

POLITEXT

Carles Riba Romeva

Selección de materiales en el diseño de máquinas

EDICIONS UPC

Selección de materiales en el diseño de máquinas

POLITEXT

Carles Riba Romeva

Selección de materiales en el diseño de máquinas

EDICIONS UPC

Primera edición: enero de 2008

Diseño de la cubierta: Manuel Andreu

© Carles Riba Romeva, 2008

© Edicions UPC, 2008
Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL
Jordi Girona Salgado 1-3, 08034 Barcelona
Tel.: 934 137 540 Fax: 934 137 541
Edicions Virtuals: www.edicionsupc.es
E-mail: edicions-upc@upc.edu

ISBN: 978-84-9880-406-5

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, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos.

Presentación

Una de las actividades más apasionantes, y a menudo más complejas, de la ingeniería es el proceso de creación, o diseño, de una máquina o un producto a partir de unas funciones y de unas prestaciones previamente especificadas. Constituye una materia pluridisciplinaria que incluye, entre otras, la teoría de máquinas y mecanismos, el cálculo y la simulación, las soluciones constructivas, los accionamientos y su control, la aplicación de materiales, las tecnologías de fabricación, las técnicas de representación, la ergonomía, la seguridad, la consideración de impactos ambientales y el fin de vida, que se integran en forma de un proyecto.

En la versión original en catalán, este texto forma parte de un conjunto de cinco trabajos que tratan el diseño de máquinas desde distintos puntos de vista complementarios (I-Mecanismos; II-Estructura constructiva; III-Accionamientos; IV-Selección de materiales; V-Metodología), cada uno de ellos con un tratamiento autónomo para ser leído o consultado con independencia de los otros.

El objetivo del conjunto de la obra es dar unas orientaciones conceptuales y metodológicas a aquellas personas con formación de nivel universitario que, en algún momento de su actividad profesional, deberán emprender el diseño o la fabricación de una máquina o de algún producto análogo.

Esta versión en castellano del volumen IV trata de la selección de materiales para cada una de las piezas o componentes de un conjunto, una de las tareas más decisivas en el diseño de máquinas. Su contenido se reparte en cuatro partes: el capítulo 1 trata sobre criterios de selección (cualitativos y cuantitativos), el capítulo 2 trata de los aceros y fundiciones, el capítulo 3 trata de los metales no férricos (entre otras, las aleaciones de aluminio y cobre), y el capítulo 4 trata de los materiales no metálicos (plásticos, elastómeros, materiales compuestos y cerámicas), complementados en esta nueva edición por unos anexos de ejercicios y de normativa.

Durante los últimos 50 años, el diseñador de máquinas ha visto aumentar de forma decisiva la disponibilidad de materiales, no tan sólo con la mejora de los materiales tradicionales (aceros, fundiciones, bronce y latones), sino también con el desarrollo de los metales ligeros (especialmente del aluminio), de los aceros inoxidables, de una gama creciente y cada vez más técnicas de plásticos y elastómeros, de los materiales compuestos e incluso de las cerámicas técnicas.

A su vez, la selección de materiales ha ido transformándose en una tarea cada vez más compleja, dada la necesidad de evaluar de forma ponderada numerosas propiedades físicas (densidad, características eléctricas, térmicas, ópticas), químicas (resistencia a la corrosión, a las radiaciones), mecánicas (resistencia, rigidez, fatiga, impacto, fluencia, propiedades deslizantes, desgaste) y tecnológicas (precio, fabricabilidad, temperaturas de servicio, deterioros, impactos ambientales).

El objetivo de este texto es doble: proporcionar criterios para la selección de materiales en el diseño de máquinas y, al mismo tiempo, ofrecer una panorámica de los principales materiales usados en esta disciplina, facilitando una estructura común en las tablas de propiedades y resaltando los rasgos más característicos de la aplicación de cada uno de ellos.

El presente texto es una revisión de la primera edición del año 1997 a la luz de las numerosas normas aparecidas en estos últimos 10 años (especialmente las europeas EN). Las tablas se basan fundamentalmente en las normas EN y se ha optado por incorporar unos anexos con las principales equivalencias entre las normas EN, las ISO, las normas americanas, las japonesas y las antiguas normas de los principales países europeos.

En la primera edición de esta obra fueron de gran utilidad las normativas (UNE; EN, aunque pocas; ISO; ASTM; DIN), y la documentación escrita y las informaciones proporcionadas por fabricantes de materiales (Thyssen, Schmidt+Clemens, Du Pont, Hoechst, Bayer, Basf, Cristalería Española), por casas comerciales suministradoras (Urssa, Ausa, Rovalma, Hastinik, Alumafel, Coasol, Macla, Posa), por empresas transformadoras (Fundiciones de Roda, Ames, Industrias Plásticas Trilla, Gates-Vulca) y por empresas fabricantes de maquinaria y producto (Girbau, Derbi, Construcciones Margarit, Ros Roca), especialmente en lo que se refiere a la selección de materiales incluidos en las tablas y a las recomendaciones para su uso. En esta segunda edición, además de las normas (fundamentalmente EN, ahora mucho más desarrollada, e ISO) y la consulta de nuevas empresas (Tratamientos Térmicos Carreras, Molfisa), se ha obtenido un gran volumen de información directamente de internet (Arcelor-Mittal, ThyssenKrupp, Corus, Salzgitter, USS, Euralliage, AluSelect, Kuperinstitut, International Zinc Assotiation, Key-to-Metals, OTUA, eFunda, IDES, Campus, MatWeb, Maryland Metrics y Global Spec entre otras).

Quiero agradecer las opiniones y criterios de muchos profesores compañeros de la Universitat Politècnica de Catalunya, especialmente de los Departamentos de Ingeniería Mecánica (Josep Fenollosa Coral, Adrià Candaló Cháfer, Albert Fortuny Garcia y Jordi Martínez Miralles), Ingeniería Química (Josep M. Fernández Santin) e Ingeniería de Materiales (José Manuel Prado Pozuelo, Antoni Martínez Benasat, Jordi Tartera Barrabeig, Antonio Herrero Palomo y Maria Lluïsa MasPOCH Ruldua) de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, así como el intercambio diario con los numerosos colaboradores del Centre de Disseny d'Equips Industrials de la Universitat Politècnica de Catalunya, CDEI-UPC, que dirijo y, de forma destacada con Carles Domènech Mestres, Sònia Llorens Cervera, Judit Coll Raïch, Huáscar Paz Bernales, Elena Blanco Romero y Andreu Presas Renom.

En la elaboración de la primera edición de la obra colaboraron Oriol Adelantado Nogué, siguiendo las vicisitudes de los trabajos desde el inicio, y Guillermo de Miguel Gambús, realizando las figuras. En esta segunda edición revisada ha colaborado Jordi Fabra Sales en la búsqueda de información y la elaboración de tablas y, en la traducción al castellano, han intervenido, además del propio autor, Valentina Kallewaard E., David Cortés Saenz, David Martínez Verdú y Jordi Fabra Sales.

Finalmente, quisiera agradecer nuevamente el apoyo y comprensión que han mostrado mi esposa Mercè Renom Pulit y mis hijas e hijos Martina, Nolasc y Joana.

