

AULA POLITÉCNICA  
/ INGENIERÍA MECÁNICA

M. Núria Salán Ballesteros

# Tecnología de proceso y transformación de materiales

# Tecnología de proceso y transformación de materiales



M. Núria Salán Ballesteros

# Tecnología de proceso y transformación de materiales

Primera edición: febrer de 2005

Diseño de la cubierta: Jordi Calvet

© La autora, 2005

© Edicions UPC, 2005  
Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL  
Jordi Girona Salgado 31, 08034 Barcelona  
Tel.: 934 016 883 Fax: 934 015 885  
Edicions Virtuals: [www.edicionsupc.es](http://www.edicionsupc.es)  
A/e: [edicions-upc@upc.es](mailto:edicions-upc@upc.es)

Producción: Quality Impres, S.L.  
Comte Güell 24-28, 08028 Barcelona

Depósito legal: B-4442-2005  
ISBN: 84-8301-789-X

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.

## Prólogo

Este texto pretende ser una ayuda para cursar la asignatura “Tecnología de Proceso y Transformación de Materiales”, correspondiente a los estudios de segundo ciclo de Ingeniería en Organización Industrial. Dado que se ubica en el segundo ciclo, el estudiante debería de haber asimilado conocimientos básicos de física y química, equivalentes a los desarrollados en los primeros cursos de cualquier tipo de ingeniería. Por contenidos, se hallaría estrechamente relacionada con “Fundamentos de Ciencia de Materiales” y con “Tecnología de Materiales”, que son asignaturas que se imparten actualmente en los estudios presenciales de Ingeniería Industrial.

Los principales campos profesionales de aplicación de esta disciplina se hallarían en el ámbito de la automoción, de la electricidad-electrónica y de la mecánica, especialmente en aquellos sectores dedicados a la fabricación, el tratamiento o el diseño de componentes. Esta asignatura incidirá en aspectos de organización y viabilidad de los procesos industriales relacionados con los materiales, ya que forma parte del plan de estudios de la carrera de Ingeniería en Organización Industrial.

Partiendo del conocimiento básico de la estructura de los materiales de ingeniería (metales, cerámicos, polímeros y compuestos) y del comportamiento y características que se asocian a dicha estructura, la asignatura tiene como eje principal el estudio de la tecnología de dichos materiales, es decir, los distintos procesos industriales de transformación de componentes, así como los principales tratamientos a que son sometidos los materiales técnicos, con objeto de mejorar sus características básicas.

Los objetivos principales de esta asignatura se podrían englobar en tres apartados:

- Introducir al alumno en los distintos tipos de materiales que se podrían considerar de aplicación industrial en la ingeniería.
- Establecer las bases que conducirían a la relación estructura-propiedades de los materiales estudiados.
- Proporcionar una visión general de los principales procesos de transformación que se desarrollan en la industria para convertir un material en un componente.



# Índice

<b>Módulo I</b> .....	13
<b>1. Operaciones de proceso de materiales</b>	
1.1 Operaciones de conformado.....	16
1.2 Otras operaciones de proceso.....	17
<b>2 Introducción a los materiales</b>	
2.1 La primera clasificación: La tabla periódica de los elementos .....	19
2.2 Enlace atómico .....	21
2.2.1 Enlace covalente .....	21
2.2.2 Enlace iónico .....	22
2.2.3 Enlace metálico.....	22
2.2.4 Enlaces secundarios .....	23
2.3 Materiales metálicos .....	23
2.3.1 Soluciones sólidas.....	26
2.3.2 Aleaciones metálicas .....	27
2.3.3 Solidificación de aleaciones .....	28
2.3.4 Difusión en estado sólido.....	30
2.4 Materiales poliméricos .....	33
2.5 Materiales cerámicos.....	33
2.6 Materiales compuestos .....	34
2.7 Características de los materiales de aplicación industrial .....	35
<b>3 Propiedades mecánicas de los materiales</b>	
3.1 Relaciones esfuerzo-deformación .....	38
3.1.1 El comportamiento elástico de los materiales.....	38
3.1.2 El comportamiento plástico de los materiales.....	39
3.2 El ensayo de tracción .....	39
3.3 El ensayo de dureza.....	47

3.4	El ensayo de impacto .....	50
3.5	Efecto de la temperatura en la respuesta mecánica de los materiales .....	52

## **Módulo II**.....55

### **4 Materiales metálicos**

4.1	Solidificación de metales y aleaciones.....	57
4.1.1	Curvas de solidificación (temperatura/tiempo).....	57
4.1.2	Velocidad de solidificación: tamaño de grano.....	57
4.1.3	Diagramas de fases .....	59
4.2	Tratamientos térmicos.....	64
4.2.1	Tratamientos térmicos de los aceros.....	65
4.2.2	Tratamientos superficiales.....	71
4.3	Aleaciones férricas.....	72
4.3.1	Aceros al carbono y aceros aleados.....	74
4.3.2	Aceros inoxidables .....	75
4.3.3	Fundiciones de hierro .....	77
4.4	Aleaciones no férricas.....	78
4.4.1	Aleaciones de cobre.....	79
4.4.2	Aleaciones de aluminio .....	80
4.4.3	Aleaciones de magnesio .....	82
4.4.4	Aleaciones de níquel.....	83
4.4.5	Aleaciones de titanio .....	83
4.5	Métodos de conformado de materiales metálicos .....	85
4.5.1	Fusión y moldeo .....	85
4.5.2	Pulvimetalurgia.....	93
4.5.3	Procesos de conformado por deformación plástica .....	98
4.6	Soldadura de aleaciones metálicas.....	111
4.6.1	Fenómenos metalúrgicos que se producen durante los procesos de soldadura .....	112
4.6.2	Técnicas de soldadura de metales.....	113

## **Módulo III**.....119

### **5 Materiales polímeros**

5.1	Polimerización y cristalinidad.....	122
5.2	Polímeros termoplásticos.....	128
5.3	Polímeros termoestables .....	130
5.4	Elastómeros.....	131
5.5	Procesos habituales de conformado de materiales polímeros .....	133
5.5.1	Moldeo por inyección.....	133
5.5.2	Extrusión.....	136
5.5.3	Termoconformado y otras operaciones .....	138

---

<b>Módulo IV</b> .....	141
<b>6 Materiales compuestos</b>	
6.1 Tipos de materiales compuestos.....	144
6.1.1 Compuestos de matriz metálica (CMM).....	144
6.1.2 Compuestos de matriz cerámica (CMC).....	145
6.1.3 Compuestos de matriz polimérica (CMP) .....	145
6.2 Tipos de refuerzo .....	146
6.2.1 Materiales compuestos reforzados con fibras.....	147
6.2.2 Materiales compuestos reforzados con partículas .....	150
6.2.3 Compuestos estructurales .....	151
6.3 Conformado de compuestos de matriz polimérica.....	151
<b>7 Materiales cerámicos y vidrios</b>	
7.1 Cerámicos tradicionales .....	160
7.2 Cerámicos tecnológicos .....	163
7.3 Vidrios.....	164
<b>Módulo V</b> .....	169
<b>8 Prácticas de laboratorio</b>	
8.1 Materiales metálicos .....	171
8.1.1 Metalografía de aleaciones férricas .....	171
8.1.2 Corrosión I: Localización de zonas sensibles.....	174
8.1.3 Corrosión II: Elaboración de una serie electrogalvánica .....	176
8.1.4 Corrosión III: Recubrimiento electroquímico (depósito de níquel).....	176
8.1.5 Recuperación de metales nobles.....	178
8.2 Materiales polímeros: .....	179
8.2.1 Identificación de polímeros a la llama.....	179
8.2.2 Tracción de materiales polímeros.....	181
8.3 Materiales compuestos: Elaboración de un laminado.....	183
8.4 Materiales cerámicos: Choque térmico.....	185
<b>9 Ejercicios y cuestiones de laboratorio resueltos</b>	
9.1 Ejercicios y cuestiones sobre materiales metálicos.....	187
9.1.1 Cuestiones sobre metalografía de aleaciones férricas.....	187
9.1.2 Cuestiones sobre localización de zonas sensibles.....	189
9.1.3 Cuestiones sobre la elaboración de una serie electrogalvánica .....	189
9.1.4 Cuestiones sobre recubrimientos electroquímicos.....	190
9.1.5 Cuestiones sobre recuperación de metales nobles .....	190
9.1.6 Ejercicios sobre tracción de materiales metálicos .....	191

9.2	Cuestiones sobre materiales compuestos laminados.....	193
9.3	Cuestiones sobre choque térmico de materiales cerámicos .....	194

## **10 Anexos**

10.1	Tablas de equivalencias de aleaciones metálicas según diferentes normas .....	195
10.2	Descripción de los principales tratamientos térmicos de los aceros .....	201
10.2.1	Tratamientos térmicos máxicos.....	201
10.2.2	Tratamientos isotérmicos.....	202
10.2.3	Tratamientos termoquímicos .....	202
10.3	Tablas de tratamientos térmicos para aceros de uso común.....	203

## **Bibliografía**

General .....	211
Direcciones electrónicas.....	213

<b>Índice alfabético de materias.....</b>	<b>215</b>
---	------------

## **Módulo I**

Este módulo comprende los tres primeros temas del presente texto y su objetivo principal es introducir al lector en los procesos de manufactura de los materiales, presentar los grupos básicos de materiales de aplicación industrial, así como los métodos más habituales de determinación de las principales propiedades mecánicas que los caracterizan y que se pueden utilizar como medida de la respuesta en servicio.

Al finalizar el módulo, el lector debería de haber asimilado información básica sobre los distintos tipos de materiales para considerar su selección en aplicaciones industriales en ingeniería. También deberían de haberse sentado las bases que conducen a la relación estructura-propiedades de los materiales estudiados.



## 1 Operaciones de proceso de materiales

Las operaciones de proceso son aquellas gracias a las cuales se transforma un material de partida en un componente con una aplicación determinada, ya sea cambiando su forma o bien alguna de sus propiedades físicas o mecánicas. Estas operaciones vendrán determinadas por el tipo de material y por sus características microscópicas, pero también por las propiedades que se esperen del producto final a fin de que cumpla correctamente los requisitos solicitados en servicio (Fig. 1.1).

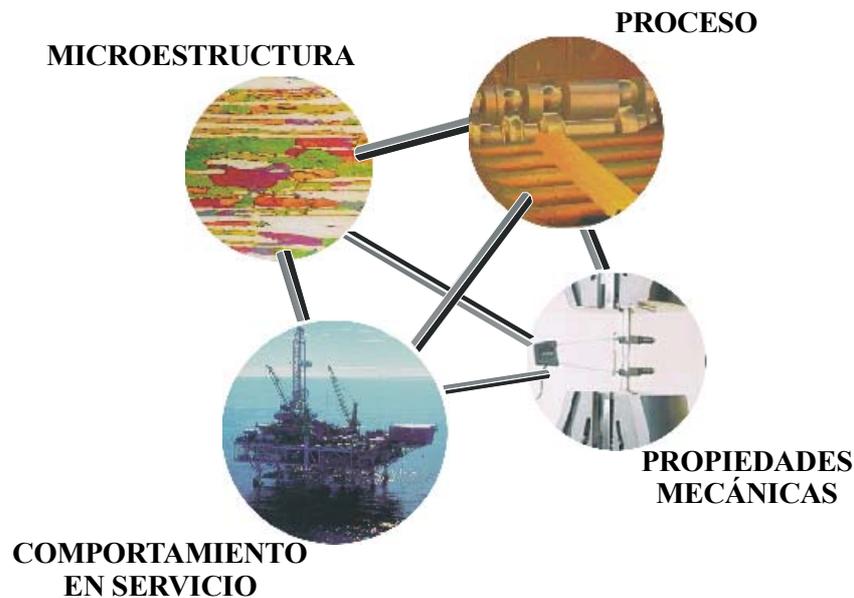


Fig. 1.1 Relaciones existentes entre la microestructura de un material, su procesado, las propiedades macroscópicas que presentará y su respuesta en servicio.

Cualquiera de las operaciones de proceso actuales precisan del consumo de energía, en mayor o menor medida, y el desarrollo de maquinaria y herramientas se orienta hacia un consumo eficaz de energía simultaneado con una optimización de los resultados del proceso.

Cualquier material, una vez procesado, incrementa su valor, ya que puede desarrollar una función como tal. Así, el valor del vidrio es muy superior al de la arena, que es el producto base utilizado en su

elaboración, y el valor del acero supera notablemente al del mineral de hierro o al de la chatarra, que suelen ser las fuentes de producto base.

Generalmente, el proceso de un material no consta de una única etapa, sino de una sucesión de actuaciones que conducen a estados intermedios, cada vez más próximos al estado final. Para clasificar las operaciones de procesado de materiales, generalmente se consideran tres categorías: las *operaciones de conformado*, las de *mejora de propiedades* y las *operaciones de superficie*.

El alcance de cada una de ellas es bien distinto, ya que las primeras conducirán, básicamente, a un cambio de forma, las segundas añadirán valor a un producto casi elaborado al variar alguna propiedad física, pero no la forma, y las terceras únicamente mejorarán el aspecto final (limpieza, pulido, pintado...). Si bien estos grupos de operaciones se tratarán en capítulos posteriores, a modo de introducción se dan a continuación unas pinceladas de cada uno de ellos.

## 1.1 Operaciones de conformado

Son procesos que se basan en el consumo de energía calorífica o mecánica para convertir una materia prima o un material bruto en un producto preelaborado o ya finalizado. En cualquiera de estos procesos, la forma y las dimensiones varían totalmente desde el principio (material de partida) hasta al final (producto).

Si bien estas operaciones se pueden clasificar atendiendo a diversas características, la forma más común y compartida es aquella que agrupa los procesos industriales de conformado basándose en el estado del material de partida:

- Operaciones de *fundición y moldeo*, que parten de material en estado líquido o semifluido y, que en su inmensa mayoría, se hallan a temperaturas muy elevadas. La forma final del producto la proporciona el molde en el cual se vierte el material de partida.
- Operaciones de *procesado de polvos*, en las cuales el material de partida se encuentra finamente dividido y la geometría final se consigue por compresión del polvo en una matriz, que reproduce las dimensiones finales, aplicando o no calor.
- Operaciones de *conformado por deformación plástica*, que se realizan con material de partida en estado sólido y que aprovechan la capacidad de cambiar de forma de algunos materiales bajo la acción de una fuerza aplicada, en caliente o en frío.
- Operaciones de *mecanizado o corte*, en las cuales el material cambia su geometría por arranque parcial de alguna de las partes.

El consumo energético, calorífico o mecánico, de cada uno de estos grupos de operaciones es distinto y, en ocasiones, el propio proceso determina ya qué materiales pueden o no conformarse según una operación.

Así, por fundición y moldeo únicamente se pueden procesar materiales de partida con puntos de fusión asequibles; el conformado de polvos precisa que el material sea sólido, si bien la limitación viene dada, como se verá, por el costo del proceso; las operaciones de deformación plástica precisan que el material de partida sea dúctil; por último, las operaciones de mecanizado requieren que el material pueda dividirse sin degradarse.

El grado de acabado de los productos obtenidos en procesos como los citados puede ser muy variable y no sólo dependerá del tipo de operación sino también del material utilizado. Así, mientras algunos componentes procesados por fusión y moldeo requieren operaciones de mecanizado posteriores, que son las que proporcionarán las dimensiones finales, el procesado de polvo y el conformado por deformación plástica generalmente proporcionan componentes con la geometría definitiva.

## 1.2 Otras operaciones de proceso

Se hace necesario comentar brevemente la existencia de otros procesos que, si bien no se hallan dentro de la clasificación realizada anteriormente, no por ello son menos importantes.

- Operaciones de *mejora de propiedades*, de gran interés, ya que, sin necesidad de alterar las dimensiones del componente, pueden conseguirse variaciones de dureza, resistencia, tenacidad, ductilidad, etc. Dentro de este grupo, las operaciones más importantes son las denominadas *tratamientos térmicos*, que consisten en una sucesión de calentamientos y enfriamientos que alteran la microestructura inicial del material y, como consecuencia, modifican la respuesta física y/o mecánica.
- Operaciones de *unión o ensamble* de dos partes, que pueden precisar de elementos auxiliares (remaches, clavos, tornillos) en el caso de las uniones mecánicas, o que pueden realizarse sin este tipo de componentes (uniones físicas) con o sin algún tipo de material de aporte (soldadura, unión por adhesivos). Ambos tipos de operaciones tienen en común que son difíciles de deshacer una vez finalizado el proceso.
- Operaciones de *superficie*, que son distintas a las anteriores, ya que únicamente se aplican cuando se precisa un acabado estéticamente aceptable o bien un recubrimiento en un componente acabado. Se incluirían en este apartado las operaciones de limpieza (desengrasado, eliminación de óxidos...), las de deposición de capas (orgánicas o inorgánicas), el pintado de componentes y también las operaciones de modificación superficial por chorreo de partículas. Los procesos de superficie suelen ser operaciones finales.



## 2 Introducción a los materiales

### 2.1 Primera clasificación: La tabla periódica de los elementos

Para comprender las propiedades de los materiales, es necesario tener presente su estructura a escala atómica y/o microscópica. Prácticamente todas las propiedades más relevantes de los materiales sólidos son el resultado directo de los mecanismos que puedan producirse a escala atómica o microscópica.

La primera herramienta de que se dispone es la *tabla periódica de los elementos*, que consiste en un sistema de ordenación, en forma de tabla, de todos los elementos químicos conocidos (Fig. 2.1). Dentro de la tabla periódica, los elementos han sido agrupados y/o distribuidos según su estructura atómica, en grupos (columnas), y en función del nivel más externo de la capa electrónica de valencia (períodos, en las filas).

Dentro de cada celda de la tabla periódica, en negrita, se indica el símbolo atómico universalmente reconocido, que representa a un elemento químico determinado; el valor numérico que se halla sobre este símbolo corresponde al *número atómico*, mientras que la cifra colocada bajo el símbolo atómico indica el valor promedio del *peso atómico* para dicho elemento.

Al observar la tabla de la figura 2.1, puede apreciarse, en primer lugar, que aproximadamente dos tercios de los elementos conocidos hasta el momento son *metales*, casi un sexto son *no metales* y el resto poseen propiedades intermedias entre metales y no metales. Así pues, los elementos metálicos constituyen la gran mayoría de los elementos de la tabla periódica.

Los elementos *metálicos* tienen, generalmente, puntos de fusión y de ebullición elevados, son conductores de la electricidad y del calor, tanto en estado sólido como líquido, y son susceptibles de ser deformados de manera permanente bajo la acción de un esfuerzo aplicado. Los elementos denominados *no metales*, por el contrario, suelen presentar puntos de fusión y ebullición generalmente inferiores a 500° C, no son conductores de la electricidad, ni en estado sólido ni como líquidos, y presentan valores de electronegatividad relativamente elevados.

Tanto las características químicas como las propiedades físicas y mecánicas de los elementos son diferentes para los metales y los no metales, y estas diferencias influyen en los procesos de manufactura y transformación en componentes y productos finales. Las combinaciones de los elementos básicos proporcionan un número ilimitado de productos que, en estado sólido, se denominan *materiales* y pueden agruparse en tres grandes grupos, atendiendo al tipo de elementos que los constituyen, al tipo de enlace o enlaces existentes y a la distribución espacial de los elementos o grupos de elementos presentes, según:



- *Metales*: resultado de la combinación de elementos metálicos con presencia minoritaria de otros no metálicos.
- *Polímeros*: productos de la combinación de elementos mayoritariamente no metálicos, aunque podrían hallarse metales en porcentajes muy bajos.
- *Cerámicos*: conjunto de materiales resultante de la combinación de metales y no metales en proporciones similares, aunque también se incluyen aquellos materiales que contienen en gran proporción elementos no metales con propiedades intermedias.

## 2.2 Enlace atómico

El enlace atómico proporciona una unión estable entre dos elementos iguales o distintos, y variará en función del tipo de constituyentes a unir. De estas diferencias surgen las características de los materiales de aplicación industrial. Las uniones posibles que pueden darse entre elementos iguales o distintos son, principalmente, los *enlaces primarios* que se indican a continuación.

### 2.2.1 Enlace covalente

Es éste un enlace propio de átomos no metálicos, es decir, de elementos con electronegatividades elevadas, o bien de no metales con propiedades intermedias.

Este tipo de unión implica el compartimiento de los electrones de las últimas capas de valencia de los átomos (Fig. 2.2), lo que justificaría que los productos resultantes no tengan capacidad de conducir electricidad, al no haber electrones portadores libres.

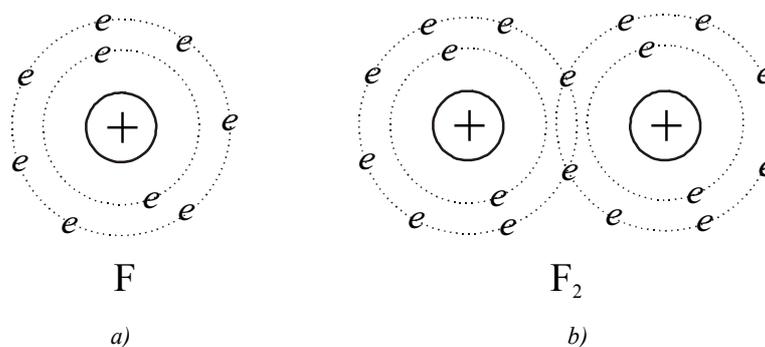


Fig. 2.2 Esquema de un enlace covalente. a) átomo de flúor (F); b) molécula gaseosa de flúor (F<sub>2</sub>).

La unión covalente es extremadamente fuerte y precisa que los átomos implicados se allen en unas direcciones determinadas, de ahí que los sólidos covalentes sean materiales muy rígidos y con puntos de fusión muy elevados.

La distribución atómica de los átomos en una estructura covalente puede ser más o menos ordenada, si bien, en general, se desarrollan estructuras en forma de largas cadenas que pueden presentar ramificaciones. Estas cadenas no suelen distribuirse de forma ordenada en el espacio, sino que se retuercen a fin de ocupar un espacio mínimo.

### 2.2.2 Enlace iónico

Es característico de las uniones entre átomos con electronegatividades muy distintas, es decir, entre metales y no metales.

En este caso, los elementos metales se desprenden de electrones de sus capas más externas y los elementos no metales captan estos electrones y los incluyen en sus niveles de valencia (Fig. 2.3). Como resultado de este traspaso electrónico, se generan iones, es decir, átomos con cargas netas positivas y negativas. A partir de aquí, son las fuerzas electrostáticas de atracción/repulsión las que rigen la unión de los distintos tipos de átomos, así como su distribución espacial.

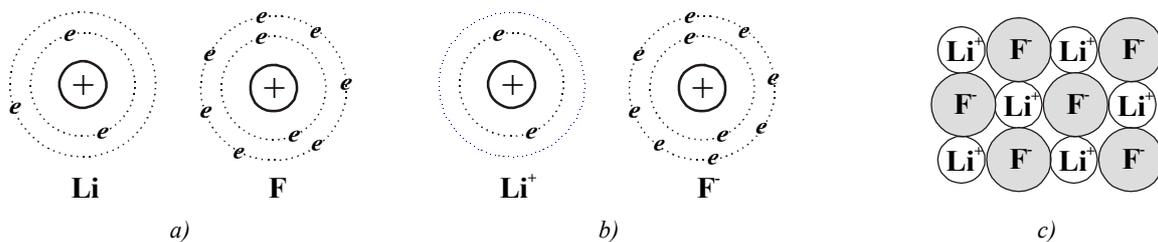


Fig. 2.3 Esquema de un enlace iónico. a) átomos de Li y de F; b) iones Li<sup>+</sup> y F<sup>-</sup>; c) red iónica de LiF.

La unión entre cargas de distinto signo implica una distribución muy ordenada, manteniendo distancias y ángulos de equilibrio entre los átomos constituyentes del sólido iónico. Esta estructura ordenada se denomina *estructura cristalina*, de manera que los sólidos iónicos son sólidos cristalinos.

### 2.2.3 Enlace metálico

Esta unión es totalmente distinta de las dos anteriores y es propia de los metales de las aleaciones metálicas. La unión se produce entre átomos metálicos que pueden desprenderse de los electrones de su capa más externa, quedando como núcleos con una carga neta positiva. Estos electrones se agrupan en torno a los núcleos, formando una nube que mantiene cohesionados dichos núcleos (Fig. 2.4).

La distribución de los núcleos positivos es regular, a fin de minimizar las repulsiones entre cargas de un mismo signo y favorecer la distribución uniforme de la nube electrónica. Esta situación es igual a la de un sólido iónico, ya que la distribución regular de los núcleos positivos convierte los sólidos metálicos en sólidos cristalinos. Por otro lado, la posibilidad de que se puedan unir átomos de un mismo tipo supone una situación similar a la de algunos sólidos covalentes.

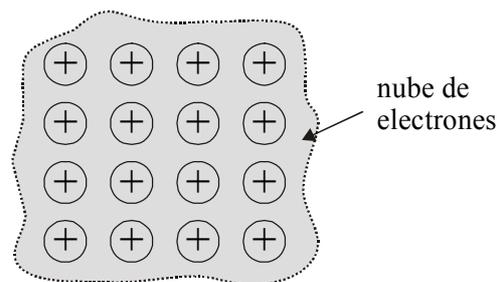


Fig. 2.4 Representación del enlace metálico con núcleos positivos ordenados y rodeados de electrones.

El enlace metálico justifica que estos materiales puedan conducir calor y electricidad, ya que los electrones son portadores de carga que pueden moverse libremente en el sólido. También explicaría porqué los metales pueden deformarse plásticamente bajo la acción de un esfuerzo aplicado, ya que este enlace no direccional permite el desplazamiento de los núcleos positivos desde sus posiciones iniciales, en tanto que la nube electrónica mantiene la cohesión de esta nueva distribución.

#### 2.2.4 Enlaces secundarios

Los enlaces primarios unen átomos entre sí, mientras que los enlaces secundarios tan sólo reflejan las fuerzas de atracción existentes entre moléculas. No hay transferencia de electrones y tampoco se generan cargas netas, de manera que son mucho más débiles que los enlaces primarios. Sin embargo, el hecho de que se produzcan en número elevado implica que son enlaces muy importantes, especialmente en estructuras covalentes moleculares como los polímeros, ya que son los enlaces que unen cadenas moleculares entre ellas.

Los enlaces secundarios más conocidos son los denominados Fuerzas de Van der Waals, que resultan de la atracción entre dipolos moleculares (entre moléculas de agua,  $H_2O$ , o entre moléculas de ácido fluorhídrico, HF, por ejemplo). También son de este tipo los enlaces que se generan entre los núcleos positivos y los electrones de valencia que dan lugar a dipolos temporales en moléculas totalmente neutras.

Otro tipo de enlace secundario son los puentes de hidrógeno y únicamente se desarrollan en moléculas que contienen hidrógeno unido de forma covalente a otros átomos distintos (por ejemplo, en las cadenas de hidrocarburos de materiales poliméricos). En este caso, se generan dipolos entre el hidrógeno, que, desprovisto de su único electrón, desarrolla una cierta carga positiva, y los electrones de los otros átomos.

### 2.3 Materiales metálicos

Dentro de los sólidos cristalinos, es decir, de aquellos que están formados por agrupaciones ordenadas de átomos en forma de red o retículo, los metales y las aleaciones metálicas constituyen la inmensa mayoría (del orden del 75 %) de la totalidad de materiales de aplicación industrial.

Todos los materiales metálicos están constituidos por átomos, iguales o distintos, dispuestos ordenadamente según los parámetros de una red espacial. Si bien son 7 los sistemas cristalinos posibles en que podrían solidificar los materiales cristalinos, las posibilidades de ocupación de estos sistemas son las correspondientes a las 14 redes de Bravais. En el esquema de la tabla 2.1 se recogen las características de los parámetros (aristas y ángulos entre aristas) que definen los distintos sistemas cristalinos.

De las redes de Bravais, los materiales metálicos utilizan mayoritariamente dos de ellas: las redes cúbicas centradas en el cuerpo y en las caras, BCC y FCC respectivamente, atendiendo a la nomenclatura inglesa (*Face Centered Cubic* y *Body Centered Cubic*). Un tercer tipo de red cristalina que usualmente se observa en algunos sólidos metálicos es una variedad de la red hexagonal: la red hexagonal compacta, HCP según la nomenclatura inglesa (*Hexagonal Close Packed*). Los tres tipos de empaquetamientos se pueden apreciar en los esquemas de la figura 2.5.

Las características de cada tipo de red (densidad, compacidad, deformabilidad) se trasladan a los materiales que las presentan, con lo cual se pueden deducir algunos de los aspectos de un metal o aleación basándose únicamente en el sistema cristalino en que haya solidificado. Así, los metales HCP

(titanio en una de sus variedades alotrópicas) muestran una pobre ductilidad y, por lo general, es difícil deformarlos a temperatura normal. De la misma forma, los metales BCC (hierro- $\alpha$ , cromo) no son tan dúctiles como los metales FCC (aluminio, cobre, oro, hierro- $\gamma$ , plata,...), ya que es esta estructura la que favorece un mayor deslizamiento de átomos bajo la acción de una tensión aplicada. En la tabla 2.2 se indican las estructuras cristalinas que, en condiciones normales de temperatura, presentan los metales más comunes.

Tabla 2.1 Relaciones entre aristas y ángulos de los sistemas cristalinos.

<i>Sistema Cristalino</i>	<i>Relación entre aristas</i>	<i>Relación entre ángulos</i>
<b>Cúbico</b>	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
<b>Tetragonal</b>	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
<b>Romboédrico</b>	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
<b>Hexagonal</b>	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
<b>Ortorrómbico</b>	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$
<b>Monoclínico</b>	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ$ $\beta \neq 90^\circ$
<b>Triclínico</b>	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

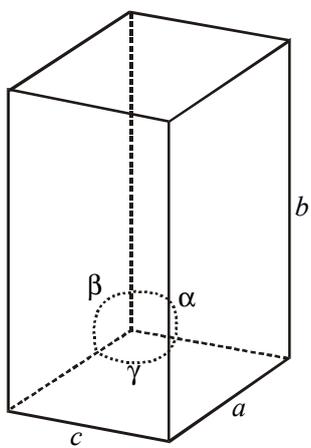
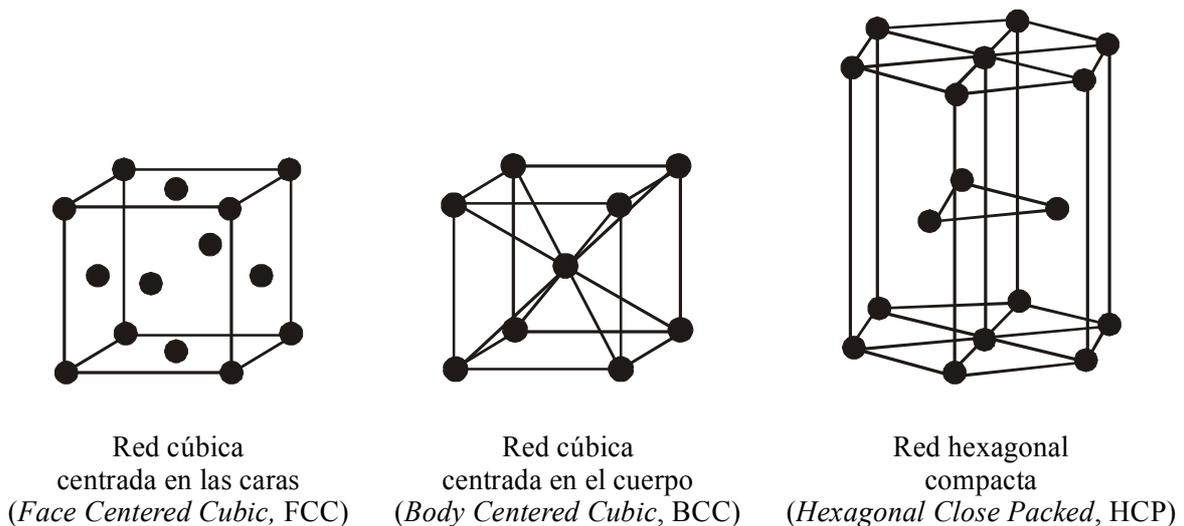



Fig. 2.5 Las tres estructuras cristalinas más comunes en metales y sus aleaciones.

Algunos metales como, por ejemplo, el cobalto, el hierro y el titanio, se pueden presentar con diferentes estructuras. Las transiciones estructurales se experimentan, generalmente, cuando se producen cambios de temperatura. Este fenómeno se conoce como *alotropía* y las diferentes redes que puede presentar un metal o una aleación se denominan variedades alotrópicas.

Tabla 2.2 Estructuras cristalinas habituales en los metales de aplicación industrial más comunes.

<i>Metal</i>	<i>Estructura cristalina</i>
<b>Cromo</b>	BCC (cúbica centrada en el cuerpo)
<b>Hierro</b>	BCC
<b>Molibdeno</b>	BCC
<b>Tantalio</b>	BCC
<b>Tungsteno</b>	BCC
<b>Aluminio</b>	FCC (cúbica centrada en las caras)
<b>Cobre</b>	FCC
<b>Oro</b>	FCC
<b>Plomo</b>	FCC
<b>Plata</b>	FCC
<b>Níquel</b>	FCC
<b>Magnesio</b>	HCP (hexagonal compacta)
<b>Titanio</b>	HCP
<b>Zinc</b>	HCP

La transformación alotrópica de un material cristalino también puede inducirse por una tensión aplicada, como es el caso de algunos materiales cerámicos que pueden transformar celdas tetragonales en monoclinicas bajo la acción de la tensión provocada por la existencia de una grieta. La transformación induce un incremento de volumen de la zona modificada, ya que la celda monoclinica es más voluminosa que la celda tetragonal ( $V_{\text{MONOCLÍNICA}} > V_{\text{TETRAGONAL}}$ ). Teniendo en cuenta que los sólidos son incompresibles, no podría producirse una transformación de este tipo si no se dispusiera de espacio vacío, en este caso el de la grieta, con lo cual se aproximan los bordes de la misma y se reduce notablemente el efecto que produce en el sólido (Fig. 2.6).

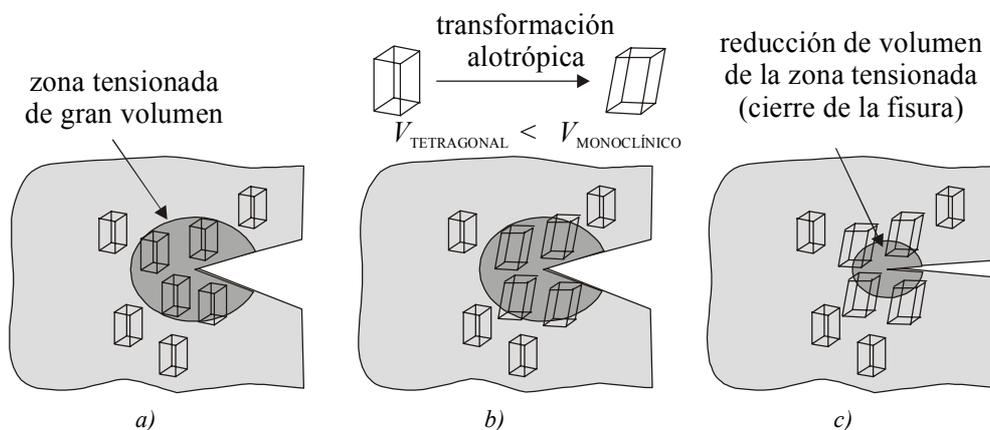


Fig. 2.6 a) Material cerámico tetragonal sometido a un esfuerzo de tracción;  
 b) transformación alotrópica de tetragonal a monoclinico en la zona de mayor tensión;  
 c) reducción de la fisura y de la zona tensionada.

### 2.3.1 Soluciones sólidas

Las aleaciones metálicas son combinaciones de dos metales o bien de un metal y un no metal, hallándose este último en porcentajes pequeños. Dado que los dos componentes, soluto y disolvente o matriz, están en estado sólido al final de la combinación, el conjunto se denomina *solución sólida*.

Tanto si la aleación corresponde a la combinación de dos metales como si se trata de una mezcla de metal y no metal, se hace necesaria la convivencia de dos átomos distintos en una misma red, esto es, en una determinada red metálica (matriz o disolvente) estará presente un tipo distinto de átomo (soluto), con lo cual se generará un *defecto cristalino*. Los defectos cristalinos que pueden producirse cuando se añade un átomo extraño a una red metálica pueden ser de tres tipos:

- *Defecto sustitucional*, que es el producido por un átomo distinto que se coloca ocupando una posición propia de la red (Fig. 2.7.a y 2.7.b). Este defecto únicamente es posible en átomos con diferencias de tamaño pequeñas (inferiores al 15 %), y cuanto menor sea esta diferencia tanto más fácil será la combinación de ambos. En estos casos puede producirse solubilidad total, de manera que el soluto puede hallarse presente en cualquier proporción.
- *Defecto intersticial*, que se produce con átomos extraños de pequeño tamaño, los cuales se introducen en espacios que hay entre las posiciones de la red (posiciones intersticiales), como se indica en el esquema c de la figura 2.7. Este tipo de defecto es característico en átomos como el hidrógeno o el carbono, que suelen introducirse en los intersticios de la red y que se denominan *solutos intersticiales*. La proporción de átomos extraños es limitada, como lo es la cantidad de huecos susceptibles de ser ocupados en una red cristalina.
- Un tercer tipo de defecto corresponde a la situación en que el átomo extraño se combina con los átomos de la red, en proporciones exactas, para formar una nueva estructura cristalina diferente (*segunda fase* o *fase precipitada* en la matriz). Por ejemplo, unas pocas centésimas de cobre presentes en una aleación de magnesio dan lugar a la formación de  $Mg_2Cu$ , un compuesto que tiene una estructura diferente de ambos metales y que se distribuye en la matriz de magnesio.

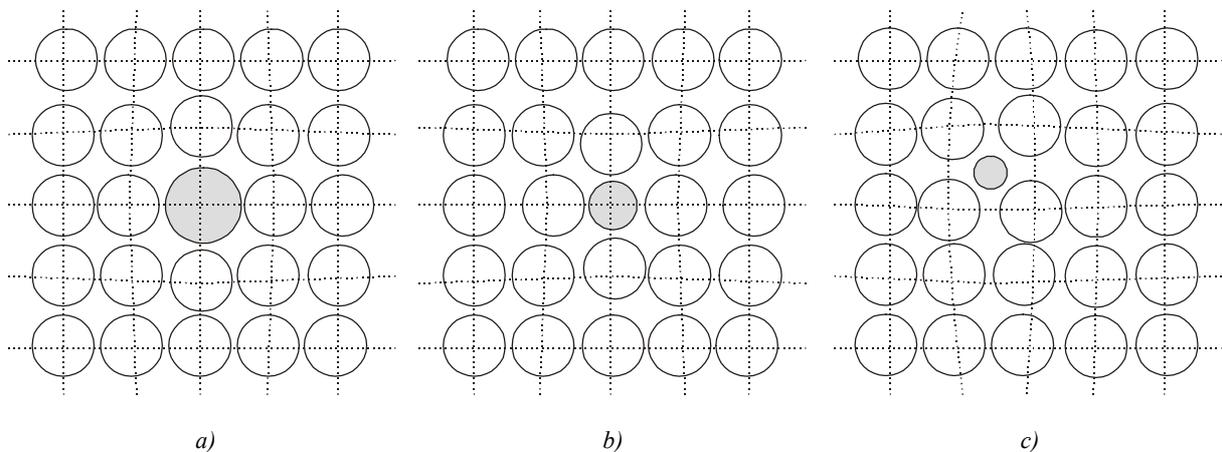


Fig. 2.7 a) Defecto sustitucional provocado por un átomo distinto y mayor, que ocupa una posición de la red;  
 b) Defecto sustitucional provocado por un átomo de soluto de menor tamaño en una posición de la red;  
 c) Defecto intersticial provocado por un átomo pequeño de soluto ubicado en un espacio intersticial.

Las situaciones representadas en la figura 2.7 corresponden a soluciones sólidas sustitucionales o intersticiales, y en cualquiera de estos casos la distribución del soluto en la matriz será uniforme, con lo cual el sólido estará constituido por una única fase. En cualquiera de las tres situaciones, la adición de un átomo extraño a una red cristalina modificará su respuesta, sea física y/o mecánica, observándose en las soluciones sólidas un endurecimiento notable respecto a la red sin combinar. Por el contrario, si se crea una segunda fase por combinación de átomos en la red, la situación que se produce no corresponde a una solución sólida, ya que habrá mayor concentración de soluto en las zonas en que se formen los cristales de la nueva fase. El efecto de la segunda fase en la respuesta macroscópica de un sólido cristalino es similar al de una solución sólida, y también induce un endurecimiento considerable respecto al material sin precipitados.

### 2.3.2 Aleaciones metálicas

Como se ha indicado en el punto anterior, una aleación es un metal compuesto por más de un elemento. En general, se puede decir que muy pocos metales se utilizan en estado puro o casi puro, en aplicaciones de ingeniería. Así, por ejemplo, el cobre con un 99,99% de pureza se usa en la fabricación de cables eléctricos. Sin embargo, la gran mayoría de los metales de aplicación industrial se combinan con otros metales o no metales, a fin de conseguir unas propiedades óptimas para el uso concreto a que se van a destinar.

Las aleaciones para ingeniería incluyen los hierros y los aceros (aleaciones Fe-C), las aleaciones de aluminio (Al), las de magnesio (Mg), las de titanio (Ti), las de níquel (Ni), las de zinc (Zn) y las de cobre (Cu), incluyendo los latones (aleaciones Cu-Zn) y los bronce (aleaciones Cu-Sn).

