidad y buena resistencia: fuselaje de aviones y largueros

## 1.4 Metales para articulaciones de cadera artificiales

Como último ejemplo volvemos al mundo de la medicina. La artritis es una enfermedad que afecta a mucha gente y los hace más viejos. La enfermedad afecta a las uniones entre diferentes huesos (articulaciones) y hace que su movimiento sea difícil y doloroso. Está causado por pequeñas protuberancias en el hueso que crecen en la superficie de rozamiento de las articulaciones, impidiendo su correcto deslizamiento. Sólo puede solucionarse reemplazando la articulación afectada por una articulación artificial. La primera sustitución de cadera se realizó en 1897 y ahora es una operación muy habitual en cirugía ortopédica. De hecho, en el mundo se reemplazan medio millón de articulaciones de cadera cada año.

La Figura 1.6 muestra un implante que reemplaza a una articulación de cadera. En la operación, la cabeza del fémur se corta y se saca el tuétano para hacer un agujero en el centro del hueso. En el agujero se introduce un vástago metálico al que está unida la cabeza artificial. La cabeza encaja en una cavidad de polietileno de alta densidad que se pega en la cavidad del antiguo hueso. Los requisitos del implante son estrictos. Tiene que soportar

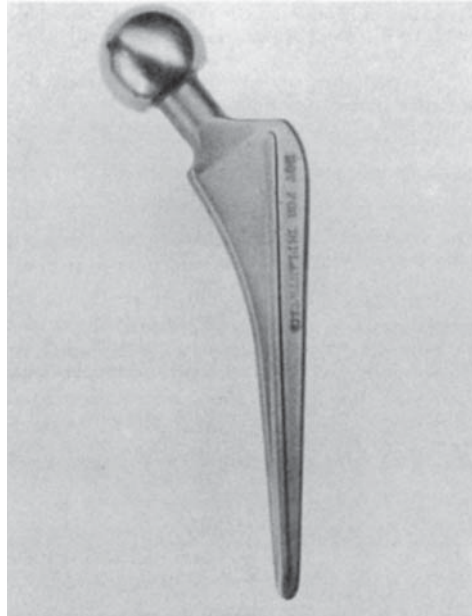


Figura 1.6 Implante de aleación de titanio para la sustitución de la articulación de la cadera. El largo vástago se pega en la parte superior del fémur. La cabeza esférica se engrana en una cavidad de polietileno de alta densidad que se pega en la cavidad pélvica.

grandes cargas sin doblarse. Cada vez que se usa la articulación ( $\approx 10^6$  veces al año) la carga que actúa fluctúa, dando lugar a un problema de fatiga a alto número de ciclos. Los fluidos fisiológicos son tan corrosivos como el agua del mar, por lo que las prótesis se tienen que diseñar para evitar la corrosión, la corrosión bajo tensión y la corrosión por fatiga. El metal tiene que ser biocompatible e, idealmente, debería ser lo más ligero posible.

Los materiales que mejor cumplen estos fuertes requisitos están basados en *titanio*. La aleación  $\alpha$ - $\beta$  mostrada en la Tabla 1.5 es tan resistente como un acero alto en carbono templado y revenido, es más resistente a la corrosión en presencia de fluidos fisiológicos que los aceros inoxidable y pesa la mitad. Una desventaja es que su módulo de elasticidad es sólo la mitad que el de los aceros, por lo que tiende a flexionarse bajo carga. Pero esto puede evitarse utilizando secciones ligeramente rígidas. La misma aleación se utiliza en los aviones, tanto en el fuselaje como en los turbocompresores de las turbinas.

Tabla 1.5 Aleaciones basadas en titanio.

<i>Metal</i>	<i>Composición típica (% peso)</i>	<i>Aplicaciones típicas</i>
Aleación de titanio $\alpha$ - $\beta$	Ti-6 Al 4 V	Ligera, muy resistente, excelente resistencia a la corrosión, alta temperatura de fusión, buena resistencia a la fluencia. La aleación se utiliza en turboventiladores, fuselaje, plantas químicas, implantes quirúrgicos