	Presentación	5
1	Criterios de selección	11
1.1	Introducción	11
	1.1.1 Carácter concurrente	11
	1.1.2 Los materiales en el diseño de máquinas	12
1.2	Propiedades físicas	15
	1.2.1 Densidad	15
	1.2.2 Propiedades ópticas	15
	1.2.3 Propiedades térmicas	16
	1.2.4 Propiedades eléctricas y magnéticas	17
1.3	Propiedades mecánicas	19
	1.3.1 Ensayos de rotura	19
	1.3.2 Ensayos superficiales	23
	1.3.3 Criterios de diseño	28
1.4	Propiedades tecnológicas	29
	1.4.1 Coste, suministro y transformación	29
	1.4.2 Relación con el usuario	29
	1.4.3 Interacción con el entorno	31
1.5	Selección cuantitativa de materiales	34
	1.5.1 Introducción	34
	1.5.2 Método de las magnitudes características	36
	1.5.3 Ejemplo 1: Resistencia y rigidez a tracción y a flexión	37
	1.5.4 Ejemplo 2: Energía térmica acumulada	41
	1.5.5 Ejemplo 3: Pérdidas por efecto Joule en un cable	42
2	Metales. Aceros y fundiciones	45
2.1	Introducción a los metales	45
	2.1.1 Visión de conjunto	45
	2.1.2 Deformación plástica en frío	46
	2.1.3 Tratamientos térmicos	46
	2.1.4 Corrosión y su prevención	48
	2.1.5 Propiedades de los metales	50
	2.1.6 Recubrimientos	55
2.2	Materiales férricos	61
	2.2.1 Introducción	61
	2.2.2 Productos férricos y fabricación de piezas	61
	2.2.3 Proceso siderúrgico y productos férricos	62
	2.2.4 Obtención de piezas con formas específicas	64
	2.2.5 Tratamientos térmicos máxicos	66
	2.2.6 Tratamientos de endurecimiento superficial	68
	2.2.7 Composición de los aceros. Elementos de aleación	69
	2.2.8 Clasificación de los materiales férricos	71
	2.2.9 Normativa general sobre los aceros	72

2.3	Aceros de construcción	74
2.3.1	Descripción y características	74
2.3.2	Tipos y aplicaciones	76
2.3.3	Normativa y designaciones	77
2.3.4	Aceros estructurales	78
2.3.5	Aceros para aplicaciones a presión	81
2.3.6	Aceros para conformar en frío y de embutición	82
2.3.7	Aceros de construcción resistentes al desgaste	84
2.3.8	Productos de acero recubiertos	84
	Tablas de aceros de construcción	86
2.4	Aceros de máquinas	93
2.4.1	Introducción	93
2.4.2	Normativa y designaciones	93
2.4.3	Aceros de bonificación (temple y revenido)	95
2.4.4	Aceros de endurecimiento superficial	97
2.4.5	Aceros de elevado límite elástico (aceros para muelles)	100
2.4.6	Aceros de mecanización	102
2.4.7	Materiales para componentes de máquinas	102
	Tablas de aceros de máquinas	104
2.5	Aceros de herramientas	111
2.5.1	Introducción	111
2.5.2	Normativa y designaciones	111
2.5.3	Aceros de herramientas para trabajo en frío	111
2.5.4	Aceros de herramientas para moldes de plástico	112
2.5.5	Aceros de herramientas para trabajo en caliente	113
2.5.6	Aceros rápidos	113
	Tablas de aceros de herramientas	114
2.6	Aceros inoxidables	116
2.6.1	Introducción a los aceros inoxidables	116
2.6.2	Normativa y designaciones	116
2.6.3	Aceros inoxidables ferríticos	117
2.6.4	Aceros inoxidables martensíticos y endurecidos por precipitación (HP)	118
2.6.5	Aceros inoxidables austeníticos	118
2.6.6	Aceros inoxidables austenítico-ferríticos (<i>dúplex</i>)	122
	Tablas de aceros inoxidables	120
2.7	Fundiciones y aceros para moldeo	123
2.7.1	Conformación de materiales férricos por moldeo	123
2.7.2	Normativa	123
2.7.3	Fundiciones	123
2.7.4	Aceros de moldeo	127
	Tablas de fundiciones grises, nodulares y ADI	128

3	Metales no férricos	133
3.1	Aluminio y aleaciones de aluminio	133
3.1.1	Introducción	133
3.1.2	Propiedades de las aleaciones de aluminio	133
3.1.3	Normativa	134
3.1.4	Estados de suministro y tratamientos térmicos	134
3.1.5	Resistencia a la corrosión. Anodizado	135
3.1.6	Grupos de aleaciones de aluminio y aplicaciones	136
3.1.7	Aleaciones de aluminio de forja (laminación, extrusión)	136
3.1.8	Aleaciones de aluminio para moldeo	138
	Tablas de aleaciones de aluminio para forja	140
3.2	Cobre y aleaciones de cobre	146
3.2.1	Introducción al cobre y aleaciones de cobre	146
3.2.2	Normativa y designaciones	146
3.2.3	Estados de suministro	147
3.2.4	Cobres	148
3.2.5	Latones	148
3.2.6	Bronces	150
3.2.7	Otras aleaciones de cobre	151
	Tablas de cobre y aleaciones de cobre	152
3.3	Otros metales	156
3.3.1	Introducción	156
3.3.2	Cinc y aleaciones de cinc	156
3.3.3	Magnesio y aleaciones de magnesio	157
3.3.4	Titanio y aleaciones de titanio	158
3.3.5	Níquel y aleaciones de níquel	159
3.3.6	Superaleaciones	160
	Tablas de cinc y aleaciones de cinc	161
4	Materiales no metálicos	169
4.1	Introducción a los polímeros	169
4.1.1	Definiciones	169
4.1.2	Campos de aplicación	169
4.1.3	Estructura molecular	170
4.1.4	Caracterización termomecánica de los polímeros	172
4.1.5	Modificaciones de las propiedades de los polímeros	173
4.1.6	Comportamiento mecánico de larga duración	174
4.1.7	Comportamiento mecánico de corta duración	178
4.1.8	Deterioro de los polímeros	180
4.1.9	Procesos de transformación	181

4.2	Plásticos	189
4.2.1	Introducción	189
4.2.2	Normativa y designaciones	190
4.2.3	Marcado y reciclaje	195
4.2.4	Propiedades de los plásticos	195
4.2.5	Plásticos de consumo	200
4.2.6	Plásticos técnicos (termoplásticos)	202
4.2.7	Plásticos técnicos (termoestables)	205
4.2.8	Plásticos de altas prestaciones	207
4.2.9	Plásticos especiales	209
4.2.10	Selección del material y diseño de piezas de plástico	210
	Tablas de plásticos	212
4.3	Elastómeros	218
4.3.1	Introducción	218
4.3.2	Propiedades de los elastómeros	219
4.3.3	Normativa	222
4.3.4	Cauchos de buenas propiedades mecánicas	225
4.3.5	Elastómeros resistentes a los agentes atmosféricos	225
4.3.6	Elastómeros resistentes a los aceites	226
4.3.7	Elastómeros resistentes a altas temperaturas	227
4.3.8	Elastómeros termoplásticos (TPE)	228
	Tablas de elastómeros	230
4.4	Materiales compuestos	234
4.4.1	Introducción	234
4.4.2	Polímeros reforzados	234
	Tablas de polímeros reforzados	237
4.4.3	Polímeros espumados (o expandidos)	241
	Tablas de polímeros espumados	243
4.4.4	Maderas y productos derivados	245
	Tablas de maderas	247
4.5	Cerámicas	248
4.5.1	Introducción	248
4.5.2	Vidrios	249
4.5.3	Cerámicas de ingeniería	251
	Tablas de vidrios y cerámicas técnicas	252
	Bibliografía	255
	Sistemas de normalización. Tablas de correspondencias de materiales	261

1 Criterios de selección

1.1 Introducción

1.1.1 Carácter concurrente

La selección del material para las distintas piezas o componentes de un conjunto mecánico es una de las decisiones centrales del proceso de diseño de una máquina. A continuación se establecen diversas consideraciones generales sobre esta actividad.

Ciclo de vida

Respuesta a la función

El material elegido debe responder a las exigencias de la función de la pieza o componente. Este aspecto está íntimamente relacionado con sus características físicas (densidad, propiedades ópticas, térmicas y eléctricas) y mecánicas (resistencia mecánica, rigidez, propiedades deslizantes). Debe tenerse en cuenta el aspecto concurrente ya dentro de la misma función: por ejemplo, aunque sea muy caro, la selección de un material de propiedades elevadas para un elemento muy solicitado (un engranaje, un árbol) puede repercutir favorablemente en el peso y dimensiones del conjunto de la máquina.