En las aleaciones ferrosas se encuentran los aceros y las fundiciones (hierros colados), que constituyen el grupo de materiales industriales más importante (del orden del 90% del total de aleaciones metálicas utilizadas). El acero es una aleación de hierro (Fe) y carbono (C), hallándose éste último en porcentajes pequeños (por debajo del 2%), y puede contener otros elementos de aleación que proporcionarán características propias y diferenciales entre las distintas familias de aceros. Los principales aditivos de los aceros son el manganeso (Mn), el cromo (Cr), el níquel (Ni) y el molibdeno (Mo). Las fundiciones o hierros colados presentan contenidos mayores en carbono (hasta el 4.5%) y también pueden contener silicio (Si) y otros elementos. Las aplicaciones industriales de este tipo de aleaciones son diversas y numerosas, especialmente para componentes estructurales y de maquinaria pesada, ya que son materiales muy competitivos, se puede disponer de grandes volúmenes, presentan unas propiedades mecánicas excelentes y son susceptibles de ser conformados según una gran variedad de posibilidades. Los sectores del transporte y de la automoción son también grandes consumidores de aleaciones férricas.

Las aleaciones no férricas constituyen aproximadamente el 10% de las aleaciones metálicas de aplicación industrial y comprenden las combinaciones del resto de elementos metálicos de la tabla periódica (el Fe puede estar presente, pero no de forma mayoritaria). Entre estos materiales se pueden hallar las aleaciones de aluminio (Al), cobre (Cu), níquel (Ni), plata (Ag), estaño (Sn), titanio (Ti), zinc (Zn) y otros metales de consumo más moderado. Las propiedades mecánicas de las aleaciones no férricas son muy variadas, así como el conjunto de alternativas de conformado.

Los metales de mayor importancia tecnológica son hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), aluminio (Al), titanio (Ti), cromo (Cr), manganeso (Mn), níquel (Ni), estaño (Sn) y cobalto (Co). Sus estructuras pueden ser relativamente simples, como los latones, que son aleaciones *binarias* (formadas por dos elementos), o muy complejas, conteniendo múltiples elementos de aleación en un mismo sistema sólido. Al observar su ubicación en la tabla periódica, se aprecia que todos ellos se hallan localizados en una misma región de la tabla (Fig. 2.8).

Metales de transición										13 Al 26.982
3b	4b	5b	6b	7b	(	8b	)	1b	2b	
21 Sc 44,956	22 Ti 47,867	23 V 50,942	24 Cr 51,996	25 Mn 54,938	26 Fe 55,854	27 Co 58,933	28 Ni 58,963	29 Cu 63,546	30 Zn 65,409	31 Ga 69,723
39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.940			45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82

Fig. 2.8 Detalle de la zona central de la tabla periódica en la cual se localizan los elementos metálicos de mayor aplicación tecnológica e industrial.

### 2.3.3 Solidificación de aleaciones

La solidificación de metales y aleaciones es un importante proceso industrial, ya que la mayoría de estos materiales son fundidos y después moldeados hasta una forma acabada o una preforma. En general, la solidificación de un metal o aleación puede ser dividida en dos etapas: una primera que comprende la formación de núcleos estables en el líquido (nucleación), y otra en que se produce el crecimiento de dichos núcleos hasta dar origen a los cristales o granos, que son la base de una estructura granular. La nucleación de partículas sólidas en un metal puede darse a través de dos mecanismos principales:

- La *nucleación homogénea* es el caso más simple de nucleación y se produce cuando el metal fundido proporciona por sí mismo los átomos necesarios para formar los núcleos (Fig. 2.9). En este caso, el crecimiento de un cristal se produce por redistribución de los átomos desde una estructura relativamente aleatoria, dentro del líquido, hasta adoptar una estructura cristalina con una geometría bien definida. En las primeras etapas de solidificación estable, generalmente se forman cristales ramificados tridimensionalmente que se conocen con el nombre de *dendritas* (Fig. 2.10).

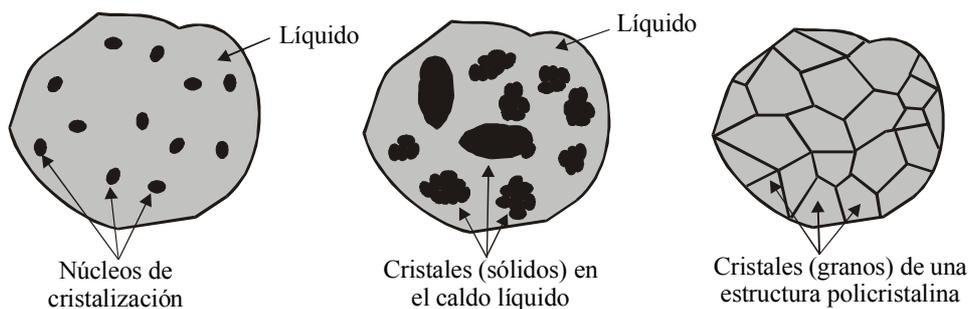


Fig. 2.9 Representación del proceso de solidificación homogénea de un metal o aleación metálica.

- La *nucleación heterogénea* se produce, en cambio, sobre una superficie distinta a la de un núcleo del propio material. Estas superficies pueden ser las del recipiente que lo contiene o bien una impureza sólida que se halle presente (Fig. 2.11). Para que se produzca la nucleación en este caso, el germen de nucleación (bien sea el recipiente que contiene el líquido o bien una impureza) debe ser humedecido por el metal líquido, cosa que sucede cuando el ángulo de contacto que existe entre el núcleo sólido y el líquido del entorno,  $\alpha$ , es pequeño.

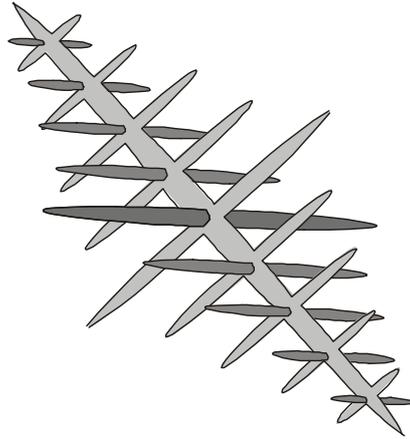


Fig. 2.10 Agrupación tridimensional dendrítica formada durante la solidificación de un metal o una aleación metálica.

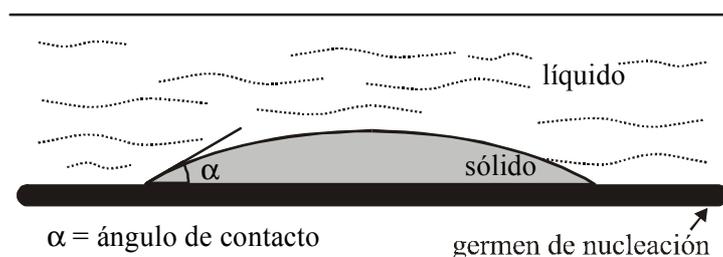


Fig. 2.11 Representación del proceso de solidificación heterogénea de un metal o aleación metálica.

Así, una porción determinada de un metal o aleación metálica puede contener millones de cristales (o granos) individuales que tendrán, cada uno de ellos, una orientación reticular única. Sin embargo, colectivamente los granos se orientan al azar dentro del sistema de solidificación, lo cual conduce a una estructura granular que se describe como *estructura policristalina*.

La región localizada entre dos cristales, o granos, se denomina *borde de grano* y está comprendida por varias filas de átomos parcialmente descolocados con respecto a la ordenación de la red que les corresponda. Este desarreglo es la consecuencia de la solidificación de los últimos átomos del líquido en una región limitada (espacio entre dos cristales que han ido creciendo), que generalmente no permite mantener las distancias correspondientes a la red. Los bordes de grano son, pues, un defecto de las estructuras cristalinas, en tanto que suponen una irregularidad del orden atómico, y son un impedimento al deslizamiento de átomos cuando una estructura policristalina se halla sometida a la acción de un esfuerzo aplicado, de manera que, cuanto mayor sea la superficie de borde de grano (estructura fina, de grano pequeño), tanto mayor será la oposición a la deformación de un material, y viceversa.

El tamaño de los granos está relacionado, de forma inversa, con la rapidez del enfriamiento. Así pues, un enfriamiento rápido promueve la formación de numerosos granos pequeños, mientras que una menor velocidad de enfriamiento tiene el efecto opuesto y conduce a una estructura policristalina con un número menor de granos, pero de tamaño mayor. Desde el punto de vista del diseño de un componente, suele ser preferible un metal con granos pequeños, ya que presenta mayor resistencia y

dureza que una estructura grosera (de tamaño de grano grande). Por el contrario, en ciertas operaciones de manufactura (conformado metálico, por ejemplo), puede resultar más adecuada una estructura policristalina de tamaño grande, ya que presenta mayor ductilidad durante la deformación plástica y una mejor superficie de producto terminado.

### 2.3.4 Difusión en estado sólido

Un gran número de procesos de producción y utilización de materiales se hallan estrechamente relacionados con la facilidad o dificultad de movimiento de los átomos que los constituyen. Dado que los materiales, por definición, se hallan en estado sólido, el movimiento y reagrupamiento de átomos en una red cristalina se conoce como *difusión en estado sólido*.

Los movimientos atómicos permiten la evolución de una microestructura a otra más estable, aunque generalmente los átomos han de poseer una energía suficiente para superar barreras energéticas que existan entre el estado inicial y el final. Este valor de energía se conoce como energía de activación ( $E_a$ ). Así, un sistema cristalino que en determinadas condiciones conserve un exceso de energía igual o superior a esta energía de activación, podrá evolucionar espontáneamente hasta unas condiciones finales, que pueden ser distintas o no. Si este estado final corresponde a una situación energéticamente más favorable, se libera una cantidad de energía que corresponde a la diferencia (Fig. 2.12).

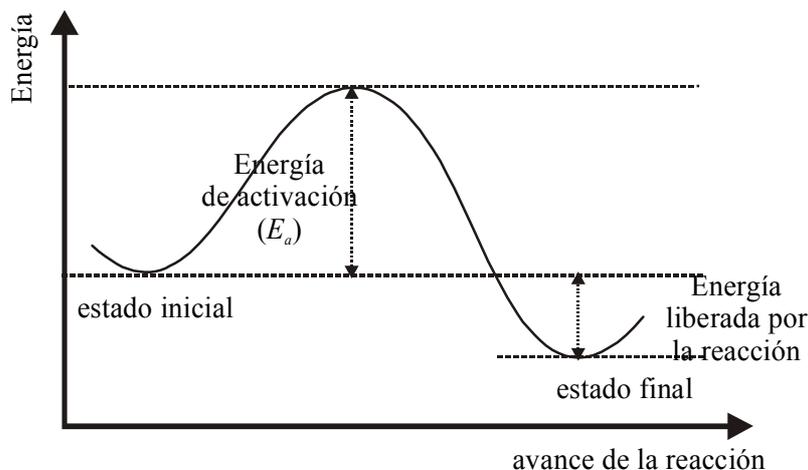


Fig. 2.12 Variación de la energía de un sistema cristalino entre los reactivos (estado inicial) y los productos (estado final).

La difusión puede definirse como el mecanismo por el cual los átomos de un sólido se ven impulsados a desplazarse a través de la red para ocupar posiciones similares, pero en otro lugar. En los gases, el movimiento es muy rápido, ya que apenas hay oposición ni choques entre átomos que frenen el avance. A modo de ejemplo, cabría indicar la rapidez con que un perfume se esparce en un espacio determinado. De forma similar, en un medio líquido, el movimiento de los átomos es relativamente veloz, aunque no tanto como en un gas, dado que el medio es condensado y la probabilidad de que un átomo choque con otro que frene su desplazamiento es elevada. Un ejemplo lo constituiría la homogeneización espontánea de una gota de tinta en un vaso de agua, de manera que en un tiempo breve se consigue una solución tintada.

En estado sólido, este movimiento está mucho más limitado dado que el sistema, además de ser condensado, presenta una densidad de átomos mayor que en el líquido o en un gas, y esto detiene el avance o lo obstaculiza. Además, el movimiento de los átomos en un sólido está limitado a posiciones vecinas y precisa de una gran energía de aporte ( $E_a$ ) para promover un cambio de posición. Las vibraciones térmicas favorecen el movimiento de un átomo en un sistema sólido, con lo cual es habitual que los procesos industriales que precisen de difusión en estado sólido se realicen a temperaturas elevadas.

En los metales y en las aleaciones, el fenómeno de la difusión es especialmente importante, ya que es la base de las reacciones que conducen a una variación microestructural, la cual afectará de forma importante a la respuesta macroscópica del material. La recristalización es un proceso que requiere la difusión de átomos a través de los bordes de grano, de manera que una estructura deformada pueda regenerar una morfología y distribución de cristales más estable que la correspondiente a un estado deformado, y de ahí la necesidad de un recalentamiento.

En los sólidos cristalinos se producen dos mecanismos básicos de difusión atómica: la *difusión por vacantes* y la *difusión intersticial*. En el primer caso, un átomo ocupa una posición vacante vecina, con lo cual avanza una posición a cambio de que la vacante “retroceda” también una posición (Fig. 2.13a). En el segundo caso, un átomo que ocupa una posición intersticial pasa a ocupar una posición equivalente, pero vecina (Fig. 2.13b).

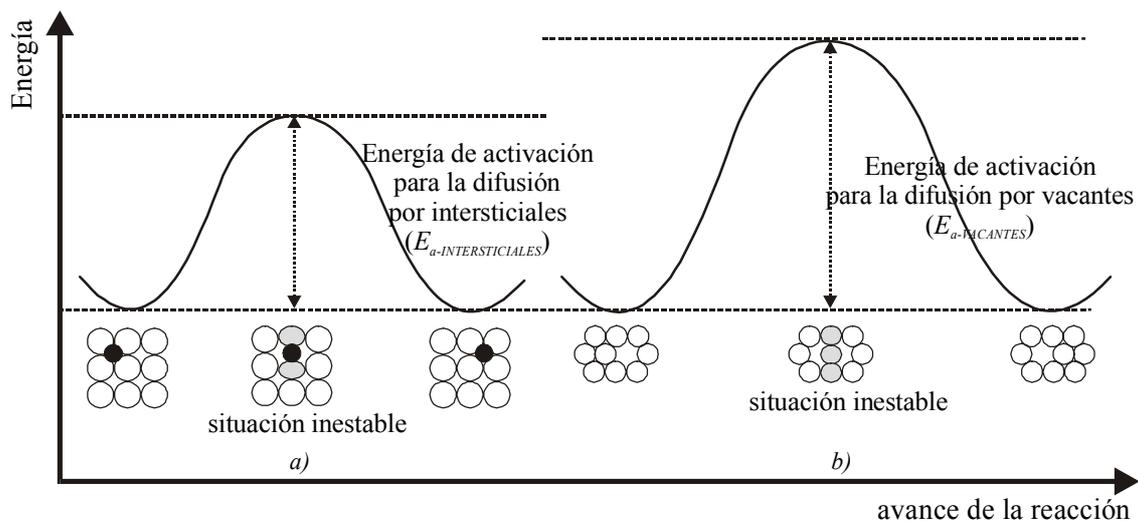


Fig. 2.13 Valores de energía de activación para los procesos de difusión por intersticiales (izquierda) y de difusión por vacantes (derecha).

Los átomos intersticiales son, generalmente, hidrógeno, carbono, nitrógeno, etc. Estos átomos son de un tamaño mucho menor que los de los átomos que constituyen la red cristalina, y no ocupan posiciones en ésta, sino que se alojan en los huecos que hay entre posiciones.

Tanto en la difusión por vacantes como en el mecanismo de difusión por intersticiales, se produce una situación intermedia de gran inestabilidad que correspondería al instante en que el átomo que se desplaza no se halla en una posición de la red o intersticial, sino entre dos posiciones. El sistema necesita una cantidad suficiente de energía para superar esta etapa de energía máxima, y la magnitud de esta inestabilidad es la energía de activación.

En el caso de la difusión por vacantes, la inestabilidad provocada por esta etapa intermedia es muy superior a la asociada a una difusión intersticial, dado que el tamaño del átomo que se desplaza es mayor y el rechazo entre las zonas positivas de los átomos implicados en la etapa inestable es también muy elevado. La difusión intersticial se produce sin provocar desplazamiento de los átomos de la red cristalina, son átomos que ocupan huecos los que se desplazan y, dado su pequeño tamaño, la distorsión que provocan en la red es menor durante la etapa inestable.

Las diferencias de movilidad atómica entre ambos mecanismos conducen a valores de energía de activación muy superiores para los procesos de difusión por vacantes de los que se hallan para los valores asociados a difusión por intersticiales (Tabla 2.3).

Tabla 2.3 Valores de energía de difusión por vacantes para diferentes metales (autodifusión) y sistemas metal-metal (difusión por vacantes).

<b>Metal</b>	<b>Temperatura de fusión, °C</b>	<b>Estructura cristalina</b>	<b>Energía de activación, kJ/mol</b>
Zinc	419	HCP	91.6
Aluminio	660	FCC	165
Plata	962	FCC	184
Cobre	1083	FCC	196
Níquel	1452	FCC	293
Hierro	1530	FCC	280
Hierro	1530	BCC	240
Molibdeno	2600	BCC	460
<b>Sistema (soluto en disolvente)</b>			<b>Energía de activación, kJ/mol</b>
Níquel en hierro-FCC			280
Manganeso en hierro-FCC			282
Zinc en cobre (FCC)			191
Cobre en aluminio (FCC)			126
Carbono en titanio (HCP)			182

A tenor de los resultados indicados en la tabla 2.3, puede apreciarse que los metales que cristalizan en redes FCC y HCP, las cuales se caracterizan por su gran compacidad, poseen valores de energía de activación muy superiores a los de metales con estructura cristalina BCC, menos compacta. Los valores de energía de difusión son característicos de cada material. Cuanto más elevado es el punto de fusión de un metal tanto mayor es su energía de difusión, ya que la temperatura de fusión está directamente relacionada con la energía del enlace en la red.

En los mecanismos de difusión, tanto por vacantes como por intersticiales, un incremento de temperatura provoca una mayor movilidad de los átomos, con lo cual se general más vacantes y además las vibraciones de los átomos alrededor de sus posiciones de equilibrio son más intensas. De esta manera, se favorece el desplazamiento atómico entre dos posiciones (situación inestable) y, en definitiva, se facilita el propio proceso de difusión.

El estudio de los mecanismos de difusión constituye una herramienta básica en numerosos procesos industriales de fabricación y/o de modificación de materiales. A modo de ejemplo, cabría mencionar los *tratamientos termoquímicos*, de los cuales se hace una descripción más amplia en el capítulo

siguiente. Estos procesos metalúrgicos se aplican en la elaboración de herramientas de corte y de componentes resistentes al desgaste y consisten en proporcionar contenidos muy elevados de átomos intersticiales (carbono, nitrógeno, azufre) a componentes férricos, mediante difusión en estado sólido. Estos tratamientos proporcionan componentes con una elevada dureza superficial (“piel” enriquecida en determinados elementos), pero que mantienen un núcleo tenaz (zona no tratada).

## 2.4 Materiales poliméricos

Una descripción muy elemental de un material polímero sería definirlo como un material compuesto principalmente por cadenas en las que el carbono (C) es el elemento principal y el resto de átomos son mayoritariamente no metales (hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, silicio, etc.). En estas cadenas se localizan unidades que se repiten (meros) y, tanto en estas unidades como entre ellas, la unión principal proviene de un enlace covalente entre átomos de carbono. La repetición de unidades conduce a moléculas finales (polímeros) que pueden llegar a ser considerablemente grandes.

En general no presentan estructura cristalina, sino que las cadenas poliméricas se distribuyen desordenadamente en el espacio, dando lugar a sólidos amorfos. Ahora bien, algunos polímeros presentan agrupaciones de cadenas que se repiten en el espacio, proporcionando una combinación de regiones cristalinas y amorfas.

Los principales elementos constituyentes de los materiales polímeros son, además de carbono, hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y cloro (Cl). El criterio de clasificación más común de los materiales polímeros suele agruparlos en tres grandes familias:

- Polímeros *termoplásticos*, que son aquellos que pueden calentarse y enfriarse varias veces sin que por ello se altere su estructura ni sus propiedades. Los plásticos utilizados en alimentación (poliestirenos y poliolefinas) y los PVC (cloruros de polivinilo) pertenecerían a este grupo, así como el nilón.
- Polímeros *termoestables* o *termofijos*, que son el producto de la transformación química de un producto base (curado) durante la cual se produce la reticulación de las cadenas poliméricas, que confieren una gran rigidez al conjunto. La forma final de los polímeros termoestables se adopta cuando estos se enfrían, después del curado. Las resinas pertenecen a esta categoría.
- Polímeros *elastómeros*, que se caracterizan por presentar una capacidad de deformación elástica extraordinaria. Los derivados del caucho, las siliconas y el neopreno se hallarían dentro de este grupo.

## 2.5 Materiales cerámicos

Si bien una gran parte de los materiales cerámicos están formados por combinaciones de metales (o semimetales) y no metales, unidos por enlaces iónicos y formando estructuras cristalinas, también hay un gran número de cerámicos covalentes, que son sólidos amorfos.

Si bien los cerámicos iónicos presentan puntos de fusión muy elevados, algunos cerámicos covalentes pueden fundir a temperaturas moderadas, como sería el caso del vidrio, formado por cadenas de silicio (Si) y oxígeno (O) en proporción 1:2 ( $\text{SiO}_2$ ) y que puede adoptar un estado fluido a partir de 1.200 °C. Los elementos que constituyen mayoritariamente los materiales cerámicos son el oxígeno (O), el nitrógeno (N) y el carbono (C).

Entre estos materiales se pueden hallar productos de aplicación tradicional que vienen utilizándose desde hace miles de años, como los derivados de barro, los productos de vidrio y algunos abrasivos, como la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) o el carburo de silicio ( $\text{SiC}$ ).

En las últimas décadas se han desarrollado los productos ya existentes, o bien nuevas combinaciones que han dado lugar a los cerámicos modernos. En estos últimos, la composición suele ser más precisa y libre de impurezas, y su principal característica es un conjunto de propiedades mecánicas muy superiores a las de los cerámicos de aplicación tradicional. Otro gran grupo de productos cerámicos son los vidrios, con puntos de fusión relativamente bajos que permiten su conformado por fusión y moldeo o soplado.

## 2.6 Materiales compuestos

Este grupo no contiene materiales distintos de los que puedan hallarse en los apartados anteriores, pero se distinguen por estar formados por combinaciones de los mismos: metal-metal, polímero-polímero, cerámico-cerámico, metal-polímero, metal-cerámico o polímero-cerámico.

Un material compuesto consta de dos o más fases, de naturaleza igual o distinta, pero con una frontera física definida entre ellas, fases que son el producto de un proceso separado de los materiales constituyentes con una unión realizada en una etapa posterior. Uno de los componentes se denomina matriz, en el cual se distribuye una segunda fase (generalmente fibras o partículas), denominada *refuerzo*.

Si bien el concepto de material compuesto resulta relativamente moderno y sugiere una elaboración artificial, en la naturaleza se hallan algunos de estos materiales, de uso muy extendido, como sería el caso de la madera.

La característica más destacada de los materiales compuestos es que, en la práctica totalidad de situaciones, el conjunto de propiedades del conjunto (físicas, químicas y/o mecánicas) supera los valores de éstas en los componentes constituyentes, ya que suelen combinarse las excelencias de las fases presentes. A modo de ejemplo, los carburos cementados (*metal duro*), muy utilizados para la elaboración de herramientas de corte de precisión, son materiales conductores, ya que la matriz es metálica, aunque poseen la dureza de un material cerámico, proporcionada por las partículas de carburos que constituyen la segunda fase (Fig. 2.14).

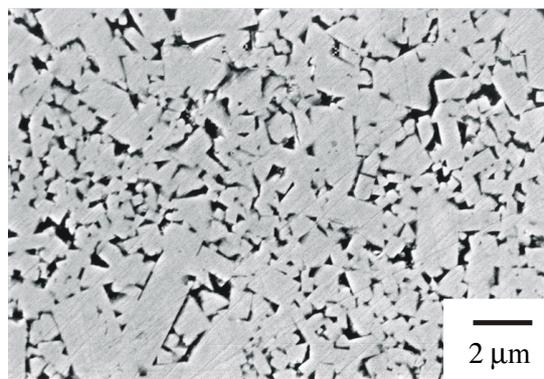


Fig. 2.14 Micrografía de un carburo cementado Co-WC. La fase oscura corresponde a la matriz metálica de cobalto (Co) y las partículas poligonales a la segunda fase de carburo de wolframio (WC).

## 2.7 Características de los materiales de aplicación industrial

Algunas de las características de los materiales de aplicación industrial derivan de su naturaleza, es decir, de su composición (elementos constituyentes) y del tipo de unión entre éstos (enlace atómico), como sería el caso de la densidad, la conductividad térmica o eléctrica o la resistencia a la temperatura, entre otras.

La selección de los distintos materiales se realiza tomando como criterio estas características, si bien los aspectos mecánicos (resistencia, dureza, tenacidad...) son también de importancia capital. Además, aspectos como el precio o la disponibilidad acaban de decidir en la selección final de un material u otro.

A modo de resumen, en la tabla 2.4 se recogen algunas de las características más relevantes de los principales materiales de aplicación industrial, separados por grupos en función de su naturaleza y tipo de enlace (metales, polímeros y cerámicos).

Tabla 2.4 Principales propiedades y características de los materiales de aplicación industrial.

<i>Tipo de material</i> <i>Características</i>	<i>Metales y Aleaciones</i>	<i>Plásticos</i>	<i>Materiales Cerámicos</i>
<b>Resistencia</b>	↑	↓ (débiles)	↑
<b>Rigidez</b>	↑	↓ (flexibles)	↑↑
<b>Tenacidad</b>	↑	↓	↓↓ (frágiles)
<b>Dureza</b>	↑	↓ (blandos)	↑↑
<b>Sensibilidad a la temperatura</b>	↑	↑↑	↓ (refractarios)
<b>Conductividad térmica</b>	↑	↓	↓↓ (aislantes)
<b>Conductividad eléctrica</b>	↑	↓↓ (sin aditivos) ↓ (con aditivos)	↓↓ (aislantes)
<b>Densidad</b>	↑	↓	↓
<b>Resistencia a la corrosión</b>	↓ (salvo aleaciones inoxidables)	↑	↑



### 3 Propiedades mecánicas de los materiales

Los materiales de uso más común suelen trabajar sometidos a esfuerzos o tensiones de mayor o menor intensidad. La necesidad de conocer los límites que puedan soportar conduce al estudio de las *propiedades mecánicas* de los materiales, que se determinarán a partir de la respuesta macroscópica a distintos tipos de tensión aplicados. Básicamente se consideran tres tipos de esfuerzos estáticos a los que pueden ser sometidos los materiales industriales:

- Esfuerzos de *tensión* (o *tracción*), uniaxiales y divergentes, que tienden a separar los extremos de la porción de material que los soportan.
- Esfuerzos de *compresión*, uniaxiales y convergentes, que tienden a unir los extremos del volumen de material que los padecen.
- Esfuerzos de *corte* o *cizalla*, que tienden a deslizar porciones adyacentes de material una sobre otra.

Cualquier material sometido a un esfuerzo, independientemente de su naturaleza presentará una mayor o menor deformación, es decir, un cambio de forma o de dimensiones que compensen el efecto del esfuerzo aplicado. La relación entre los esfuerzos de cualquier tipo y las deformaciones asociadas a ellos describirá gran parte de las propiedades mecánicas de los materiales.

Cabe destacar que el tipo de deformación que puede sufrir un material bajo la acción de un esfuerzo puede ser distinto en función del grado de tensión aplicada, o bien en función de la naturaleza del material. Así, una primera etapa, para cualquier tipo de material, suele consistir en una *deformación elástica* que se caracteriza por permitir que un componente recupere su forma inicial, cuando cesa la acción del esfuerzo aplicado. Los materiales rígidos (cerámicos, vidrios y otros materiales en determinadas condiciones) suelen presentar únicamente deformación elástica seguida de fractura (frágil), cuando se alcanzan niveles suficientemente elevados de tensión.

Después de una etapa de deformación elástica los materiales no rígidos pueden presentar un cambio de dimensiones y/o de forma permanentes, *deformación plástica*, de manera que la alteración sufrida por el componente es irreversible aunque cese la acción del esfuerzo aplicado.

Tras la deformación elástica y la plástica, esfuerzos superiores conducen a la fractura (dúctil en este caso). Este tipo de comportamiento se asocia a metales y a polímeros (de ahí su definición como “plásticos”), aunque un mismo material puede presentar un comportamiento distinto en función de las condiciones ambientales o de aplicación de esfuerzos, como se verá más adelante.

### 3.1 Relaciones esfuerzo-deformación

El estudio del comportamiento mecánico de los metales suele comenzar a partir de la realización de ensayos mecánicos, que suponen la medida de la respuesta macroscópica (deformación o ruptura), cuando actúa una tensión o esfuerzo. El ensayo mecánico que mayor cantidad de información proporciona, en este sentido, es el *ensayo de tracción*, también denominado ensayo de tensión o universal, que permite estudiar el comportamiento de deformación de un material en función de la tensión aplicada y del alargamiento observado.

La tensión o esfuerzo se define como la fuerza aplicada ( $F$ ) por unidad de sección transversal ( $S$ ), y se representa con la letra sigma ( $\sigma$ ) según

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3.1)$$

La deformación es una medida del cambio de las dimensiones de un sólido y suele expresarse en relación a las dimensiones iniciales, de manera que se define como el incremento de longitud ( $\Delta l$ ) respecto a la longitud inicial ( $l_0$ ), y se expresa con la letra epsilon ( $\epsilon$ ) según

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.2)$$

La relación entre tensión ( $\sigma$ ) y deformación ( $\epsilon$ ) determinará el comportamiento de un material y, por tanto, cuál será la respuesta que puede esperarse en servicio.

#### 3.1.1 El comportamiento elástico de los materiales

En 1676, Robert Hooke enunció la ley que lleva su nombre:

$$F = k \cdot \Delta l \quad (k = \text{constante}) \quad (3.3)$$

Considerando las relaciones establecidas en las ecuaciones (3.1) y (3.2), se cumple que, según Hooke, en un sólido elástico la tensión aplicada es proporcional a la deformación observada. Esta proporcionalidad es cierta para la gran mayoría de materiales cuando la tensión aplicada es relativamente pequeña. En estas condiciones, puede definirse un *módulo elástico*,  $E$ , que es la relación entre el esfuerzo en régimen elástico y la deformación reversible asociada:

$$E = \left( \frac{\sigma}{\epsilon} \right)_{\text{RÉGIMEN ELÁSTICO}} \quad (3.4)$$

El módulo elástico es un parámetro característico de cada material y es función de las fuerzas de enlace existentes entre los átomos constituyentes del mismo. Deviene un índice de la rigidez del mismo, de manera que un material muy rígido (por ejemplo, un cerámico) será muy reacio a alterar sus dimensiones, aún elásticamente, y precisará de valores muy elevados de tensión para que pueda apreciarse una mínima deformación. Esta combinación conduce a cocientes tensión/deformación, en régimen elástico, muy elevadas.

Se ha observado que la mayor parte de los monocristales metálicos no se comportan de forma isotrópica, de manera que el valor del módulo elástico varía según la dirección en que se aplique el

esfuerzo. Para los metales policristalinos, que son la prácticamente todos los materiales de aplicación industrial, la anisotropía individual de cada cristal queda compensada por el conjunto, de manera que presentan un comportamiento macroscópicamente isotrópico.

### 3.1.2 El comportamiento plástico de los materiales

Los metales puros suelen poseer una ductilidad muy elevada, de manera que, bajo la acción de esfuerzos relativamente pequeños, presentan variaciones de forma permanentes, es decir, deformación plástica. Las aleaciones ven modificado este tipo de comportamiento.

Si bien los metales (puros o aleaciones) se caracterizan por ser dúctiles y maleables, el grado de plasticidad varía con el grado de aleación, o con el tipo de elemento que se combine con el metal mayoritario.

En la práctica, es conveniente diferenciar entre los dos tipos de comportamiento plástico que pueden presentar los materiales, es decir, entre la ductilidad y la maleabilidad. Así, la ductilidad es la facilidad con la que un material se puede deformar en hilos bajo una tensión de tracción, y la maleabilidad es la facilidad con que puede ser deformado en láminas bajo una tensión de compresión.

Un componente metálico de poco espesor, cuando se deforma ligeramente, se comporta como un sólido elástico, siguiendo la ley de Hooke, y recobra su forma inicial cuando cesa la aplicación del esfuerzo. Sin embargo, si este mismo componente se somete a esfuerzos más elevados, la deformación es más pronunciada e irreversible, de manera que más allá de un valor determinado de tensión, el material abandona la ley de Hooke y sufre un cambio permanente de forma (deformación plástica). Este valor de tensión que indica el tránsito de uno a otro tipo de comportamiento se define como el *límite de fluencia* o *límite elástico* del material y suele representarse como  $\sigma_y$ .

Considerando que los sólidos (metálicos, cerámicos o polímeros) son incompresibles, una deformación plástica que implique un cambio de dimensiones en una dirección (por ejemplo, una deformación longitudinal  $\epsilon_x$ ) inevitablemente estará asociada a un cambio de dimensiones en las otras direcciones (deformaciones laterales  $\epsilon_y, \epsilon_z$ ) que compense la redistribución del material.

La relación entre estas deformaciones viene determinada por el *coeficiente de Poisson* ( $\nu$ ) según

$$\nu = \frac{\epsilon_{\text{longitudinal}}}{\epsilon_{\text{lateral}}} = \frac{\epsilon_x}{(-\epsilon_y)} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} \quad (3.5)$$

En un sólido ideal, el valor de  $\nu$  debería ser igual a 0,5, sin embargo los sólidos reales presentan valores comprendidos entre 0,22 y 0,4 ( $\nu \cong 0,3$  para gran número de aleaciones metálicas).

## 3.2 El ensayo de tracción

Como se ha apuntado anteriormente, el ensayo de tracción es el más utilizado para conocer numerosas propiedades mecánicas de los materiales, como la resistencia, el límite de elasticidad y las características de ductilidad (alargamiento y estricción), que es preciso conocer para realizar una correcta selección de los materiales o para juzgar su calidad.

El ensayo de tracción consiste en someter una porción del material a ensayar, llamado *probeta*, a un esfuerzo axial de intensidad gradualmente creciente hasta provocar la rotura. Las magnitudes que se

deducen de este ensayo no son suficientes para predecir técnicamente la respuesta del material en unas condiciones determinadas, aunque sí constituyen una muy adecuada aproximación.

Las dimensiones y la geometría de las probetas de tracción, así como el procedimiento de ensayo, están perfectamente descritos en las normativas industriales nacionales (UNE) o internacionales (ISO, DIN, ASTM...). Las probetas de tracción normalizadas poseen una región central (zona calibrada o caña) de sección inferior a la de los extremos o cabezas (Fig. 3.1), de manera que la aplicación de una misma carga ( $F$ ) suponga valores mayores de tensión ( $\sigma$ ) en la zona central. De esta forma, se asegura que cualquier mecanismo de deformación y/o rotura se produzca en la zona de menor sección.

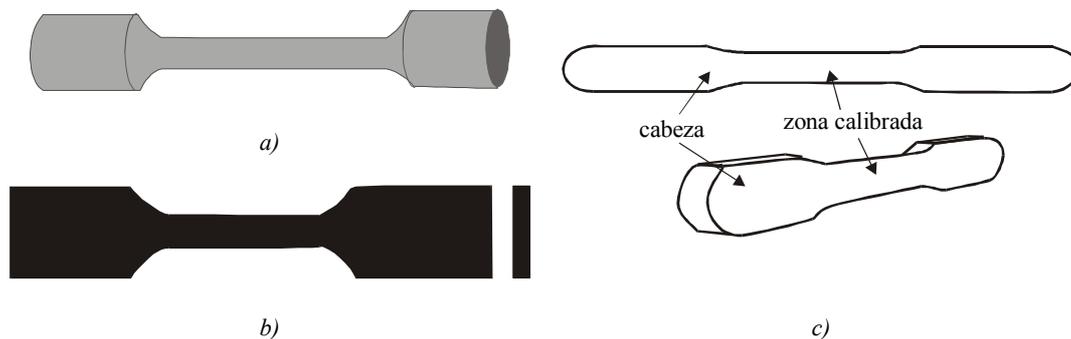


Fig. 3.1 Probetas de tracción de distintas geometrías: a) de sección circular (metales); b) halterio (polímeros); c) de sección rectangular (metales y sinterizados).

En cualquier tipo de probetas de tracción, sea cual sea su geometría, es necesario que la transición entre las zonas de diferente sección sea progresiva, con un amplio radio de curvatura, a fin de evitar la existencia de puntos débiles en la probeta que distorsionen el resultado del ensayo.

Una máquina de ensayos convencional suele ser un dispositivo vertical con unas columnas paralelas que sujetan las bancadas (Fig. 3.2). A lo largo de las columnas se desplazará una de las bancadas (*bancada móvil*) y este desplazamiento ( $\Delta l$ ) se transmitirá a cualquier accesorio acoplado. A las bancadas se acoplan las mordazas (Fig. 3.3), cuya función es sujetar firmemente los extremos de las probetas, de manera que el desplazamiento de la bancada móvil, a lo largo del ensayo, se transmita fielmente a éstas y provoque el distanciamiento de sus extremos, con lo cual se inducirá una deformación en el material.

El *registro de la máquina* recoge los valores de  $F$  y  $\Delta l$  en cada punto del ensayo, proporcionando un gráfico característico del comportamiento a tracción de una probeta determinada y con unidades de fuerza y longitud en sus ejes (Fig. 3.4). Si se consideran las expresiones (3.1) y (3.2), al dividir los valores de la curva  $F/\Delta l$  por parámetros constantes ( $S$  y  $l_0$ ), se obtiene una curva  $\sigma/\epsilon$  (*curva ingenieril*), de forma idéntica a la de registro, con unidades de tensión y de deformación, que representa el comportamiento a tracción de un material, independientemente del tamaño de la probeta.

Dado que las mordazas mantienen a las probetas solidarias con la máquina, es de esperar que el desplazamiento de la bancada móvil se vea limitado por la oposición a la deformación del material a ensayar. Así, en todo momento se ha de cumplir que el valor de la tensión que actúa ( $\sigma$ ) sea suficiente para vencer la oposición del material, manteniéndose constante la velocidad de desplazamiento del conjunto bancada-mordaza-probeta (en la gran mayoría de los casos).

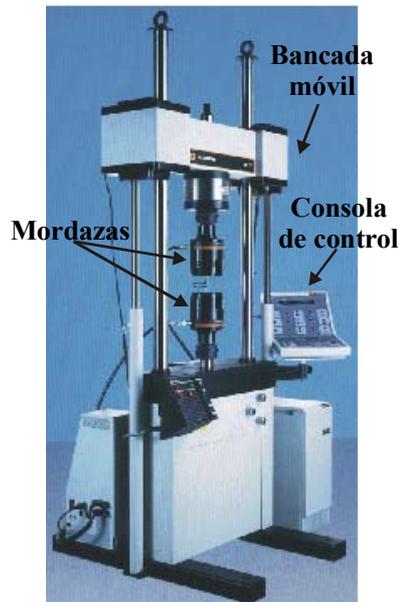


Fig. 3.2 Máquina universal de ensayos y partes principales de la misma.

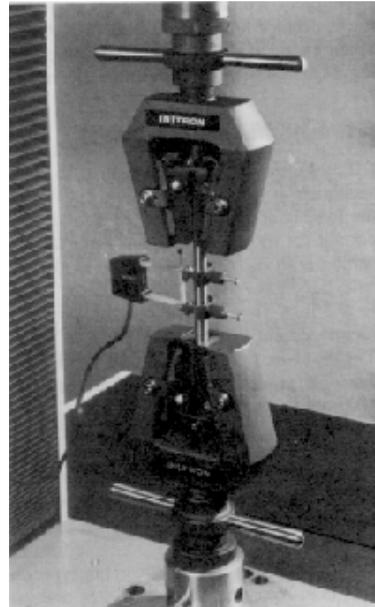


Fig. 3.3 Mordazas de mandíbula de uso común con probetas metálicas.

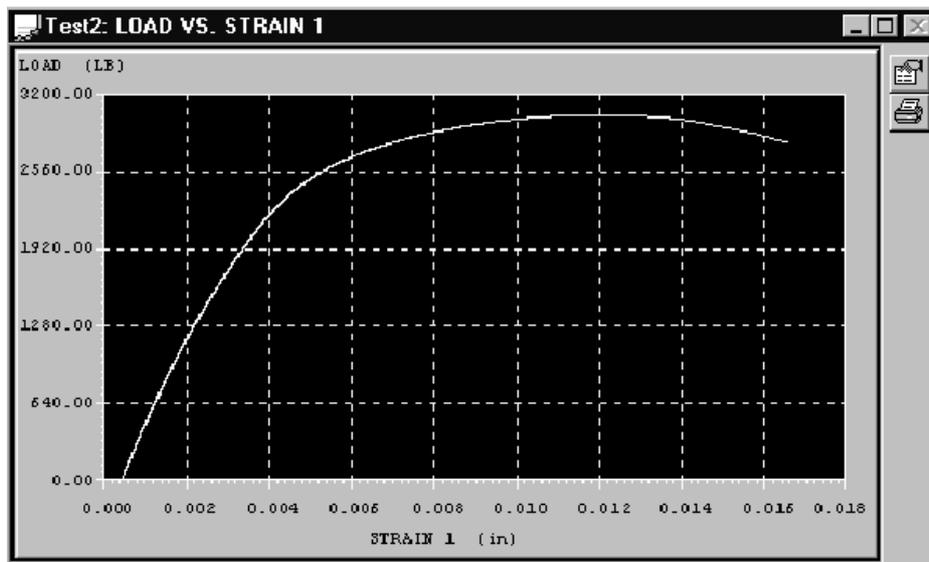


Fig. 3.4 Registro de la máquina correspondiente a un ensayo de tracción de una probeta metálica.