**Tabla 1.6** Propiedades de las aleaciones.

Metal	Precio (UK£ (US\$) tonelada <sup>-1</sup> )	Densidad (Mg m <sup>-3</sup> )	Módulo de Young (GPa)	Límite elástico (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Ductilidad	Tenacidad a la fractura (MPa m <sup>1/2</sup> )	Temperatura de fusión (K)	Calor específico (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Conductividad térmica (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Coefficiente expansión térmica (MK <sup>-1</sup> )
Hierro	100 (140)	7,9	211	50	200	0,3	80	1809	456	78	12
Acero dulce	200-230 (260-300)	7,9	210	220	430	0,21	140	1765	482	60	12
Acero alto carbono	150 (200)	7,8	210	350-1600	650-2000	0,1-0,2	20-50	1570	460	40	12
Aceros débilmente aleados	180-250 (230-330)	7,8	203	290-1600	420-2000	0,1-0,2	50-170	1750	460	40	12
Aceros aleados	1100-1400 (1400-1800)	7,8	215	170-1600	460-1700	0,1-0,5	50-170	1680	500	12-30	10-18
Fundiciones	120 (160)	7,4	152	50-400	10-800	0-0,18	6-20	1403			
Cobre	1020 (1330)	8,9	130	75	220	0,5-0,9	>100	1356	385	397	17
Latones	750-1060 (980-1380)	8,4	105	200	350	0,5	30-100	1190		121	20
Bronces	1500 (2000)	8,4	120	200	350	0,5	30-100	1120		85	19
Níquel	3200 (4200)	8,9	214	60	300	0,4	>100	1728	450	89	13
Aleación monel	3000 (3900)	8,9	185	340	680	0,5	>100	1600	420	22	14
Superalaciones	5000 (6500)	7,9	214	800	1300	0,2	>100	1550	450	11	12
Aluminio	910 (1180)	2,7	71	25-125	75-135	0,1-0,5	45	933	917	240	24
Serie 1000	910 (1180)	2,7	71	28-165	75-180	0,1-0,45	45	915			24
Serie 2000	1100 (1430)	2,8	71	200-500	300-600	0,1-0,25	10-50	860		180	24
Serie 5000	1000 (1300)	2,7	71	40-300	120-430	0,1-0,35	30-40	890		130	22
Serie 7000	1100 (1430)	2,8	71	350-600	500-670	0,1-0,17	20-70	890		150	24
Aleaciones para moldeo	1100 (1430)	2,7	71	65-350	130-400	0,01-0,15	5-30	860		140	20
Titanio	4630 (6020)	4,5	120	170	240	0,25		1940	530	22	9
Ti-6 Al 4 V	5780 (7510)	4,4	115	800-900	900-1000	0,1-0,2	50-80	1920	610	6	8
Zinc	330 (430)	7,1	105		120	0,4		693	390	120	31
Soldadura plomo-estaño	2000 (2600)	9,4	40					456			
Aleaciones moldeo en coquilla	800 (1040)	6,7	105		280-330	0,07-0,15		650	420	110	27

## 1.5 Datos de metales

Cuando se selecciona un metal para alguna aplicación se necesitan datos. La Tabla 1.6 proporciona valores *aproximados* de las propiedades de las principales aleaciones, muy útiles en la primera fase de un proyecto de diseño. Cuando se haya limitado la elección se pueden consultar los datos más exhaustivos de las Referencias. Finalmente, antes de tomar la decisión se deben solicitar las especificaciones detalladas de los materiales al suministrador que proporcionará los materiales que se van a utilizar. Si el componente es crítico (significa que su fallo puede provocar una catástrofe) se debería ensayar previamente. Hay, por supuesto, muchos más metales disponibles que los que aparecen en la lista. Es muy útil saber que algunas propiedades dependen ligeramente de la microestructura: la densidad, el módulo, la expansión térmica y el calor específico de *algunos* aceros tienen valores muy próximos a los que aparecen en la tabla. (En la tabla se puede ver que las variaciones de estas propiedades no superan un  $\pm 5\%$ .) Éstas son propiedades “*no sensibles a la estructura*”. Otras propiedades, sin embargo, varían mucho con los tratamientos térmicos y mecánicos, y con la composición de la aleación; son propiedades “*sensibles a la estructura*”: límite elástico, resistencia a la tracción, ductilidad, tenacidad a la fractura, fluencia y resistencia a la fatiga. No se pueden estimar a partir de los datos de otras aleaciones, aun cuando la composición sea casi la misma. En estos casos es *esencial* consultar las hojas de datos de los fabricantes que contienen las propiedades de la aleación que se piensa utilizar, con los mismos tratamientos mecánicos y térmicos.

### Ejemplos

**1.1** Explicar cuál es el significado de los siguientes términos:

- (a) Propiedades sensibles a la estructura.
- (b) Propiedades no sensibles a la estructura.

Enumerar cinco propiedades sensibles a la estructura.

Enumerar cinco propiedades no sensibles a la estructura.

### Respuestas

Propiedades sensibles a la estructura: límite elástico, dureza, resistencia a la tracción, ductilidad, tenacidad a la fractura, resistencia a la fatiga, resistencia a la fluencia, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, conductividad térmica, conductividad eléctrica. Propiedades no sensibles a la estructura: módulo elástico, coeficiente de Poisson, densidad, coeficiente de expansión térmica, calor específico.

**1.2** ¿Cuáles son los cinco tipos de aleaciones? Para cada tipo:

- (a) Dar un ejemplo de un componente específico fabricado con ese tipo de aleación.
- (b) Indicar por qué se ha seleccionado ese tipo de aleación para fabricar el componente.