Conformación y fabricación

La selección del material no puede desligarse del método de conformado y del proceso de fabricación de la pieza o componente. En efecto, aunque un material posea las propiedades requeridas para realizar una función, debe prestarse al método de elaboración deseado (o disponible) con un coste razonable.

Coste y suministro

Entre materiales candidatos equivalentes, el coste y las condiciones de suministro (productos semielaborados, regularidad en las propiedades, disponibilidad, lotes mínimos) son determinantes en la selección del material.

Relación con el usuario

Aspecto que cada día adquiere mayor importancia en la selección del material: facilidad para dar formas, colores y texturas atractivas, tacto amigable, sensación de solidez o de ligereza. Deben considerarse los costes asociados a las operaciones de acabado.

Facilidad de reciclaje

Es el último de los condicionantes de carácter concurrente que hay que incorporar en la selección del material: debe ser reciclable, tanto por imposición legal como por la creciente sensibi-

lidad ciudadana. Este es el motivo de muchas decisiones de cambios de materiales y también en relación a su tratamiento (por ejemplo, las mezclas suelen ser más difíciles de reciclar).

Grado de innovación

Ante la selección de materiales para un determinado producto, el diseñador de máquinas puede orientarse hacia soluciones experimentadas o hacia soluciones innovadoras. La recomendación podría ser la siguiente:

Soluciones experimentadas

En general conviene analizar los materiales usados en soluciones experimentadas (la selección de materiales exige la consideración de un gran número de variables de difícil evaluación). Así pues, una solución prudente es basarse en aplicaciones experimentadas y materiales usuales.

Soluciones innovadoras

Cuando cambian las situaciones (nuevos requerimientos, nuevos materiales o nuevas relaciones de precios), la selección de los materiales adquiere toda su capacidad transformadora. A menudo, una máquina o un producto devienen competitivos gracias a la aplicación innovadora de un material tradicional o a la introducción de un nuevo material.

Características y propiedades de los materiales

Dos de los aspectos más importantes en la tarea de selección de materiales en el diseño de máquinas son disponer de una buena información de base sobre las características y propiedades de los materiales, así como de herramientas para procesar e interpretar esta información.

Organización de los datos sobre propiedades de los materiales

A pesar del gran volumen de información disponible sobre propiedades de los materiales, pocos textos las presentan de forma sistematizada y coherente, orientada a la fase inicial de selección (la mayoría de bases de datos, generalmente muy especializadas, suelen ser útiles en la fase final de selección). Para posibilitar las comparaciones entre materiales, las propiedades cuantificables deben obtenerse mediante metodologías y unidades coherentes, y las características no cuantificables (a menudo olvidadas) deben evaluarse con baremos de fácil interpretación. Este es uno de los retos asumidos en este texto.

Cuantificación de la selección de materiales

Las clasificaciones de materiales según una propiedad individual (resistencia a la tracción, conductividad eléctrica, transmisividad óptica) dan unos primeros criterios de selección. Sin embargo, cuando se cuantifica la influencia combinada de varias propiedades (resistencia por unidad de masa, conductividad eléctrica por unidad de coste; denominadas en este texto *magnitudes características*, sección 1.5), se obtiene una visión cuantitativa más profunda y a la vez más ajustada para una aplicación determinada.

1.1.2 Los materiales en el diseño de máquinas

Los materiales disponibles en ingeniería son muy numerosos y se distinguen fundamentalmente por su composición química, su estado (sólido, líquido, gas), su estructura (cristalina, amorfa), sus distintas fases, sus impurezas y la distribución de estos componentes. El diseño de máquinas se interesa fundamentalmente por los materiales sólidos que realizan funciones estructurales (soportar adecuadamente las tensiones y experimentar deformaciones controladas), funciones de guiado (deslizamiento y adherencia, resistencia a la abrasión) y otras funciones (contención de líquidos, protección, aspectos estéticos y relación con el usuario).

Tabla 1.1 Cuadro comparativo de materiales de las principales familias

	Materiales metálicos			Materiales basados en polímeros	
	Acero	Aluminio	Latón	Termo-plástico	Elastómero
	C45E	AlMg0,7Si T6	CuZn30 R480	PE-HD	NR

Composición química	Unidades					
Aluminio	%	-	Resto	≤0,02	-	-
Carbono C	%	0,42÷0,50	-	-	-	-
Cobre Cu	%	-	≤0,10	Resto	-	-
Hierro Fe	%	Resto	≤0,35	-	-	-
Magnesio Mg	%	-	0,45÷0,90	-	-	-
Silicio Si	%	-	0,20÷0,60	-	-	-
Cinc Zn	%	-	≤0,10	29,0÷31,0	-	-
Propiedades físicas	Unidades					
Densidad	Mg/m ³	7,85	2,70	8,53	0,94÷0,96	0,93
Coefficiente dilatación	μm/m·K	12,0	23,5	19,9	200	216
Calor específico	J/kg·K	440	898	375	2100÷2700	2500
Conductividad térmica	W/m·K	50	201	120	0,38÷0,51	0,165
Resistividad eléctrica	Ω·m	150·10 ⁻⁹	33,2·10 ⁻⁹	62·10 ⁻⁹	>10 ¹⁵	10 ¹³ ÷10 ¹⁵
Propiedades mecánicas	Unidades					
Resistencia tracción	MPa	≥620/560	≥245	≥480	18÷35	20÷28
Límite elástico	MPa	≥340/275	≥170	≥430	-	-
Alargamiento rotura	%	≥14/16	≥10	≥2	100÷1000	300÷900
Módulo de elasticidad	GPa	210	69,5	110	0,7÷1,4	0,001÷0,010
Dureza	HB	207	75	150	40÷65 ⁽¹⁾	30÷95 ⁽²⁾
Propiedad. tecnológicas	Unidades					
Coste	€/kg	0,87	4,20	3,80	1,15	1,60
Temperatura de fusión	°C	1520	615÷655	915÷955	160÷200	-
Temp. máxima de uso	°C	450	100÷150	300	70÷80	70÷90

(1) Dureza a la bola (MPa)

(2) Dureza IRHD (≈ Shore A)

2 Metales. Aceros y fundiciones

2.1 Introducción a los metales

2.1.1 Visión de conjunto

Los materiales metálicos y, entre ellos, los materiales férricos, constituyen el grupo más importante de materiales en el diseño y fabricación de máquinas. Sus características más destacadas son: *a*) excelentes propiedades mecánicas (resistencia, rigidez, frente a los polímeros; y tenacidad, frente a las cerámicas); *b*) buena conductividad eléctrica y del calor; *c*) muy buenas características para el conformado (muy particularmente para la deformación plástica); *d*) la posibilidad de modificar las propiedades mecánicas por medio de deformación plástica en frío (trabajo en frío) o de tratamientos térmicos. Estas dos últimas características se analizan en los próximos apartados.

Los metales más usados en el diseño de máquinas son:

Materiales férricos (Fe): los aceros, de muy buenas características mecánicas, y las fundiciones, de fácil moldeo, todos ellos de coste moderado pero muy densos y vulnerables a la corrosión; y los aceros inoxidable, resistentes a la corrosión, pero de coste mucho más elevado.

Aleaciones del aluminio (Al): muy ligeras y resistentes a la corrosión, pero de características mecánicas más moderadas y precio más elevado.

Aleaciones del cobre (Cu), (comercial, bronce y latones): excelentes conductoras (electricidad, calor), resistentes a la corrosión y de características mecánicas intermedias, pero muy densas y caras.

En proporciones más limitadas también se usan en el diseño de máquinas: las *aleaciones de cinc* (Zn), por su bajo punto de fusión y fácil moldeo; las *aleaciones de magnesio* (Mg), por su bajísima densidad; las *aleaciones de titanio* (Ti), por su relativa ligereza, buenas características mecánicas y resistencia a la corrosión, pero de coste muy elevado; y las *aleaciones de Níquel* (Ni), por su gran resistencia a la corrosión y buenas características mecánicas, pero de densidad y coste muy elevados.