Los parámetros que suelen obtenerse a partir del análisis de una curva  $\sigma/\epsilon$  son los siguientes:

- $E$ , *módulo elástico* o *módulo de Young*, que corresponde al valor de la pendiente del tramo recto inicial. Como se indica en la expresión (3.4), en este tramo la tensión es proporcional a la deformación, lo cual indica que el material cumple con la ley de Hooke, manteniéndose en un régimen elástico. Las unidades de  $E$  son las mismas que las de una tensión y este parámetro representa la rigidez de un material, de ahí que también se conozca como *módulo de rigidez*.

- $\sigma_y$ , *tensión de fluencia* o *límite elástico*, que corresponde al valor de tensión a partir del cual el material deja de comportarse elásticamente. Si el material es frágil, este valor equivale a la tensión de ruptura, mientras que en materiales dúctiles el parámetro  $\sigma_y$  indica el inicio de la deformación plástica o permanente (Fig. 3.5), de manera que un material sometido a cualquier tensión inferior a  $\sigma_y$  se mantendrá en régimen elástico. Cuando se supera este valor de tensión, la proporción entre  $\sigma$  y  $\epsilon$  ya no es lineal, aunque la curva inicialmente sigue siendo creciente. En el tramo de la curva no lineal y creciente, la deformación es plástica y homogénea, es decir, el material se deforma por igual a lo largo de toda la zona calibrada (Fig. 3.6).

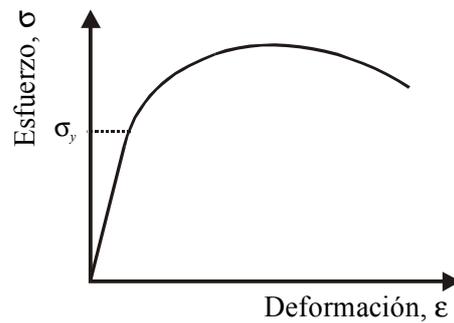


Fig. 3.5 Curva de tracción de un material dúctil.

- $\sigma_m$ , *resistencia a tracción*, que indica el valor máximo de tensión que soporta un material dúctil en régimen de deformación plástica homogénea (Fig. 3.5). Por encima de  $\sigma_m$ , la deformación plástica se intensifica en un punto de la zona calibrada, que se angosta hasta que el material se colapsa plásticamente y se rompe (Fig. 3.6). Esta deformación plástica localizada se denomina *estricción* y puede aparecer en cualquier punto de la zona calibrada. El parámetro  $\sigma_m$  representa la resistencia máxima de un material ensayado a tracción.

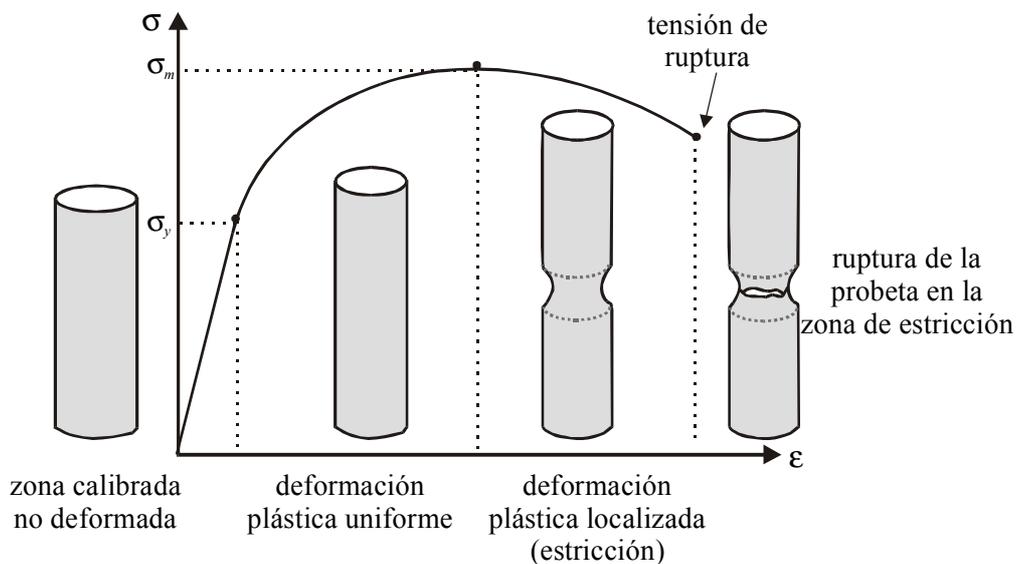


Fig. 3.6 Grados de deformación plástica en una probeta metálica durante un ensayo de tracción.

Un material frágil se rompería antes de iniciar el tramo de deformación plástica, de manera que toda la deformación que se hubiera podido desarrollar hubiera sido elástica y las dos mitades de la probeta, una vez fracturada, encajarían a la perfección (Fig. 3.7).

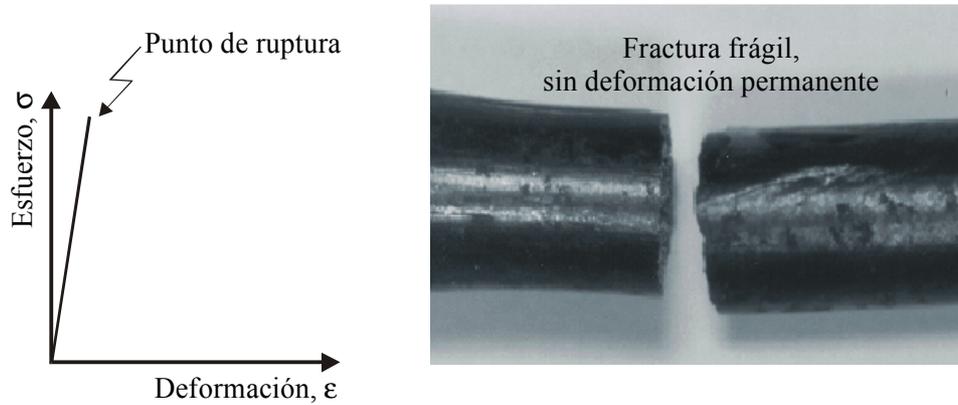


Fig. 3.7 Curva de tracción de un material frágil y aspecto de la zona de fractura de una probeta de este material.

En la región de deformación plástica homogénea, la interrupción del ensayo permitiría al material recuperar únicamente su deformación elástica. En un gráfico  $\sigma/\epsilon$ , esta recuperación se representaría como una línea recta, paralela a la del tramo elástico, cuyo inicio se hallaría en el punto de la curva en que se detuviera el ensayo y finalizaría sobre el eje de abscisas (Fig. 3.8).

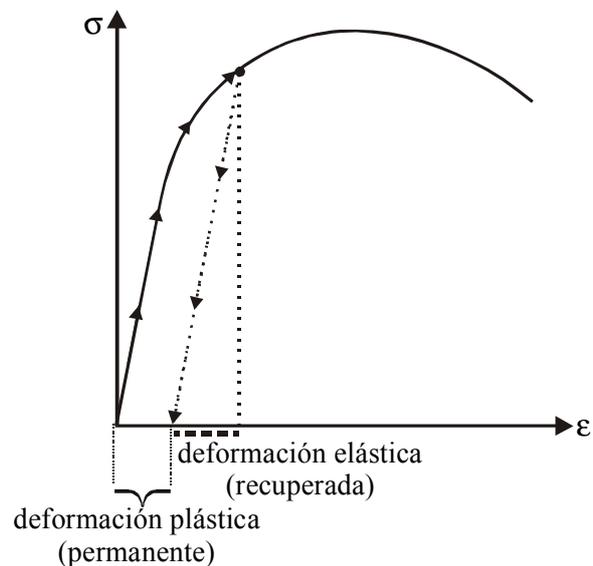


Fig. 3.8 Recuperación de la deformación elástica durante la realización de un ensayo de tracción.

En ocasiones, la transición entre la zona elástica y la plástica no se produce en un punto exacto y existe una franja de valores de tensión en dicha transición que complica la determinación precisa de  $\sigma_y$ . En estos casos, el límite de elasticidad se define como el valor de tensión para la cual la

deformación plástica alcanzada es igual a 0,2% (0,002). Para determinar este parámetro, definido como *límite elástico convencional* ( $\sigma_{0,2}$ ), se parte del valor de las abscisas,  $\epsilon = 0,002$ , y se traza una recta paralela al tramo elástico. La intersección de dicha recta con la curva de tracción corresponderá al valor de este parámetro, que siempre se determina gráficamente y que se halla ligeramente por encima del valor asociado al límite de fluencia (Fig. 3.9).

Si bien los parámetros  $E$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{0,2}$  y  $\sigma_m$  son magnitudes con unidades de tensión, también hay parámetros que se pueden determinar a partir de un ensayo de tracción y que están relacionados con la deformación. Así, se puede determinar la ductilidad de un material a partir de la deformación plástica máxima ( $\epsilon_{pl(max)}$ ). Para ello, a partir del punto de ruptura se traza una recta, paralela al tramo correspondiente al régimen elástico, y el valor de deformación que quede así registrado en el eje de abscisas corresponderá a la máxima deformación plástica que podrá desarrollar el material (Fig. 3.10).

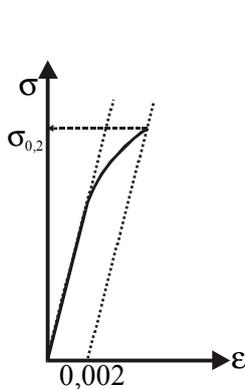


Fig. 3.9 Determinación del límite elástico convencional en un ensayo de tracción.

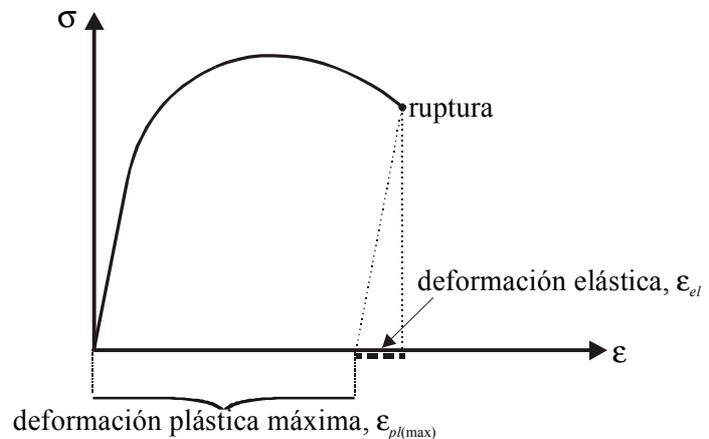


Fig. 3.10 Determinación de la deformación plástica máxima en un ensayo de tracción.

El parámetro que determina la ductilidad de un material se conoce como *alargamiento porcentual* ( $A\%$ ) y se determina, analíticamente, según

$$A\% = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 = \epsilon_{pl(max)} \times 100 \quad (3.6)$$

donde  $l_f$  es la longitud de la zona calibrada una vez finalizado el ensayo.

Otro parámetro asociado a la ductilidad es la *estricción* ( $Z\%$ ), que se define como la capacidad de un material de deformarse, durante un ensayo de tracción, perpendicularmente a la dirección de aplicación de tensión. La estricción se determina a partir de la expresión siguiente

$$Z\% = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \times 100 \quad (3.7)$$

donde  $S_0$  es la sección inicial de la probeta en su zona calibrada y  $S_f$  es la sección medida en la superficie de fractura de la probeta. Si bien este parámetro se puede obtener a partir de un ensayo de tracción, no se determina directamente con la curva, sino que es preciso tomar medidas de la probeta ya fracturada. Cabe decir que, en un material dúctil, la fractura se produce en la zona en que la

deformación no ha sido uniforme, de manera que la relación entre  $S_0-l_0$  y  $S_f-l_f$  no se puede determinar a partir del volumen inicial de la probeta. En la figura 3.11 se muestra la superficie de fractura de una probeta que ha desarrollado estricción, de manera que la sección en la zona de fractura es mucho menor que la sección en la zona de deformación plástica homogénea y ésta, a su vez, es menor que la sección inicial de la probeta.

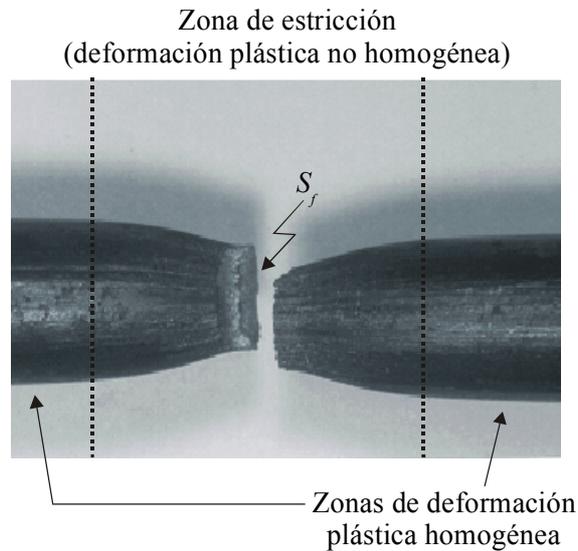


Fig. 3.11 Zona de fractura de una probeta de material dúctil, en la que se aprecia la región de estricción.

Al observar el área total registrada debajo de la curva  $\sigma/\epsilon$ , se obtiene una información adicional. Esta superficie representa la capacidad de un material para acumular energía mecánica durante un ensayo o bien durante la acción de un esfuerzo aplicado, oponiéndose a la deformación o, en su caso, a la fractura. Como propiedad mecánica, este valor se denomina *tenacidad*. Así, en la figura 3.12 se representan las curvas de tracción de un acero de alta resistencia (A, acero para muelles de alto carbono), pero de ductilidad moderada, y de un acero estructural (B) menos resistente, pero más dúctil.

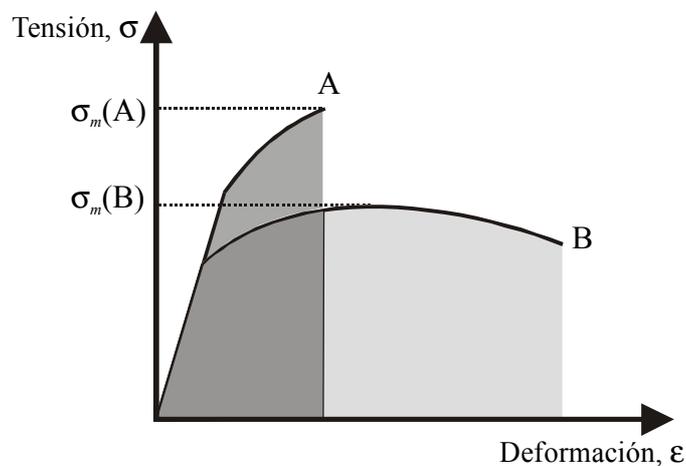


Fig. 3.12 Diagramas de tracción para dos aceros distintos. La región sombreada en ambas curvas corresponde a la energía absorbida por cada material durante la realización del ensayo.

En la figura 3.12, la curva del acero A es más alta y estrecha que la del acero B de manera que  $\sigma_{0.2}(A) > \sigma_{0.2}(B)$  y  $\sigma_m(A) > \sigma_m(B)$ . Sin embargo, al observar las áreas localizadas bajo cada una de las curvas (regiones sombreadas), se observa que en el caso del acero A esta superficie es menor que la equivalente en el acero B, lo que indica que la cantidad de energía absorbida por el acero A durante el ensayo es mucho menor que la del acero B. Así, aunque el acero A sea más resistente, es menos tenaz.

En el gráfico de la figura 3.13 se representan curvas de tracción ( $\sigma/\epsilon$ ) para varias aleaciones metálicas de aplicación industrial. Puede apreciarse que los valores mayores de límite elástico ( $\sigma_y$ ,  $\sigma_{0.2}$ ) y de resistencia ( $\sigma_m$ ) corresponden a las aleaciones férricas, especialmente a las de alta aleación (inoxidables, aceros al níquel...). Las aleaciones de titanio y de aluminio presentan valores de resistencia ( $\sigma_m$ ) notablemente inferiores, sin embargo, se utilizan cada vez más para aplicaciones estructurales. Aunque parezca una contradicción, no lo es si se considera el peso específico de las distintas aleaciones.

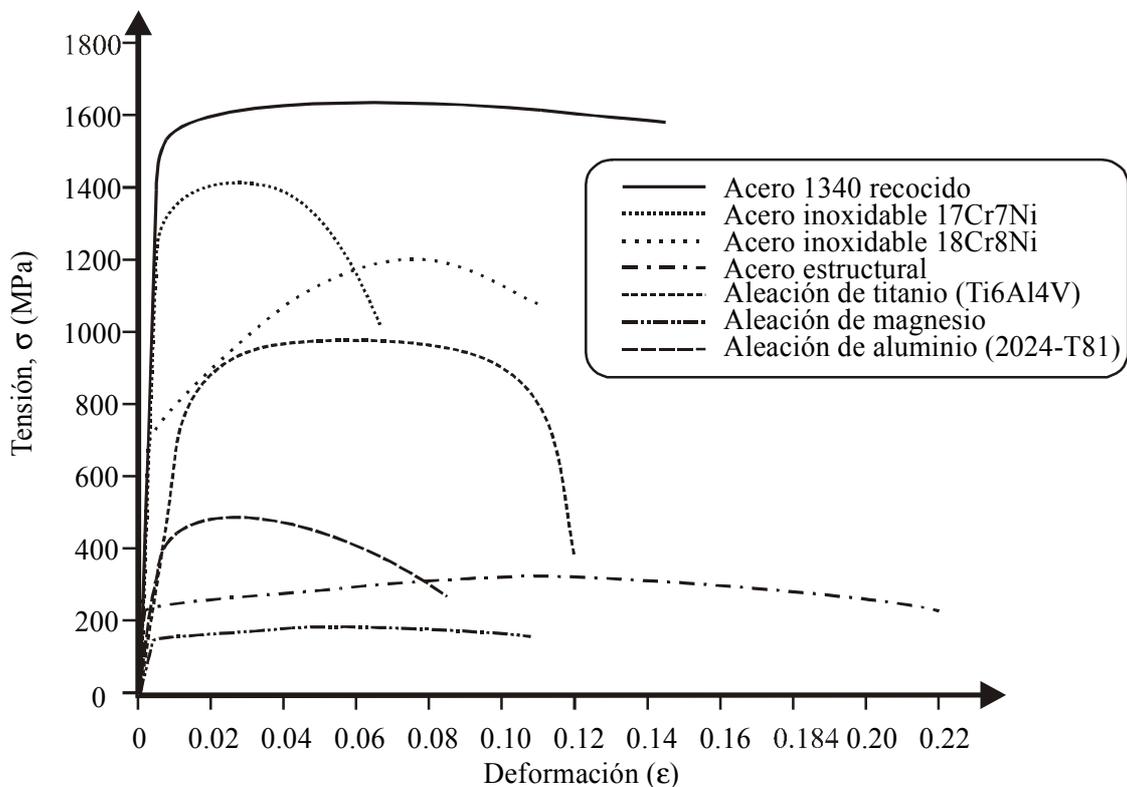


Fig. 3.13 Diagramas tensión/deformación para distintas aleaciones metálicas de aplicación industrial.

El cociente entre la resistencia de un material y su densidad se define como *resistencia específica* y, dado que la densidad de las aleaciones férricas es muy superior a la de las aleaciones de aluminio, magnesio o titanio, ocurre que estos últimos materiales presentan resistencias específicas muy superiores a las de los aceros.

El motivo de la utilización de las propiedades específicas radica en que un material más ligero, aunque no sea tan resistente, puede resultar más adecuado que un material pesado y resistente, ya que se puede realizar un diseño con mayor superficie (con mayor volumen de material, pero con menor peso) para soportar una carga ( $F$ ) determinada. Sin embargo, al dividir la carga por la sección resistente, el valor de tensión se hallará por debajo del límite requerido.

Una densidad baja permite incrementar la cantidad de material requerida (secciones resistentes mayores), pero manteniendo el conjunto más ligero, de ahí que en las últimas décadas se haya iniciado la construcción de vehículos con estructura de aluminio, con mayor sección que las convencionales de acero y, aun así, con menor peso.

Una vez finalizado el ensayo de tracción, cabe considerar que el examen visual y microscópico de las superficies de las probetas después de la rotura sirve para completar la información que se haya obtenido del propio ensayo.

### 3.3 El ensayo de dureza

La dureza de un material es una medida de la oposición de éste a ser penetrado por un objeto, lo cual provocaría una deformación plástica permanente. Así, un material es tanto más duro cuanto menos se deje “marcar” por otros materiales, y viceversa.

Los ensayos de penetración se han utilizado para evaluar la dureza de los minerales, de manera que un material se enfrentaba a otro y el más duro marcaba al más blando. Mohs estableció la escala de dureza de los minerales con patrones, a los que proporcionó un valor entero de dureza del 1 al 10, pero no permitía discriminar metales, ya que prácticamente todos se hallaban entre 8 y 10 Mohs.

Así, en 1900 Brinell diseñó un método para medir la dureza de los metales, con intención de sustituir parcialmente los ensayos de tracción convencionales, completos, pero complejos y caros. Para ello, la dureza Brinell se mide como el cociente entre una fuerza aplicada ( $P$ ) mediante un penetrador esférico metálico y la medida de la huella permanente que queda en la superficie evaluada ( $S$ ). Esta operación permite obtener un valor de una magnitud, con unidades de tensión, que representa la oposición del material a ser deformado plásticamente por un penetrador y que es directamente proporcional al valor de resistencia proporcionado por un ensayo de tracción convencional.

El principal inconveniente del ensayo Brinell es la eventual deformación del penetrador al ensayar un material de dureza similar a la del material de la bola. Por ello, en 1922 se adapta una modificación propuesta por Vickers, en la cual el penetrador esférico se sustituye por una pirámide de base cuadrada de diamante (Fig. 3.14a), totalmente indeformable.

También en este caso el cociente entre la carga aplicada durante el ensayo ( $P$ ) y la superficie de la huella (obtenida a partir de la diagonal media de la huella,  $d$ ), presenta unidades de tensión y es proporcional a la resistencia a la tracción. En el esquema de la figura 3.14b se representa la región de material que queda afectada durante la realización del ensayo de dureza.

Tanto el método de Brinell como la modificación de Vickers implican la necesidad de una lectura precisa de las dimensiones de la huella, por lo que son ensayos lentos y no demasiado adecuados para el análisis sistemático de grandes producciones. Así, se establecen las escalas Rockwell como medidas de dureza basadas en la penetración vertical y no en la superficie de la huella. Se establecen, básicamente, dos escalas de dureza Rockwell: la B, con penetrador esférico de acero para aleaciones de dureza moderada; y la C, con penetrador cónico de diamante y para materiales de mayor dureza. En la figura 3.15 se muestra un durómetro Rockwell convencional.

Para la realización de un ensayo de dureza Rockwell en cualquiera de sus escalas, se aplica una parte de la carga (10 kg) y se determina en ese punto el cero de recorrido del penetrador. Al aplicar la carga restante, el penetrador realiza un recorrido tanto más largo cuanto más blando sea el material (y viceversa), con lo cual es la profundidad de penetración la magnitud que se relaciona con la dureza del

material. En el esquema de la figura 3.16 se detallan los pasos de un ensayo de dureza Rockwell C, con penetrador cónico de diamante.

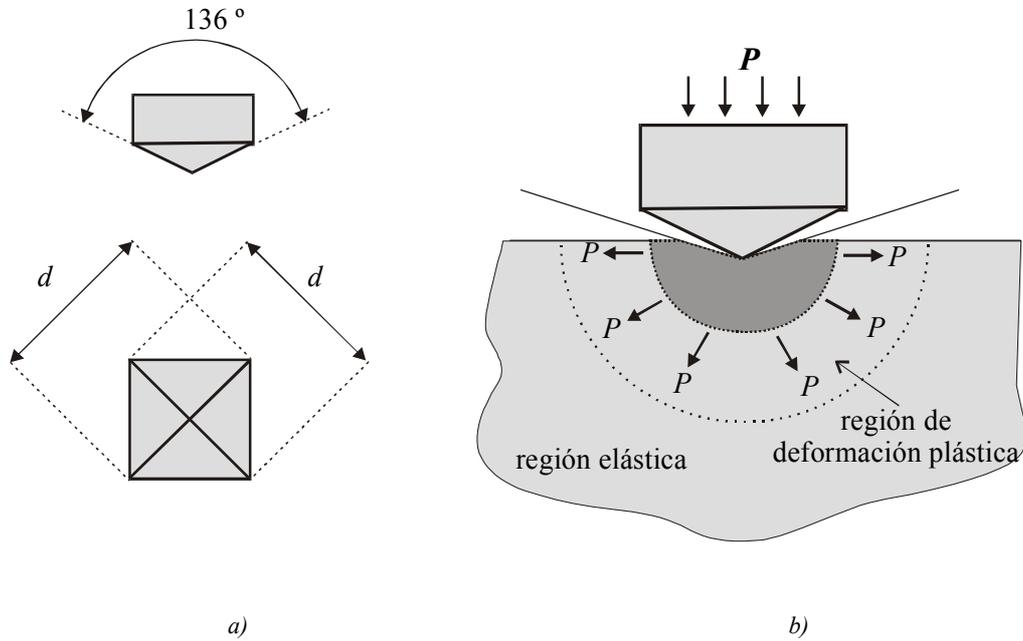


Fig. 3.14 a) Geometría de un indentador Vickers; b) región de material afectada plásticamente por la acción del penetrador Vickers durante un ensayo de dureza.

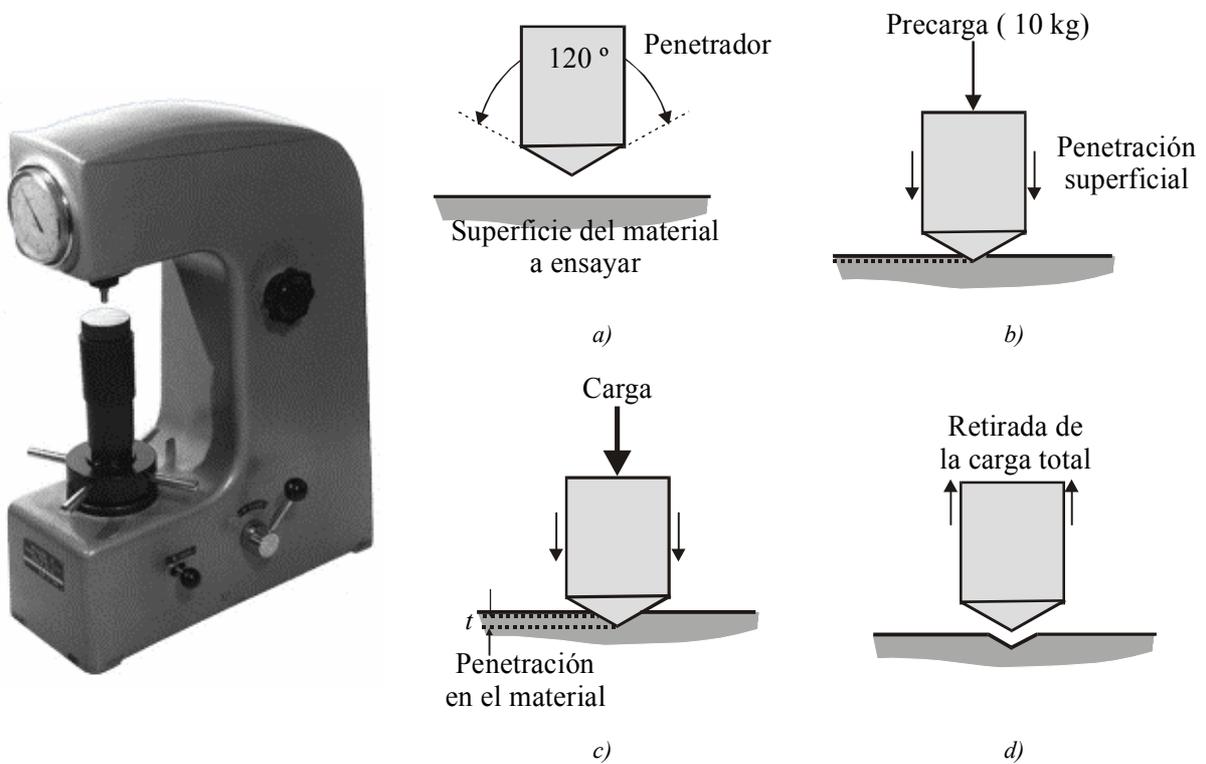
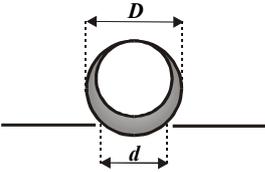
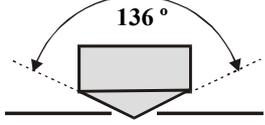
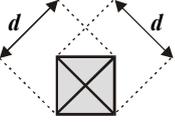
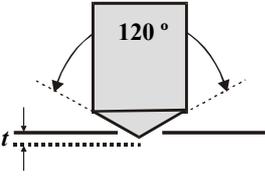


Fig. 3.15 Durómetro Rockwell.

Fig. 3.16 Etapas de un ensayo de dureza Rockwell C.

En la tabla 3.1 se recogen las características de las escalas de dureza descritas, que son las más utilizadas y se diferencian por el tipo de penetrador y por las cargas aplicadas. La elección de un tipo de escala u otro dependerá de la dureza del material a ensayar y de la precisión requerida en la medida.

Tabla 3.1 Tipos de escalas de dureza y características.

<i>Escala</i>	<i>Penetrador</i>	<i>Esquema</i>	<i>Aspecto de la huella</i>	<i>Relación para calcular la dureza</i>
<b>Brinell</b>	Bola de acero ( $D = 10 \text{ mm}$ )			$HB = \frac{P}{(\pi D/2)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
<b>Vickers</b>	Pirámide de diamante			$HV = 1.72 \left( \frac{P}{d^2} \right)$
<b>Rockwell B</b>	Bola de acero ( $D = 1/16''$ )			$HR_B = 130 - 500 t$
<b>Rockwell C</b>	Cono de diamante			$HR_C = 100 - 500 t$

HB = valor de dureza en escala Brinell

HV = valor de dureza en escala Vickers

$HR_B$  = valor de dureza en escala Rockwell B

$HR_C$  = valor de dureza en escala Rockwell C

$P$  = Carga aplicada (kg)

$D$  = diámetro del penetrador (de bola)

$d$  = diámetro de una huella esférica o diagonal de una huella piramidal

$t$  = profundidad de la penetración

Los valores de dureza obtenidos tras la realización de cualquiera de los ensayos proporcionan una orientación acerca de las propiedades mecánicas convencionales de un material, ya que los parámetros de dureza y algunos de los proporcionados por ensayos convencionales de tracción (como el límite elástico, la resistencia a tracción y la ductilidad) están relacionados.

Así, se puede considerar de un modo general que los materiales de dureza elevada presentan escasa ductilidad y, a su vez, gran resistencia a la tracción, y viceversa.

### 3.4 El ensayo de impacto

Este ensayo mecánico proporciona información acerca de la *tenacidad a impacto* de un material, es decir, de su capacidad para soportar una tensión determinada en un intervalo de tiempo muy breve. La magnitud evaluada en este tipo de ensayo es la energía que es capaz de absorber un material antes de romperse bajo la acción de una inyección de tensión, y se denomina *resiliencia*.

Para realizar un ensayo de impacto se utilizan probetas cuyas geometrías y dimensiones vienen determinadas por las normas industriales, aunque las más utilizadas son las Charpy, con una longitud de 55 mm y una sección cuadrada máxima de 10 x 10 mm (Fig. 3.17).

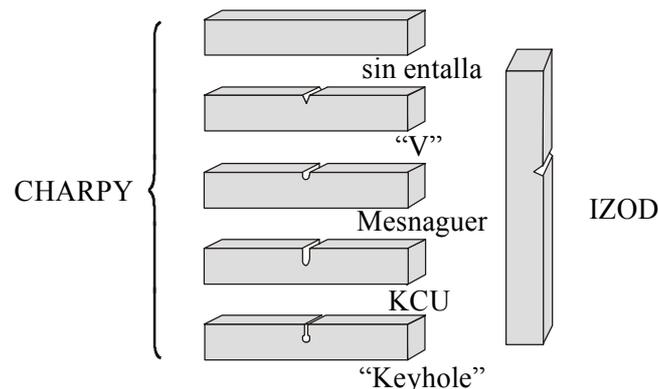


Fig. 3.17 Geometría y dimensiones de distintas probetas convencionales que se utilizan en los ensayos de impacto.

La probeta seleccionada se sujeta en la parte inferior del dispositivo (Fig. 3.18a), que dispone de un péndulo de masa  $M$ , el cual se deja caer libremente desde una altura  $h$  e impacta sobre la probeta. Antes de que se inicie el movimiento del péndulo, éste posee una energía potencial inicial cuyo valor será igual a  $E_{p_i} = Mgh$ .

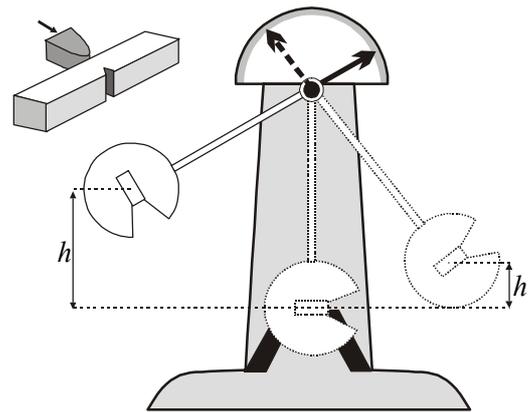
En el punto más bajo de su recorrido ( $h = 0$ ), el péndulo impactará sobre la probeta, continuando su recorrido hasta una altura final máxima  $h'$  ( $h' < h$ ), momento en que su energía potencial final será igual a  $E_{p_f} = Mgh'$  (Fig. 3.18b). La masa del péndulo de impacto Charpy ( $M$ ) suele ser de 30 kg.

La diferencia de energía potencial que posee el péndulo antes y después del impacto corresponderá a la energía que habrá sido capaz de absorber el material antes de romperse. Este valor de energía dividido por la sección de la zona de impacto se denomina resiliencia ( $\rho$ ), y es una medida de la tenacidad a impacto de un material.

$$\text{Resiliencia} = \frac{E_{\text{abs}}}{S} = \frac{Ep_i - Ep_f}{S} = \frac{Mgh - Mgh'}{S} = \frac{Mg(h - h')}{S} = \rho \quad (3.8)$$



a)



b)

Fig. 3.18 a) Péndulo de impacto Charpy;  
b) esquema de las etapas del ensayo de impacto con una probeta Charpy V.

Los valores de resiliencia obtenidos tras la realización de ensayos de impacto, no tienen una aplicación tan directa en el cálculo como los proporcionados por los ensayos de tracción, pero son una referencia muy útil para prever el comportamiento de un material frente a la acción de una carga súbita. Es importante destacar que en estos ensayos, como en cualquier otro, es necesario señalar el proceso que se ha seguido en la extracción de la probeta, pues los resultados dependerán en gran medida de sus características microestructurales (estructura metalográfica, forma y tamaño de los granos, orientación de los cristales, etc.).

El ensayo de impacto es, de todos los definidos hasta este punto, el más adecuado para poner de manifiesto el efecto de la temperatura en un material metálico, especialmente cuando la temperatura es baja. Así, un ensayo convencional se ha de realizar a una temperatura constante de  $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  y se observa que, al disminuir la temperatura, el valor de la energía absorbida desciende en forma más o menos notable, en función de la sensibilidad del material.

Se define la *temperatura de transición* ( $T_{tr}$ ) de un material como aquella en que se aprecia una variación muy brusca en los valores de energía absorbida durante un ensayo de impacto (Fig. 3.19), de manera que, para  $T < T_{tr}$ , el material presenta un comportamiento *frágil*, absorbiendo muy poca energía antes de romperse, mientras que, para  $T > T_{tr}$ , el material es capaz de absorber gran cantidad de energía, es decir, tiene un comportamiento *tenaz*.

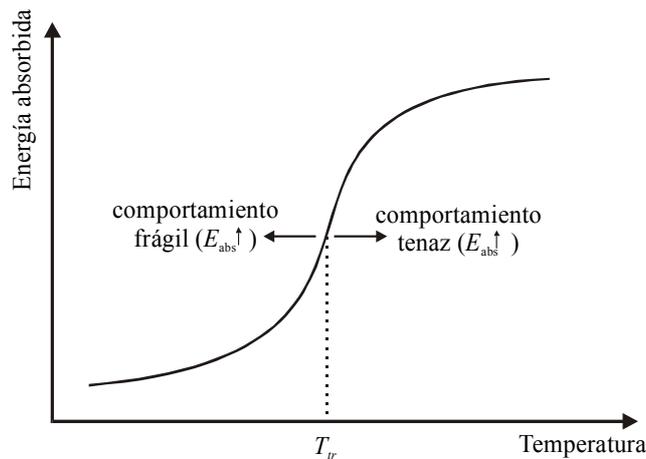


Fig. 3.19 Representación de la resiliencia en función de la temperatura. El valor de temperatura de transición ( $T_{tr}$ ) indica el punto de transición dúctil-tenaz.

### 3.5 Efecto de la temperatura en la respuesta mecánica de los materiales

Los resultados proporcionados por los ensayos mecánicos son indicadores de la respuesta mecánica de los materiales y permiten prever la respuesta de dicho material en servicio. Si bien los ensayos convencionales se realizan en condiciones ambientales, la temperatura afecta notablemente a todas las propiedades mecánicas.

En general, todos los materiales presentan una menor resistencia a la deformación a temperaturas elevadas, mientras que las temperaturas bajas favorecen una respuesta más frágil. Si el material se somete a deformación plástica (tracción-compresión-flexión) a temperaturas elevadas, se requerirán valores de tensión muy inferiores a los que se precisarían para alcanzar un mismo grado de deformación a temperatura ambiente o baja. Este es el motivo por el cual la gran mayoría de procesos de conformado de metales que implican deformación plástica se realizan en caliente.

Si el material se ensaya a impacto, el efecto de la temperatura también se puede apreciar en los valores de energía absorbida, como se ha indicado en el apartado anterior, y también en el aspecto de la superficie de fractura. En el esquema de la figura 3.20, se presentan las micrografías correspondientes a las fracturas presentadas por un mismo material sometido a ensayos de impacto a temperaturas distintas, que permiten apreciar las notables diferencias entre una superficie dúctil, correspondiente a un ensayo realizado a temperaturas por encima de la de transición, y una superficie de fractura frágil obtenida en el mismo material, pero a temperatura de ensayo inferior a  $T_{tr}$ .

Las etapas de conformado de metales y de aleaciones metálicas requieren de procesos en caliente, a fin de ablandar el material e incrementar su ductilidad. Un metal deformado plásticamente incrementa su energía interna, ya que los cristales cambian su morfología bajo la acción de un esfuerzo aplicado (generalmente se alargan en la dirección de aplicación de dicho esfuerzo), y acumulan gran cantidad de tensión. Si la deformación plástica se produce en caliente, la acumulación de energía es mucho menor que la observada para procesos realizados en frío y en este último caso se dice que el material tiene *acritud*.

La temperatura por debajo de la cual un material desarrolla acritud es la *temperatura de recristalización*,  $T_R$ , que es característica para cada material y corresponde al 40% de la temperatura de fusión (en grados Kelvin). Por encima de  $T_R$ , no se observa acritud y se considera que cualquier proceso se ha realizado *en caliente*.

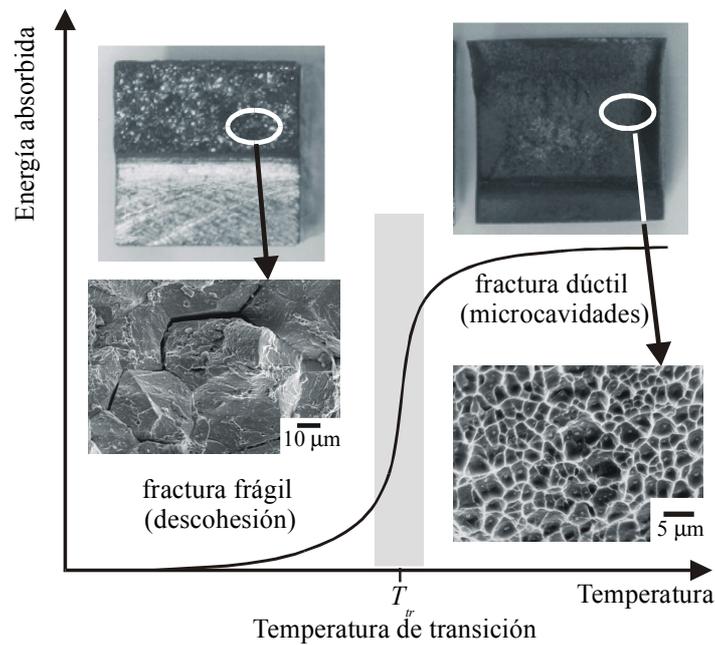


Fig. 3.20 Superficies de fractura dúctil y frágil de un mismo material ensayado a impacto para distintas temperaturas.

Para temperaturas ligeramente inferiores a la de recristalización, los materiales metálicos policristalinos sufren una *recuperación*, en la cual se reducen las tensiones que puedan haberse acumulado en el material durante deformaciones previas en frío. Para temperaturas superiores a  $T_R$ , el material *recristaliza*, de manera que se generan nuevos cristales en los bordes de grano de los cristales deformados y, a partir de ahí, se puede observar un crecimiento granular (Fig. 3.21). Estas modificaciones microestructurales afectan notablemente a la respuesta mecánica del material, como también se indica en el esquema de la figura 3.21.

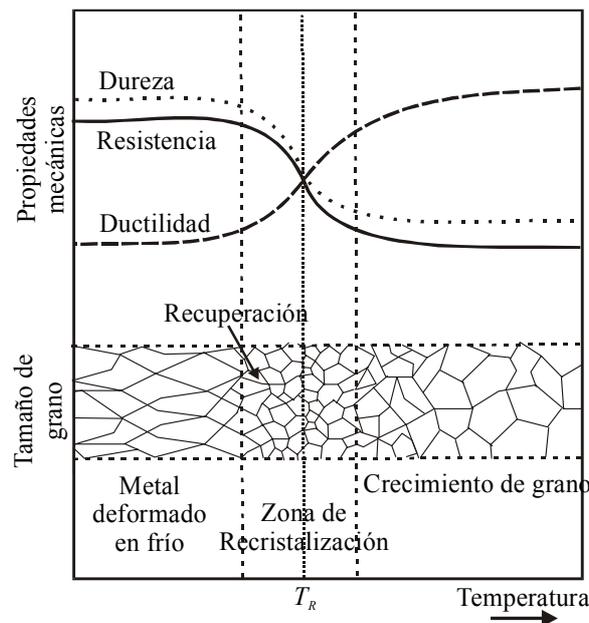


Fig. 3.21 Efecto de la temperatura en la microestructura (tamaño y morfología de los cristales) y en las principales propiedades mecánicas (resistencia, dureza y ductilidad) de una aleación metálica deformada en frío.

Así pues, la dureza de una estructura recristalizada es notablemente inferior a la que presentaría el material antes del calentamiento. Este descenso de dureza irá acompañado de una disminución de la resistencia y, de la misma forma, de un notable aumento en la ductilidad del material, ya que la recristalización favorece una mayor deformabilidad del material.

## **Módulo II**

Este módulo comprende el tema 4 del presente texto. El objetivo fundamental que se persigue es el de proporcionar un conocimiento básico de los principales materiales metálicos, férricos y no férricos, así como de los tratamientos térmicos que se les aplican más comúnmente.

La información se completa gracias a la descripción de algunos aspectos relacionados con los procesos más comunes de obtención de componentes, partiendo del estado líquido o sólido, así como de los procesos básicos de soldadura de metales.

Por último, cabe indicar que en este módulo se proporcionará una visión general de los principales procesos de transformación que se desarrollan en la industria para convertir un material en un componente.



## 4 Materiales metálicos

Los metales se encuentran en la naturaleza en forma de óxidos, sulfuros, cloruros y carbonatos. La mayor parte de los metales utilizados por el hombre lo son en forma de aleaciones, que son mezclas de un metal con otros elementos, metálicos o no metálicos. La composición de una aleación y la disposición de sus átomos en la red cristalina determinarán sus propiedades físico-químicas y sus propiedades mecánicas.

### 4.1 Solidificación de metales y aleaciones

Durante la solidificación de los metales (tanto puros como aleaciones) se produce la distribución atómica que conducirá a la microestructura final, la cual puede variar si se modifica la composición química o la velocidad de solidificación.

#### 4.1.1 Curvas de solidificación (temperatura/tiempo)

En los metales puros, el paso del estado sólido al líquido, y viceversa, se produce a una temperatura constante. En el caso de las aleaciones, la transformación de líquido a sólido no se produce a una temperatura constante, sino que existe un cierto intervalo de solidificación entre dos temperaturas que indican el inicio y el final del tránsito entre el estado líquido y el sólido.

Las curvas de enfriamiento, temperatura/tiempo, de los elementos puros presentan una meseta para la temperatura de fusión/solidificación ( $T_f=T_s$ ). En este caso, cuando se inicia el proceso ( $t_1$ ), la temperatura del sistema es la misma que después del tiempo necesario para la solidificación completa ( $t_2$ ), aunque en algún caso a  $t_1$  se puede observar un descenso súbito de temperatura, correspondiente a un subenfriamiento (Fig. 4.1a). En el caso de las aleaciones, el proceso de solidificación no se produce a una temperatura constante, de manera que a una temperatura determinada,  $T_1$ , se inicia dicho proceso ( $t_1$ ), y cuando el sistema ha solidificado completamente ( $t_2$ ) se puede apreciar que su temperatura es inferior a la inicial,  $T_2$ . Así, en la curva de enfriamiento se aprecia un intervalo con una cierta pendiente ( $\Delta T/\Delta t$ ), que puede variar según la composición relativa de los elementos en la aleación (Fig. 4.1b).

#### 4.1.2 Velocidad de solidificación: Tamaño de grano

Durante la solidificación de metales y aleaciones, los átomos que forman el líquido se agrupan según la red cristalina que haya de tener en estado sólido. En una primera etapa se forman *gérmenes* o

*núcleos de cristalización.* A medida que avanza el proceso de solidificación, los núcleos crecen gracias a la adición de nuevos átomos que abandonan el líquido. Después de la formación de un primer núcleo cristalino, los átomos se empiezan a depositar sobre éste, entonces el cristal comienza a crecer en la misma dirección del flujo de calor, pero en sentido contrario, perpendicularmente a las líneas isotermas que se generarían en el cuerpo (Fig. 4.2). Cuando todos los átomos se hallan formando parte del agregado policristalino, se considera que el sistema está totalmente solidificado.

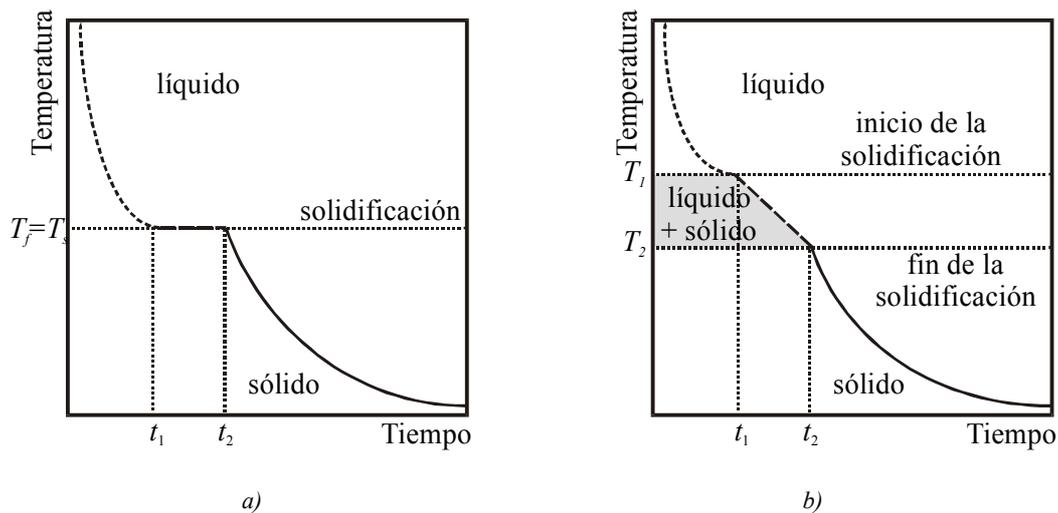


Fig. 4.1 Curvas de enfriamiento para el proceso de solidificación de los metales  
 a) metal puro, con una temperatura de fusión/solidificación constante ( $T_f = T_s$ );  
 b) aleación, con un intervalo de solidificación comprendido entre  $T_1$  y  $T_2$ .

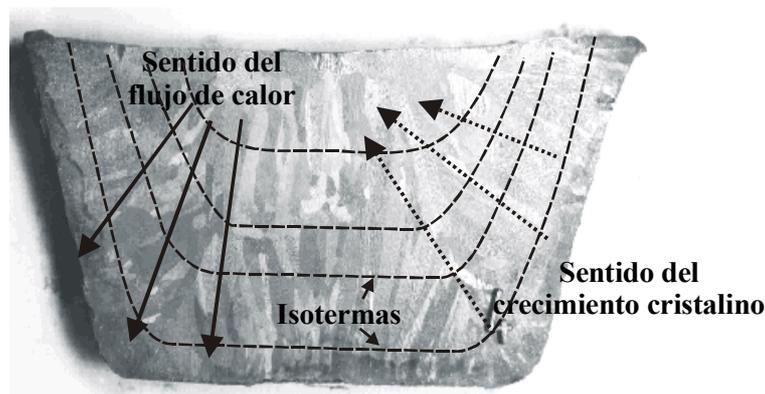


Fig. 4.2 Sección de un lingote de plomo en que se puede apreciar el crecimiento columnar de los cristales en el sentido opuesto al flujo de calor, perpendicularmente a las isotermas.

La velocidad de solidificación afectará notablemente a la distribución atómica, ya que la formación de gérmenes es directamente proporcional a la rapidez de enfriamiento del líquido, de manera que, cuanto mayor sea esta rapidez tanto mayor será el número de gérmenes y, consecuentemente, su crecimiento estará limitado, alcanzándose una estructura policristalina de *grano fino*. Por el contrario, si la velocidad de enfriamiento es más pausada, el número de gérmenes que progresa es mucho menor y el total del volumen de material se distribuye en una cantidad inferior de cristales, lo cual conduce a una microestructura final más *grosera*, de tamaño de grano mayor.

Esta variación en el tamaño de grano afectará notablemente a la respuesta mecánica, ya que, cuanto más fina sea la microestructura, más duro y resistente será el metal, y viceversa. La ley de Hall-Petch establece la variación del límite elástico ( $\sigma_y$ ) de un metal con el tamaño de grano ( $d$ ), según

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (4.1)$$

donde  $k$  es una constante, propia de cada metal, y el parámetro  $\sigma_0$  representa el valor del límite elástico correspondiente a la estructura monocristalina.

### 4.1.3 Diagramas de fases

Con este término se hace referencia a una representación gráfica que permite conocer la estructura que debería tener un material de composición establecida a una temperatura determinada. Una fase es una porción homogénea de un sistema, con características físicas y químicas uniformes, y puede hallarse en estado sólido, líquido o gaseoso.

Si un sistema presenta más de una fase, cada una de ellas tendrá sus propiedades y el límite entre ellas implicará una discontinuidad súbita entre las características físicas y/o químicas entre dos puntos. Si las fases de un sistema se hallan en *equilibrio*, el sistema presenta una energía libre mínima y, macroscópicamente, esto representa que sus características no varían con el tiempo, de manera que el sistema es *estable*. Cualquier variación de composición, presión y/o temperatura alterará este equilibrio y el sistema evolucionará espontáneamente hacia una nueva situación de mínima energía.

Un sistema puede estar formado por dos componentes (elementos o compuestos estequiométricos) y ser monofásico, denominándose en este caso *homogéneo*. Un sistema que no sea monofásico se define como mezcla o sistema *heterogéneo*, y de este tipo son la gran mayoría de materiales.

Los diagramas composición/temperatura son las representaciones más comunes y con ellos es posible predecir las transformaciones que puedan ocurrir en un sistema y cuál sería la microestructura final, pero no cuantifica el tiempo necesario. Los diagramas de fases, también llamados diagramas de equilibrio, se construyen a partir de los diagramas de enfriamiento (Fig. 4.3).

La mayoría de los metales puros se presentan en una sola fase sólida, pero algunos (tales como el hierro y el titanio) pueden existir en dos o tres formas cristalinas sólidas. Sin embargo, la mayoría de los metales de aplicación industrial no son metales puros, con lo cual es frecuente que se presenten varias fases. Así, por ejemplo, el latón es una aleación de cobre y de zinc y su observación al microscopio suele poner de manifiesto la existencia de fase alfa ( $\alpha$ , solución de zinc en cobre) y de fase beta ( $\beta$ , que es una solución de cobre en zinc).

La forma de los diagramas de equilibrio puede variar según la miscibilidad, es decir, según la solubilidad de una fase en la otra. Así, un diagrama con solubilidad total tendrá una representación temperatura/composición como la de la figura 4.4a y mostrará un dominio en el que exista un único sólido  $\alpha$ , formado por los dos constituyentes, y un dominio de coexistencia de ese sólido con el líquido.

Por el contrario, un diagrama con solubilidad parcial representará a aquellas aleaciones en las que una red de un constituyente A pueda aceptar una cantidad limitada de soluto B, y viceversa, pudiendo existir entonces dos fases sólidas  $\alpha$  y  $\beta$ , donde la primera será una fase rica en A con una cantidad variable de B, y la segunda rica en B con proporciones variables de A, pero dentro de un límite de solubilidad (Fig. 4.4b).

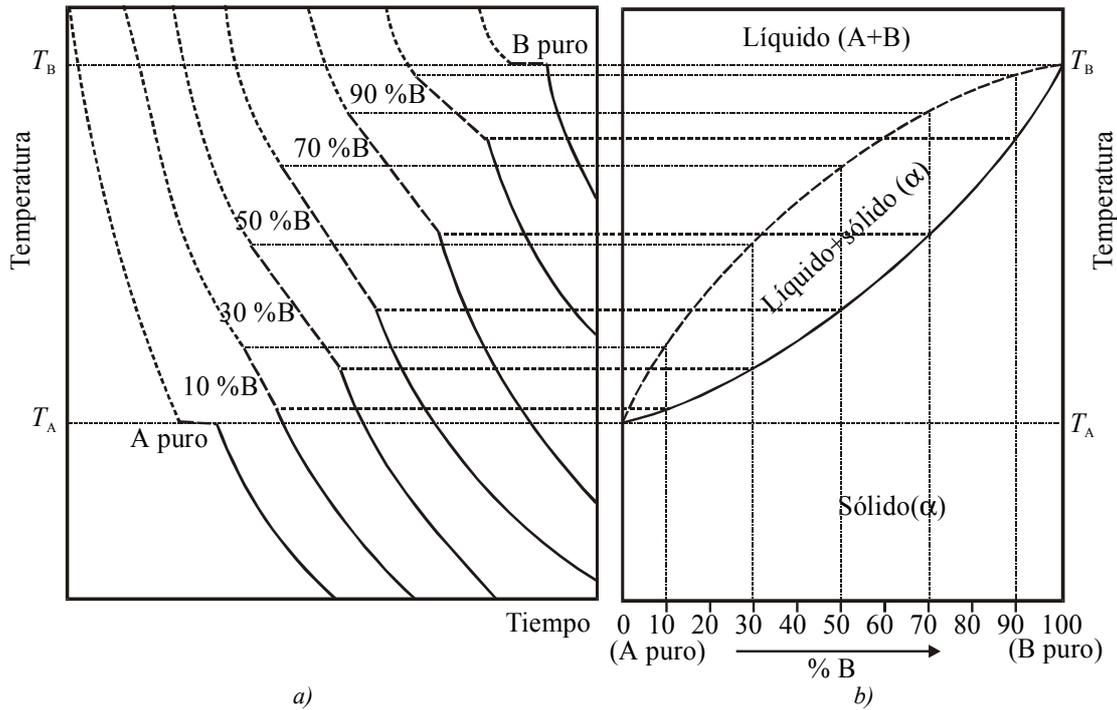


Fig. 4.3 a) Curvas de enfriamiento para distintas composiciones de un sistema A-B;  
b) construcción del diagrama de fases para el sistema A-B a partir de las curvas de enfriamiento.

En el diagrama de la figura 4.4b se observa la existencia de un punto  $e$  para el cual la solidificación del sistema se produce a una temperatura única  $e$  inferior a la de solidificación de los constituyentes. Esta situación corresponde a una reacción de *solidificación eutéctica*, durante la cual se produce una competencia entre la formación de dos sólidos ( $\alpha$  y  $\beta$ ). En este caso, el proceso de solidificación se produce de forma alternada, dando lugar a estructuras de capas ( $\alpha + \beta + \alpha + \beta \dots$ ) que confieren a los sólidos eutécticos unas propiedades mecánicas características.

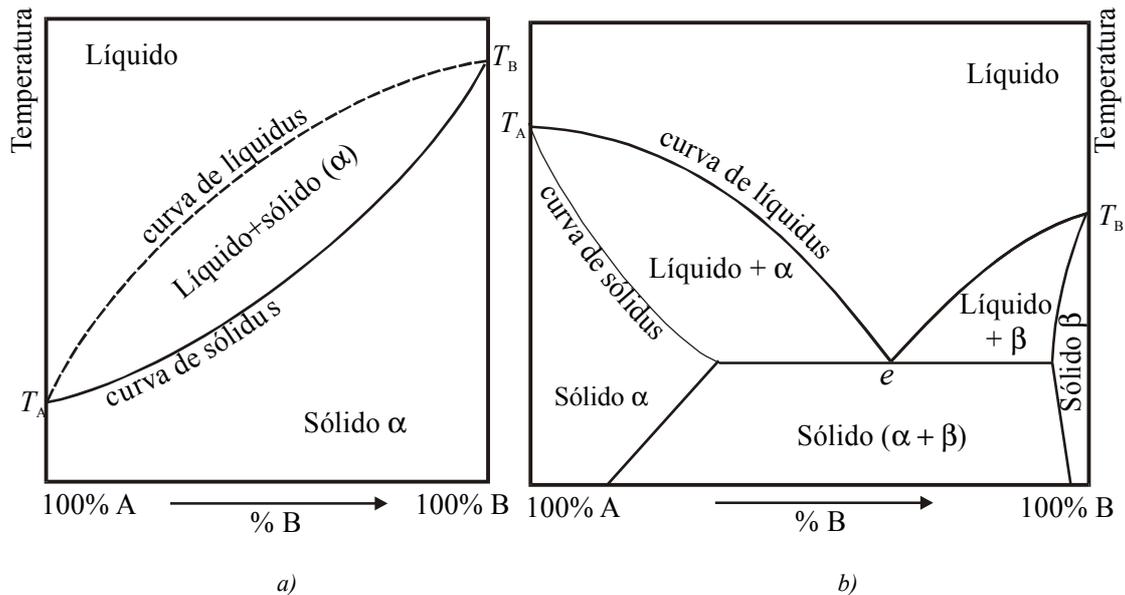


Fig. 4.4 Representación de diagramas de fases a) Para un sistema A-B con solubilidad total;  
b) para un sistema A-B con solubilidad parcial.

De todos los diagramas de equilibrio, el más extensamente utilizado es el *diagrama hierro-carbono* (Fig. 4.5), que permite prever la microestructura de un acero o de una fundición de hierro en función de su contenido en carbono y de su temperatura.

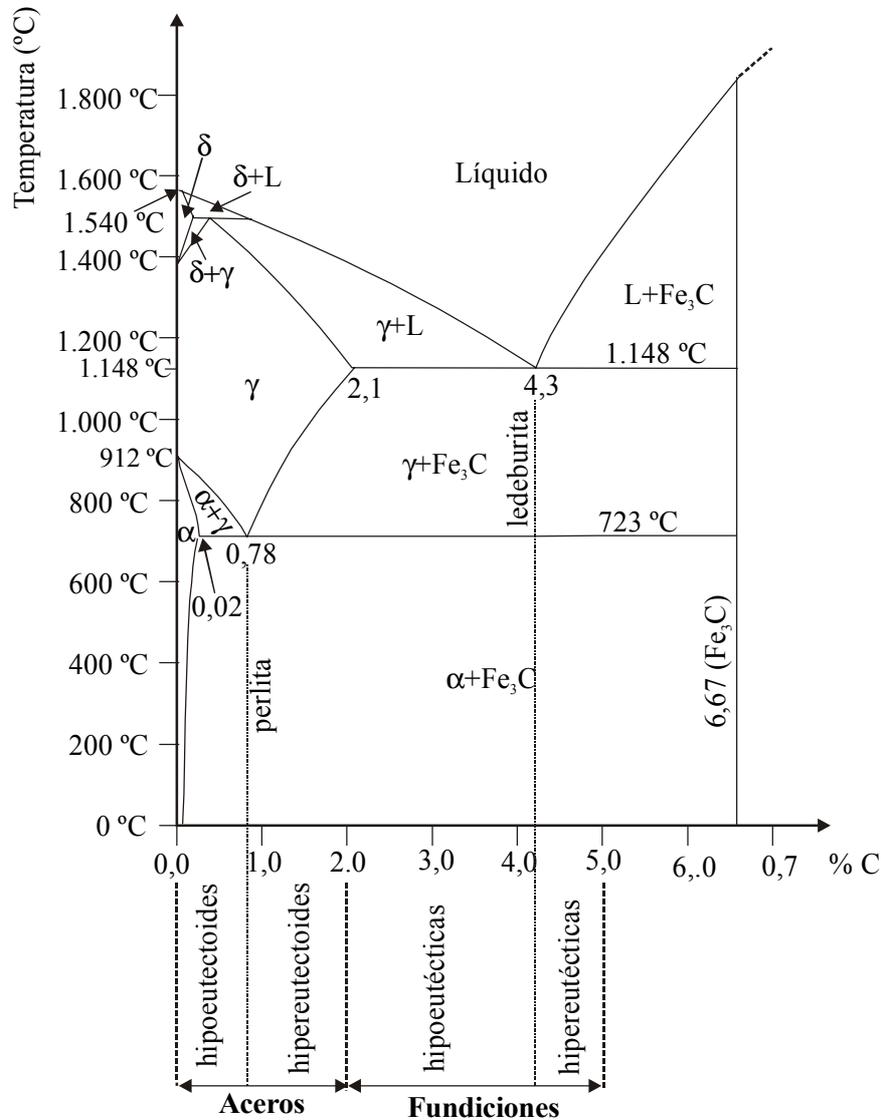


Fig. 4.5 Diagrama hierro-carbono (Fe-Fe<sub>3</sub>C).

El hierro puro puede presentarse en diferentes estados alotrópicos, es decir, con arreglos correspondientes a distintos tipos de redes cristalinas:

- El hierro alfa (α) posee una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC, *Body Centered Cubic*) y es magnético. A 723 °C, aproximadamente, puede disolver una pequeña cantidad de carbono, del orden de 0,02%, que corresponde a su máximo de solubilidad.
- El hierro gamma (γ) tiene una red cristalina cúbica centrada en las caras (FCC, *Face Centered Cubic*), no es magnético y puede disolver cantidades de carbono variables, hasta un máximo de 2,1% a 1.148 °C. Esta capacidad para disolver carbono se debe a que la red FCC

tiene mayor número de huecos entre los átomos de Fe, con lo cual puede alojar más átomos en posiciones intersticiales.

- El hierro delta ( $\delta$ ) corresponde al hierro que adopta nuevamente la estructura BCC por encima de 1.400 °C y la conserva hasta la fusión. No es magnético y su interés práctico es escaso debido a la alta temperatura a la que se forma.

En el diagrama hierro-carbono (Fig. 4.5) se indican las soluciones sólidas formadas por estos dos elementos y también un carburo de hierro de estequiometría bien definida, la *cementita* ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), que se caracteriza por su elevada dureza. Dado que los diagramas hierro-carbono no se extienden para contenidos en carbono superiores a la composición de la cementita (6,67% C), es común hacer referencia al diagrama Fe-C como *diagrama hierro-cementita*, Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ . En este diagrama se pueden distinguir dos grupos de aleaciones férricas: los *aceros*, que son aleaciones Fe-C con contenidos en C inferiores a 2,1%, y las *fundiciones*, que poseen mayores porcentajes de C (sin superar el 5%).

Una aleación férrica con un contenido en carbono del 0,78, a temperaturas elevadas presentará una estructura austenítica ( $\gamma$ , FCC) y a medida que su temperatura disminuya, por debajo de 723 °C, se verá forzado a cambiar su estructura gamma por otra que sea estable en esas condiciones de temperatura. La transformación alotrópica del hierro, si no tuviera C en solución, sería de Fe- $\gamma$  a Fe- $\alpha$ , pero el contenido en carbono induce una *reacción eutectoide* en la que el hierro gamma (FCC) se transforma en ferrita ( $\alpha$ ), cuya solubilidad en carbono es prácticamente nula, y en láminas de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), mucho más ricas en C. Esta transformación conduce a una estructura final laminar, muy característica, que se conoce con el nombre de *perlita* (Fig. 4.6).

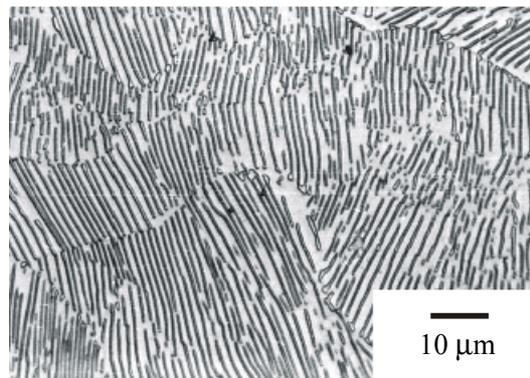


Fig. 4.6 Microestructura de un acero perlítico (% C = 0,8).

Los aceros con contenidos en carbono iguales a 0,78% se denominan *aceros eutectoides*, mientras que contenidos inferiores corresponden a *aceros hipoeutectoides* y los mayores contenidos en carbono dentro de los aceros (entre 0,78 y 2,1%) dan lugar a los *aceros hipereutectoides*. Los dominios de fases sólidas estables que se representan en el diagrama Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  corresponden a los constituyentes que pueden presentar los aceros:

- La *austenita* ( $\gamma$ ), que está formada por cristales de solución sólida de carbono en hierro gamma (FCC). Los cristales de austenita se forman durante el enfriamiento lento de aleaciones con proporciones de carbono de hasta 4.3%, a temperaturas comprendidas entre 723 y 1480 °C
- La *ferrita* ( $\alpha$ ), constituida por una solución sólida de carbono en hierro alfa. Se forma durante el enfriamiento lento de aleaciones con contenidos de carbono inferiores a 0,02%, por debajo de 912 °C.

- La *perlita* ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ), que corresponde a la microestructura eutectoide formada por capas alternadas de cementita y de ferrita, con un contenido conjunto de carbono del 0,78%. Los *aceros perlíticos* suelen presentar morfología laminar (Fig. 4.6), aunque también es posible hallar microestructuras con morfologías globulares de cementita.

Existe otro constituyente de los aceros, la *martensita* (Fig. 4.7), que no aparece en el diagrama de equilibrio de la figura 4.5, debido a que ésta no es una estructura de equilibrio, sino que corresponde a una situación particular de algunos aceros. La martensita se forma por enfriamiento *rápido* desde el dominio austenítico, situación en la que la red cúbica se ve obligada a retener un exceso de carbono. El resultado es una red tetragonal (cúbica centrada distorsionada) metaestable, con los átomos de C ocupando huecos intersticiales. Los aceros martensíticos presentan una dureza muy elevada, como resultado del elevado porcentaje de C retenido en la red.

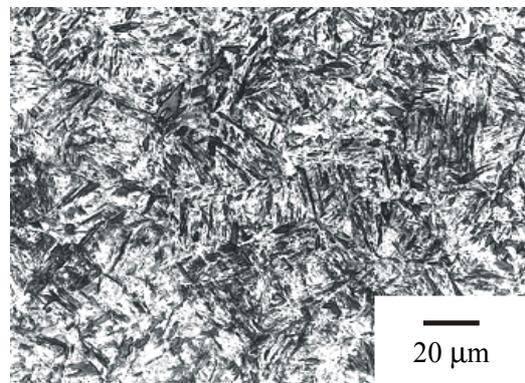


Fig. 4.7 Microestructura de un acero martensítico (% C = 0,5).

La composición química de los aceros determinará su microestructura resultante, que será una combinación de los constituyentes indicados en el diagrama de equilibrio, pudiendo hacer referencia a los aceros en función del constituyente que se halle presente (aceros austeníticos, ferríticos o perlíticos). Las composiciones intermedias, con proporciones de C inferiores al 0,78% (hipoeutectoides) o superiores (hipereutectoides), conducirán a microestructuras mixtas de ferrita-perlita (Fig. 4.8a) o de perlita-cementita, respectivamente (Fig. 4.8b).

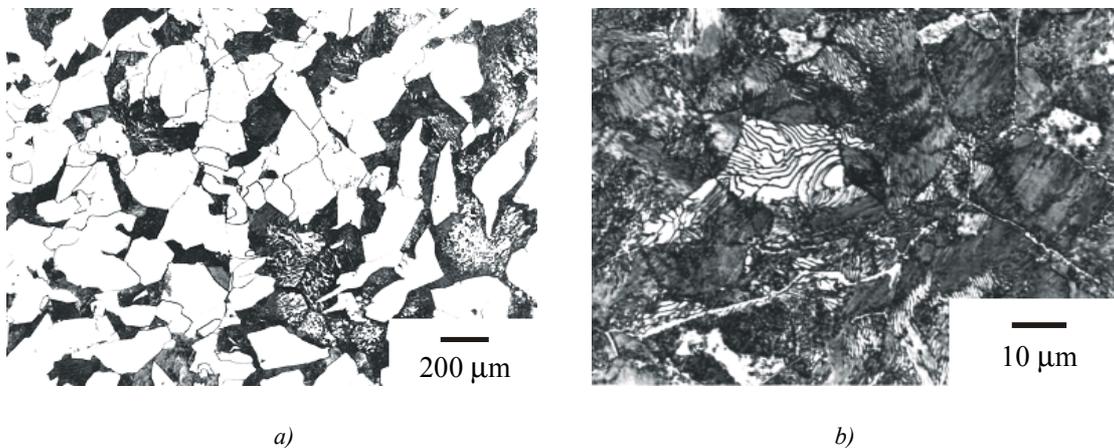


Fig. 4.8 Microestructuras a) hipoeutectoide (ferrita+perlita), 0,45% C; b) hipereutectoide (perlita+cementita), 1,17% C.

## 4.2 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos son operaciones de sucesivos calentamientos y enfriamientos a los que se someten los materiales, principalmente metálicos y mayoritariamente férricos, a fin de conseguir unas características mecánicas adecuadas a su uso o a los procesos de elaboración y manufactura que se hayan de realizar.

La gran mayoría de tratamientos térmicos provocan modificaciones microestructurales y el diseño de estas operaciones, es decir, de las condiciones de temperatura y tiempo requeridas, se realizará a fin de optimizar la combinación de propiedades que se hayan de derivar de la microestructura final.

Las etapas de un tratamiento térmico convencional se indican en el esquema de la figura 4.9 y son básicamente tres:

- Calentamiento del material, generalmente a una velocidad elevada, desde la temperatura inicial hasta la temperatura de proceso ( $T$ ).
- Mantenimiento del volumen de material a esta temperatura durante un período de tiempo determinado,  $t$ .
- Enfriamiento desde  $T$  hasta la temperatura final (que puede ser la del ambiente o la de un baño de enfriamiento) a velocidades diversas en función del tipo de tratamiento.

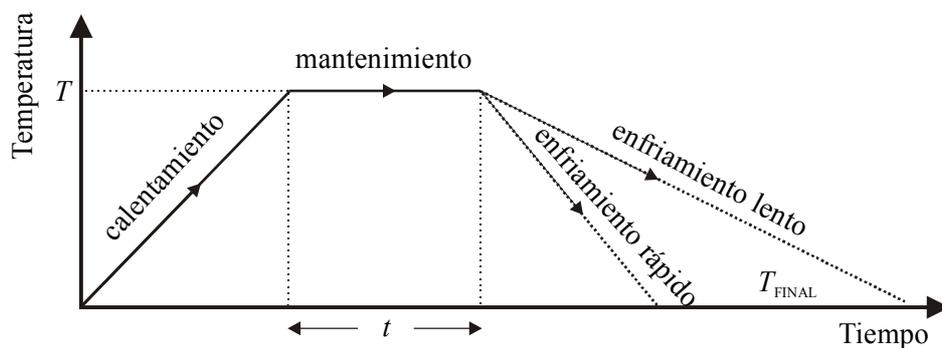


Fig. 4.9 Esquema de las etapas principales de un tratamiento térmico.

La etapa de calentamiento se realiza de manera que todo el volumen de material alcance la temperatura requerida, especialmente si, durante esta etapa, el material sufre alguna transformación alotrópica. Generalmente se realiza a velocidad elevada, introduciendo el material a tratar en un horno y dejando que se caliente mientras el horno alcanza la temperatura de proceso  $T$ , de manera que la posible diferencia de temperaturas entre la superficie y el núcleo sea mínima. Por ejemplo, para un calentamiento hasta  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  en un acero al carbono, debería considerarse una velocidad de calentamiento del orden de 1 minuto por mm de espesor, aunque generalmente se invierte menos tiempo por motivos económicos. Un calentamiento rápido es tanto más inadecuado cuanto mayor sea el espesor del componente.

El tiempo que permanece un material a la temperatura de tratamiento,  $t$ , influye notablemente en la microestructura final y, por tanto, en sus propiedades. Así, un período excesivamente largo favorece el crecimiento de grano, que no suele ser conveniente, ya que disminuye la resistencia a tracción. Si se

desea obtener una transformación alotrópica en los aceros, generalmente suelen ser suficientes 10 minutos por cada 4 mm de espesor.

La etapa de enfriamiento es la más crítica, ya que de ésta dependerá en gran manera la microestructura final y, por tanto, las propiedades del material. Los diagramas de fases de los sistemas metálicos son herramientas de gran utilidad para analizar la evolución microestructural, en equilibrio, de un material determinado.

Las estructuras de equilibrio se pueden alcanzar a velocidades de enfriamiento lentas o muy lentas, mientras que a velocidades medias o elevadas pueden obtenerse microestructuras *metaestables* o de no equilibrio. Así, el control de la velocidad de enfriamiento es el factor que distingue generalmente unos tratamientos de otros.

#### 4.2.1 Tratamientos térmicos de los aceros

Los tratamientos térmicos más comunes de los aceros se clasifican, principalmente, según la etapa de enfriamiento. Si ésta se realiza tan lentamente como para que la microestructura final sea la correspondiente al diagrama de equilibrio, el tratamiento se denomina *recocido*. El enfriamiento de los tratamientos de recocido se realiza generalmente dentro del horno, si bien existe un tipo determinado de recocido, denominado *normalizado*, en el cual el enfriamiento es lento, pero no tanto, ya que se realiza al aire. Por el contrario, un enfriamiento tan rápido que no permita el desarrollo de microestructuras de equilibrio da lugar a un tipo de tratamiento térmico distinto, denominado *temple*.

En ocasiones, tras un temple, se realiza un segundo tratamiento que consiste en un calentamiento suave (por debajo de 700 °C) con enfriamiento más o menos rápido y recibe el nombre de revenido. Un acero templado y revenido (tratamiento que recibe el nombre de *bonificación*) no es tan duro ni tan resistente como un acero sólo templado, pero es más tenaz. En la figura 4.10 se representan esquemáticamente los tratamientos más comunes de los aceros. Esta segunda parte del tratamiento elimina tensiones que se han acumulado en el material a causa del temple y suaviza la microestructura, ya que descompone parcialmente la martensita y así se reduce la distorsión de la red sobresaturada de carbono. La microestructura resultante de un tratamiento de revenido es la *martensita revenida*.

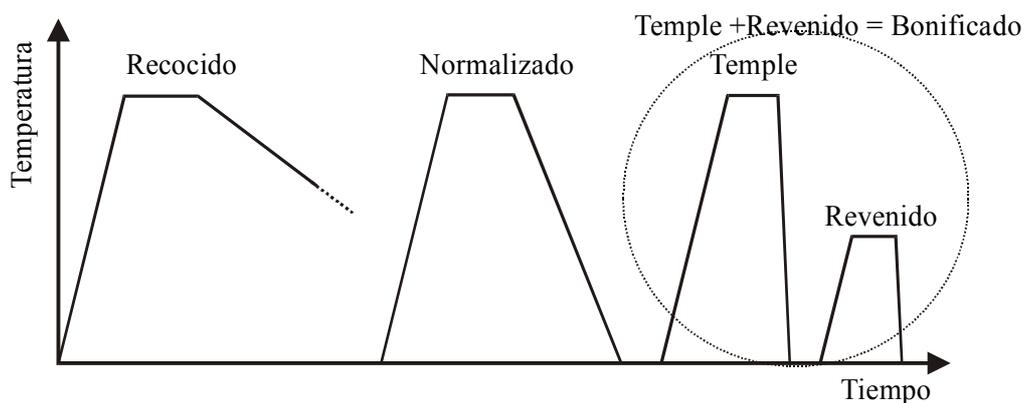


Fig. 4.10 Representación esquemática de las etapas de los principales tratamientos térmicos de los aceros.

En los tratamientos de normalizado y recocido, la temperatura de calentamiento estabiliza una estructura austenítica ( $Fe-\gamma$ ) y el enfriamiento conduce a microestructuras determinadas por el diagrama de equilibrio, es decir, con las propiedades y características propias de su composición

(ferrita-perlita, perlita o perlita-cementita, mostradas en las figuras 4.6 y 4.8 del apartado 4.1.3). Estas microestructuras permiten que el acero pueda deformarse plásticamente o ser mecanizado con buena eliminación de viruta. El normalizado es un tratamiento muy usual en aceros al carbono hipoeutectoides, con porcentajes bajos o medios de carbono.

Se pueden realizar tratamientos térmicos de recocido o normalizado en componentes que hayan sido deformados en frío o en caliente, ya que la microestructura final del recocido y del normalizado es homogénea (no orientada). También se eliminan las tensiones internas que el material pueda haber acumulado durante los procesos de deformación. En el esquema de la figura 4.11 se representan los tipos de recocido más habituales en la práctica industrial para los aceros, que son:

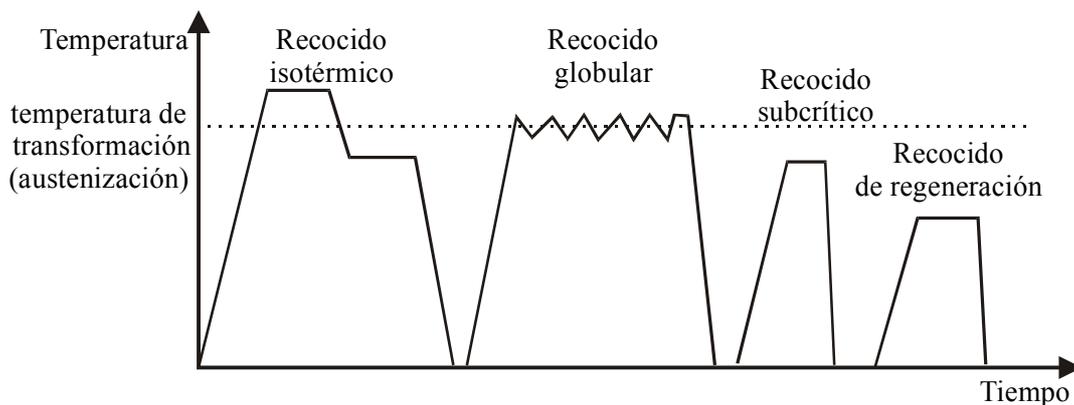


Fig. 4.11 Tratamientos térmicos de recocido más habituales en los aceros al carbono.

- Recocido isotérmico, ideal para componentes muy gruesos, que presenta un enfriamiento en dos etapas, a fin de favorecer que la temperatura de enfriamiento uniforme.
- Recocido globular, que provoca la globulización de la cementita, facilitando la mecanización de los aceros tratados (Fig. 4.12).
- Recocido subcrítico, que se realiza a una temperatura a la cual no se produce transformación alotrópica total.
- Recocido de regeneración, también denominado recocido total.

A diferencia de los tratamientos de recocido y normalizado, los de temple conducen a situaciones que no figuran en el diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C, ya que no son de equilibrio. Estas microestructuras son la *martensita* (ya mostrada en la figura 4.7 del apartado 4.1.3) y la *bainita*, que es una estructura intermedia entre la martensita y la perlita fina (Fig. 4.13), y se origina cuando se realizan enfriamientos más lentos y escalonados que los procesos que conducen a microestructuras martensíticas.

El temple es el tratamiento indicado si se requiere dureza y resistencia al desgaste. El contenido en C de un acero, por sí solo, ejerce una notable influencia en su dureza, ya que, cuanto mayor sea el porcentaje de este elemento, tanto mayor será la dureza del acero. Este efecto se ve multiplicado por la realización de un temple, de manera que un acero con alto carbono tendrá una dureza elevada con estructura de equilibrio, pero tras un tratamiento de temple, tendrá una dureza mucho mayor (Fig. 4.14).

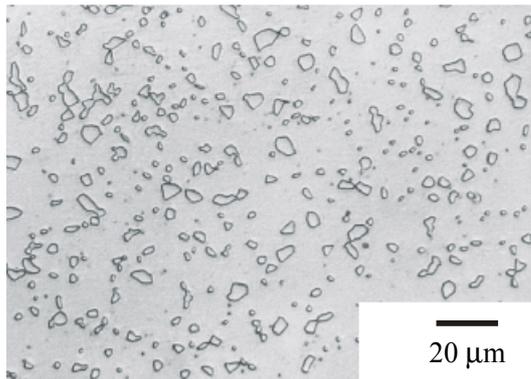


Fig. 4.12 Acero hipereutectoide (1,2% C) tras un recocido globular, con Fe<sub>3</sub>C distribuida en glóbulos.

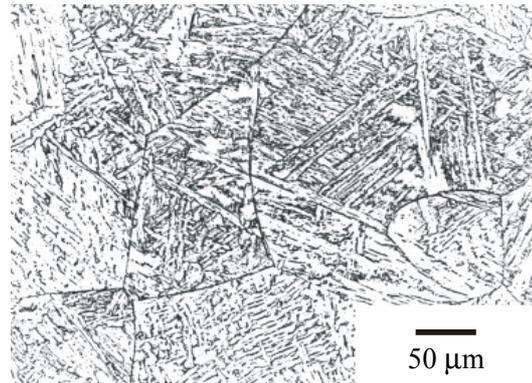


Fig. 4.13 Microestructura bainítica para un acero al carbono.