Antes de analizar las propiedades de los materiales metálicos, se estudian tres aspectos determinantes en muchas aplicaciones donde los metales presentan un comportamiento específico diferenciado de otras familias de materiales: *a*) *deformación plástica en frío*; *b*) *tratamientos térmicos*; *c*) *la corrosión y su prevención*.

En relación a los dos primeros puntos, cabe señalar que los *diagramas de fases* muestran las distintas fases obtenidas en condiciones de equilibrio en función de la composición y la temperatura. Sin embargo, otros aspectos mecánicos y metalúrgicos (procesos de deformación plástica en frío, o tratamientos térmicos realizados fuera de las condiciones de equilibrio) son determinantes en las microestructuras (forma, dimensión, distribución y orientación de los granos de las distintas fases) y, en definitiva, modulan las propiedades mecánicas del material.

Respecto al tercer punto, cabe decir que los metales experimentan un tipo de deterioro específico, la corrosión, relacionada en gran medida con el hecho de ser materiales conductores (efectos galvánicos), lo que merece también un análisis específico y el estudio de sus formas de prevención.

2.1.2 Deformación plástica en frío

La deformación plástica en frío es probablemente el aspecto que más diferencia el comportamiento de los metales respecto a otros materiales. Tiene dos efectos importantes: permite mejorar las características mecánicas del material y facilita varios procesos característicos de conformado en frío (laminación, extrusión, estampación, plegado, curvado, embutición).

Mecanismo de deformación plástica en frío

Cuando un metal es sometido a una tensión superior a su límite elástico, se produce un pequeño alargamiento irreversible, o deformación plástica. Un nuevo aumento de la tensión produce un nuevo alargamiento, y así la deformación plástica continúa hasta que el material agota su capacidad de deformación y experimenta la rotura.

El alargamiento tiene lugar por medio de unos pequeños deslizamientos entre planos de máxima densidad atómica de la red cristalina del metal. La estructura cúbica centrada en las caras, f.c.c., tiene 12 planos de deslizamiento y proporciona una gran ductilidad (Al, Cu); la estructura hexagonal, c.p.h., tiene tan sólo 3 planos de deslizamiento por lo que proporciona una baja ductilidad (Mg, Ti α , Co); finalmente, la estructura cúbica centrada en el cuerpo, b.c.c., se halla en una situación intermedia (Fe α , Mo, W).

Las tensiones necesarias para producir estos pequeños deslizamientos en un metal, calculados a partir de las fuerzas de los enlaces atómicos, son de 100 a 1000 veces mayores que el límite elástico. Es por ello que el modelo aceptado hoy día para explicar la deformación plástica parte de la existencia de múltiples dislocaciones (defectos en la regularidad de la red) que se propagan paso a paso (movimiento de oruga) con una tensión considerablemente inferior a la calculada.

La propagación de las dislocaciones puede detenerse mediante diversos tipos de barrera: límites de grano (donde hay un cambio de orientación de la red), defectos localizados (vacantes en la red, partículas de sustitución o intersticiales) y confluencia con otras dislocaciones. En cada nueva deformación plástica, las dislocaciones se propagan según orientaciones y condiciones menos favorables hasta que llega un momento en el que la tensión necesaria para una nueva dislocación es mayor que la de las fisuras inestables, y entonces se produce la rotura frágil.

Trabajo en frío (acritud)

A medida que un metal va acumulando deformación plástica en frío, aumenta su resistencia y dureza, mientras que disminuye, la ductilidad y tenacidad. Los productos trabajados en frío tienen unas propiedades mecánicas mejoradas y una buena precisión dimensional (sin embargo, si el trabajo mecánico ha sido excesivo, el material puede resultar demasiado frágil).

2.1.3 Tratamientos térmicos

Conjunto de procesos aplicados a las aleaciones metálicas, que se realizan mediante el control de las velocidades de calentamiento, de enfriamiento y del tiempo de permanencia a distintas temperaturas (en algunos casos en medios o atmósferas determinadas). Tienen por objeto obtener o controlar la naturaleza, cantidad, dimensión, forma, distribución y orientación de las fases y, en determinadas ocasiones, controlar o modificar el estado de tensiones internas del material.

Los principales tratamientos térmicos son: el *recocido* y el *endurecimiento por precipitación* y, en los materiales férricos, también la *transformación martensítica* y los tratamientos superficiales de *endurecimiento por difusión*.

Hay que advertir que los tratamientos térmicos originan importantes incrementos de costes que a menudo duplican el precio de las piezas, por lo que sólo conviene aplicarlos cuando las soluciones alternativas no son adecuadas o comportan un dimensionado excesivo de los componentes.

Recocido

Tratamiento térmico que permite devolver la estructura distorsionada de un metal, debida a una previa deformación plástica en frío, a un estado libre de tensiones y con la ductilidad original. El proceso de recocido presenta tres grados: reducción de la distorsión, recristalización y crecimiento del grano. Según se avance en el proceso, recibe distintos nombres y tiene distintos objetivos.

Recocido de liberación de tensiones: Tratamiento térmico a baja temperatura que no produce cambios en la microestructura del metal, pero que libera tensiones de una estructura previamente distorsionada. Esta operación es muy importante después de procesos que hayan originado tensiones internas en el material (grandes deformaciones plásticas, determinados tratamientos térmicos, soldadura).

Recocido de regeneración: Si la temperatura aumenta hasta la de recristalización, en las zonas de mayor distorsión se nuclean cristales libres de tensiones, que crecen hasta encontrar los granos vecinos. Si se controla la temperatura, el tiempo de permanencia y la velocidad de enfriamiento, se puede obtener una estructura de grano fino y uniforme que presenta muy buenas características mecánicas. La *normalización* de los aceros es una forma de recocido de regeneración realizado con un enfriamiento en aire quieto.

Recocido total: Si después de la nucleación de nuevos granos se mantiene la temperatura de recocido durante un tiempo prolongado, se obtiene una estructura de granos de gran tamaño (por absorción de los granos vecinos), de resistencia y dureza muy bajas, pero con una gran ductilidad. En un metal, los procesos de deformación en frío y de recocido total pueden realizarse sucesivamente tantas veces como se crea conveniente.

Trabajo en caliente: Consiste en la deformación plástica de un metal por encima de la temperatura de recristalización, de forma que la acritud se compensa con la recristalización, por lo que la deformación plástica puede continuar indefinidamente. El trabajo requerido para la deformación de un metal en caliente es muy inferior al necesario para la deformación en frío, a la vez que permite obtener cambios de forma y de dimensiones mucho mayores, pero las piezas o productos resultantes tienen unas características mecánicas más moderadas, una precisión dimensional más reducida y aparecen recubiertos de capas de óxido.

Endurecimiento por precipitación

Tratamiento térmico que produce una segunda fase de partículas finamente dispersas en la primera, que tiene por efecto la creación de un gran número de barreras a la propagación de las dislocaciones. Se consigue por medio de una primera operación de solubilización de un elemento de aleación a elevada temperatura, seguida de un enfriamiento rápido para crear una solución sobresaturada (en algunos casos hasta temperaturas inferiores a la ambiente) conservando la ductilidad para, finalmente, dar lugar a una fina precipitación a temperatura ambiente (envejecimiento natural) o a temperatura superior (envejecimiento artificial), produciéndose el efecto de endurecimiento por el bloqueo de las dislocaciones.

Un efecto similar se puede obtener por sinterización de polvos de dos composiciones distintas; recibe entonces el nombre de *endurecimiento por dispersión*.

El tratamiento de *bonificación* en los aceros (temple y revenido) presenta ciertas analogías con el *endurecimiento por precipitación*.