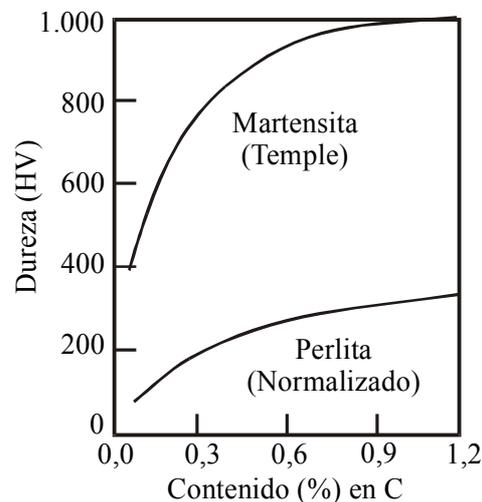


Fig. 4.14 Efecto del % C en la dureza (HV), en función del tratamiento térmico, para los aceros al carbono.

La velocidad de enfriamiento en un tratamiento de temple viene determinada por el medio de enfriamiento (agua con sales, agua, aceites minerales o sales fundidas son los medios más habituales) y por el grado de agitación del medio (a mayor agitación, mayor capacidad de enfriamiento). Cuanto más severo sea el medio de enfriamiento, tanto mayor será la velocidad de enfriamiento, con lo cual se reducirá el tiempo necesario para disminuir la temperatura desde la de tratamiento (austenización completa o parcial) hasta la final (generalmente, temperatura ambiente).

Los diagramas TEC (transformación por enfriamiento continuo) son una herramienta fundamental, dado que determinan, para cada composición, las condiciones en que se producirá transformación y permiten estimar el porcentaje de cada uno de los constituyentes que puedan hallarse en la microestructura final (Fig. 4.15). Estos diagramas resumen la evolución de la transformación de la microestructura sobre un eje logarítmico de tiempo, con lo que una velocidad de enfriamiento continua ( $\Delta T/\Delta t = \text{cte}$ ) se verá representada como una curva en el diagrama.

Así, para un acero perlítico, que tendrá una curva TEC como la de la figura 4.15, las curvas de enfriamiento (1, 2, 3, 4 y 5) podrán cortar o no las “narices” del diagrama. Las curvas 1 y 2 cortan las

dos curvas de transformación (curva de inicio y curva final), lo que indica que la microestructura será la de equilibrio (perlita) en ambos casos, con la diferencia de que la curva 1 (velocidad de enfriamiento muy lenta) proporcionará perlita gruesa, mientras que la 2 conducirá a una microestructura de perlita fina. Una velocidad de enfriamiento ligeramente mayor que la curva 2 hubiera proporcionado una microestructura de bainita, ya que la zona de esta microestructura se halla justo por debajo de la de perlita fina.

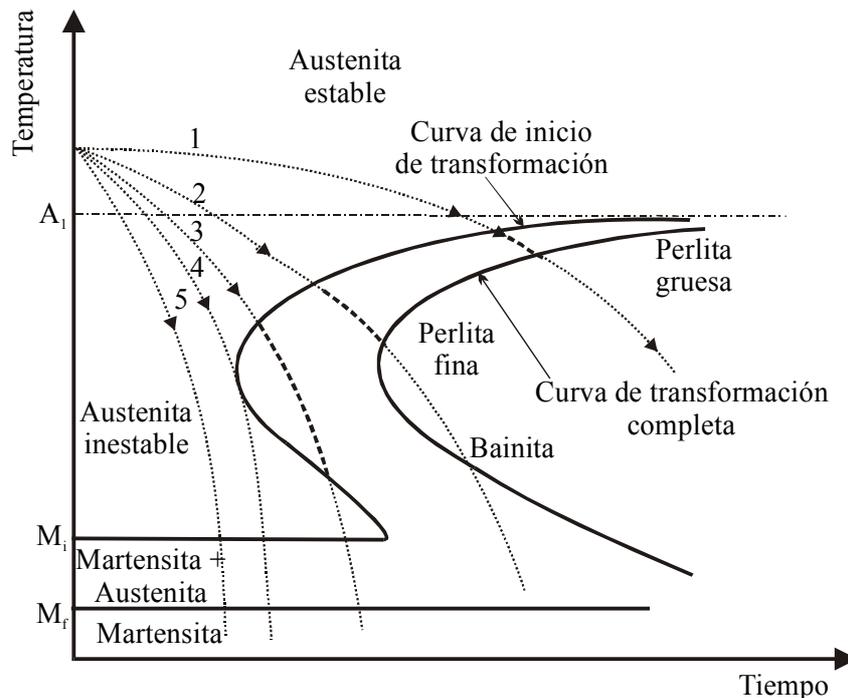


Fig. 4.15 Diagrama TEC para un acero perlítico.

Las curvas 4 y 5 no cortan ninguna de las dos curvas de transformación, de manera que no proporcionarán microestructura de equilibrio (perlita), y corresponderán a velocidades de enfriamiento de temple (muy elevadas). La velocidad de enfriamiento de la curva 4 es tangente a la nariz más externa (curva de inicio de transformación), corresponde a la velocidad más lenta que proporcionaría una microestructura 100% martensítica, es decir, a la *velocidad crítica de temple*, y determinará el medio de enfriamiento necesario para conseguirla. Cualquier otra curva que corresponda a una velocidad mayor de enfriamiento (como la curva 5) conducirá a una microestructura de martensita, tanto más fina cuanto más breve sea el tiempo invertido en el enfriamiento. En el caso de la curva 3, para esa velocidad de enfriamiento tan sólo se corta la curva de inicio, y no la de final de transformación, con lo que la microestructura final será una mezcla de martensita con perlita o bainita.

Las curvas de enfriamiento que conducen a microestructuras de equilibrio son aquellas que cortan las curvas de transformación en la parte superior. En la figura 4.16 se superponen los esquemas de algunos de los tratamientos de recocido más comunes con la curva TEC correspondiente, y se puede apreciar como en todos los casos la zona de intersección es la misma.

Para los tratamientos de temple, en cambio, la zona de corte de las curvas TEC es la inferior, lejos de las “narices” de transformación, como se representa en el esquema de la figura 4.17.

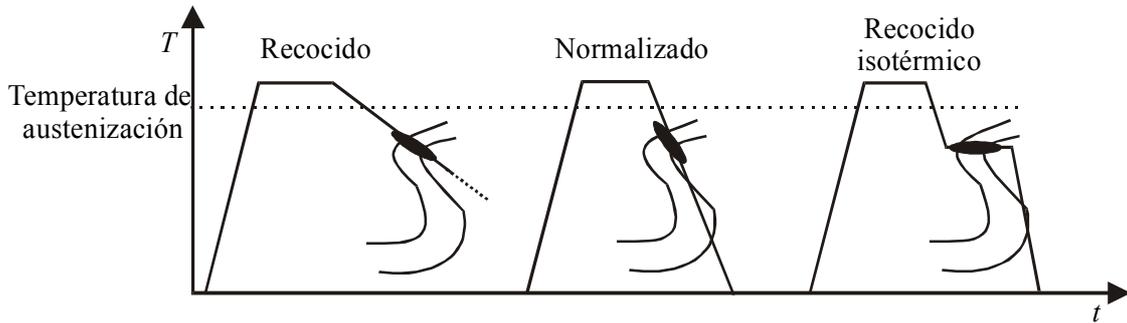


Fig. 4.16 Zona de corte de las curvas TEC para los tratamientos de recocido de aceros.

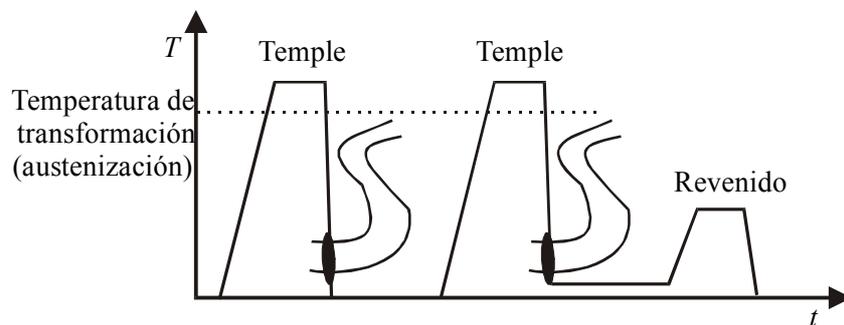


Fig. 4.17 Zona de corte de las curvas TEC para los tratamientos de temple de aceros.

Para componentes muy gruesos, resulta complicado conseguir una misma velocidad de enfriamiento en todo el volumen y suele suceder que la superficie se enfría a mayor velocidad que el núcleo. Una forma de evitar esta situación es realizando tratamientos isotérmicos, en los cuales el enfriamiento se realiza en dos etapas: desde la temperatura de austenización se sumerge el componente a tratar en un baño a temperatura constante (sales fundidas o metales de bajo punto de fusión como Sn, Zn, Pb), y una vez uniformizada la temperatura, se inicia la segunda etapa de enfriamiento, más rápida (con agua o aceite) hasta temperatura ambiente.

Si la transformación (intersección de la curva TEC) se produce durante esta región isotérmica, el tratamiento recibe el nombre de *austempering* y la microestructura final que se consigue es la de equilibrio (Fig. 4.18). Por el contrario, si al cesar la etapa intermedia e iniciarse de nuevo el enfriamiento es cuando se produce la intersección con la curva TEC, el tratamiento se define como *martempering* y la microestructura final es de martensita (Fig. 4.18).

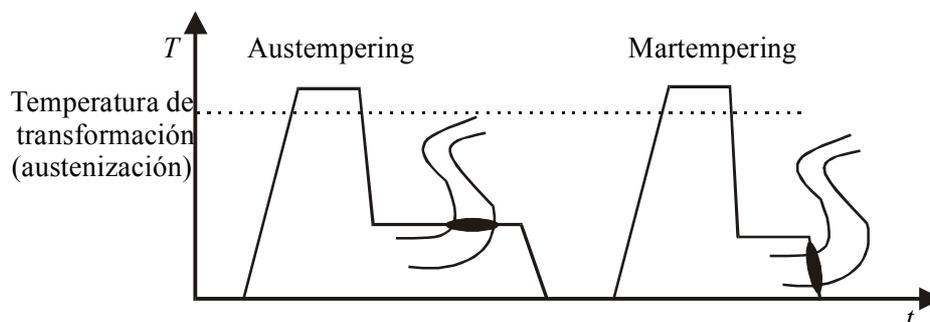


Fig. 4.18 Esquema de los tratamientos isotérmicos de austempering y martempering.

El diagrama TEC de un acero es característico y la forma de las curvas de transformación (anchura y localización hacia la derecha o la izquierda dentro del diagrama) variará si se modifica el contenido en los elementos de aleación. Aquellos elementos que provocan un desplazamiento de las curvas hacia la derecha, como el carbono (C), el níquel (Ni) o el manganeso (Mn), disminuyen la velocidad crítica de temple, ya que se podrá conseguir una microestructura 100% martensítica con enfriamientos no tan intensos (aceite). En este caso, se considera que estos elementos aumentan o mejoran la *templabilidad* del acero, ya que se posibilita el temple completo a velocidades inferiores, sin precisar de medios de enfriamiento muy intensos.

Si bien se considera que cuanto mayor es la cantidad de elementos de aleación, empezando por el carbono, tanto mayor es la templabilidad de un acero, se puede “traducir” el efecto de todos los elementos presentes en porcentajes equivalentes de carbono, mediante expresiones como la siguiente:

$$\%C_{\text{EQUIVALENTE}} = \%C + \left(\frac{\%Mn}{6}\right) + \left(\frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5}\right) + \left(\frac{\%Ni + \%Cu}{15}\right) \quad (4.2)$$

La expresión anterior pone de manifiesto los distintos efectos de los elementos de aleación, de manera que el carbono es el elemento que más desplaza las curvas del diagrama TEC, mientras que el cobre y el níquel influyen mucho menos y desplazarían muy poco dichas curvas. Así, la composición química de un acero determinará su templabilidad y la posible respuesta del material en aplicaciones concretas. El ensayo de *Jominy* permite evaluar esta capacidad y, por tanto, permite determinar el efecto de los distintos elementos de aleación. Consiste en someter una probeta del material a estudiar, con las dimensiones indicadas en la figura 4.19, a una etapa de austenización total, momento en que se extrae del horno, se sujeta sobre un soporte y se activa un chorro de agua, desde una tobera de 12,5 mm de diámetro, que incide sobre la parte inferior de la probeta, de manera que esta zona se enfría inmediatamente y las zonas superiores se van enfriando progresivamente.

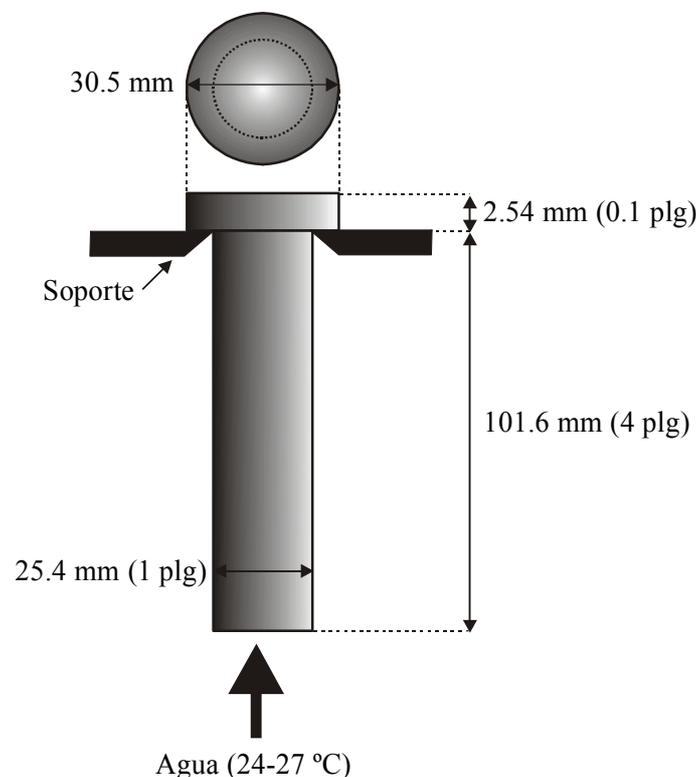


Fig. 4.19 Probeta para el ensayo de templabilidad (Jominy).

Finalizado el proceso de enfriamiento de la probeta, se rectifica una cara plana longitudinalmente sobre la superficie cilíndrica. En esta superficie mecanizada, se realizan ensayos de dureza con penetrador cónico de diamante (escala Rockwell C, según se indica en el apartado 3.3), empezando en el borde de la probeta, en la zona en que ha incidido el agua ( $x = 0$ ) y espaciando las huellas hasta la zona próxima al soporte.

Así, la primera medida de dureza se realiza a 1.5 mm del extremo y la segunda a 3 mm; a partir de ahí, se toman 6 valores de dureza cada 2 mm (habiendo alcanzado una profundidad de 15 mm desde el extremo), y a continuación se mide la dureza cada 5 mm hasta la estabilización de los valores. La representación gráfica de los valores de dureza (HRC) con respecto a la distancia ( $x$ ) proporcionará un tipo de curva característica, que indicará la profundidad del temple en el material, es decir, hasta qué distancia (desde el punto de incidencia del chorro de agua) ha habido transformación martensítica. La región que haya sufrido dicha transformación presentará valores de dureza muy superiores a los del material de origen (Fig. 4.20).

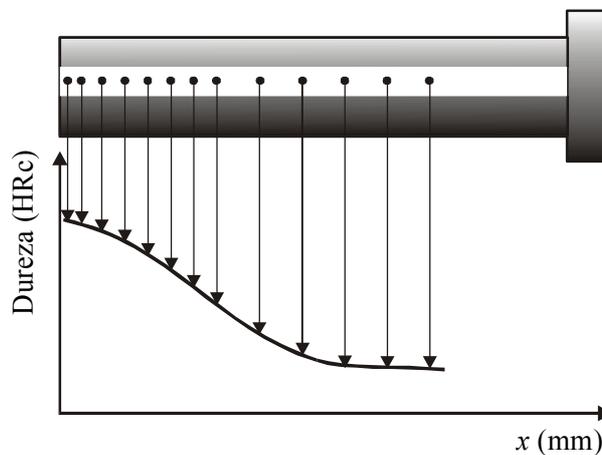


Fig. 4.20 Determinación de la curva de templabilidad.

La medida de templabilidad de un acero vendrá determinada por la forma de la curva, ya que cuanto más desplazado hacia la derecha se halle el punto de inflexión (hacia mayores valores de  $x$ ), tanto más podrá penetrar el temple en el material.

#### 4.2.2 Tratamientos superficiales

Si bien los tratamientos térmicos se caracterizan por modificar la respuesta mecánica de un volumen determinado de material sin alterar su composición química, es habitual la realización de tratamientos locales, que tan sólo afecten a una región o a la superficie de un componente. Los más comunes son los *tratamientos superficiales*, que consisten en tratar térmicamente un espesor determinado del componente, con o sin modificación de la composición química.

Los tratamientos superficiales que *no* modifican la composición química son los *temple superficiales*, que se realizan calentando superficialmente la región a tratar, mediante la acción de una llama o de una bobina de inducción, hasta que se ha alcanzado la condición de austenización, y posteriormente se efectúa un enfriamiento rápido de la zona afectada, generalmente mediante la acción de un chorro de agua a presión. Este tipo de temple induce la formación de martensita tan sólo en la región que se ha calentado, con profundidades de transformación pequeñas, con lo cual se consiguen componentes duros en su superficie, pero tenaces en el interior, ya que en la zona interna no habrá habido ninguna variación microestructural.

Sin embargo, se ha indicado que mayores leyes de aleación suelen ir acompañadas de mayores valores de dureza y resistencia. La combinación de estos dos aspectos da lugar a un tipo de tratamientos superficiales, denominados *tratamientos termoquímicos*, que se caracterizan por modificar la composición química tan sólo en la región más externa de los componentes, con lo cual se consigue incrementar la dureza localmente, en la zona en que se ha inducido la modificación estructural.

Dentro de los tratamientos termoquímicos, el más común es el que provoca un endurecimiento superficial en un componente férrico por adición de carbono, proceso denominado *cementación* o *carburización*. Gracias a la difusión en la zona superficial (ver apartado 2.3.4), esa región del material se comporta como un acero de alto carbono. Dado que la temperatura necesaria para que se produzca difusión ha de ser suficientemente elevada como para que el componente se halle en dominio austenítico, el enfriamiento rápido provocará endurecimiento en la región enriquecida por transformación martensítica, mientras que el núcleo se mantendrá con la composición y la microestructura originales (más blando, pero más tenaz).

Otro tipo de tratamiento termoquímico muy habitual es el de *nitruración*, que se realiza a temperaturas muy inferiores a las de carburización (próximas a 500 °C) y puede aplicarse a componentes previamente templados y revenidos. Consiste en inducir la difusión de nitrógeno atómico en la superficie de los componentes a tratar, con lo que la dureza se incrementa notablemente como consecuencia de la formación de nitruros. Se pueden realizar tratamientos de nitruración con espesores de capa muy finos sin que haya necesidad de realizar ningún tratamiento posterior de temple.

La *carbonitruración* es un proceso en el que se provoca la difusión de carbono y de nitrógeno simultáneamente en la superficie de los componentes a tratar, seguida de un tratamiento térmico de temple, con lo cual se alcanzan valores de dureza muy elevados en la zona tratada.

### 4.3 Aleaciones férricas

Las aleaciones férricas son aquellas en las cuales el hierro (Fe) es el elemento principal, y las más comunes son las formadas por hierro y carbono (C). El hierro no se encuentra en la naturaleza químicamente puro, sino que lo más habitual es encontrarlo presente en diversos minerales en forma de compuestos más o menos complejos, generalmente óxidos, sulfuros y carbonatos. Al procesar estos minerales para extraer el hierro, es muy frecuente la presencia de contenidos variables en fósforo y azufre en los productos finales, que se consideran impurezas muy perjudiciales, aunque se hallen en proporciones pequeñas, ya que provocan una gran fragilidad en los productos siderúrgicos.

Para que un proceso siderúrgico sea económicamente viable, suele considerarse necesario que la *mena* o mineral de origen tenga un contenido en hierro superior al 20%, si bien lo más corriente es trabajar con menas de riquezas comprendidas entre el 50 y el 70%. Los minerales que suelen explotarse para la obtención de hierro son la *magnetita* ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , con un 70% de Fe aproximadamente), el *hematites* ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , con una riqueza algo menor) y la *siderita* ( $\text{FeCO}_3$ , con algo menos del 50% de Fe).

Los minerales de hierro recién extraídos de la mina van siempre acompañados de sustancias de naturaleza silíceas, arcillosas y calcáreas, que forman la *ganga*, con puntos de fusión elevados. Puesto que para la obtención del hierro se ha de fundir el mineral, se hace necesario un proceso previo de separación de la mayor parte de la ganga, pues de lo contrario se requerirían temperaturas industrialmente prohibitivas. Estos procesos suelen realizarse en las proximidades de la explotación minera, con lo que material que llega a los centros de producción va “enriquecido” en hierro.

La primera etapa en la producción de los aceros se lleva a cabo en el *alto horno*. En estas instalaciones se provoca la reducción química de los óxidos de hierro mediante la acción del monóxido de carbono

(CO) a elevadas temperaturas. En el esquema de la figura 4.21 se reproduce la estructura de un alto horno, así como las temperaturas medias que se alcanzan en cada nivel y las principales reacciones que se van produciendo.

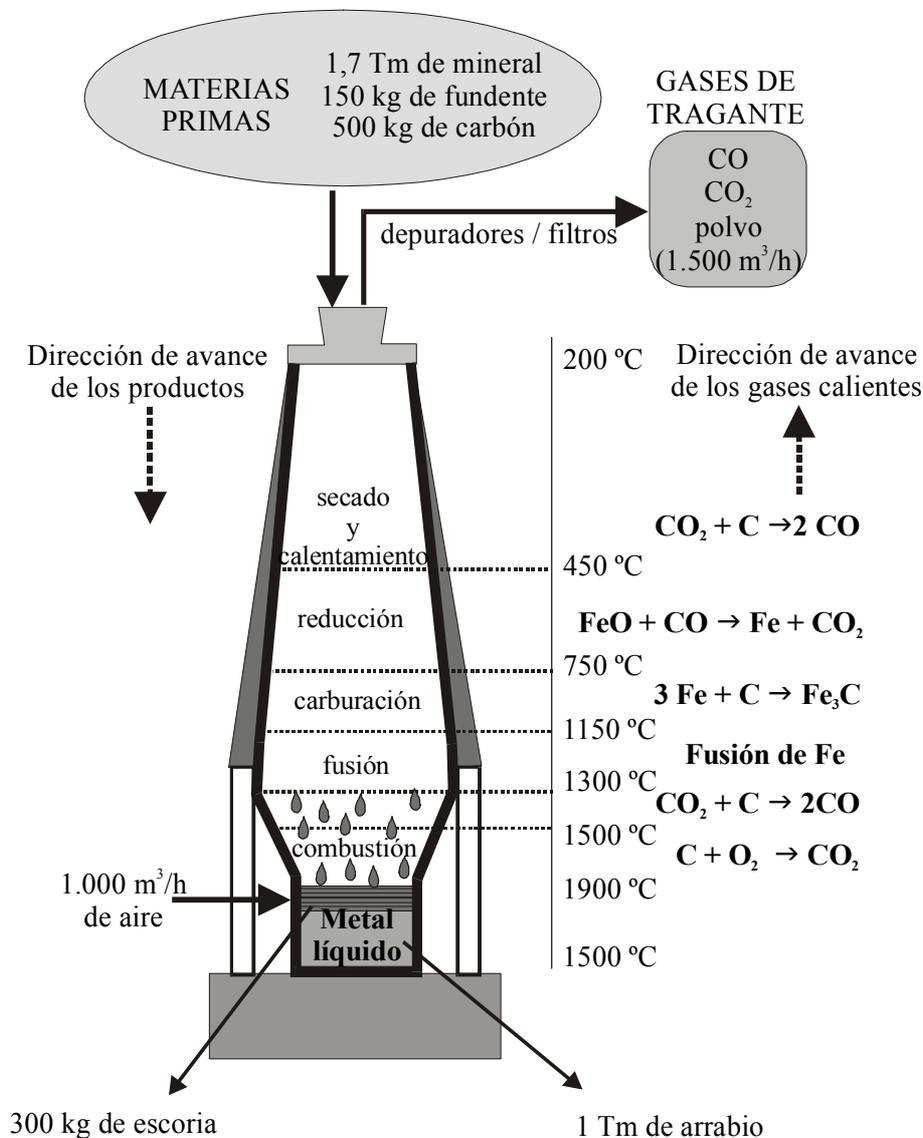


Fig. 4.21 Esquema de un alto horno, indicando las temperaturas y las reacciones de cada nivel y un balance de masas típico.

El producto resultante de la operación en el alto horno se denomina *arrabio*. Atendiendo a su composición química, se trataría de un producto férrico de la gama de las fundiciones, si bien su contenido en algunos elementos, tales como el fósforo y el azufre, es todavía muy superior al de los materiales de aplicación industrial. A fin de reducir el contenido en estos elementos y poder dar aplicación a los productos del alto horno, se procede a afinarlos. Para ello, se utilizan diversos tipos de hornos, o bien unos dispositivos especiales conocidos con el nombre de *convertidores*. En los convertidores se añaden oxígeno y productos desulfurantes y desfosforantes que eliminan impurezas (azufre, fósforo y exceso de carbono), ayudando a convertir el arrabio en aleaciones férricas de uso comercial e industrial: aceros y fundiciones.

En la actualidad, el proceso de obtención de aleaciones férricas a partir de minerales se ha restringido notablemente, dado que el consumo energético es muy elevado, así como el nivel de residuos generados y el gran impacto ambiental que supone la explotación de menas. Además, estos productos han sido consumidos en grandes cantidades en los últimos dos siglos, con lo cual se ha ido generando una gran cantidad de chatarra. Todo ello ha conducido al desarrollo de los procesos de elaboración de productos férricos por refusión de productos ya utilizados, que ha dado lugar a una nueva generación de aceros (*aceros eléctricos*), muy apreciados por presentar una composición muy precisa y con la ventaja de contribuir al reciclado de grandes cantidades de residuos industriales.

#### 4.3.1 Aceros al carbono y aceros aleados

Los aceros más sencillos son aleaciones binarias de hierro y carbono y se denominan *aceros al carbono*. Si, además de estos dos elementos, contienen otros, ya no son aleaciones binarias sencillas y se denominan *aceros aleados*. Los elementos de aleación más comunes en los aceros aleados son níquel, cromo, manganeso, molibdeno y vanadio, aunque pueden también contener cobre, plomo y otros elementos no tan frecuentes. Los *aceros al carbono* son los más comunes, si se considera el volumen de producción frente a otras aleaciones férricas más complejas. Se destinan a cubrir las necesidades generales de la ingeniería en la construcción de edificios, estructuras, puentes, minas, industria naval, automoción, calderas y componentes de ferrocarriles (vagonetas, ejes, carriles, etc.).

Los aceros al carbono se pueden clasificar en función de su contenido en carbono, teniendo en cuenta que son más duros cuanto más carbono contienen, y esto determinará su respuesta en servicio. Así, se pueden distinguir básicamente los tres grupos siguientes:

- Aceros bajos en carbono, para  $\% C < 0,20$ .
- Aceros medios en carbono, si  $0,20 < \% C < 0,50$ .
- Aceros altos en carbono, cuando  $\% C > 0,50$ .

Los aceros aleados son materiales de mayor calidad (y mayor precio) que los aceros al carbono. Se emplean cuando se necesitan unos requisitos de resistencia (mecánica o química) superiores.

En general, se entiende que los aceros son de *baja aleación* si el contenido en elementos aleantes se sitúa entre el 1 y el 4%. El resto de aceros aleados se definen como *aceros especiales* y se hace referencia a ellos en función del elemento de aleación más representativo:

- *Aceros al cromo*: La adición de cromo, hasta el 4%, aumenta la dureza, la elasticidad, la resistencia a la tracción y también la resistencia al desgaste de los aceros. Se emplean aceros con 4% de cromo para la fabricación de herramientas de corte de alta velocidad. Si el porcentaje en cromo es superior a 12, el acero deviene inoxidable y presenta muy buena resistencia al calor y a los agentes químicos ácidos.
- *Aceros al manganeso*: Para contenidos superiores al 0,8% en este elemento, los aceros presentan una gran resistencia al desgaste y al impacto, con lo cual resultan de gran utilidad en construcción de blindajes, ruedas de locomotora, trituradoras, etc.
- *Aceros al plomo*: Que se caracterizan por presentar una fina dispersión de glóbulos o partículas de plomo, ya que éste es un elemento prácticamente insoluble en los aceros. Esta morfología facilita notablemente el mecanizado.

- *Aceros al silicio*: Se emplean para la construcción de muelles. Cuando el contenido en silicio se sitúa entre el 2 y el 4%, entonces se utilizan para núcleos de transformadores en maquinaria de mecanización.
- *Aceros al molibdeno*: Se caracterizan por poseer excelentes propiedades mecánicas en caliente (dureza y resistencia) simultaneadas con una notable tenacidad.
- *Aceros al níquel*: Poseen mayor resistencia a tracción y tenacidad que los aceros al carbono, especialmente a bajas temperaturas. Este elemento también influye notablemente en la resistencia a la corrosión, siendo su contenido muy importante (después del de cromo) en los aceros inoxidable.
- *Aceros al vanadio*: este elemento forma carburos con gran facilidad, que precipitan en los bordes de grano, limitando su crecimiento a temperaturas elevadas. Estos carburos también tienen un efecto importante en la resistencia al desgaste.

Los *aceros HSLA (High Strength Low Alloy)* contienen diversos elementos de aleación en proporciones reducidas (por debajo del 3% en conjunto) y un porcentaje de carbono entre bajo y medio (0,1-0,3%). Se caracterizan por poseer mejores propiedades que los aceros al carbono, como resultado de la solución sólida de los elementos presentes, sin ser excesivamente caros, dada la moderación en su aleación.

Los *aceros de herramienta* son aceros de alta aleación que se caracterizan por su resistencia al desgaste, su resistencia mecánica y su dureza, incluso en caliente. Este conjunto de propiedades los hacen altamente indicados para ser utilizados como herramientas de corte, matrices y moldes. La presencia de elementos de aleación en porcentajes importantes permite que estos materiales sean tratados térmicamente a fin de mejorar su resistencia y favorecer la precipitación de carburos que incrementan la dureza. Los elementos que suelen contener son, además de C (entre un 0,4 y un 1,0%) y Cr (entre un 0,5 y un 12%), Mo (entre un 0,2 y un 5,0%) y W (entre un 0,5 y un 18%).

#### 4.3.2 Aceros inoxidable

Estos aceros son muy aleados y, por consiguiente, más costosos que los aceros de grupos anteriores. Los principales elementos de aleación son el cromo y el níquel y la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable se debe principalmente a la presencia del cromo, en porcentajes superiores al 12%, elemento que lo hace sumamente resistente al ataque por parte de entornos agresivos u oxidantes.

El cromo es un elemento *alfágeno* y estabiliza la fase ferrítica, “ensanchando” su dominio de existencia en el diagrama Fe-Cr (Fig. 4.22). El efecto inoxidable del cromo se ve notablemente incrementado por la adición de níquel, si bien este elemento es *gammágeno* y ensancha el dominio austenítico en el diagrama Fe-Ni, en detrimento del ferrítico (Fig. 4.23). Los otros elementos de aleación que puede haber en los aceros inoxidable tienen efectos equiparables a los del Cr o el Ni, dependiendo de que sean alfágenos (V, Ti, Al, Mo) o gammágenos (Mn y Cu).

Los aceros inoxidable, según su composición, pueden presentar estructuras metalográficas diferentes, distinguiéndose cuatro grupos: ferríticos, martensíticos, austeníticos y austeno-ferríticos (dúplex).

- Los *aceros inoxidable ferríticos y martensíticos* se caracterizan por presentar contenidos importantes en cromo, pero bajos (o nulos) en níquel, por lo que resultan muy económicos y, por otro lado, su resistencia a la corrosión es moderada. Los primeros son magnéticos, con ductilidad moderada, y los segundos son resistentes a tracción y a fatiga, pero su resistencia a la corrosión es algo inferior a la de los ferríticos.

- Los *aceros inoxidables austeníticos* presentan el mayor volumen de utilización de todos y se caracterizan por presentar, además de un elevado contenido en cromo, proporciones importantes de níquel, generalmente por encima del 8%, lo cual mejora notablemente su resistencia a la corrosión, pero incrementa su precio. No son magnéticos y su ductilidad es muy superior a la de los ferríticos o martensíticos, aunque la deformación en frío provoca un endurecimiento notable.
- Los *aceros inoxidables dúplex* se caracterizan por presentar estructuras metalográficas mixtas de ferrita + austenita ( $\alpha+\gamma$ ) y una resistencia a la corrosión similar a la de los austeníticos, pero son mecánicamente más resistentes, con lo cual constituyen una buena opción en aquellas condiciones en que se precisan simultáneamente buenas prestaciones mecánicas y resistencia a la corrosión.

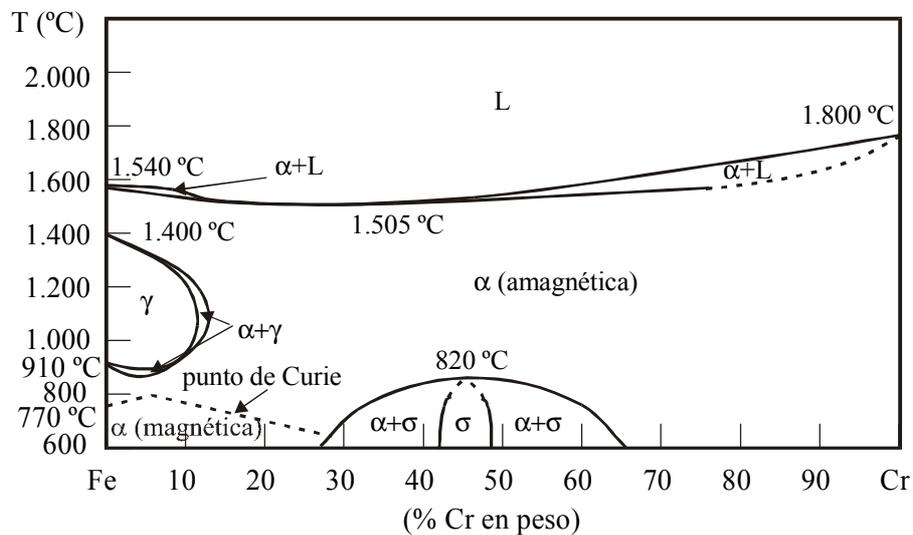


Fig. 4.22 Diagrama Fe-Cr.

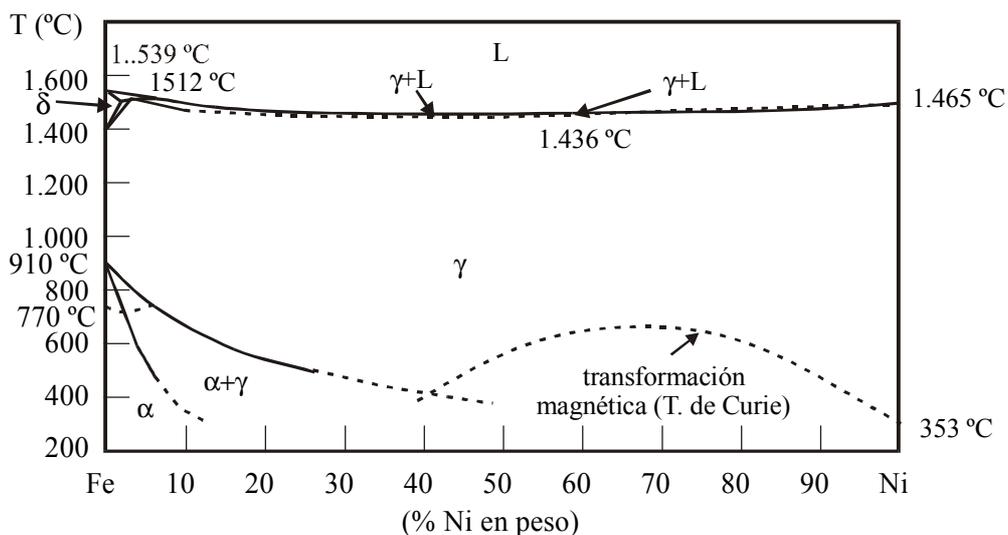


Fig. 4.23 Diagrama Fe-Ni.

En el anexo 1 se proporcionan tablas de composiciones de aceros al carbono, aceros aleados y aceros inoxidables, así como tablas de equivalencias entre las denominaciones de aceros para normas de distintos países, entre las que cabe destacar las siguientes:

- Normas EN, de Europa
- Normas UNE, de España
- Normas AFNOR, de Francia
- Normas AISI/SAE, de EE UU
- Normas DIN/Standard n°, de Alemania
- Normas BS, de Gran Bretaña
- Normas JIS, de Japón

### 4.3.3 Fundiciones de hierro

También conocidas como *hierros colados*, las fundiciones comprenden aquellas aleaciones Fe-C con mayores contenidos en carbono ( $> 2\%$ ) y con proporciones de silicio entre un 1 y un 3%, que les confiere gran colabilidad y facilita su conformado por fusión y moldeo (de ahí su nombre). Después de los aceros, las fundiciones son el grupo de aleaciones de mayor volumen de uso a nivel industrial.

La clasificación más común de las fundiciones atiende a la morfología del componente rico en carbono. Este elemento de aleación, que se halla en porcentajes que superan los límites de solubilidad de las redes cristalinas del hierro, puede hallarse formando parte de la cementita, en fundiciones que poseen hasta un 3,5% de carbono, o bien en forma de agregados de grafito, condiciones en que el material alcanza los máximos niveles de este elemento (hasta el 4,5%).

Las fundiciones más utilizadas son las *fundiciones grises*, en las que el carbono se halla mayoritariamente en forma de grafito y los contenidos en silicio pueden alcanzar porcentajes muy elevados, próximos al 3%. El carbono se distribuye en forma de hojuelas de grafito por todo el metal, de manera que, cuando se fractura, se aprecia un color gris mate (de aquí el nombre de fundición gris). Esta distribución de láminas de grafito proporciona, básicamente, dos propiedades que hacen muy atractivos estos materiales ya que

- favorecen la amortiguación y absorben las vibraciones, con lo cual estas fundiciones son muy adecuadas para fabricar grandes maquinarias, motores o bancadas de maquinaria que trabajan en condiciones en que las vibraciones son importantes;
- favorece, la mecanización, ya que actúan como lubricante interno y facilitan la eliminación de material en forma de virutas.

Las propiedades mecánicas de las fundiciones grises son más bien pobres, tanto a tracción como a impacto, y su ductilidad es muy baja (inferior al 1%). Sin embargo, pueden soportar esfuerzos notables a compresión. Si una fundición gris se trata químicamente antes de realizar el vertido en el molde, mediante la adición de magnesio (Mg) y/o cerio (Ce), se puede conseguir que el grafito forme nódulos, con lo cual el producto resultante es más dúctil (puede alcanzar valores de alargamiento porcentual casi del 20%), más duro y muy resistente. Este tipo de productos reciben el nombre de *fundiciones*

*nodulares* o *fundiciones dúctiles* y, dadas sus características, las principales aplicaciones a que se destinan están relacionadas con la fabricación de componentes de maquinaria voluminosos que precisen de gran resistencia mecánica y de buena resistencia al desgaste.

Las *fundiciones blancas* son el segundo gran grupo de fundiciones, y poseen menores contenidos de carbono y silicio que las fundiciones grises (ver Tabla 4.1). El carbono, en este tipo de fundiciones, se halla en forma de cementita ( $Fe_3C$ ), que se forma gracias a un enfriamiento rápido desde el estado líquido, evitando la formación de agrupaciones de grafito. La superficie de fractura de las fundiciones blancas posee un aspecto metálico y brillante, que da nombre a este grupo de materiales. Dado que la cementita es un componente de gran dureza, contenidos elevados de este constituyente en las fundiciones blancas proporcionan una excelente resistencia al desgaste, aunque su ductilidad es prácticamente nula.

En general, las fundiciones blancas son más resistentes que las fundiciones grises. Si una fundición blanca se trata térmicamente, puede conseguirse una separación de parte del carbono de la cementita, con lo cual se adopta una microestructura mixta con cementita y grafito. Este producto se denomina *fundición maleable* y presenta una ductilidad muy superior a la de las fundiciones blancas, pudiendo superar el 20%. En la tabla 4.1 se indican las composiciones químicas y las propiedades mecánicas de algunas de las fundiciones de hierro de uso más común.

Tabla 4.1 Composición química y propiedades mecánicas de algunas fundiciones.

Tipo	Composición química (%)				Resistencia a tracción (MPa)	Ductilidad (%)	
	C	Si	Mn	Otros			
Fundición gris	Clase 20	3,5	2,5	0,65	--	140	0,6
	Clase 30	3,2	2,1	0,75	--	210	0,6
	Clase 40	3,1	1,9	0,85	--	280	0,6
	Clase 50	3,0	1,6	1,0	0,67 Mo	350	0,6
Fundición nodular	A395(*)	3,0	2,5	--	--	400	18
	A476(*)	3,0	3,0	--	--	550	3
Fundición blanca	Bajo C	2,5	1,3	0,4	1,5 Ni 1 Cr 0,5 Mo	280	0
Fundición maleable	Ferrítica	2,6	1,4	0,4	--	350	10
	Perlítica	2,4	1,4	0,8	--	400	10

(\*) Clasificación según ASTM (*American Society for Testing Materials*)

#### 4.4 Aleaciones no férricas

En este grupo de materiales metálicos se incluyen las aleaciones que no se basan en el hierro y que tienen gran importancia por sus aplicaciones en ingeniería, como son las aleaciones de cobre, de aluminio, de níquel, de titanio, de zinc y otras. Aunque las propiedades mecánicas de las aleaciones no férricas suelen ser inferiores a las de los aceros, cada uno de los grupos mencionados poseen alguna característica que lo hace excepcional, como sería la resistencia a la corrosión de las aleaciones de cobre, aluminio, titanio o níquel, o bien la baja densidad de las aleaciones de aluminio, titanio o magnesio.

#### 4.4.1 Aleaciones de cobre

El cobre es uno de los metales más conocidos por el hombre desde la antigüedad, gracias a la posibilidad de hallarlo en estado puro en la naturaleza (*cobre nativo*). Caracterizado por una ductilidad importante y por una dureza muy baja en estado puro, el conformado del cobre por martilleo fue una de las primeras técnicas de conformado de metales conocida y utilizada por el hombre. Hacia el año 2000 aC se data la observación de que la mezcla de cobre con estaño proporcionaba un nuevo material, mucho más duro e igualmente atractivo, iniciándose el uso generalizado del *bronce*. Esta aleación da nombre a una época (edad de bronce) que dura hasta el siglo I dC. Con posterioridad se desarrollan otras aleaciones de cobre con contenidos diversos de otros elementos.

Aunque el cobre puro, sin alear, se emplea principalmente como conductor eléctrico, no es adecuado para aquellas aplicaciones que requieren resistencia mecánica, buena maquinabilidad y gran resistencia a las temperaturas elevadas o al desgaste. Es en estos casos cuando se suele recurrir a aleaciones de cobre con porcentajes variables de otros metales: zinc, aluminio, estaño, níquel, hierro, etc. Las aleaciones de cobre se clasifican, generalmente, en los grupos siguientes:

- Cobres
- Cobres aleados
- Aleaciones cobre-zinc: latones
- Aleaciones cobre-zinc-plomo: latones con plomo
- Aleaciones cobre-zinc especiales: latones especiales
- Aleaciones cobre-estaño: bronce
- Aleaciones cobre-aluminio: cuproaluminios
- Aleaciones cobre-níquel: cuproníqueles
- Aleaciones cobre-níquel-zinc: alpacas
- Aleaciones cobre-níquel-zinc-plomo: alpacas con plomo

También se emplea el cobre como elemento de adición (en centésimas o milésimas) para conferir ciertas propiedades a metales como aceros, fundiciones de hierro, aleaciones de aluminio y de zinc.

Los *bronces* son aleaciones cobre-estaño con porcentajes de Sn inferiores al 28% (*bronces ordinarios*). Funden entre 900 y 1.000 °C y su dureza aumenta conforme aumenta el contenido en estaño. Mediante tratamientos térmicos de temple se puede disminuir su dureza, contrariamente a lo que sucede en algunos aceros. Los bronce se utilizan para la fabricación de campanas, cuerpos de bomba, cojinetes, etc.

Además de Sn, los bronce pueden contener otros elementos de aleación, como fósforo (P), aluminio (Al) y níquel (Ni), recibiendo el nombre de *bronces especiales*. Incluyen los *bronces fosforosos*, que se caracterizan por su elevada pureza y por haber sido desoxidados con Sn y Cu-fosforoso y que, en realidad, no contienen fósforo porque este elemento ha sido eliminado con las escorias. Los bronce fosforosos se caracterizan por presentar una buena fusibilidad, notable dureza, resistencia a tracción, y muy buena resistencia a la corrosión y a la agresión con agentes químicos.

Los *bronces al cadmio* se conocen también con el nombre de *bronces telefónicos*, porque se emplean en los conductores de las líneas telefónicas y telegráficas, así como también en el hilo de contacto de los ferrocarriles. Los *bronces al níquel* son aleaciones Cu-Sn con una proporción de níquel generalmente superior al 10%, que resisten muy bien la acción corrosiva del agua del mar y del vapor y que, para contenidos en níquel por encima del 54%, devienen muy resistentes al desgaste. Se emplean para piezas de bombas que hayan de utilizarse con agua de mar. Los *bronces al berilio* son una generación más reciente de aleaciones de cobre de gran resistencia. Presentan una combinación de propiedades mecánicas y fisicoquímicas excelentes, si bien suelen ser productos con precios elevados.

Los *latones* son aleaciones de cobre con proporciones de zinc que pueden estar entre el 5 y el 40%. Para contenidos inferiores al 35% ambos elementos forman una solución sólida, pero por encima de esta proporción las aleaciones presentan dos fases estables: alfa ( $\alpha$ , FCC) y beta ( $\beta'$ , BCC), siendo esta última más rica en Zn (Fig. 4.24) y con mayor dureza y resistencia. Las aleaciones  $\alpha+\beta'$  suelen conformarse en caliente. En algunos latones se hallan contenidos significativos de plomo, prácticamente insoluble en el cobre sólido, que se distribuye en forma de pequeños glóbulos y contribuye a mejorar notablemente la maquinabilidad de este tipo de materiales, denominados *latones al plomo*.

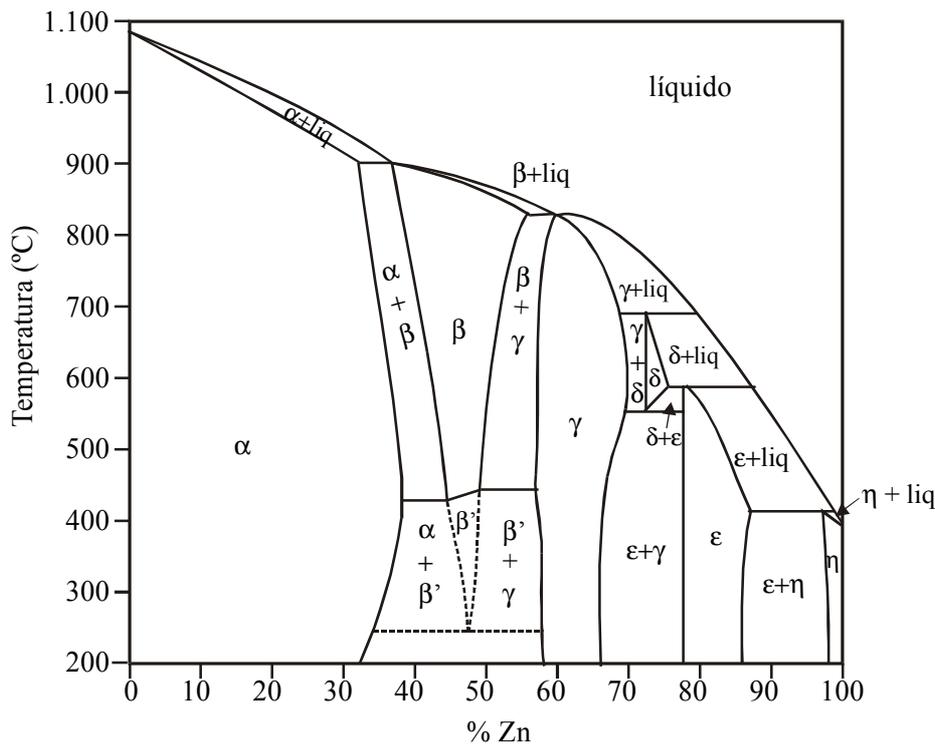


Fig. 4.24 Diagrama de fases Cu-Zn.

#### 4.4.2 Aleaciones de aluminio

El aluminio, junto con el titanio y el magnesio, constituye la base de las *aleaciones ligeras*, ya que presentan densidades muy inferiores a los  $7,8 \text{ g/cm}^3$  de los aceros. El aluminio tiene un peso específico, a temperatura ambiente, del orden de  $2,7 \text{ g/cm}^3$  y un punto de fusión de  $660 \text{ °C}$  que lo convierte en un excelente material para procesos de fusión y moldeo.

Con una estructura cristalina FCC, las aleaciones de aluminio se caracterizan y aprecian por su excelente ductilidad (incluso en frío) y también por ser buenas conductoras del calor y de la electricidad. Las propiedades mecánicas del aluminio son más bien modestas, pero pueden mejorarse por adición de elementos de aleación que dan origen a soluciones sólidas susceptibles de admitir temple e incrementar notablemente su dureza y resistencia.

El aluminio está muy difundido en la naturaleza, hallándose en las rocas, en forma de silicatos, óxidos o hidróxidos. Pese a su abundancia, su obtención no es sencilla y requiere de procesos complejos que estabilicen el metal puro. Éste fue el principal motivo de que su desarrollo se postergara hasta finales

del siglo XIX, cuando se implantó la obtención de lingotes de aluminio por fusión electrolítica en volúmenes industriales.

La formación de una película de óxido superficial que dificulta posteriores ataques por parte del medio, ha convertido las aleaciones de aluminio en el máximo exponente de materiales resistentes a la corrosión, aunque ha supuesto un inconveniente importante en los procesos de soldadura.

Dentro de las aleaciones de aluminio, destacan las de *aluminio-cobre*, que resultan de interés práctico cuando el contenido en cobre se limita a valores que no superen el 10%, dado que, por encima de esta proporción, el material resulta demasiado duro y frágil. El motivo de este comportamiento es la formación de precipitados de un compuesto intermetálico, de estequiometría  $\text{CuAl}_2$ , de gran dureza, responsables del incremento en la dureza y en la fragilidad de las aleaciones.

El diagrama de equilibrio de las aleaciones Al-Cu, para las composiciones más habituales (zona sombreada en la figura 4.25), revela la existencia de tres zonas:

- Fase  $\alpha$  (solución sólida alfa, Al-Cu)
- Líquido +  $\alpha$
- $\alpha + \text{CuAl}_2$  (indicado como fase  $\theta$  en el diagrama)

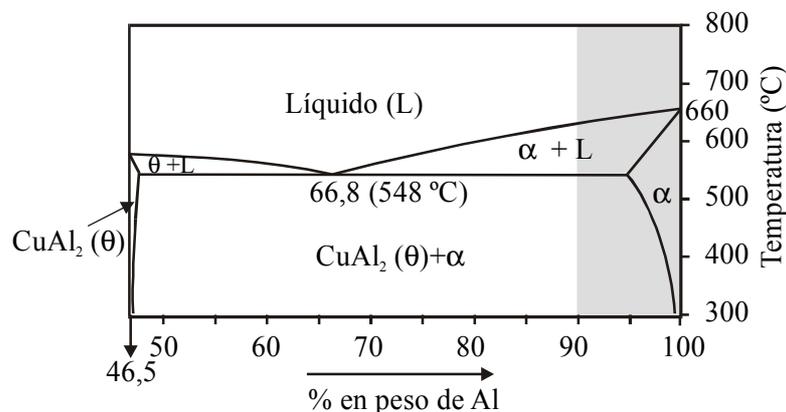


Fig. 4.25 Zona del diagrama Cu-Al correspondiente a las aleaciones más comunes.

Las aleaciones de *aluminio-silicio* y las de *aluminio-magnesio-silicio* son otro gran grupo de aleaciones industriales con base de aluminio. La solubilidad del silicio (Si) en el aluminio aumenta con la temperatura, pero alcanza un valor máximo del 1,95% a una temperatura de 577 °C.

El estudio de las aleaciones ternarias aluminio-magnesio-silicio se realiza, generalmente, basándose en el diagrama de la aleación pseudobinaria Al+Mg<sub>2</sub>Si (Fig. 4.26). Por debajo de la línea de sólido, que va desde el punto de fusión del aluminio hasta el punto B, a 595 °C y 1,65% de Mg<sub>2</sub>Si, se tiene una solución sólida del compuesto Mg<sub>2</sub>Si en aluminio (fase  $\beta$ ). El dominio de estabilidad de la fase  $\beta$  en el sistema Al-Mg<sub>2</sub>Si se localiza en la zona sombreada y el interés de esta solución sólida radica en que es bastante homogénea como para que sea posible su conformado por mecanización. La limitación de estas aleaciones se halla en la separación del compuesto Mg<sub>2</sub>Si de la matriz, ya que su dispersión conduce a un producto final muy duro y muy frágil, dificultando cualquier operación de conformado. Para evitar esta separación, el enfriamiento desde el líquido ha de realizarse muy rápidamente.

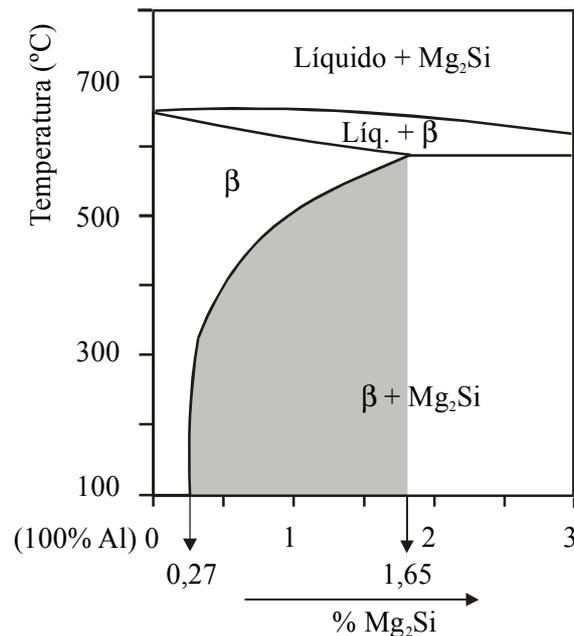


Fig. 4.26 Diagrama de equilibrio pseudobinario Al-Mg<sub>2</sub>Si.

Los criterios de denominación aplicados en la clasificación de las aleaciones comerciales de aluminio corresponden a las normas AA (*Aluminium Association*), ya que son las de uso más común y extendido en el mundo. Según estas normas, las aleaciones de aluminio se indican mediante un código de cuatro cifras, **XYZZ**, donde **X** es un valor numérico que representa el tipo genérico de aleación, según:

- 1- Aluminio puro
- 2- Aluminio-Cobre
- 3- Aluminio-Manganeso
- 4- Aluminio-Silicio
- 5- Aluminio-Magnesio
- 6- Aluminio-Magnesio-Silicio
- 7- Aluminio-Zinc
- 8- Otras aleaciones

El segundo dígito (**Y**) indica cualquier variación sobre la composición original, a la que se le asigna el valor 0. Los dos últimos dígitos (**ZZ**) sirven para distinguir el porcentaje de aluminio superior al 99% en el caso de las series 1, o bien para identificar la aleación en el resto de series. Así, por ejemplo, una aleación 1050 corresponde a una aleación de aluminio puro con un 99,5% de Al.

#### 4.4.3 Aleaciones de magnesio

El magnesio es el más ligero de los metales de aplicación estructural, con una densidad de 1,74 g/cm<sup>3</sup>. La temperatura de fusión es intermedia entre las aleaciones de aluminio y las de hierro (1.200 °C), con lo cual la fusión y el moldeo constituyen una de las mejores opciones de conformado para las aleaciones de magnesio. Su estructura cristalina es HCP, y de ahí se deriva una ductilidad muy moderada, aunque permite su conformado por forja. Con un módulo elástico de 45000 MPa, su rigidez es una de las limitaciones para determinadas aplicaciones, si bien la inestabilidad química de estas

aleaciones es su principal inconveniente. Su oxidación es rápida y exotérmica, tanto más acusada cuanto mayor sea la superficie de metal en contacto con la atmósfera, de manera que las virutas de mecanizado y el magnesio pulverulento presentan una oxidación muy violenta, con riesgo de explosión. Si bien se puede encontrar en la naturaleza, en forma de minerales (silicatos, carbonatos, etc.), su extracción se realiza mayoritariamente por electrolisis del  $MgCl_2$  del agua de mar.

Mecánicamente, su respuesta es muy pobre, pero puede alearse y tratarse térmicamente hasta alcanzar valores de resistencia comparables a los de algunas aleaciones de aluminio. La resistencia específica (cociente resistencia-peso), sin embargo, es muy superior a la de los aceros, con lo cual se pueden utilizar estructuras muy voluminosas, que soportarán cargas importantes, manteniendo un peso del conjunto muy por debajo del equivalente a un componente de acero. Sus principales aplicaciones se localizan en el sector de la aeronáutica (rotores de helicópteros) en la fabricación de proyectiles y en algunos componentes de automoción.

#### 4.4.4 Aleaciones de níquel

El níquel es un elemento químicamente muy similar al hierro, ya que es magnético y presenta un módulo de elasticidad similar, pero es notablemente más resistente a la oxidación-corrosión y presenta una resistencia mecánica a temperaturas elevadas también muy superior, de ahí que algunas aleaciones de níquel reciban el nombre de superaleaciones. Además de las aplicaciones que pueda tener el níquel como material metálico *per se*, caben destacar otras dos: como *elemento de aleación* en los aceros inoxidables y como *recubrimiento* sobre sustratos de otros metales.

Como se ha indicado en el apartado de aleaciones de cobre, una de las principales aplicaciones del níquel es la de constituyente mayoritario del *Monel* (65% Ni – 28% Cu – 7% Fe, aproximadamente) que es la aleación utilizada para elaborar monedas de curso legal. Este tipo de aleaciones tiene gran estabilidad química y una resistencia mecánica notable, lo cual permite también su aplicación en componentes de bombas y válvulas que hayan de trabajar en entornos ácidos o sulfurosos.

#### 4.4.5 Aleaciones de titanio

Como elemento, el titanio (Ti) se halla en la naturaleza formando parte de un 1% de la corteza terrestre, porcentaje nada despreciable si se compara con el aluminio, que constituye un 8% de esta corteza y es el elemento más abundante. No ha sido, pues, la escasez de titanio lo que ha frenado la explotación de este metal paralelamente a la de las aleaciones de cobre o de aluminio. La utilización del titanio y de sus aleaciones se ha incrementado sustancialmente en las últimas décadas, ya que una de sus principales aplicaciones se halla en el sector de la industria aeroespacial, gracias a su baja densidad ( $4,5 \text{ g/cm}^3$ ) y a sus excelentes propiedades mecánicas específicas.

Entre sus cualidades, cabe destacar un coeficiente de dilatación térmica muy bajo, si se compara con el de otras aleaciones metálicas de aplicación industrial, y es más rígido y resistente que el aluminio y el magnesio, incluso a temperaturas elevadas. También destaca por la formación de una película de óxido superficial, que lo hace muy resistente al ataque de agentes agresivos. Todo ello lo convierte en un material muy adecuado para la elaboración de componentes resistentes a la corrosión ambiental y en entornos agresivos (industria química, petroquímica, prótesis e implantes) y para aplicaciones en que se requiera gran resistencia a temperaturas de hasta  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  (componentes de aviones y proyectiles). Sin embargo, la principal limitación de estas aleaciones es su reactividad química a temperaturas elevadas con otros elementos que se hallen presentes en solución sólida, lo que obliga a extremar las condiciones de pureza durante su elaboración. Sus aleaciones presentan contenidos variables de

aluminio, vanadio, manganeso y estaño, siendo la aleación más extendida y conocida la denominada Ti-6Al-4V (6% de Al y 4% de V).

Si bien los valores de las principales propiedades mecánicas (resistencia, dureza, tenacidad) de las aleaciones no férricas suelen hallarse en inferioridad frente a esos mismos valores, pero pertenecientes a aleaciones férricas, es cada vez más frecuente la fabricación de componentes estructurales en el sector de la automoción elaborados con aleaciones de aluminio. El motivo de este cambio radica en que la densidad del aluminio es casi una tercera parte de la del acero, pero no es tres veces menos resistente, de manera que, si se compara una sección determinada de acero con una mayor de aluminio, la segunda puede llegar a soportar cargas superiores, ya que el esfuerzo soportado (cociente entre la carga y la superficie) será menor. Una propiedad mecánica dividida por la densidad del material se conoce como propiedad específica.

En la tabla 4.2 se recogen las propiedades mecánicas más relevantes de algunas aleaciones no férricas comparadas con los correspondientes valores para algunas férricas, indicando los valores de las propiedades específicas a fin de establecer comparaciones.

Tabla 4.2 Propiedades mecánicas y específicas de algunas aleaciones férricas y no férricas.

<i>Aleación</i>	<i>Denominación</i>	<i>Resistencia a tracción (MPa)</i>	<i>Alargamiento (%)</i>	<i>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Resistencia específica</i>
<i>Acero al carbono</i>	<i>F-1110</i>	300	47	7,80	39
	<i>F-1140</i>	520	20		67
	<i>F-1150</i>	900	16		115
<i>Aceros aleados</i>	<i>F-1230</i>	700	16		90
	<i>F-1252</i>	900	28		<b>115</b>
<i>Aceros inoxidables</i>	<i>F-3517</i>	620	40		80
	<i>F-3534</i>	515	40		66
	<i>F-3113</i>	415	20		55
	<i>F-3411</i>	490	20		63
<i>Aluminio</i>	<i>1050-O</i>	75	39		2,70
	<i>1050-H1</i>	160	7	60	
	<i>2024-T3</i>	490	18	<b>181</b>	
	<i>3003-H3</i>	260	7	96	
	<i>6063-T4</i>	172	20	64	
<i>Cobre</i>	<i>C11000</i>	220	45	8,96	25
	<i>C26000</i>	300	68		35
	<i>C51000</i>	380	70		45
<i>Magnesio</i>	<i>AZ10A</i>	240	10	1,74	138
	<i>HN31A</i>	285	10		<b>164</b>
<i>Níquel</i>	<i>270</i>	345	50	8,90	40
	<i>600</i>	655	40		75
<i>Titanio</i>	<i>R50250 (99,8% Ti)</i>	240	24	4,50	55
	<i>R56400 (Ti6Al4V)</i>	1000	12		<b>220</b>

## 4.5 Métodos de conformado de materiales metálicos

Los principales procesos de conformado de metales y aleaciones metálicas se pueden agrupar en dos grandes bloques, dependiendo de que el material de partida sea *líquido* o bien *sólido*. Sin embargo, en este último caso, el sólido puede hallarse en forma continua, generalmente una *preforma sólida* a la que se proporcionan las dimensiones finales requeridas, o bien discontinua, que son aquellos procesos en los que la materia de partida es *polvo metálico*. Basándose en estos criterios se consideran los principales procesos de conformado que se describen a continuación.

### 4.5.1 Fusión y moldeo

El proceso para producir piezas u objetos útiles con metales u otros materiales en estado líquido se conoce como proceso de *fundición* o de *fusión y moldeo*. Consiste en vaciar el material fundido dentro de un recipiente (molde), con la forma del componente que se desea fabricar, y esperar a que solidifique durante el enfriamiento.

Entre las ventajas de esta técnica cabe destacar que permite elaborar elementos con perfiles más complejos que los que podrían obtenerse por conformado de sólidos. Además, los productos finales son mucho más económicos. También puede considerarse una ventaja que las microestructuras de fusión y moldeo sean homogéneas (no orientadas), aunque ello implique unas propiedades mecánicas moderadas. En ocasiones, esta técnica es la única que permite obtener componentes muy voluminosos. Sin embargo, se han de tener también presentes las limitaciones, y la más importante es la temperatura que pueda necesitarse para desarrollar el proceso. Así, supone una complicación importante la elaboración de componentes de metales cuya temperatura de fusión supere los 1,600 °C, ya que, además de la energía necesaria para fundir y mantener el caldo líquido, el material de los moldes es también muy restringido en estas condiciones.

Un aspecto que puede conducir a desestimar este proceso es que las aleaciones que quieran fundirse presenten una separación muy grande entre las curvas de *sólidus* y *líquidus* de sus diagramas de equilibrio. En estos casos, el rango de temperatura en que coexisten sólido y líquido es grande y se favorecen estructuras con distribución heterogénea de átomos constituyentes, denominadas de *piel abierta*, cuyas propiedades mecánicas son muy inferiores a las que hubieran correspondido a una composición similar, pero con una distribución homogénea de sus átomos de aleación (*piel cerrada*). Para obtener una microestructura de piel cerrada, es necesario que los diagramas presenten separaciones moderadas entre las curvas de *líquidus* y *sólidus* (Fig. 4.27).

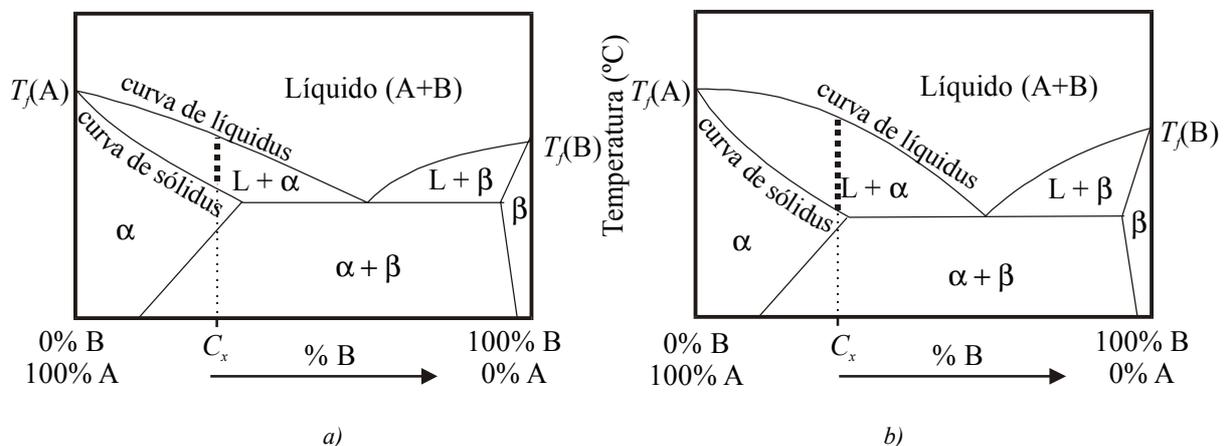


Fig. 4.27 Diagramas de equilibrio de aleaciones que conducen a estructuras a) de piel cerrada, b) de piel abierta.

Así, en los bronce es común la formación de estructuras de piel abierta, lo que encarece mucho su proceso por fusión y moldeo, ya que se requieren diseños de sistemas de colada más precisos. Por el contrario, los latones tienen diagramas en los que las curvas de *sólidus* y *líquidus* están próximas, con lo cual las estructuras que se obtienen son de piel cerrada y no se han de diseñar sistemas especiales, abaratándose el coste del proceso.

Otra limitación inherente a los procesos de fusión y moldeo es la posibilidad de que queden gases ocluidos en el líquido, ya que, tras la solidificación, pueden generar poros. El control dimensional de los componentes obtenidos por fusión y moldeo es muy limitado, ya que la contracción del metal líquido puede ser considerable durante la solidificación. Por último, también es conveniente considerar que el acabado superficial de los componentes obtenidos por esta técnica suele ser deficiente, tanto más cuanto mayor sea el grado de deterioro del molde.

Aunque el concepto parece sencillo, en la práctica la producción industrial de piezas fundidas es un proceso sumamente complejo que generalmente exige las siguientes actividades:

- Diseño de los modelos del componente y de sus partes internas
- Diseño del molde a partir del modelo
- Preparación de los materiales para los modelos y el molde
- Fabricación de los modelos y los moldes
- Colado del material fundido
- Enfriamiento de los moldes
- Extracción de las piezas fundidas
- Recuperación de los materiales de los moldes

Los moldes pueden fabricarse a partir de diferentes materiales, tales como arena, yeso o determinadas aleaciones metálicas. En ocasiones, principalmente si están elaborados con materiales no metálicos, los moldes permiten un solo uso. La fundición en moldes permanentes (moldes metálicos) es un proceso ideal para producciones masivas de piezas de tamaño medio o pequeño, y queda limitado a metales de punto de fusión bajo.

Una primera etapa de este proceso es la preparación del metal líquido o *caldo*, que requiere de un cálculo preciso de la cantidad de energía necesaria para conseguir la fusión total del metal y, además, que todo el volumen líquido alcance la temperatura adecuada de vaciado, ya que, cuanto mayor sea la temperatura, menor será la viscosidad y tanto más sencilla será la distribución del líquido en el molde. Cuando el metal ha alcanzado la temperatura de vaciado, se realiza el *vertido del líquido en el molde* y, a partir de ahí, se inicia el enfriamiento del líquido hasta la temperatura de inicio de solidificación.

La velocidad de enfriamiento influirá en gran medida en el tipo de microestructura final, de manera que una velocidad muy elevada favorecerá una estructura de grano fino y una solidificación lenta proporcionará estructuras groseras, lo cual determinará algunas de las características del metal una vez solidificado (ver apartado 2.3.3). El vertido del metal líquido en el molde viene condicionado por la diferencia de temperaturas entre el líquido y el molde, la velocidad del metal líquido (tanto en el momento del contacto metal-molde como durante la distribución del fluido dentro de la cavidad) y la aparición de turbulencias durante el proceso de llenado.

La velocidad de vaciado que se ha de considerar es la velocidad volumétrica,  $Q$ :

$$Q = v \cdot A \quad (4.3)$$

donde  $v$  es la velocidad lineal del fluido y  $A$  la sección que atraviese en cada momento, de manera que, cuanto menor sea la sección de la zona que se esté llenando, más rápido irá el líquido, y viceversa.

Si la velocidad de vaciado es baja, el metal se va enfriando a medida que invade la cavidad y, por tanto, se incrementa su viscosidad, de manera que podría darse el caso de que no acabase de llenar completamente el molde y se obtendría un componente defectuoso. Por el contrario, una velocidad de llenado excesiva puede producir turbulencias y el flujo no sería laminar.

Si se mantiene el caudal constante, el líquido transcurre dentro de una vaina de óxido (Fig. 4.28a), pero si es tumultuoso, se originan turbulencias que favorecen la formación de óxidos y la proyección de partículas (pequeños volúmenes de metal solidificado), con lo cual se favorece una solidificación irregular y con impurezas, así como una mayor degradación del molde por erosión (Fig. 4.28b).

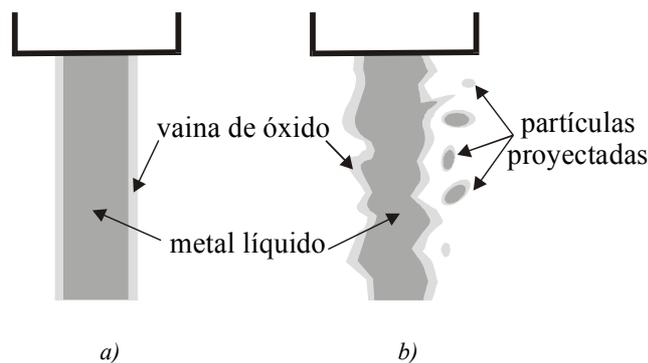


Fig. 4.28 Modelo de vertido de metal líquido a) laminar; b) con turbulencias, que provocan la proyección de gotas de líquido enfriado y de óxido.

Desde el momento en que se inicie el enfriamiento del caldo metálico (líquido) hasta que finalice la solidificación, se ha de tener presente que el volumen de material variará notablemente, ya que prácticamente todos los metales sufren contracciones más o menos importantes desde la temperatura de vaciado hasta la temperatura final del sólido. La contracción total del proceso de solidificación se produce en tres etapas:

- El líquido, durante su enfriamiento desde la temperatura de vaciado hasta la de inicio de solidificación (*liquidus*), presenta una primera contracción que puede ser del orden del 0,5 % del volumen total (Fig. 4.29a).
- Una vez se ha alcanzado la temperatura de *liquidus*, se inicia el proceso de solidificación propiamente dicho, que no finalizará hasta que el sistema alcance la temperatura de *sólidus*. Durante esta transición líquido → sólido de nuevo se produce una contracción, la más importante de todo el proceso (Fig. 4.29b).
- Cuando el metal se halle totalmente sólido, su temperatura disminuirá desde la de *sólidus* hasta la temperatura final del proceso (ambiente o no), y en esta última etapa de nuevo tendrá lugar una contracción, más o menos importante en función del material (Fig. 4.29c-d).

La contracción que se produce durante el cambio de estado líquido → sólido es la que puede conducir a la formación de cavidades internas, ya que puede producirse solidificación del material próximo a las paredes del molde, mientras que un volumen importante de líquido, aún en el interior, se contraerá cuando solidifique (Fig. 4.29c). Esta cavidad interna se denomina *rechupe* (Fig. 4.29d) y es un defecto que ha de evitarse. Para ello, es preciso diseñar el sistema de vaciado de manera que se minimicen los grandes volúmenes aislados, o bien se consiga realimentar esas zonas a fin de compensar las

contracciones. Los rechupes serán más importantes cuanto mayor sea el volumen de metal a solidificar. Las mazarotas son volúmenes adicionales en los que se puede almacenar líquido durante el proceso de solidificación del componente, dispuestos en lugares estratégicos de la cavidad, cuya función es la de asegurar una correcta alimentación de líquido, de manera que se compense el volumen de la contracción y se evite la aparición de rechupes. Un sistema de mazarotaje correcto asegura una pieza “sana”, sin rechupes.

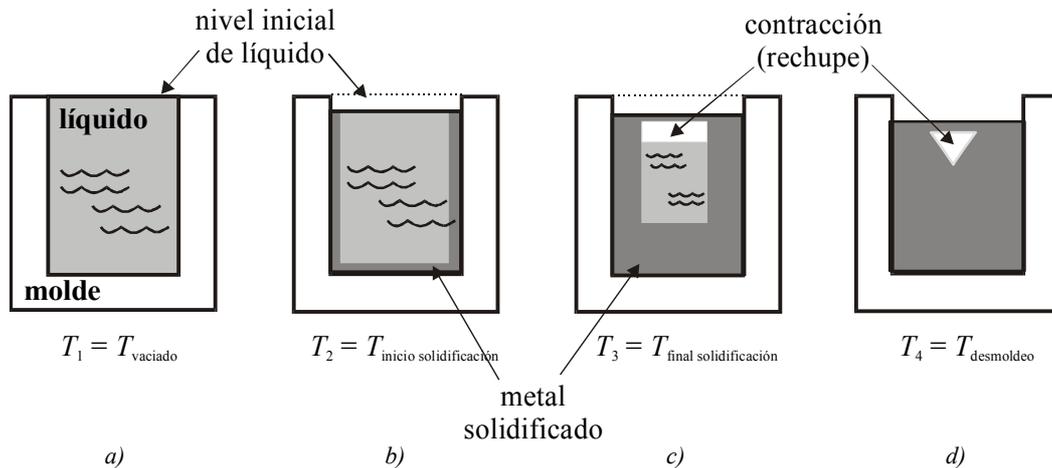


Fig. 4.29 Contracción durante la solidificación de un metal: a) vertido del líquido en el molde; b) contracción del líquido; c) contracción por cambio de estado líquido  $\rightarrow$  sólido; d) contracción del sólido.

El metal líquido se vierte en un espacio vacío en el que se producirá la solidificación, reproduciéndose sus dimensiones (molde). Si el componente que se está elaborando por fusión y moldeo presenta diferencias de sección importantes entre dos partes, se ha de tener presente que el tiempo de solidificación, incluso para un mismo metal, viene determinado por el volumen del cuerpo ( $V$ ), pero también por la superficie de contacto entre éste y el molde ( $S$ ). La regla de Chvorinov permite determinar el tiempo total de solidificación de un sólido (TST, *Total Solidification Time*) de volumen  $V$  y superficie  $S$  según

$$\text{TST} = C_m \cdot \left( \frac{V}{S} \right)^n \quad (4.4)$$

Los parámetros  $C_m$  y  $n$  son característicos para cada tipo de molde utilizado junto con la aleación metálica que ha de solidificar.

Para calcular el tiempo total de solidificación de un componente se puede considerar que éste se comportará como varias partes, de geometría tan sencilla como sea posible, y que las partes ya sólidas, al contraer, “tirarán” de las zonas que aún conserven una parte líquida. Esto obliga a considerar la existencia de *refuerzos* en los cambios bruscos de sección de las cavidades, a fin de evitar distorsiones en el producto final solidificado. En la figura 4.30 se representa un cuerpo con tres módulos (1, 2 y 3) para el cual  $\text{TST}_2 \gg \text{TST}_1$  y  $\text{TST}_2 \gg \text{TST}_3$ . La diferencia entre el tiempo de solidificación del módulo 2 y los adyacentes puede provocar una distorsión en el componente final una vez solidificado, ya que los módulos 1 y 3 estarán totalmente sólidos, mientras que en el módulo 2 aún quedará un volumen importante de metal líquido. En este caso, la colocación de un refuerzo como el que se indica en la figura 4.30 evitará que la contracción asociada a la solidificación del módulo 2 desplace los dos módulos vecinos, alterando las dimensiones finales. Una vez finalizado el proceso de solidificación, el refuerzo puede eliminarse por rectificad.

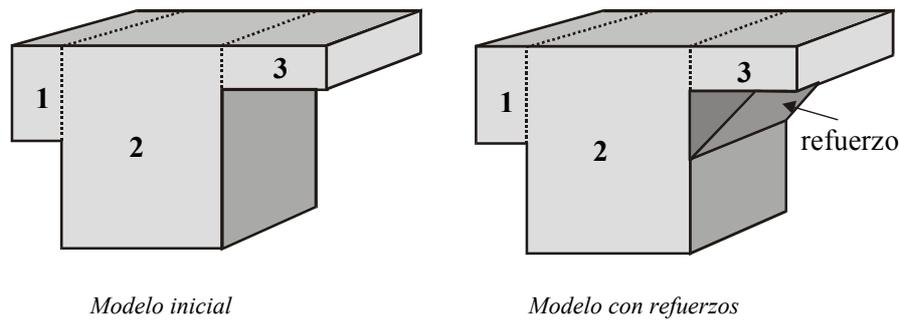


Fig. 4.30 a) Componente con tres módulos ( $TST_2 > TST_1 > TST_3$ );  
b) Componente anterior al que se ha añadido un refuerzo entre los módulos 2 y 3.

Las contracciones de volumen del metal líquido dependerán del tipo de aleación a conformar, y pueden variar mucho entre una u otra. Así, las fundiciones grises de alto carbono son las aleaciones metálicas que menor contracción volumétrica presentan, prácticamente inexistente, frente al 3 % de las fundiciones grises de bajo carbono, el 5 % de las aleaciones de cobre, o el 7 % correspondiente a las aleaciones de aluminio, que presentan el valor más elevado de contracción.

Una vez conocidas las dimensiones necesarias de la cavidad, se elabora el *molde*, de arena, de yeso o de metal, que es el recipiente que contiene la cavidad más el sistema de alimentación (bebedero, canal de colada, mazarotas, etc.) y en el que se vierte el metal líquido. Hay numerosos tipos de moldes para conformar aleaciones metálicas, si bien una clasificación sencilla sería agruparlos en función de si son abiertos o cerrados, o bien si son moldes permanentes o de un solo uso.

Un *molde abierto* es aquel en que el metal se vierte directamente en la cavidad hasta que ésta se llena totalmente. No precisan de sistemas de llenado ni de mazarotas, pero únicamente se pueden utilizar en caso de que el componente sea sencillo. En un *molde cerrado*, el metal se vierte por una vía de paso (sistema de colada) que permita un flujo laminar, sin turbulencias. Es necesario tener presente que, en un molde abierto, la superficie de metal en contacto con el aire (que presentará una oxidación más o menos importante) será mayor que en el caso de que el molde sea cerrado, si bien entonces el modelo será mucho más complejo, ya que deberá incluir mazarotas y sistemas de colada.

Dentro de los moldes de un solo uso, destacan los *moldes de arena* que constan de dos o más partes (*cajas*) y que tienen una parte de cavidad (realizada por compactación de la arena con aglutinante alrededor del modelo correspondiente) en la que se verterá el metal líquido mediante la vía de paso. Cuando el metal fundido entra en el molde de arena, disipa su exceso de calor a través de las paredes del molde muy lentamente, dado que la arena no es buena conductora. El aglutinante es un aditivo, generalmente orgánico, que facilita la cohesión de la arena durante la fabricación del molde. El calor que disipa el metal líquido calienta la arena y descompone el aglutinante, generándose vapor de agua y  $CO_2$  mayoritariamente. Estos vapores, junto con el aire que se hallaba en la cavidad en el momento de introducir el metal líquido, se evacúan gracias a la permeabilidad del molde de arena.

Como se ha indicado, en el caso de los moldes de arena, la cavidad se elabora a partir de un modelo que se ha de extraer una vez compactada la arena. Es, pues, necesario considerar que, si las paredes del modelo son rectas, como la situación indicada en el esquema de la izquierda de la figura 4.31, su extracción será muy complicada por la succión que se originará al no poder entrar aire en la cavidad que dejará el modelo. Para evitar este inconveniente se considera un *ángulo de extracción* ( $\alpha$ ) que dependerá de la altura de la pieza y que puede llegar a ser del 10% (Fig. 4.31).