2.1.4 Corrosión y su prevención

La corrosión es el deterioro o destrucción de un metal debido a la reacción con el medio de su entorno (aire seco, húmedo; agua dulce, salada; atmósfera rural, urbana, marina; suelo; vapor de agua; aceites y disolventes; gasolinas y gasóleos; ácidos y bases). En la industria, los medios corrosivos a menudo se acompañan de elevadas temperaturas y presiones que agravan el ataque.

Hay que distinguir entre *corrosión húmeda* (la más frecuente), que normalmente se produce a temperatura ambiente en presencia de un líquido (generalmente una solución acuosa), donde se forman electrolitos que causan fenómenos galvánicos, y *corrosión seca* (mucho más rara), que se produce frecuentemente a altas temperaturas (hornos) en ausencia de líquidos (o por encima de su punto de rocío), donde los vapores y gases son los agentes corrosivos.

Las actitudes del diseñador de máquinas frente a la corrosión pueden ser diversas. En algunas aplicaciones, donde es primordial la apariencia superficial, se usan o bien materiales nobles (cocinas industriales) o se aplican pinturas u otros recubrimientos estéticos (carrocerías de automóviles). En otros casos la corrosión puede dar lugar a fallos de funcionamiento (corrosión de tubos, deterioro de juntas, rotura de elementos) y, entonces, se utilizan materiales resistentes a la corrosión para evitar los importantes costes derivados del mantenimiento o de eventuales accidentes. En algunos casos se lucha contra la corrosión sobredimensionando las piezas.

Las principales manifestaciones de la corrosión y las correspondientes formas de prevención son:

Corrosión uniforme

Ataque químico o electroquímico que tiene lugar uniformemente en toda la superficie del metal, cuyo grosor se adelgaza progresivamente hasta que falla. Es la forma más frecuente de corrosión. Se puede prevenir mediante: a) sustitución por un metal no corrosivo en el medio utilizado (suele ser el procedimiento más caro); b) aplicación de recubrimientos (imprimaciones, pinturas, recubrimientos plásticos, cobreado, niquelado, cromado); c) inhibidores; d) protecciones catódicas (recubrimientos galvánicos de zinc o aluminio para el acero, cátodos de sacrificio).

Corrosión galvánica

Tiene lugar cuando dos metales de distinto potencial galvánico están eléctricamente conectados entre sí y expuestos a un electrolito. El metal más activo sufre corrosión (reacción anódica), mientras que el metal más noble (o inerte) queda protegido (reacción catódica). La serie galvánica de la Tabla 2.1 predice la tendencia de distintos metales y aleaciones a formar parejas galvánicas. Por ejemplo: al unir tubos de cobre y de acero en las instalaciones de agua doméstica, estos últimos experimentan una fuerte corrosión galvánica.

Para prevenir este tipo de corrosión se recomienda: a) Elegir parejas de metales próximos en la serie galvánica; b) Evitar el efecto desfavorable de una superficie anódica pequeña y una superficie catódica grande (conviene que tornillos y pernos constituyan el ánodo); c) Aislar eléctricamente los dos metales susceptibles de formar una pareja galvánica; d) Aplicar recubrimientos, inhibidores o ánodos de sacrificio respecto a los dos metales.

Corrosión en grietas. Corrosión por picado

Son formas de corrosión intensas y localizadas, causadas por la distinta concentración de iones entre dos partes de la misma pieza o conjunto, de manera que producen una reacción galvánica. La *corrosión en grietas* se da en juntas y fisuras donde se retiene más la humedad (reacción anódica) que en otras partes más aireadas de la misma pieza. La *corrosión por picado* es un fenómeno análogo que se inicia en un defecto de la superficie del metal y progresa por gravedad hacia su interior (puede llegar a perforar las chapas).

Para prevenir la corrosión en grietas se recomienda: a) evitar juntas y fisuras (si es necesario, soldarlas); b) usar soldadura en lugar de tornillos o remaches (evitar las juntas); c) diseñar las piezas eliminando los rincones; d) evitar depósitos de materiales que retengan humedad, espe-

3 Metales no férricos

3.1 Aluminio y aleaciones de aluminio

3.1.1 Introducción

El aluminio (elemento muy abundante en la corteza terrestre) y sus aleaciones destacan por su ligereza y resistencia a la corrosión, y por su buena conductividad térmica y eléctrica. Las propiedades mecánicas del metal puro son bastante moderadas, pero, aleado con otros elementos, mejoran notablemente. Si se toma la resistencia o la rigidez en relación con la densidad, los aluminios aventajan los aceros en determinadas aplicaciones (Sección 11.5). Estas cualidades, junto con la gran aptitud para el conformado (deformación en frío, forja, moldeo, extrusión, mecanizado), han convertido las aleaciones de aluminio en el segundo grupo de materiales metálicos más usados después de los férricos, aunque su obtención industrial no se inició hasta finales del siglo XIX. Los progresos de la industria del aluminio han ido muy ligados al desarrollo de la aviación (especialmente después de la Segunda Guerra Mundial), pero desde entonces han ido apareciendo nuevos campos de aplicación propios (automoción, equipamiento naval, arquitectura, envases).

3.1.2 Propiedades de las aleaciones de aluminio

Propiedades físicas

Destacan la muy baja densidad ($2,7 \text{ Mg/m}^3$, $\sim 1/3$ de la de los aceros; vehículos, aparatos portátiles, piezas sometidas a grandes aceleraciones), la elevada conductividad térmica ($80\div 230 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; elementos conductores o disipadores de calor: pistones, carcasas), la elevada conductividad eléctrica (resistividad eléctrica: $28\div 60 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$; aplicaciones eléctricas) y el también elevado calor específico ($865\div 905 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$). La elevada dilatación térmica ($20\div 25 \mu\text{m/m}\cdot\text{K}$; \sim doble de la de los aceros) hace que las piezas de aluminio sufran variaciones dimensionales importantes con la temperatura (menor estabilidad dimensional). El aluminio pulido proporciona excelentes superficies reflectoras.

Propiedades mecánicas

A temperatura ambiente, la resistencia a la tracción ($150\div 450 \text{ MPa}$), el límite elástico ($100\div 300 \text{ MPa}$) y el módulo de elasticidad ($69\div 73 \text{ GPa}$) son moderados, y las durezas relativamente bajas (Al-comercial 20 HB, Grupo Al-Zn: 150 HB), no adecuadas para las presiones superficiales requeridas en los enlaces. La resistencia a la fatiga es aceptable (sin un límite de fatiga definido) y la resiliencia es normalmente elevada excepto en los aluminios más resistentes (grupos Al-Cu y Al-Zn). El comportamiento a altas temperaturas es moderado: ya a $100\div 150 \text{ }^\circ\text{C}$ (según las aleaciones) la fluencia se manifiesta de forma acusada y disminuyen sensiblemente la resistencia, el límite elástico y la dureza, siendo residuales las propiedades mecánicas a partir de $350 \text{ }^\circ\text{C}$. Entre $200\div 300 \text{ }^\circ\text{C}$, el mejor comportamiento mecánico corresponde a los grupos Al-Cu y Al-Mg. Sin embargo, el comportamiento mecánico a bajas temperaturas es excelente y la resistencia aumenta mientras que la resiliencia, el límite elástico y el alargamiento se mantienen hasta temperaturas operativas de $-195 \text{ }^\circ\text{C}$.

Aptitudes para el conformado

Las aleaciones de aluminio presentan una gran aptitud para el conformado. La baja temperatura de fusión (520÷650 °C) facilita el moldeo de piezas complicadas (molde de arena, coquilla; por inyección se obtienen piezas de gran precisión dimensional). Su elevada ductilidad facilita el conformado por deformación plástica, en frío y en caliente, mediante laminación (chapas, barras), forja o extrusión (perfiles de formas complejas, eventualmente con cavidades, difíciles de obtener con otros tipos de materiales). La gran maquinabilidad a altas velocidades proporciona una productividad elevada, un abaratamiento de costes y el ahorro de energía.