Para componentes cuya altura ( $h$ ) es inferior a 200 mm,  $\alpha$  se determina según

$$\alpha = 0.5 + \frac{h(\text{mm})}{100} \quad (4.5)$$

mientras que, si la altura esté entre 200 y 500 mm, se utiliza la expresión siguiente:

$$\alpha = 0.5 + \frac{h(\text{mm})}{150} \quad (4.6)$$

y, en el caso de que la altura supere los 500 mm, el valor de  $\alpha$  se obtiene a partir de

$$\alpha = 1.0 + \frac{h(\text{mm})}{200} \quad (4.7)$$

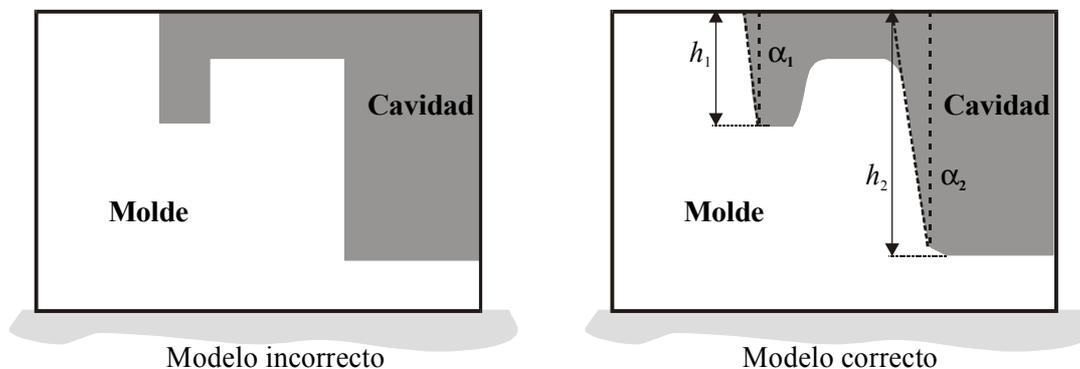


Fig. 4.31 Sobredimensionado de un modelo correspondiente al ángulo de extracción.

Así pues, la cavidad diseñada ha de reproducir las dimensiones del componente sólido que se desea obtener, de manera que será necesario tener en cuenta el sobredimensionado necesario para obtener un producto final “sano”, es decir, en el que se hayan compensado las contracciones de volumen del metal líquido por solidificación y enfriamiento, que contenga los volúmenes extra que sean necesarios (refuerzos, bebederos, mazarotas) y en el que se haya considerado el margen de los ángulos de desmoldeo.

Un defecto común en los moldes de arena es el que provoca una compactación insuficiente de la arena, ya que, en estos casos, el metal puede recalcar las paredes inferiores del molde, obteniéndose componentes que no poseen las dimensiones requeridas. También se observa en ocasiones una penetración del metal dentro del molde, por capilaridad, lo que proporcionará componentes finales con acabados irregulares. En ocasiones, las vías de salida de gases se obstruyen y el metal retiene aire (porosidades o microcavidades). Este último tipo de defectos es muy común en componentes de cobre obtenidos por fusión y moldeo, ya que estas aleaciones adolecen de la gran capacidad del metal líquido para absorber y disolver cantidades apreciables de gases que, durante la solidificación, quedan atrapados en la masa metálica, formando unas cavidades denominadas *sopladuras*.

Otros tipos de moldes de un solo uso, además de los de arena, serían los *moldes de yeso*, que suelen utilizarse para componentes muy pequeños y en los que se requiere gran precisión dimensional, como, por ejemplo, en la elaboración de ortodoncias. En ocasiones, los moldes de yeso se utilizan en procesos de *moldeo a la cera perdida*, técnica tan antigua que se remonta al Egipto faraónico y que se utiliza habitualmente en joyería. Consiste en la creación de un *modelo en cera* de la pieza a reproducir,

que se recubre con un material cerámico (yeso o similar); a continuación el conjunto (modelo-cerámico) se introduce en un horno, con lo cual el material de recubrimiento se endurece y la cera se derrite. Como resultado, se obtiene una cavidad que reproduce a la perfección las dimensiones del original, y puede utilizarse una sola vez o, en determinados casos, para obtener un número limitado de piezas.

Los moldes permanentes pueden ser cerámicos o metálicos (coquillas). El caso más representativo lo constituyen los moldes de acero, destinados a la obtención de componentes metálicos no férricos, con puntos de fusión inferiores a 1200 °C. Estos moldes disipan muy rápidamente el calor, con lo que la velocidad de solidificación y de enfriamiento es muy rápida, pudiéndose acelerar mediante un sistema de refrigeración de las paredes del molde. Si se consigue un enfriamiento rápido, los moldes no “sufren” y no se alteran sus dimensiones, con lo cual se prolonga el período de uso. A fin de disminuir el tiempo de contacto metal-molde, se puede acelerar la entrada de líquido inyectándolo a presión, con lo cual el proceso se acorta notablemente. El moldeo por inyección está especialmente indicado para grandes producciones en serie de componentes de volumen moderado o pequeño. En la figura 4.32 se muestra una cámara fría horizontal que se utiliza para la elaboración de componentes metálicos no férricos por inyección. La longitud real de un equipo de este tipo supera los 10 metros.



Fig. 4.32 Cámara fría horizontal para fundición a presión de aleaciones no férricas.

Los moldes metálicos también pueden proporcionar componentes defectuosos, si bien las causas que los originan serán de naturaleza distinta. El principal tipo de defectos es la *solidificación prematura* del metal, sea por tiempo de llenado excesivo o por una excesiva evacuación de calor a través de las paredes. Si se alarga el tiempo de llenado, puede suceder que la cavidad no se llene completamente porque el metal haya solidificado en un punto intermedio entre la entrada y el final de la cavidad. Otro defecto muy común es el de *junta fría*, que se produce en la elaboración de componentes huecos, ya que es preciso introducir un *corazón* en la cavidad que evite que el líquido ocupe ese espacio para que, al extraer el corazón, se pueda obtener un hueco. Este tipo de componentes favorece la formación de dos frentes de avance del metal líquido, uno por cada lado del corazón, que pueden haberse solidificado parcialmente al tocarse, lo que impediría la mezcla. Otro tipo de defectos, muy común en componentes obtenidos por fusión y moldeo en moldes permanentes, es la existencia de *cavidades por contracción* debido a un diseño de evacuación de gases insuficiente. El gas que se halla en la cavidad en el momento de introducir el caldo no puede salir completamente y se queda ocupando una parte. Si un componente presenta cambios de sección importantes entre dos zonas, pueden producirse *desgarramientos*, ya que la solidificación de un módulo induce tensiones que “tiran” de los módulos

ya sólidos. Si estas tensiones consiguen desplazar los módulos ya sólidos, el componente se deforma, pero en caso contrario aparecen fisuras en los puntos de máxima tensión (por ejemplo, en las zonas de contacto entre dos módulos).

Las aleaciones férricas que *mayoritariamente* se destinan a procesos de conformado por fusión y moldeo son las *fundiciones grises*, para la fabricación de bancadas de motores, máquinas, herramientas, bloques de cilindros, culatas, bañeras, estufas, rejas, etc. Su principal virtud es que prácticamente no presentan contracción, ya que el grafito se expande durante el proceso de solidificación del metal y contrarresta la contracción del hierro. Las fundiciones blancas, más duras, se utilizan para elaborar piezas que no hayan de mecanizarse posteriormente: matrices de embutición, ruedas de molino, cilindros de laminación, etc.

Los aceros adecuados para esta técnica (aceros de fundición) proporcionan componentes de hasta 200 Tm mucho más económicos que si se hubiesen elaborado por otros métodos. El nada despreciable coeficiente de contracción y la también elevada temperatura de colada, sumados a una colabilidad moderada, hacen que se precisen arenas muy refractarias para estos procesos. Considerando que los aceros en estado líquido son relativamente viscosos, se ha de procurar que los bebederos y canales de alimentación no sean estrechos, para favorecer la fluencia del metal.

De las aleaciones no férricas, los bronce y los latones son los materiales más habituales en procesos de fusión y moldeo, junto con el aluminio. En estas últimas, se ha de tener la precaución de evitar las turbulencias en la superficie para que no se rompa la capa de óxido. Las aleaciones de magnesio también son muy adecuadas para su conformado por fusión y moldeo, si bien se ha de evitar la más mínima presencia de humedad en los moldes, ya que el magnesio se combina muy rápidamente con el oxígeno, formándose hidrógeno como producto de la reacción, y se producen explosiones.

En la tabla 4.3 se indican las principales ventajas y los inconvenientes más representativos de los componentes metálicos elaborados por fusión y moldeo.

Tabla 4.3 Principales ventajas e inconvenientes a considerar para componentes obtenidos por técnicas de fusión y moldeo.

<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>
Si el componente a elaborar posee una forma muy compleja o un perfil muy complicado, es posible su conformado por fusión y moldeo, con o sin operaciones secundarias	Las propiedades mecánicas de los componentes realizados mediante esta técnica suelen ser moderados. Así, por ejemplo, es más resistente un componente elaborado por forja que el mismo componente obtenido por fusión y moldeo
Es la única técnica que permite conformar componentes muy voluminosos (por encima de 100 Tm)	La precisión dimensional es baja, debido a las contracciones propias de la solidificación y a la dificultad de controlar la porosidad
La microestructura de los componentes elaborados por fusión y moldeo es homogénea y no presenta orientaciones preferentes	El acabado de los componentes obtenidos por fusión y moldeo suele ser pobre, especialmente si el molde utilizado es de arena
Es un proceso más económico que otras técnicas habituales de conformado de componentes metálicos	El nivel de riesgo que se asume en este tipo de procesos es muy elevado
En principio, cualquier aleación metálica puede conformarse por fusión y moldeo	Si bien, en principio, cualquier aleación puede alcanzar el estado líquido, es complicado considerar esta técnica cuando la temperatura de fusión total supera los 1.600 °C
Es posible su adaptación a procesos masivos	

#### 4.5.2 Pulvimetalurgia

Ante la necesidad de conformar componentes de platino, cuyo punto de fusión supera los 1.700 °C, a principios del s. XIX Wollaston desarrolló el proceso del mismo nombre, mediante el cual consiguió elaborar componentes de Pt a partir de polvo de este metal, obtenido previamente por reducción química, compactado en un molde que reproducía las dimensiones del producto final y calentado hasta obtener un grado de cohesión elevado.

A partir de ahí, la técnica pulvimetalúrgica ha resultado sumamente útil para situaciones similares, como la elaboración de filamentos de wolframio para lámparas incandescentes, proceso que se remonta a principios del siglo XX. Más adelante se desarrolló la elaboración de herramientas de corte de metal duro (WC-Co), por combinación de carburos metálicos y polvo de metal, compactados y sinterizados. A partir de la década de 1960, la pulvimetalurgia deviene un proceso común para la elaboración masiva de componentes sinterizados destinados principalmente a la industria de la automoción.

Los procesos pulvimetalúrgicos han adquirido un interés creciente en las últimas décadas debido a sus aplicaciones industriales, dadas las ventajas que suponen los componentes así obtenidos frente a los elaborados por otras técnicas convencionales. Se caracterizan por partir de materia prima sólida en forma de *polvo* que se conforma por prensado o compactación, en frío o en caliente (*pieza en verde*), y que se somete a un proceso de cocción denominado *sinterización*. El calentamiento induce la unión de las partículas por difusión en estado sólido, de manera que se generan cuellos donde había intercaras (Fig. 4.33) sin que, en ningún momento del proceso, se alcancen las condiciones de fusión del material.

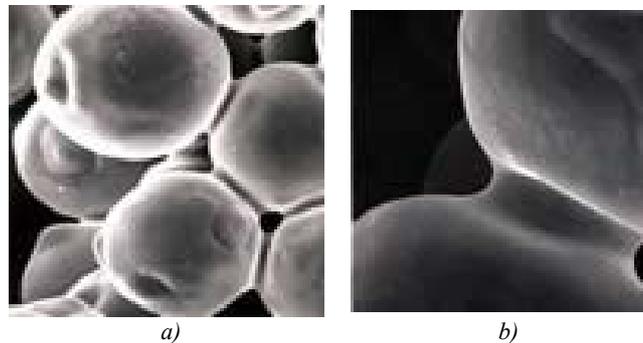


Fig. 4.33 a) Unión entre partículas de polvo tras un proceso de sinterizado y b) detalle de esta unión (cuello).

Los procesos de producción de los polvos metálicos constituyen una etapa de gran importancia que determinará la mayor parte de las características de los componentes finales. La técnica principal de obtención de materia prima para los procesos pulvimetalúrgicos es la *atomización*, especialmente indicada cuando el punto de fusión de las aleaciones no supera los 1.600 °C. Para ello se funde el metal en un horno de inducción al vacío y se hace pasar el líquido, a gran velocidad, por una boquilla, bien proyectándolo sobre una superficie en movimiento (atomización centrífuga), bien mezclándolo con un caudal de gas inerte o de agua a presión, que favorece la solidificación de pequeñas gotas.

La velocidad de atomización determinará las dimensiones y la morfología de las partículas obtenidas (Fig. 4.34) de manera que, cuanto mayor sea esta velocidad, más fino e irregular será el polvo. Si se hace pasar un flujo de aire o de agua, el líquido se atomiza en partículas aproximadamente esféricas que solidifican rápidamente. El resultado de los procesos de atomización es un sólido pulverulento de pureza muy elevada.

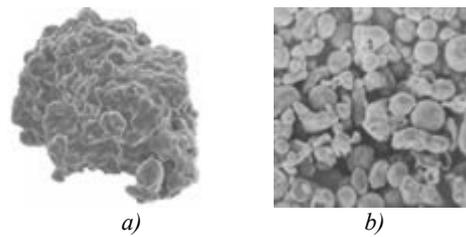


Fig. 4.34 a) Partícula de polvo metálico de morfología esponjosa;  
b) agrupación de partículas casi esféricas.

Cuando el metal presenta temperaturas de fusión muy elevadas, se encarece y dificulta el proceso anterior. En estos casos, los polvos metálicos se pueden obtener por *reducción química* de algún componente o sal metálica, generalmente con  $H_2$  o  $CO$ , o por electrolisis. Los procesos de reducción y de electrolisis son económicamente costosos, pero también proporcionan productos de gran pureza.

La *caracterización* de los polvos metálicos es muy necesaria, pues el *tamaño* de las partículas, su *distribución*, su *forma* y su capacidad de fluencia (*fricción*) determinarán su comportamiento durante el llenado de moldes y afectarán a las características de los componentes obtenidos. Para determinar la distribución de partículas por tamaño, el polvo metálico, bajo presión o con aire filtrado, se introduce en un sistema cerrado en el que unos filtros vibradores ayudan a separar la población de polvo por diámetros. Se recogen fracciones con distintos tamaños de diámetro equivalente (determinado por la luz de cada tamiz) y se puede limitar el diámetro máximo/mínimo de partícula deseada, eliminando los tamaños extremos.

La forma de las partículas de polvo se evalúa mediante un parámetro definido como *relación de aspecto* (RA), que es el valor del cociente entre las dimensiones máximas y mínimas de una partícula, de manera que una esfera poseerá una RA de una unidad, mientras que una partícula filiforme puede llegar a tener una RA de 4. La fricción entre partículas se determina haciendo pasar el polvo a través de una boquilla, de manera que se amontone por gravedad; la medida del ángulo final entre la pendiente del montón y la horizontal es el ángulo de fricción,  $\theta$  (Fig. 4.35).

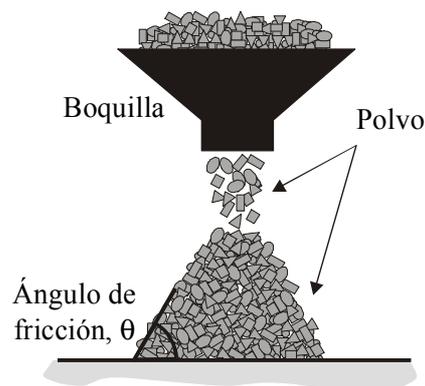


Fig. 4.35 Determinación del ángulo de fricción en una distribución determinada de polvos metálicos

Cuanto menor sea el valor de  $\theta$ , más fluido será el polvo y mejor se distribuirá en el molde, mientras que ángulos de fricción elevados indican un costoso deslizamiento de partículas entre ellas (fricción elevada). El ángulo de fricción depende de las características del polvo, de manera que

- las partículas pequeñas presentan una menor fricción que las partículas de diámetros equivalentes menores;
- las partículas esféricas ( $RA = 1$ ) poseen valores de  $\theta$  menores que las alargadas ( $RA > 1$ );
- una población heterogénea, con distintos tamaños de partícula, se repartirá mejor que una distribución homogénea.

Los polvos metálicos suelen mezclarse en tambores a fin de conseguir una distribución homogénea de partículas, evitando que las partículas mayores queden abajo y, por encima, las de menor tamaño. Si se han mezclado distintos tipos de polvo o bien si se han añadido aditivos (lubricantes o aglutinantes), la mezcla permite una correcta homogeneización de la composición deseada. El polvo que proviene de los tambores mezcladores, totalmente homogeneizado, se introduce en un recipiente, que reproduce la forma del componente que se desea elaborar (*molde*), y se somete a vibración a fin de conseguir una correcta distribución del polvo, maximizando la densidad de empaquetamiento. En este momento se puede determinar la *densidad aparente* del polvo, que dependerá en gran medida de sus características. Así, una distribución irregular de partículas favorece una densidad elevada, ya que los huecos son ocupados por partículas más pequeñas. De forma similar, cabe decir que, cuanto mayor sea el valor de RA menor será la densidad, ya que entre partículas de forma irregular se verá más favorecida la existencia de huecos que entre partículas esféricas.

Una vez completado el molde, la pieza en verde se obtiene por compactación simple, mediante una prensa mecánica o hidráulica, bajo cargas aplicadas que impliquen valores de tensión muy superiores a los de resistencia a fluencia del metal, para asegurar un buen compactado en verde por soldadura parcial en frío. En este momento, las partículas metálicas se mantienen unidas por la deformación plástica y la pieza posee dimensiones próximas a las del componente que se desea obtener, habiéndose reducido notablemente la cantidad de espacios vacíos (Fig. 4.36). Sin embargo, en estas condiciones la pieza es mucho más débil de lo que se espera para el componente final.

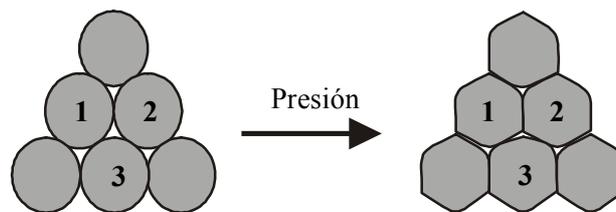


Fig. 4.36 Incremento de la superficie de contacto en partículas compactadas.

Una vez compactada la pieza en verde, suele realizarse una etapa de calentamiento posterior, a temperatura inferior a la de fusión del material, proceso que recibe el nombre de *sinterización* y que favorece la unión entre partículas por difusión en estado sólido. La consistencia se la proporciona la etapa de sinterización, realizada a una temperatura y en una atmósfera adecuadas. Los hornos de sinterizado generalmente constan de una primera cámara de precalentamiento en la que se queman los aditivos, una segunda cámara que es propiamente la de sinterización, y una última cámara de enfriamiento en la que las piezas alcanzan la temperatura adecuada para ser manipuladas. La temperatura de sinterizado dependerá de la temperatura de fusión del polvo, si bien suele estar entre un 70 y un 90 % de la temperatura de fusión (en K). En la tabla 4.4 se indican las temperaturas de este proceso para distintas aleaciones metálicas y los valores aproximados de tiempo de permanencia en la cámara de sinterización.

Tabla 4.4 Parámetros de sinterización para distintas aleaciones metálicas.

<i>Aleación</i>	<i>Temperatura de sinterización (°C)</i>	<i>Tiempo (minutos)</i>
<i>Acero</i>	900-1.100	30
<i>Acero inoxidable</i>	1.050-1.200	45
<i>Cobre</i>	850-870	25
<i>Latones</i>	850	25
<i>Bronces</i>	820	15
<i>Carburo de tungsteno (WC)</i>	1.480	> 60
<i>Wolframio</i>	2.300	480

Una vez concluido el proceso de sinterización, pueden realizarse diversos procesos de acabado y operaciones secundarias, como la mecanización o los tratamientos térmicos. Las características más atractivas de los procesos pulvimetalúrgicos se han recogido en la tabla 4.5, así como los principales inconvenientes de la técnica o de los componentes elaborados según este tipo de procesos.

Tabla 4.5 Principales ventajas e inconvenientes de los procesos de conformado pulvimetalúrgico.

<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>
Se consigue un importante ahorro energético, ya que nunca se alcanzan las condiciones de fusión del material	La forma de los componentes se limita a geometrías que puedan elaborarse mediante una matriz de compactación, ya que el polvo no fluye lateralmente
Se aprovecha prácticamente la totalidad de la materia prima (aproximadamente, el 97 % del polvo metálico se convierte en producto)	Los equipamientos necesarios son muy costosos y se requieren inversiones iniciales importantes, que tan sólo se amortizan con niveles de producción muy elevados
Es posible fabricar componentes metálicos porosos (cojinetes, filtros, engranajes) y con geometrías complejas	
Permite el conformado de materiales con puntos de fusión muy elevados, no adecuados para fusión y moldeo	La obtención y almacenaje de polvo metálico es un proceso costoso, que encarece notablemente los componentes pulvimetalúrgicos
Se alcanzan elevados niveles de producción, dado que la temperatura de proceso es inferior a la de fusión y, por tanto, el tiempo de enfriamiento de los componentes es mucho menor	Las dimensiones de las piezas obtenidas por esta técnica están limitadas y no suelen superarse secciones de 150 cm <sup>2</sup> ni alturas mayores a 80 mm
El excelente control dimensional ( $\pm 0,13$ mm) generalmente evita que deban realizarse operaciones posteriores de rectificado	Algunos metales presentan oxidaciones muy rápidas y exotérmicas, lo cual dificulta en gran manera su almacenaje (Al, Mg)
Es factible la obtención de aleaciones imposibles de procesar por fusión y moldeo (puntos de fusión de los constituyentes muy distintos), o bien con solubilidades superiores a las que indica el diagrama de equilibrio	Debido a la porosidad, la resistencia mecánica de los componentes pulvimetalúrgicos suele ser inferior a la de los componentes elaborados por fusión y moldeo
La porosidad existente implica una menor densidad en los componentes pulvimetalúrgicos y posibilita que puedan amortiguar vibraciones	Es posible que la compactación no sea igualmente eficaz entre dos regiones con espesores distintos, lo que obliga a realizar operaciones de recalado posteriores

Así, la técnica de conformado de polvos es recomendable para la producción masiva de componentes con buenas prestaciones y acabados excelentes (Fig. 4.37), siempre después de un estudio económico que justifique la rentabilidad, atendiendo a las ventajas e inconvenientes de este proceso. Las dos aleaciones que más habitualmente se utilizan en procesos pulvimetalúrgicos son las de cobre y las de hierro, aunque también es común la elaboración de componentes a base de polvos de níquel, plata, wolframio, aluminio y titanio.



Fig. 4.37 Aspecto de diversos componentes obtenidos por sinterización.

Entre las aplicaciones de los componentes así obtenidos, las más importantes son:

- Componentes mecánicos y estructurales
- Componentes de aceros refractarios
- Cojinetes autolubricantes de bronce o de acero
- Herramientas de corte a partir de carburos cementados o de metal duro
- Filtros para industria mecánica, química y textil
- Los componentes elaborados con aleaciones imposibles de procesar mediante otras técnicas

En ocasiones, se realizan operaciones posteriores a la etapa de sinterización, como el reprensado localizado (densificación), la introducción de lubricantes (impregnación), o el relleno de espacios entre partículas con algún metal de bajo punto de fusión (infiltración). Esta última operación proporciona compuestos no porosos y con propiedades mecánicas notables. En la tabla 4.6 se recogen las principales propiedades mecánicas de un acero pulvimetalúrgico, con diferentes grados de densidad, y se comparan con las que presenta un acero equivalente obtenido por fusión.

Tabla 4.6 Comparación de propiedades mecánicas para un mismo acero obtenido según distintas técnicas.

<i>Material</i>	<i>Límite elástico (MPa)</i>	<i>Alargamiento (%)</i>
Acero laminado en caliente	331	30
Acero sinterizado (16 % porosidad)	214	2
Acero sinterizado y reprensado (5 % porosidad)	283	25

Cabe señalar que existen otros procesos de conformado de polvos, además de la sinterización convencional, como serían:

- El *prensado isostático*, proceso en el que la presión se aplica en todas direcciones. Si se realiza en caliente (HIP, *Hot Isostatic Pressing*), el mismo calor del prensado permite la sinterización.
- El moldeo por *inyección de polvos* (MIP), en el que se forman *pellets* granulares con el polvo mezclado, que se calientan y se inyectan a presión en la cavidad. La presión de inyección permite adoptar la forma final y posteriormente se sinteriza el conjunto.
- El *laminado de polvos*, de forma semicontinua, que es un proceso de compactación de polvos en frío mediante dos rodillos que se encuentran a la salida de las tolvas que los contienen. La tira que se obtiene se vuelve a compactar con una segunda serie de rodillos y se sinteriza. Este proceso permite elaborar componentes largos y almacenar tiras compactadas en bobinas.
- La *extrusión de polvos*, en la cual la mezcla de polvos se coloca dentro de un recipiente en el que se hace el vacío para que la mezcla se proyecte sobre las paredes. En ocasiones, esta proyección de polvo se realiza mediante la acción de explosivos y, en cualquier caso, se obtienen componentes con grados de densificación muy elevados.
- La *sinterización en fase líquida* es adecuada para mezclas de polvos con puntos de fusión muy distintos. Durante la etapa de sinterizado en procesos de este tipo, uno de los componentes alcanza el punto de fusión, repartiéndose y “mojando” las partículas del otro constituyente y se obtienen productos no porosos (Fe-Cu, W-Cu, Cu-Co, etc.).

#### 4.5.3 Procesos de conformado por deformación plástica

El conformado de materiales metálicos por deformación plástica comprende todos aquellos procesos en los cuales, por acción de una tensión, se altera la forma del producto inicial (*preforma*) para convertirlo en otra preforma o bien en un componente final.

El nivel de esfuerzo que se precisa en todos estos procesos ha de ser lo bastante elevado para garantizar el régimen plástico del material, y los principales procesos de conformado requieren de esfuerzos de compresión, si bien en algún caso se deforma el material mediante esfuerzos de tracción o de flexión.

Las principales cualidades que se requieren en un metal para su conformado son la ductilidad y la baja resistencia a la fluencia, de manera que el nivel de esfuerzo que se requiera no sea excesivo. Una primera clasificación de los procesos de conformado permite distinguir dos grandes grupos:

- Procesos de *preconformado*, cuyo objetivo es conseguir una primera forma (preforma) a partir de un lingote solidificado (bruto de colada). En este grupo se incluirían los procesos de obtención de semielaborados.
- Procesos de *conformado con desplazamiento de material*, en los cuales se parte de una preforma a la cual se le proporcionan unas dimensiones distintas por deformación plástica, sin eliminar ninguna parte (forja, laminado, extrusión, etc.). En este grupo se puede distinguir entre *procesos volumétricos*, que son aquellos que afectan a componentes cuya relación área superficial/volumen es baja, y *procesos de chapa*, en los cuales la relación entre el área superficial y el volumen del componente es muy elevada.

A partir de la región no lineal de la curva esfuerzo/deformación de un metal, que corresponde a la zona de deformación plástica, pueden determinarse algunos parámetros esenciales para su conformado. Así, en la región plástica, la ecuación que relaciona el esfuerzo con la deformación es una expresión del tipo:

$$\sigma = k \cdot \epsilon^n \quad (4.8)$$

donde  $k$  es el coeficiente de resistencia y representa el valor de tensión para el cual la deformación plástica será del 100% ( $\epsilon = 1$ ) y el parámetro  $n$  se denomina coeficiente de endurecimiento por deformación. Un metal que no endurezca por deformación tendrá un valor de  $n = 0$ , correspondiente a un comportamiento *plástico ideal*, y cuanto mayor sea el valor de  $n$ , más “vertical” será el tramo curvo del gráfico  $\sigma/\epsilon$  (Fig. 4.38). Para las aleaciones metálicas que habitualmente se someten a procesos de conformado por deformación, los valores de  $n$  se encuentran entre 0,1 (aleaciones de aluminio) y 0,5 (cobre).

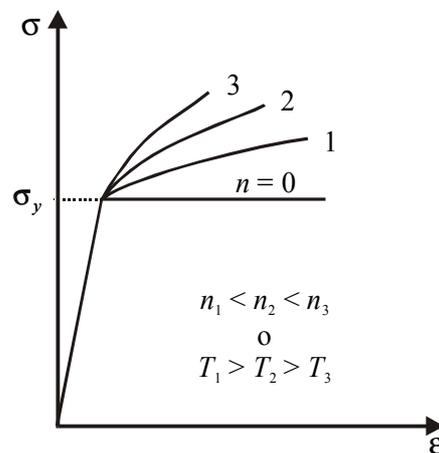


Fig. 4.38 Efecto del coeficiente de endurecimiento por deformación ( $n$ ) en la forma de la curva  $\sigma/\epsilon$  en metales.

La temperatura influye notablemente en la respuesta mecánica de los metales, ya que, cuanto mayor sea la temperatura de proceso, menor será el esfuerzo necesario para superar el límite de fluencia y mayor será la ductilidad, como se puede apreciar en las curvas de la figura 4.38, ya que disminuye el valor del coeficiente de endurecimiento por deformación.

Se distingue, en función de la temperatura de operación, entre procesos de *conformado en frío* o *en caliente*, dependiendo de que la temperatura de trabajo sea inferior o superior a la de recristalización, respectivamente, considerando que la temperatura de recristalización de un metal se halla próxima al 40 % de su temperatura de fusión (en K) y que depende de factores externos como, por ejemplo, el grado de trabajo en frío.

Para la mayoría de aleaciones de aplicación industrial, cuyas temperaturas de fusión superan los 800-900 °C, los procesos de conformado en frío se realizan a temperatura ambiente o ligeramente superior, presentando una serie de ventajas e inconvenientes que se recogen en la tabla 4.7. Si se incrementa la temperatura de trabajo sin llegar a la de recristalización, se reduce la oposición del material a la deformación plástica, con lo que el nivel de esfuerzo requerido para conformarlo se reduce y pueden alcanzarse grados de deformación mayores en secciones mayores o con un número menor de etapas.

Tabla 4.7 Ventajas e inconvenientes de los procesos de conformado en frío.

<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>
Son más precisos (mejor control dimensional)	Se requieren esfuerzos muy elevados
El endurecimiento por deformación proporciona componentes de resistencia considerable	La forma final de los componentes está limitada por la deformabilidad del material
La estructura final está orientada paralelamente a la dirección del esfuerzo de deformación (dirección preferente o anisotropía)	Se requiere de una etapa de limpieza previa a la deformación, para evitar incrustaciones de óxidos o impurezas que conducirían a piezas finales defectuosas
Proporcionan mejor acabado en los componentes	
Son económicos (ahorro energético)	A menudo se requiere de un tratamiento térmico para relajar tensiones que puedan haberse acumulado durante la deformación
Se pueden alcanzar ritmos de producción elevados	

Los procesos de conformado realizados en caliente son sustancialmente distintos, ya que en estas condiciones el material se puede deformar a bajas tensiones. La temperatura de proceso no suele superar el 75 % de la temperatura de fusión (en K), ya que existe el riesgo de que se produzcan fusiones locales en zonas delgadas.

Aunque las tensiones de trabajo son muy inferiores en los procesos de conformado en caliente, también pueden detectarse ventajas e inconvenientes por comparación con los procesos de conformado en frío, tal como se detalla en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Ventajas e inconvenientes de los procesos de conformado en caliente.

<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>
Se pueden alcanzar grados de deformación muy elevados, más que con cualquier otra técnica de conformado por deformación	El consumo energético es elevado (se requiere mantener caliente un gran volumen de material hasta la temperatura de trabajo)
Se pueden elaborar perfiles más complejos (la fluencia es mucho mayor en caliente)	La precisión dimensional es baja
Se puede trabajar con esfuerzos aplicados menores (se requieren potencias menores en los equipos)	Se producen oxidaciones superficiales en los materiales
Es la única forma en que pueden trabajarse metales frágiles, que se romperían si se deformasen en frío	El acabado es más pobre (existencia de irregularidades, oxidaciones, etc.)
Se genera menos anisotropía, ya que la orientación cristalina es muy suave y, además, se produce recristalización	Las herramientas suelen tener una vida útil más corta, ya que la temperatura degrada más rápidamente las zonas afiladas (fatiga térmica)

En los procesos de conformado en caliente se alcanza la temperatura de recristalización, pero la recristalización requiere de períodos prolongados de tiempo, ya que está regida por las leyes de la difusión atómica (ver apartado 2.3.4). El material deformado y caliente se va enfriando lentamente y en este período se puede producir recristalización parcial.

Como se ha indicado al principio del apartado, los procesos de conformado volumétricos implican desplazamiento de material y tanto pueden realizarse bajo tensiones de compresión (laminado, forja y extrusión), como bajo esfuerzos de tracción (trefilado). Para ello se parte de preformas (barras, palanquillas o planchones) o de volúmenes elementales (lingotes).

De todas las operaciones de conformado por deformación plástica en las que las tensiones aplicadas son de *compresión*, cabe destacar la *laminación* por ser la más común. En este tipo de procesos, un producto sólido, en caliente o en frío, se somete a compresión bajo la acción de unos rodillos que reducen su sección de forma continua, en una o varias etapas.

Dado que los metales suelen incrementar su resistencia a medida que se deforman, las operaciones de laminación generalmente se realizan en caliente, especialmente si el grosor de los componentes de partida es elevado. Las operaciones en caliente suelen proporcionar productos *isotrópicos*, con una microestructura regular y sin tensiones residuales, aunque el calor favorece la oxidación y los productos laminados presentan una capa más o menos importante de óxido superficial, a diferencia de lo que ocurre en los procesos de laminación en frío, que proporcionan microestructuras con gran anisotropía (Fig. 4.39).

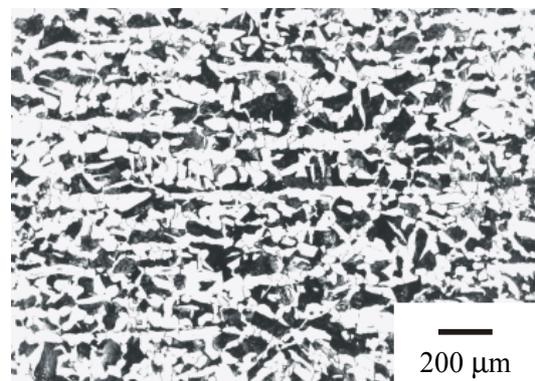


Fig. 4.39 Microestructura anisotrópica de un acero hipoeutectoide laminado. En la figura se aprecia la orientación de los cristales en la dirección de laminación.

La laminación es un proceso muy común en la elaboración de productos férricos. Durante la elaboración del acero, bien sea a partir de mineral o por fusión de chatarra (procesos descritos en el apartado 4.3), se pueden obtener grandes volúmenes sólidos que se reservan para su aplicación posterior (lingotes). Se mantienen en hornos de fosa a temperaturas próximas a 1.200 °C y en el momento de su utilización se deforman por laminación o por forja bajo la acción de fuerzas de compresión que convierten los bloques en perfiles de manejo más sencillo.

Otro tipo de productos que se pueden obtener directamente por solidificación del metal líquido son los planchones y las palanquillas, que son el resultado de conducir el metal líquido hacia un distribuidor que lo divide en varios frentes de solidificación. En estos frentes se definen unos perfiles sencillos, poligonales (planchón, palanquilla), que irán avanzando sobre unos rodillos hasta alcanzar una temperatura que permita su manipulación y/o acumulación. Estos productos semielaborados,

posteriormente se vuelven a laminar en un *tren de laminación* para la obtención de productos finales (barras, láminas, planchas o perfiles estructurales). En estos trenes (Fig. 4.40), los rodillos que actúan sobre el metal para cambiar sus dimensiones suelen estar agrupados en conjuntos denominados *cajas de rodillos* y el número de estas cajas determinará la longitud final de la instalación.

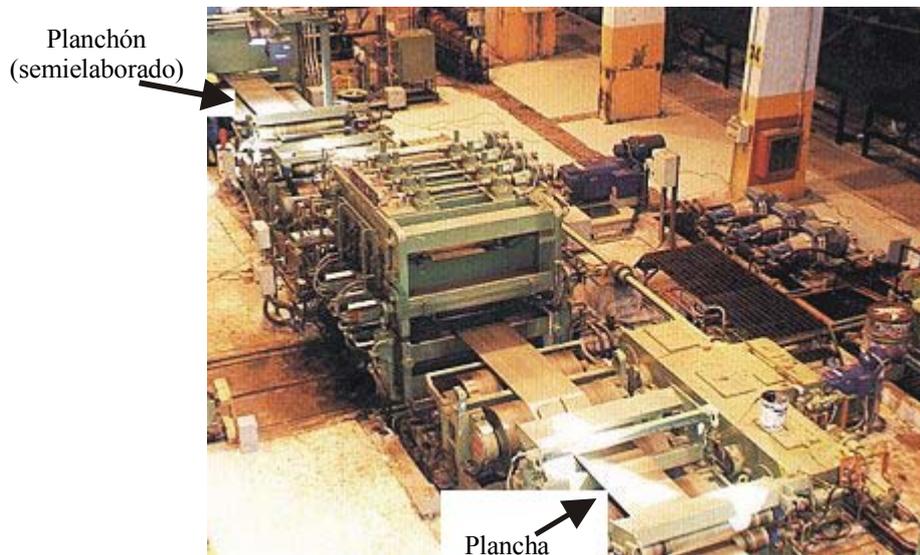


Fig. 4.40 Tren de laminación para la obtención de chapa (en la zona delantera de la imagen) a partir de plancha (en la zona posterior de la imagen).

En ocasiones se realiza un proceso previo de preparación de los productos (generalmente operaciones de desengrasado y decapado), a fin de proporcionar una limpieza superficial y la eliminación de residuos (capas de óxidos o cascarillas) que pueden influir negativamente en la calidad del producto, dañando además las superficies de las herramientas de trabajo de las instalaciones.

Una vez finalizado el proceso, si se hace preciso un nuevo laminado, éste se realizará en frío, a fin de proporcionar componentes resistentes, con tolerancias menores y sin oxidaciones superficiales. Los procesos de laminación en frío suelen estar controlados automáticamente y en ellos se tienen en cuenta diversos parámetros, principalmente aquellos relacionados con la geometría y las dimensiones del producto.

Los productos resultantes suelen someterse a un proceso de lavado, a fin de eliminar cualquier resto de aceite, y de ahí se dirigen a los hornos de recocido, en los que se realizan calentamientos destinados principalmente a reducir las tensiones originadas por el propio proceso de deformación en frío. En el esquema de la figura 4.41 se reproduce el proceso de elaboración de barras y alambres a partir de palanquillas. El laminado de perfiles es un proceso mediante el cual se genera un contorno en la sección transversal del componente conformado. De esta forma se obtienen vigas (en I, en T y en L), canales (en U), rieles, barras (redondas y cuadradas) y varillas. En estos procesos, los rodillos utilizados son más complejos a fin de permitir las variaciones de sección necesarias.

Además de los procesos de laminación, los de *forja* constituyen el otro grupo más habitual de técnicas de conformado por deformación plástica mediante la acción de esfuerzos de compresión. Pueden realizarse en frío o en caliente, si bien suelen producirse en caliente, dado que el grado de deformación que se puede alcanzar en una sola etapa es mucho mayor que el que se obtendría en varias etapas de laminación.

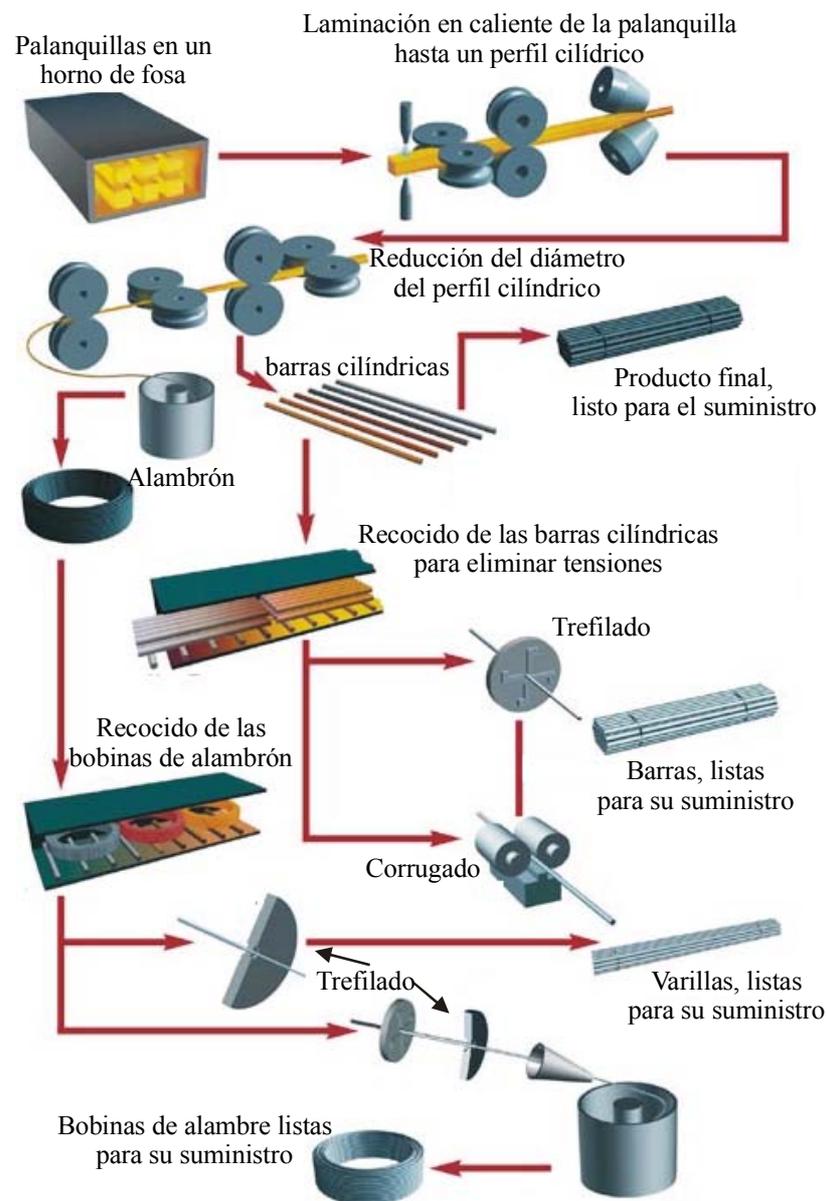


Fig. 4.41 Elaboración de barras y alambres por laminación y trefilado.