3.1.3 Normativa

ISO 209-1:1989	Aluminio y aleaciones de aluminio para forja. Composición química y forma de los productos. Parte 1: Composición química.
EN 485-1/2	Aluminio y aleaciones de aluminio. Chapas, bandas y planchas. Parte 1 (1994): Condiciones técnicas de suministro y de inspección. Parte 2 (2004): Características mecánicas.
EN 515:1993	Aluminio y aleaciones de aluminio. Productos forjados. Designación de los estados de tratamiento.
EN 573-1/5	Aluminio y aleaciones de aluminio. Composición química y forma de los productos de forja. Parte 1 (2004): Sistema de designación numérica. Parte 2 (1994): Sistema de designación simbólica. Parte 3 (2003): Composición química. Parte 4 (2004): Forma de los productos. Parte 5 (2003): Codificación de los productos de forja normalizados.
EN 755-1/2:1997	Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras, tubos y perfiles extruidos. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro y de inspección. Parte 2: Características mecánicas.
EN 1706:1998	Aluminio y aleaciones de aluminio. Piezas moldeadas. Composición química y características mecánicas.
EN 12258-1/4	Aluminio y aleaciones de aluminio. Términos y definiciones. Parte 1 (1998): Términos generales. Parte 2 (2004): Análisis químico. Parte 3 (2003): Chatarras. Parte 4 (2004): Residuos de la industria del aluminio.

3.1.4 Estados de suministro y tratamientos térmicos

(EN 515:1993)

La designación F de las aleaciones de aluminio corresponde al estado bruto de fabricación (sin control de las condiciones térmicas o de acritud), y la designación O corresponde al estado de recocido. Las piezas y productos de aluminio pueden mejorarse mediante dos procedimientos distintos: *a*) deformación en frío o acritud (designaciones H); *b*) tratamientos térmicos (designaciones T).

Endurecimiento por deformación en frío (acritud)

Las aleaciones de aluminio pueden endurecerse por deformación en frío (acritud), seguida o no de un recocido parcial o de estabilización. Estos estados se indican por: H1x, deformación plástica en frío; H2x, deformación plástica en frío y recocido parcial; H3x, deformación plástica en frío y estabilización (mejora la ductilidad) mediante un proceso térmico a baja temperatura; H4x, deformación plástica en frío y un cierto recocido parcial debido al curado térmico de un lacado o pintado. El segundo dígito, x, indica el grado de dureza: 2 (¼ duro), 4 (½ duro), 6 (¾ duro), 8 (duro); los dígitos 1, 3, 5 y 7 se usan raramente. Los incrementos de resistencia a la tracción entre los estados de dureza, Hx8, y de recocido, O, van desde 55 MPa para los aluminios más blandos (< 40 MPa en estado de recocido) hasta 120 MPa en los aluminios más resistentes (> 300 MPa en estado de recocido). El tercer dígito, si se usa, indica variantes de los estados de dos dígitos. Algunos grupos de aleación de aluminio (Al-comercial, Al-Mn, Al-Mg) sólo se endurecen por deformación en frío.

Tratamientos térmicos

Las propiedades mecánicas de determinadas aleaciones de aluminio pueden mejorarse mediante tratamiento térmico de *bonificación* (o de *envejecimiento*) que consta de tres fases: *a) solubilización* de los elementos de aleación, por calentamiento del material durante un cierto tiempo a temperatura adecuada; *b) temple* o enfriamiento enérgico para producir una solución sobresaturada a temperatura ambiente; *c) maduración* (o *envejecimiento*) consistente en la precipitación de pequeñas partículas del material de aleación, ya sea a temperatura ambiente (maduración natural) o a temperatura controlada (maduración artificial). Los grupos de aleaciones que pueden bonificarse (además de endurecerse por deformación en frío) son: Al-Cu, Al-Mg-Si y Al-Zn, así como también algunos del grupo Al-Si.

Los principales tratamientos térmicos de los aluminios de forja son: T1, enfriamiento desde la conformación en caliente y maduración natural; T2, ídem con acritud antes de la maduración natural; T5, ídem con maduración artificial; T4, solubilización, temple y maduración natural; T6, ídem con maduración artificial; T3, solubilización, temple, deformación en frío y maduración natural; T8, ídem con maduración artificial; T9, solubilización, temple, maduración artificial y deformación en frío; T7, solubilización, temple y sobresaturación/estabilización. Se pueden añadir uno o más dígitos a las designaciones T1 a T9 para indicar variantes de tratamiento que incidan significativamente en las características del producto. La designación T73, por ejemplo, indica que el proceso se ha realizado de manera que se obtenga la mejor resistencia bajo tensión.

Tabla 3.1 **Resumen de los estados de tratamiento térmico de los aluminios**

Maduración	Acritud	Enfriamiento desde la conformación	Enfriamiento desde solubilización en horno
Natural	No	T1	T4
	Sí	T2	T3
Artificial	No	T5	T6, T7
	Antes de maduración	-	T7, T8
	Después de maduración	-	T9

3.1.5 Resistencia a la corrosión. Anodizado

Gracias a la extraordinaria afinidad con el oxígeno, el aluminio se recubre espontáneamente de una capa superficial de óxido de pocos átomos de espesor (si se destruye, se regenera), tupida e impermeable, que protege al material de oxidaciones posteriores y del ataque de la mayoría de sustancias orgánicas e inorgánicas, lo que le proporciona inocuidad sanitaria (alimentos, utensilios de uso personal); en ciertos medios, algunas aleaciones experimentan corrosiones intercrystalinas. En todo caso, hay que hacer notar el mal comportamiento a la corrosión de las aleaciones que contienen Cu, en especial en ambientes marinos.

Anodizado

Tratamiento superficial de los productos y piezas de aluminio que consiste en situar el material en el ánodo de una célula electrolítica donde se libera oxígeno, que refuerza la capa protectora de óxido (normalmente de 5÷25 μm de espesor; en el anodizado duro las capas son más gruesas y duras, de 25÷150 μm). Los efectos del anodizado son varios: acción protectora contra la corrosión, acción decorativa (con la adición de colorantes, las piezas y los productos adquieren un aspecto atractivo), mejora de la resistencia al desgaste (anodizado duro) y aislamiento eléctrico. En principio todos los grupos de aleación de aluminio son aptos para el anodizado, pero los que dan mejores resultados son el Al puro y las aleaciones de Al-Mg y Al-Mg-Si.

3.1.6 Grupos de aleación de aluminio y aplicaciones

Como en otros metales, se distingue entre las aleaciones para forja (extrusión y laminación) y las de moldeo. A pesar de la gran variedad de aleaciones de forja normalizadas, el mercado ofrece una selección relativamente reducida dentro de la que debe hacerse la selección, siempre que ello sea posible. Existe más libertad en las aleaciones para moldeo, ya que en cada colada puede ajustarse la composición deseada a partir de la mezcla de lingotes de *aleación madre* (para fundir, con composiciones sencillas bien definidas). A continuación se analizan las principales propiedades y aplicaciones de los diferentes grupos de aleación de aluminios para forja y moldeo.

3.1.7 Aleaciones de aluminio de forja (laminación, extrusión)

(EN 573-1/2/3/4/5, productos forjados; EN 755-1/2, productos extrudidos)

Los productos laminados o extrudidos se suministran en una gran diversidad de formas (chapas, planchas, bandas, barras, tubos, alambre y una gran variedad de perfiles), que se obtienen en distintos estados de suministro (recocido, O; deformado en frío, Hxy; bonificado, Tx). La elección debe hacerse en función de las propiedades del material, el proceso de conformado previsto para la pieza (mecanizado, deformación en frío, forja, extrusión, soldadura) y los costos totales derivados.

Las aleaciones de aluminio para forja (AW, *wrought* en inglés) se designan según las normas europeas EN 573-1:2004 (designación numérica) y EN 573-2:1994 (designación simbólica). Las designaciones numéricas proceden del Registro Internacional de Aleaciones, mientras que las designaciones simbólicas se basan en los mismos principios que la norma ISO 209-1:1989. Ejemplos: EN AW-2014 [AlCu4SiMg]; más raramente, EN AW-AlCu4SiMg. Los aluminios para aplicaciones eléctricas anteponen la letra E a la designación simbólica: EN AW-6101 [EAlMgSi].

Grupos no bonificables

Grupo Al

Este grupo incluye los Al comerciales de distintos niveles de pureza superiores a 99,0%. Ninguno de ellos es bonificable y se usan recocidos o en distintos grados de acritud. Los Al comerciales, de bajas características mecánicas, se caracterizan por una buena resistencia a la corrosión, soldabilidad, facilidad de conformación y aptitud para el anodizado, y se utilizan en una gran diversidad de aplicaciones (envases y embalajes, recipientes, conductores eléctricos, intercambiadores de calor, reflectores de luz, placas de *offset*, embellecedores) y de sectores de actividad (industrias química, alimentaria y criogénica, arquitectura). El aluminio más frecuente es el EN AW-1050A [Al 99,5], suministrado recocido (O), $\frac{1}{4}$ duro (H12) y $\frac{1}{2}$ duro (H14). La versión para usos eléctricos EN AW-1350 [EAl 99,5], tiene contenidos severamente limitados de Ti, V, Cr y Mn (elementos que perjudican la conductividad eléctrica; 62% IACS, ver aleaciones de Cu, Sección 3.2), y se halla en el mercado en forma de alambre para trefilar. El aluminio EN AW-1080A [Al 99,8(A)], de mayor pureza y bello aspecto, tiene un excelente comportamiento en medios agresivos y se usa en la industria química. El aluminio EN AW-1200 [Al 99,0] ofrece una resistencia mecánica ligeramente superior a EN AW-1050A, pero disminuyen su conductividad térmica y la reflectividad a la luz.

Grupo Al-Mn

La adición de un pequeño porcentaje de Mn al aluminio proporciona aleaciones no bonificables, de mejor resistencia mecánica, muy buena resistencia a la corrosión, excelente soldabilidad y buena conformabilidad. Se presenta en forma de chapas, especialmente aptas para embutición profunda (baterías de cocina), barras, alambres, tubos y perfiles, y se usa en sustitución del Al comercial cuando se requieren mejores propiedades mecánicas (industria química, intercambiadores térmicos y criogénicos, depósitos, tejados, embalaje, muebles, señales de tráfico). El más usual es EN AW-3003 [AlMn1Cu] y, con la adición de Mg, la aleación EN AW-3004 [AlMn1Mg1] adquiere una resistencia mecánica superior (envases de bebida o latas, recubrimientos de fachadas).

4 Materiales no metálicos

4.1 Introducción a los polímeros

4.1.1 Definiciones

Los *plásticos* y los *elastómeros* constituyen un amplio grupo de materiales (la gran mayoría sintéticos), basados en macromoléculas de tipo orgánico (polímeros), a las que se añaden determinadas cantidades de otras sustancias (aditivos) para modificar sus propiedades o para facilitar los procesos de conformado. Estos materiales son cada vez más decisivos en el diseño de máquinas y responden a las descripciones siguientes:

Plásticos

Materiales basados en polímeros de consistencia rígida comparados con los elastómeros (su denominación se refiere al estado plástico que la mayoría de ellos presentan durante el proceso de conformado). Se agrupan en dos grandes familias: *plásticos termoplásticos* (los más numerosos), en general dúctiles, de comportamiento viscoelástico que, al calentarse, se reblandecen y pueden deformarse plásticamente; *plásticos termoestables*, no dúctiles, de comportamiento elástico que, una vez polimerizados, mantienen fundamentalmente su consistencia y no se deforman en caliente.

Elastómeros

Materiales basados en polímeros de comportamiento elástico, consistencia flexible comparados con los plásticos (sufren grandes deformaciones con tensiones moderadas) y resiliencia elevada. Se agrupan también en dos familias: *elastómeros termoplásticos* que, al calentarse, se reblandecen y pueden deformarse plásticamente; su desarrollo se relativamente reciente, pero su importancia crece debido a la facilidad de conformado; *elastómeros termoestables* (o permanentes) que, una vez polimerizados (o vulcanizados), mantienen su consistencia y no se deforman en caliente.

4.1.2 Campos de aplicación

Dada la gran diversidad de composiciones químicas y estructurales de los polímeros de base, y gracias a las grandes posibilidades de modificación por medio de aditivos, los distintos *plásticos* y *elastómeros* tienen una gradación de propiedades casi continua que los hacen muy atractivos para numerosas aplicaciones relacionadas con el diseño de máquinas.

Las características más destacadas de los plásticos y de los elastómeros, origen de sus principales aplicaciones, son: *a) baja densidad*: ha permitido aligerar muchos objetos, máquinas y aparatos de uso cotidiano, entre ellos los vehículos, donde el peso se determinante; *b) bajo coste y fácil conformado*: a pesar de la gran variedad de precios, los materiales plásticos son relativamente baratos, en gran parte debido a la baja densidad; *c) fácil conformación* (especialmente en los termoplásticos): junto con el bajo coste, han contribuido de manera destacada en su difusión; *d) resistencia al ataque químico*: los plásticos y los elastómeros presentan una buena resistencia al

ataque químico y, en general, no necesitan protecciones superficiales; pero son atacados por sustancias de naturaleza análoga a la del propio material (aceites, disolventes); *e) relación amigable con el usuario*: ofrecen posibilidades muy interesantes, como una gran libertad para obtener formas atractivas, excelentes acabados superficiales (gran variedad de colores y texturas), sensación de ligereza, sensación de atemperación térmica (ni frío ni calor) debido a la baja conductividad térmica y seguridad contra las descargas eléctricas.

Pero también tienen algunas limitaciones que deben tenerse presentes: *f) propiedades mecánicas moderadas*: los plásticos (y los elastómeros aún más) tienen una resistencia mecánica, una rigidez y una dureza mucho menor que los metales; aun así, cuando se establecen las magnitudes características de estas propiedades en relación a su masa, la comparación ya no resulta tan desfavorable; *g) bajas temperaturas de servicio*: ésta es una limitación importante de los plásticos y de los elastómeros en relación a los metales.

Los plásticos tienen cada día un mayor número de aplicaciones (como alternativa a los metales o por méritos propios) en una gran variedad de elementos y piezas de las máquinas con funciones de soporte (carcasas, marcos), de guiado y transmisión (cojinetes, guías, levas, engranajes), o en funciones complementarias (tapas, revestimientos). Los elastómeros tienen aplicación en determinadas piezas elásticas, a menudo de alto contenido técnico, que ejercen funciones decisivas en las máquinas (juntas, retenes, articulaciones elásticas, elementos de suspensión, ruedas, protecciones flexibles, conducciones de fluidos), para las que no hay alternativa.

4.1.3 Estructura molecular

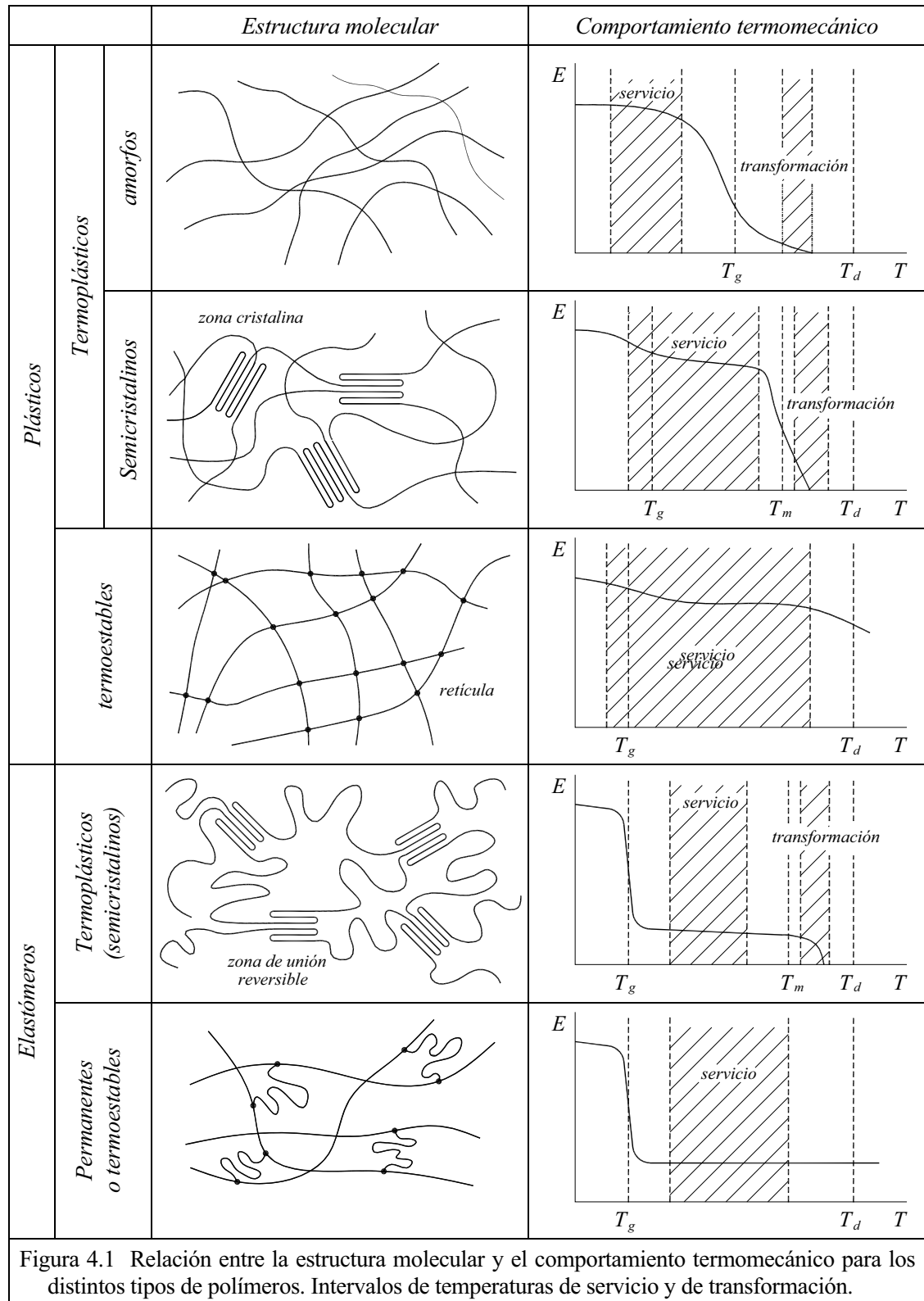
Los *polímeros*, materiales base de los plásticos y elastómeros, son compuestos orgánicos basados en cadenas de carbono, C, en combinación con otros elementos: hidrógeno, H; oxígeno, O; nitrógeno, N; cloro, Cl; flúor, F; bromo, Br; y azufre, S. Algunos polímeros se basan en cadenas que alternan átomos de silicio, Si, y de oxígeno, y reciben el nombre de siliconas. Todos ellos se forman a partir de una o más unidades químicas simples (o monómeros), con enlaces activos (dobles o triples) que, al romperse, reaccionan unas con otros monómeros (polimerización) originando así una cadena que crece (polímero) hasta que encuentra un agente de bloqueo o se agota el monómero. Si no se forma ningún otro compuesto más que el polímero, la reacción recibe el nombre de *polimerización de adición*, mientras que si se segregan otras moléculas (por ejemplo, agua), la reacción se llama de *polimerización de condensación*. En función de la naturaleza de las macromoléculas y de las uniones entre ellas, pueden distinguirse los siguientes materiales basados en polímeros:

Polímeros termoplásticos / polímeros termoestables

Los *polímeros termoplásticos* se forman a partir de monómeros con un solo enlace activo, que polimerizan en moléculas de estructura lineal o ramificada, con uniones de naturaleza débil (fuerzas de Van der Waals, fuerzas polares, entrelazamiento de cadenas), sensibles a la temperatura; mientras que los *polímeros termoestables* se forman a partir de monómeros con más de un enlace activo, que polimerizan en una estructura tridimensional mediante enlaces químicos de naturaleza fuerte.

Plásticos / elastómeros

En los *plásticos*, la densidad de uniones entre las moléculas (débiles en los *termoplásticos* y fuertes en los *termoestables*) es muy densa, lo que limita la deformación del material (consistencia rígida); mientras que en los *elastómeros*, las moléculas están enrolladas o plegadas y la red de uniones entre sí (débiles en los *elastómeros termoplásticos* y fuertes en los *elastómeros permanentes*), es poco tupida, lo que permite grandes deformaciones elásticas.



Termoplásticos amorfos / termoplásticos semicristalinos

En los *termoplásticos amorfos* (por ejemplo: PS, PMMA), las moléculas se entrelazan sin ningún orden, mientras que en los *termoplásticos semicristalinos* (por ejemplo: PE, PA), hay zonas de cierto paralelismo entre las moléculas, análogo a la ordenación de los átomos en los cristales.

El grado de cristalinidad de los materiales influye en las propiedades físicas (mayor densidad) y ópticas (los amorfos son transparentes y los semicristalinos opacos), mecánicas (mayor rigidez, dureza y resistencia a la fluencia) y superficiales (baja fricción y elevada resistencia al desgaste).

4.1.4 Caracterización termomecánica de los polímeros

Las propiedades mecánicas de los polímeros (rigidez, dureza, tenacidad) varían con la temperatura y, mediante tres valores característicos (*temperatura de transición vítrea*, T_g ; *temperatura de fusión*, T_m , para los termoplásticos semicristalinos; y *temperatura de descomposición*, T_d), se establecen tres o cuatro zonas características, según el polímero:

- Por debajo de T_g , los polímeros tienen una consistencia rígida, dura y frágil, como la del vidrio.
- Por encima de T_g , los polímeros pierden la fragilidad y se vuelven menos rígidos.
- A la temperatura de fusión T_m , los termoplásticos semicristalinos pierden la cristalinidad y se ablandan.
- A la temperatura T_d , todos los polímeros experimentan alteraciones químicas y se degradan.

A continuación se caracterizan los diferentes tipos de polímeros (ver la figura 4.1) en función de la variación del módulo de elasticidad, E , con la temperatura, T ($E \approx 3 \cdot G$, obteniendo G en un ensayo de vibración a torsión):

Plásticos termoplásticos amorfos

Muestran una disminución del módulo de elasticidad muy marcada en la zona de temperatura de transición vítrea, T_g . La zona de servicio (o de uso) se encuentra por debajo de esta temperatura y la de transformación, entre T_g y T_d .

Plásticos termoplásticos semicristalinos

Muestran una disminución del módulo de elasticidad poco acusada a la temperatura de transición vítrea, T_g , ya que conservan zonas cristalinas hasta la temperatura de fusión, T_m . La zona de servicio se halla por debajo de la temperatura de fusión, T_m , y la zona de transformación, entre T_m y T_d .

Plásticos termoestables

Son rígidos y frágiles durante todo el intervalo de temperaturas hasta la degradación, T_d , con una pequeña pérdida de rigidez poco antes de esta temperatura. La zona de servicio se tiene que distanciar de la temperatura de degradación.

Elastómeros termoplásticos

La rigidez disminuye de forma muy acusada a la temperatura de transición vítrea, T_g , para mantenerse después prácticamente constante hasta la temperatura de fusión, T_m . La zona de servicio se halla entre estas dos temperaturas (módulo de rigidez bajo), y la de transformación, entre T_m y T_d .

Elastómeros termoestables (o permanentes)

Presentan también una disminución muy pronunciada de la rigidez en la zona de la temperatura de transición vítrea, T_g , que después se mantiene prácticamente constante hasta la temperatura de degradación, T_d . La zona de servicio se encuentra entre estas dos temperaturas.