Los procesos de *forja* consisten en aplicar esfuerzos de compresión a un material en tiempos cortos, a diferencia de los de laminación, que suelen ser más lentos, sea por impacto o por presión gradual entre dos matrices que, a su vez, pueden ser:

- Superficies planas o casi planas entre las cuales el metal fluye lateralmente. Estos procesos se conocen como *forja en matriz abierta* o *forja libre* y no proporcionan formas finales, sino reducciones severas de espesor (Fig. 4.42).
- Matrices de impresión o *estampas*, que tienen una forma determinada (negativo), a la que se adapta el volumen de sólido al deformarse, y restringen mucho más la fluencia del metal (Fig. 4.43). Proporcionan formas finales (por ejemplo, bielas), aunque es común la existencia de rebabas laterales en las zonas de contacto de las dos estampas.

- *Matrices cerradas*, en las cuales la deformación del material queda totalmente restringida por las paredes de la cavidad y no se generan rebabas. En este caso, el diseño de las matrices requiere un control preciso del volumen de material, que ha de adaptarse al volumen de la cavidad.

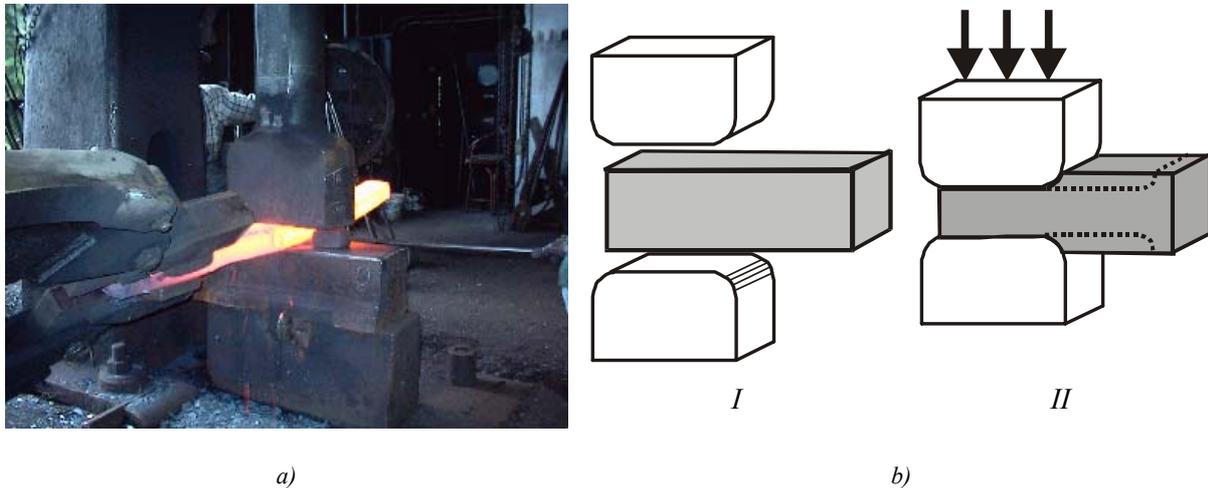


Fig. 4.42 a) Aspecto de una forja abierta; b) esquema de las etapas de la forja en el que la línea punteada de la figura II indica la reducción de sección del próximo impacto.

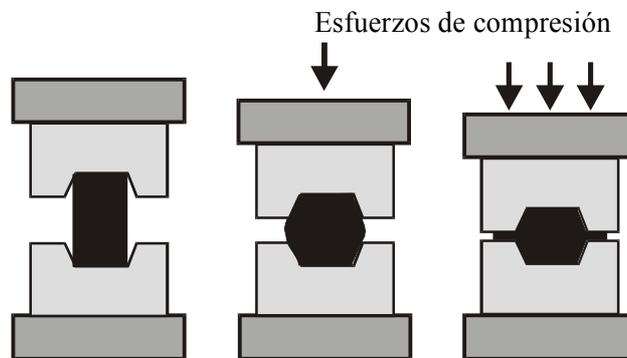


Fig. 4.43 Forja en estampa. En el esquema de la derecha se aprecia la formación de una rebaba en la zona de contacto de las dos estampas.

Los procesos de forja generalmente se realizan en caliente, tanto por encima como por debajo de la temperatura de recristalización, aunque también se realizan procesos de forja en frío que proporcionan mayor resistencia en los componentes finales, a causa del elevado grado de endurecimiento por deformación. En cualquier caso, las matrices restringen la capacidad de fluencia del material y los esfuerzos aplicados no se distribuyen homogéneamente, de manera que el material presenta una microestructura orientada que reproduce esta distribución (Fig. 4.44).

El aspecto externo de los componentes elaborados por forja revela esta distribución irregular de esfuerzos debida a la fricción, ya que la forma final no suele ser regular, sino que presenta una deformación conocida como abarrilamiento (Fig. 4.45).

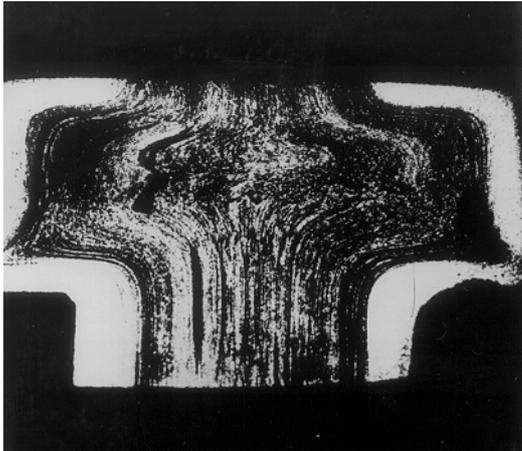


Fig. 4.44 Microestructura resultante de un proceso de forja en la que se aprecia la orientación de los cristales, que reproduce la distribución de tensiones (Cortesía A. Herrero).

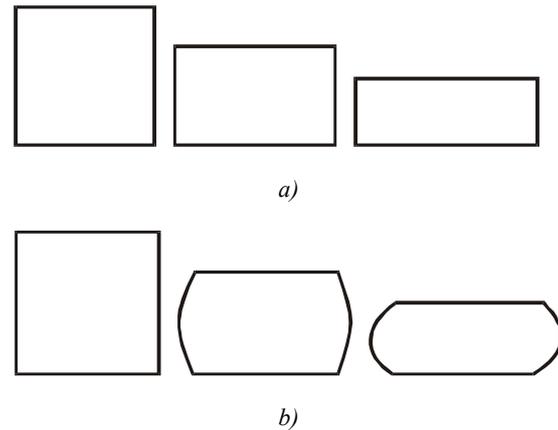


Fig. 4.45 Esquema de las reducciones de altura producidas en los procesos de forja:  
a) sin fricción (situación ideal);  
b) con abarrilamiento (fricción matriz-material).

Las características del material (composición, microestructura inicial) influyen notablemente en la respuesta de los aceros a la forja, ya que determinan el nivel de esfuerzo necesario y/o limitan el grado de deformación final. Así, la forja de un acero con un elevado contenido en carbono será más costosa y en un acero con azufre será un proceso delicado, ya que este elemento favorece la fragilidad en caliente, mientras que el fósforo, por el contrario, aumenta la fragilidad en frío. La temperatura de forja de los aceros dependerá de su composición. Si para un acero se requieren temperaturas superiores a 700 °C, es preciso realizar el proceso rápidamente, ya que hay riesgo de descarburación superficial, con lo cual disminuye la dureza y la resistencia al desgaste. La etapa de enfriamiento posterior a la forja siempre ha de ser lenta y uniforme.

Los equipos de forja más antiguos son los yunques de herrero, en los que los esfuerzos de compresión se aplican manualmente (Fig. 4.46), y en ocasiones se utilizan acompañados de otros instrumentos tales como mazos, martinets, etc. Sin embargo, su uso se limita a componentes de pequeño tamaño, atendiendo a los bajos niveles de esfuerzo que suelen aplicarse.



Fig. 4.46 Forja en yunque.

Para los procesos de forja en estampa, los valores de fuerza requeridos son bastante mayores que los requeridos para forja abierta, ya que las paredes de la matriz limitan la deformación lateral del material. La forja en matrices cerradas requiere valores de fuerza comparables a los de la estampación, y pueden calcularse también de forma similar. En estos procesos, lo que es fundamental es igualar el volumen del componente a elaborar con el de la cavidad, ya que un volumen de material superior al de la cavidad puede dañar la matriz.

Los procesos de *recalcado* son un tipo particular de forja, en matriz cerrada o abierta, en los cuales una parte de un producto largo (altura > diámetro) aumenta su sección al ser comprimido en un espacio de menor altura (Fig. 4.47). Son procesos sin rebaba y con una precisión dimensional muy elevada. Es una técnica de uso habitual en la elaboración de cabezas de pernos o clavos y se realiza tanto en frío como en caliente. El *acuñado* es una aplicación especial de los procesos de forja que se caracteriza por la inexistencia de rebaba y por la impresión de detalles muy finos en el componente final. Estos detalles se hallan grabados en las matrices superior e inferior (Fig. 4.48) y el flujo de metal del proceso es pequeño, ya que no se pretende un gran cambio de forma, sino un producto final con gran definición de los detalles impresos (monedas, acabados superficiales). Los niveles de presión requeridos son muy elevados y los materiales de las matrices han de ser de gran resistencia, ya que la degradación por desgaste conduce a la obtención de componentes sin definición en los detalles, lo que los convierte en productos finales defectuosos. Son procesos muy rápidos y con una capacidad de producción muy elevada.

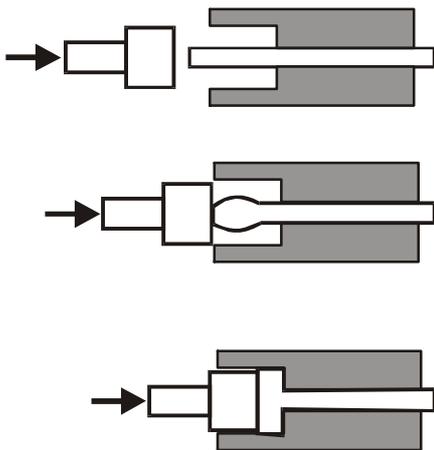


Fig. 4.47 Etapas de un proceso de recalcado.

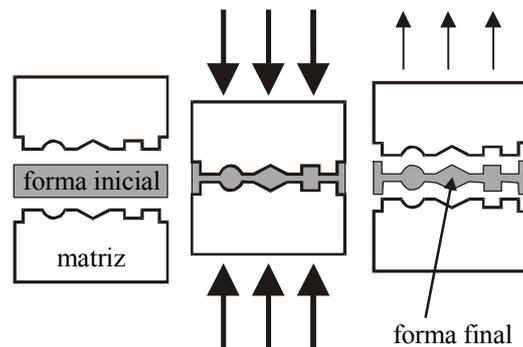


Fig. 4.48 Esquema de un proceso de acuñado.

Otro proceso de forja habitual es el *forjado radial*, que es una técnica adecuada para crear secciones troncocónicas en productos cilíndricos por compresiones sucesivas, girando entre las dos matrices hasta que todo el componente ha sido deformado. También podría mencionarse la *forja con rodillos*, que permite obtener productos largos con secciones variables, ya que los rodillos no giran continuamente, sino tan sólo cuando la porción de material requiere un cambio de forma.

Un último tipo de procesos de conformado por deformación plástica bajo la acción de esfuerzos de compresión son los procesos de *extrusión*, en los cuales el sólido es forzado a pasar por la abertura de una herramienta, mediante un esfuerzo de compresión posterior, reduciendo su sección y adoptando la forma de la abertura (perfil). Estos procesos pueden realizarse como en el esquema de la figura 4.49, es decir, hacia adelante, y reciben el nombre de *extrusión directa*. Es común que se produzcan fricciones muy importantes entre el volumen de material y las matrices, por lo cual se requieren valores de fuerza notablemente superiores a los teóricos. Si el proceso de extrusión se realiza en

caliente, la formación de películas de óxido superficiales obstaculiza aún más el avance del material, lo cual disminuye la efectividad del proceso y la calidad del producto obtenido. Por extrusión directa se pueden elaborar perfiles macizos o huecos (por ejemplo, perfilera de aluminio), siempre y cuando se utilice un émbolo con un mandril que atraviese el perfil extrusionado (Fig. 4.50).

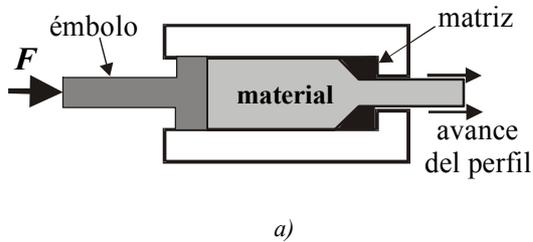


Fig. 4.49 Esquema del proceso de extrusión de perfiles macizos.

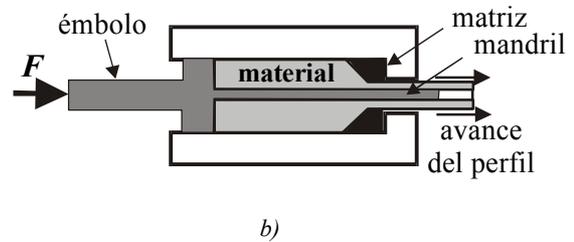


Fig. 4.50 Esquema del proceso de extrusión de perfiles huecos.

Si la extrusión se realiza de forma *indirecta*, la matriz se halla sobre el émbolo, de manera que, cuando este último penetra en el material, lo fuerza a salir en sentido opuesto, fluyendo alrededor del pistón. El principal inconveniente de estos procesos indirectos es que la longitud final del componente está limitada por la longitud del émbolo.

La *extrusión por impacto* se realiza a velocidades mayores que la extrusión convencional. En estos procesos el material fluye plásticamente por la holgura existente entre el punzón y las paredes de la matriz, tanto en la dirección de aplicación del esfuerzo (hacia adelante) como en retroceso (Fig. 4.51). Tan sólo aquellos metales con gran capacidad de fluencia son susceptibles de ser conformados según esta técnica, y proporcionan componentes que pueden tener las paredes muy delgadas (botes, tubos, etc.) a partir de discos o platinas (Fig. 4.52), dado que es posible realizar etapas sucesivas de extrusión por impacto en caso de precisar componentes con bordes muy elevados.

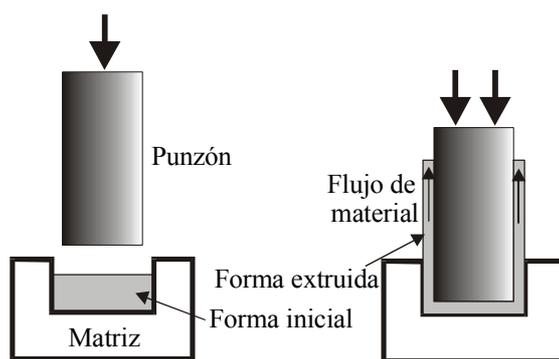


Fig. 4.51 Etapas del proceso de extrusión por impacto con retroceso del material.



Fig. 4.52 Perfiles de aluminio obtenidos por extrusión por impacto.

Los productos así obtenidos son únicos (piezas individuales) y la velocidad de procesado es elevada, ya que el impacto favorece un alto grado de deformación en cada etapa, con lo cual los niveles de

producción pueden ser también considerables. Las aleaciones más utilizadas en este tipo de procesos de conformado son las de aluminio, plomo, zinc, cobre y los latones.

Dado que la fricción entre la matriz y el material es muy elevada en los procesos de extrusión, es común la formación de defectos en la piel de los componentes, debido a una fluencia irregular. Una forma de solucionar este inconveniente ha consistido en diseñar matrices con un depósito de fluido, que es el que recibe la presión del pistón y, por tanto, el que actúa sobre el material (extrusión hidrostática). De esta forma, se minimizan los defectos superficiales, se pueden alcanzar grados de deformación muy superiores y se favorece la posibilidad de conformar por extrusión materiales endurecidos o menos dúctiles que los utilizados en los procesos de extrusión convencional.

Dentro de los procesos de conformado por deformación plástica, el *estirado* es el más importante de los que requieren de esfuerzos aplicados de tracción. En estas operaciones, una sección transversal de diámetro  $D_0$  se reduce hasta  $D_f$  al tirar del material a través de la abertura de una matriz troncocónica que se denomina *hileras* (Fig. 4.53). Las características del proceso son similares a las de extrusión, salvo en que la fuerza ( $F$ ) actúa desde delante de la matriz, tirando del material, y en que estos procesos siempre se realizan en frío. Aunque se consideran procesos de conformado por tracción, los esfuerzos de compresión en la zona de la abertura de la hilera (indicada con una línea punteada en la figura 4.53) son muy elevados, y son los que provocan la deformación del metal.

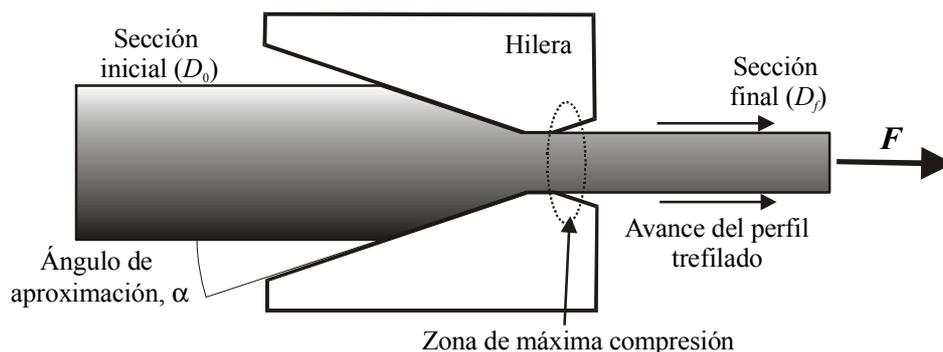


Fig. 4.53 Esquema del proceso de estirado de productos metálicos.

El ángulo de aproximación,  $\alpha$ , dependerá del grado de reducción, del material y de la velocidad de proceso, y suele estar comprendido entre 6 y 20°. El *estirado de barras* es un proceso de estirado simple en el que el material de partida, con una sección grande, conduce a un producto final recto, ya que la sección final, también grande, no es adecuada para ser enrollada.

Si el proceso de estirado se sucede en varias pasadas, por varias hileras, se consiguen alambres que pueden enrollarse en bobinas y utilizarse posteriormente para elaborar alambres más finos. El *estirado de alambres o trefilado* (Fig. 4.54) es un proceso continuo, ya que un final de bobina puede unirse al principio de otra por soldadura a presión, y obtenerse componentes de miles de metros de longitud.

Si bien las operaciones de estirado se refieren generalmente a secciones circulares para la obtención de barras, varillas y alambres, este tipo de procesos puede utilizarse también para la elaboración de láminas de anchura moderada (*flejes*) o para el *estirado de tubos*. En este último caso, se parte de tubos sin soldaduras y se suele utilizar un mandril que determina el diámetro interno, aunque algunos procesos más simples consisten en estirar el tubo sin mandril y, por tanto, sin control dimensional del diámetro interno del tubo.

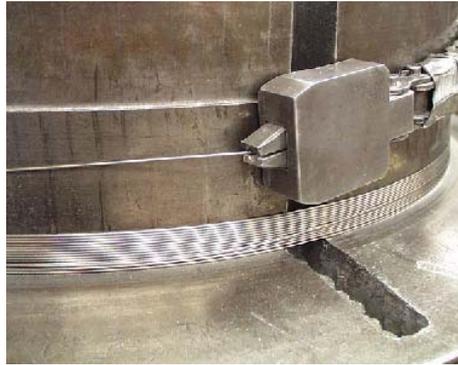


Fig. 4.54 Hilera de trefilado de alambre.

En cualquiera de los procesos de estirado, el material sufre un endurecimiento a causa de la deformación en frío. Este hecho implica que las hileras se han de fabricar con materiales de muy alta rigidez y resistencia a la fricción, siendo muy común la utilización de hileras de trefilado de metal duro (WC-Co) o de diamante.

Por último, cabría mencionar las operaciones de *doblado*, que se definen como aquellas en que la deformación del material se produce alrededor de un eje recto. En estos casos, el componente conserva su nueva forma cuando se retira el esfuerzo que ha provocado el doblado, salvo la recuperación elástica, y prácticamente no ve alteradas las dimensiones de su sección, ya que tan sólo se modifica su ángulo.

La capacidad de *doblado* de un material depende de su ductilidad y estos procesos pueden realizarse en frío o en caliente, en función de las características de ductilidad del material o del grado de doblado requerido. El parámetro característico de los procesos de doblado es el *radio de curvatura*, que podrá ser tanto más pequeño cuanto más dúctil sea el metal. En ocasiones, las etapas de doblado requieren de un calentamiento previo del material a fin de favorecer su deformación. Así, por ejemplo, las aleaciones de cinc (Zn) suelen calentarse hasta 150 °C y las de magnesio (Mg) hasta 300 °C. En estos procesos, sucede que los cristales de la zona más externa quedan sometidos a esfuerzos de tracción, mientras que la zona interna del codo queda sometida a compresión. En medio, existe una región que no queda alterada (*fibra neutra*), y que para un radio de curvatura grande suele localizarse hacia la mitad del espesor (Fig. 4.55).

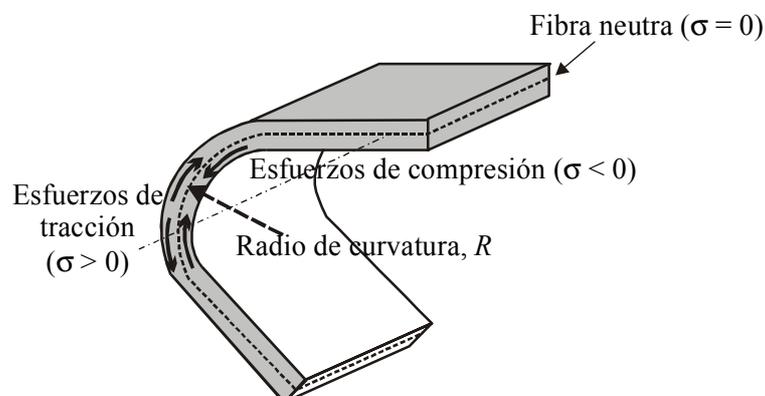


Fig. 4.55 Localización de las regiones sometidas a tracción o a compresión durante la operación de doblado de un componente metálico.

Generalmente, las tensiones de tracción de la región externa superan el valor de resistencia ( $\sigma_m$ ), con lo cual se produce estricción y se aprecia una pérdida de brillo en esa zona del componente provocada por la fluencia irregular. La reducción de sección en la región que sufre estricción permite que el material incremente su longitud y pueda deformarse hacia los lados.

La zona interna, sometida a esfuerzos de compresión, sufre un incremento de sección, acompañado de una disminución de longitud. De esta forma, el exceso de material que se localiza en la región interna se compensa con la falta que se ha generado en la región externa y se mantiene la sección global del componente.

El radio de curvatura,  $R$ , que se puede imponer a una pieza en un proceso de doblado dependerá de varios factores, como son:

- La ductilidad del material :  $\uparrow$  ductilidad  $\rightarrow \downarrow R$ .
- El espesor del perfil a doblar:  $\uparrow$  espesor  $\rightarrow \uparrow R$ .
- La microestructura: Si la microestructura está orientada, cuando las fibras son paralelas al plano de flexión precisan valores de  $R$  menores que cuando las fibras están orientadas perpendicularmente.
- La temperatura del proceso de conformado:  $\uparrow$  temperatura  $\rightarrow \downarrow R$ .

En estos procesos suele aparecer un retroceso del ángulo de doblado debido a la recuperación elástica que se produce cuando cesa el esfuerzo global. Así, se ha de diseñar el proceso de manera que el valor de  $R$  buscado esté por encima (hasta  $5^\circ$ ) del necesario, a fin de compensar esta recuperación elástica. Este efecto es tanto más importante cuanto mayor sea el radio de curvatura.

Los procesos de conformado de láminas metálicas más comunes consisten en la elaboración de una forma final hueca más o menos compleja por la acción de un punzón (*embutición*). Las latas de conserva, los casquillos de munición, los fregaderos metálicos y un sinfín de componentes de chapa se elaboran mediante procesos de embutición (Fig. 4.56).

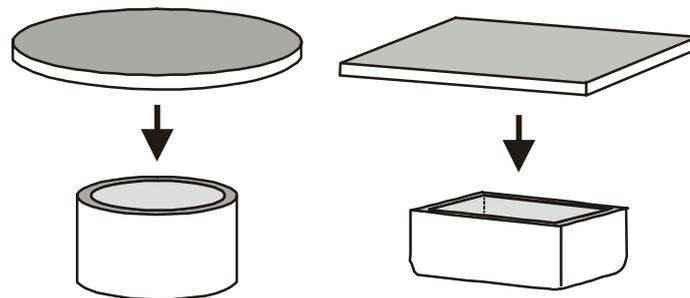


Fig. 4.56 Elaboración de componentes por embutición de chapa.

En una primera etapa, los procesos de embutición se podrían considerar como un doblado, ya que el punzón actúa sobre la zona central de la chapa y provoca un doblado de sus bordes, pero a medida que avanza el proceso y el recorrido del punzón, se produce una serie compleja de tensiones y de deformaciones, de manera que la región curvada durante el doblado se endereza, paralelamente a las paredes del punzón, para formar las paredes del componente (Fig. 4.57).

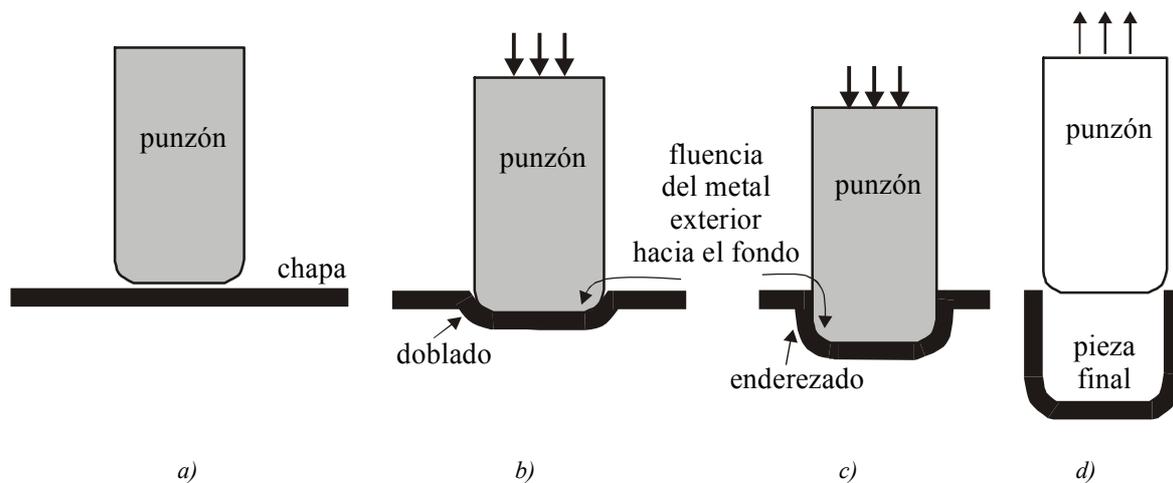


Fig. 4.57 Etapas de la embutición de chapa: a) la lámina, antes del contacto del punzón, es totalmente plana; b) el punzón dobla la chapa; c) una mayor acción del punzón sobre la chapa provoca un desplazamiento de la base de la copa formada y un enderezamiento de las paredes; d) al retirar el punzón, se obtiene una pieza hueca.

A partir de este punto, la región de metal que constituye la base ya no se deforma más y las zonas curvadas próximas a la base son las que sufren mayores tensiones y deformaciones más importantes.

A medida que avanza el punzón, el metal que se halla en la zona inferior (base y bordes curvados) queda atrapado y es la región de metal que había quedado por fuera del punzón la que se introduce (se *embute*) en el espacio que deja el punzón hasta las paredes de la matriz, dando nombre a este tipo de procesos de conformado de chapa.

#### 4.6 Soldadura de aleaciones metálicas

Los procesos de unión por soldadura han adquirido una enorme importancia en las últimas décadas, dada su creciente implantación en los procesos industriales. El término *soldadura*, en ingeniería, se refiere al procedimiento por el cual dos o más piezas de metal se unen por aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin el aporte de otro metal.

En ocasiones se hace preciso recurrir a un metal auxiliar (*metal de aportación*) que al recuperar su estado sólido mantiene adheridas las piezas de partida. En este caso, el material a unir no participa propiamente en el proceso de soldadura, sino que es el metal de aporte el que realiza la unión. La mayor parte de procesos de soldadura se pueden separar en dos categorías, que son: la *soldadura por presión*, que se realiza mediante la aplicación de la presión suficiente y normalmente ayudada con calor (sin metal de aportación); y la *soldadura por fusión*, realizada calentando las superficies a unir, pudiendo producirse fusión del metal base o del metal de aportación en la zona de contacto. Si es el propio material que se ha de unir el que funde, sin aportación de ningún material, el proceso se denomina *soldadura autógena*. Si se utiliza metal de aportación, dependiendo de la temperatura de fusión, se denominará de *soldadura blanda* (metales con punto de fusión por debajo de 450 °C), o de *soldadura fuerte* o *dura* (metales de aportación con mayores temperaturas de fusión).

A lo largo de la primera mitad del siglo XX, la soldadura sustituyó a las uniones mecánicas con tornillos y remaches en la construcción de estructuras metálicas de grandes dimensiones, como puentes, edificios y barcos. Actualmente la práctica de la técnica de la soldadura es el medio más eficaz para unir materiales metálicos y su aplicación está muy generalizada en la construcción de

recipientes a presión, en la industria de la automoción y en la naval, en la fabricación de maquinaria, armaduras y estructuras, etc.

El tipo de soldadura más adecuado para unir dos piezas de metal depende de las propiedades físicas de los metales, del uso al que esté destinado el componente final y de las instalaciones disponibles. Entre las numerosas ventajas que presenta la unión por soldadura frente a los métodos de unión mecánica, destacan el ahorro de material, la disminución general de peso en la estructura, la simplificación en el ensamblado, la estanqueidad de las uniones (especialmente importante en la fabricación de depósitos y conducciones de fluidos), la mayor resistencia a la corrosión y la posibilidad de unión sencilla de estructuras tubulares.

Otros conceptos importantes a considerar en un proceso de soldadura son los procesos de solidificación de los metales líquidos, el flujo térmico durante la solidificación de los metales, el efecto de la temperatura en las microestructuras metálicas (crecimiento de grano, difusión, etc.), así como las causas y los posibles remedios a las grietas o fisuras que pudieran producirse en los componentes metálicos después de un proceso de soldadura.

#### 4.6.1 Fenómenos metalúrgicos que se producen durante los procesos de soldadura

Todos los procesos de soldadura conllevan alguna aplicación de energía, bien térmica o bien mecánica, a los materiales que se han de unir. Así, por ejemplo, en los procesos de soldadura de metales por fusión, se requiere un aporte energético suficiente para alcanzar la fusión de las partes o del metal que se aporta. Como consecuencia del proceso, en la zona de unión el material presenta una estructura metalográfica propia de un componente obtenido por fusión (Fig. 4.2), que suele ser distinta a la del material original. Es por ello que el conocimiento práctico de la Ciencia de Materiales, en general, y de la Metalurgia especialmente, es esencial para poder interpretar cómo la microestructura de las zonas soldadas influye notablemente en las propiedades finales de los componentes.

A consecuencia de los calentamientos y enfriamientos que se producen durante las operaciones de soldadura, pueden producirse transformaciones o alteraciones en la estructura cristalina de los materiales, que dependerán de las aleaciones metálicas que intervengan en el proceso. Además, debe considerarse el efecto de otras variables que influyen en la soldadura, como las reacciones químicas que se puedan producir en la masa fundida, la posible formación de aleaciones y la presencia de contaminantes. Todos estos factores determinan la existencia de distintas regiones en la zona de unión, que afectarán significativamente a las propiedades de la soldadura y que constituyen la ZAT, o *zona afectada térmicamente* (Fig. 4.58).

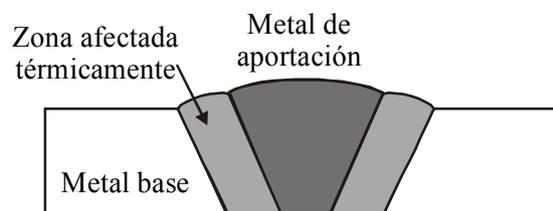


Fig. 4.58 Regiones que se distinguen en una unión por soldadura.

Dado que la mayoría de las soldaduras se relacionan con aleaciones y no con metales puros, la transformación de líquido a sólido no se produce a una temperatura constante, sino que existe un

intervalo de solidificación. En el caso de las soldaduras por fusión, cuando el líquido del cordón empieza a solidificarse sobre los metales a unir, se produce una solidificación heterogénea (ver apartado 2.3.3). Después de la formación de un primer núcleo cristalino, los átomos se empiezan a depositar sobre éste, entonces el cristal comienza a crecer perpendicularmente a las líneas isotermas que se generan, en sentido opuesto al flujo de calor (Fig. 4.59). Los nuevos cristales que se forman se depositan sobre las superficies ya sólidas (*epitaxias*) y mantienen una cierta coherencia con la estructura sobre la que empiezan a crecer. Este tipo de solidificación se denomina *crecimiento epitaxial* (Fig. 4.60).

La coherencia entre los nuevos granos que se forman sobre la superficie cristalina de los materiales a unir induce un tamaño de grano mayor en la zona afectada por la soldadura, pero el tamaño del grano en esta región dependerá en gran medida de la velocidad de enfriamiento y también del tamaño del grano original. Así, cuando los materiales base de una soldadura presentan tamaños de grano por encima de ciertos límites, se produce una estructura grosera y basta, mientras que, por el contrario, cuando los materiales a unir poseen una microestructura fina, en el cordón se formará una estructura de grano fino, aunque siempre de mayor tamaño que el de los materiales de partida (Fig. 4.61).

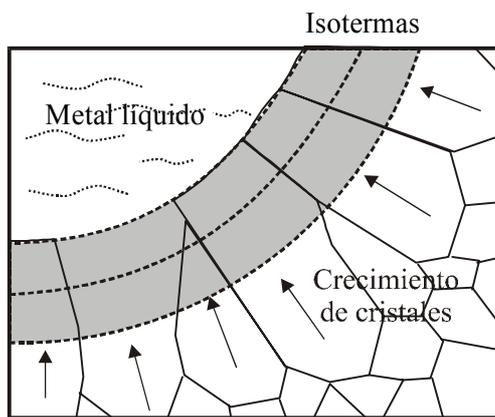


Fig. 4.59 Crecimiento epitaxial producido durante la solidificación de una zona de soldadura con fusión de metal.

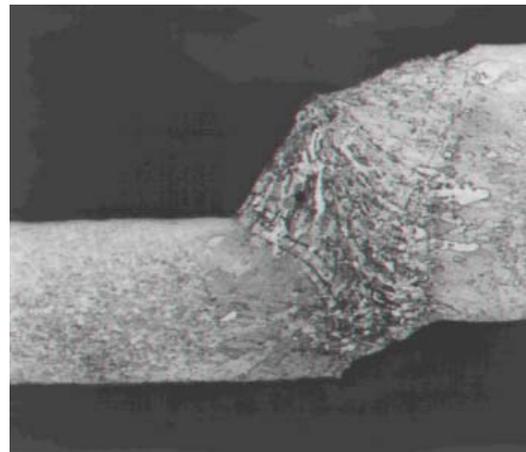


Fig. 4.60 Micrografía de soldadura de dos chapas de diferente grosor en la que se aprecia el mayor tamaño de grano de la zona de unión.

#### 4.6.2 Técnicas de soldadura de metales

Se pueden considerar más de treinta procedimientos diferentes de uso industrial para la soldadura de las aleaciones metálicas. Según la técnica empleada podemos establecer los grupos que se detallan a continuación y que se indican en el esquema de la figura 4.61:

- *Soldadura por fusión*, que engloba los procedimientos más usuales de unión de las aleaciones de uso industrial, como son la soldadura por fusión a la llama, por arco eléctrico y por resistencia eléctrica. Aunque no se indica en el esquema de la figura 4.61, en este grupo se localizarían los procesos de soldadura por bombardeo con partículas de alta energía.
- *Soldadura en estado sólido*, que son las técnicas que se caracterizan por que el aporte de energía no proviene de una fuente de calor, como serían la soldadura por ultrasonidos, la soldadura por presión en frío, la soldadura por fricción y la soldadura por explosivos.

- *Soldadura fuerte*, que son procesos de unión en que se precisa de metales de aporte, químicamente similares al metal base, pero con puntos de fusión inferiores. En esta técnica no se produce fusión del material base y la unión se realiza a través del metal de aporte, mediante la formación de una aleación de superficie en la zona de contacto.
- *Soldadura blanda*, que son procesos técnicamente idénticos a los anteriores, pero con la diferencia fundamental de que se utilizan materiales de aporte de naturaleza no necesariamente igual a la del metal base y con puntos de fusión muy inferiores.

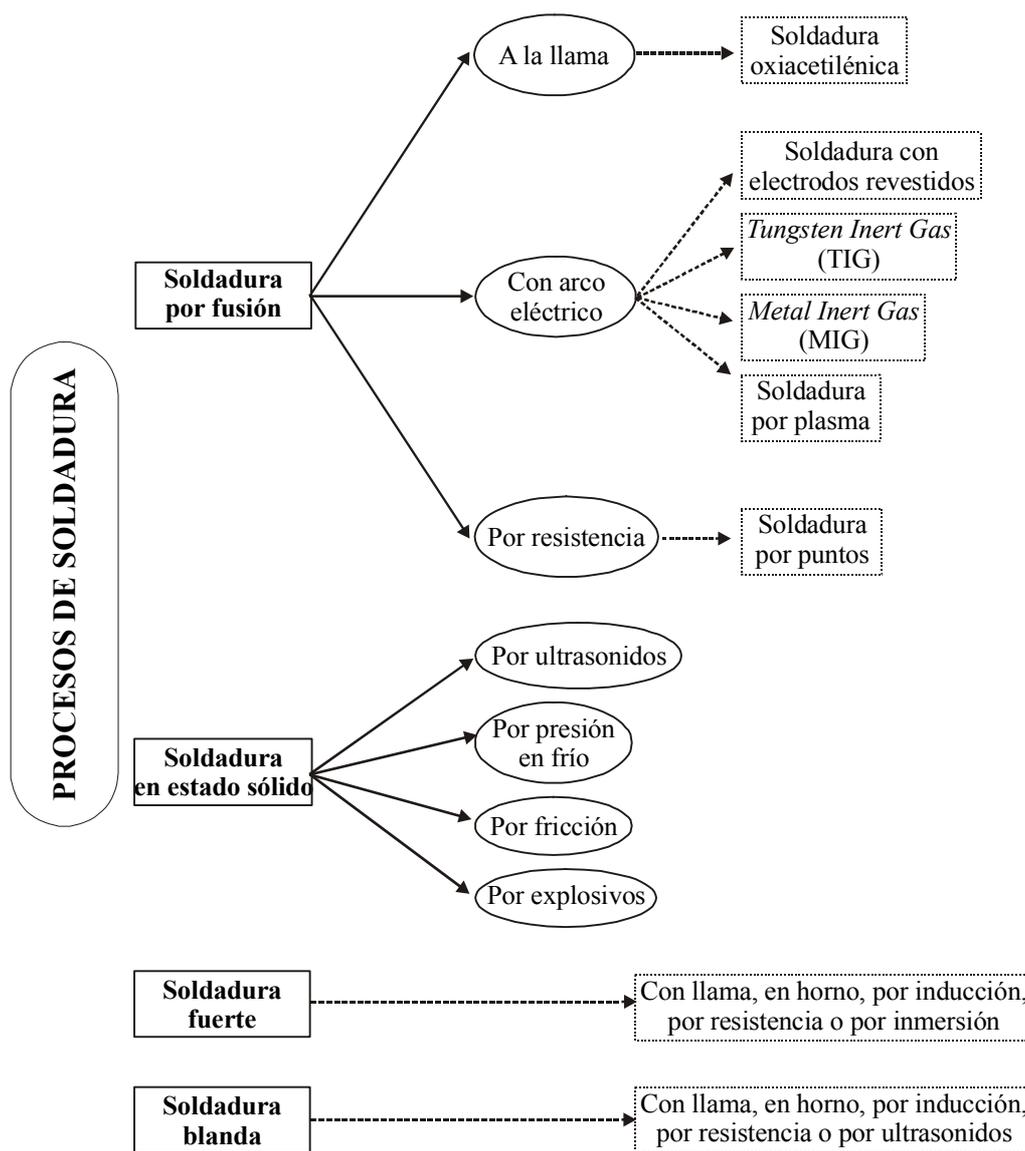


Fig. 4.61 Tipos de soldadura.

De todas las técnicas de unión indicadas anteriormente, los procesos de *soldadura con gas* constituyen el grupo de técnicas de uso más extendido y también pueden utilizarse como técnicas de corte. En estos procesos, el principio es simple y se basa en producir una intensa llama por la combustión

controlada de una mezcla de oxígeno y un gas combustible. Los gases provienen de fuentes o tanques separados y, a través de reguladores, se mezclan en una antorcha para salir por la cabeza de soldadura (boquilla), donde ocurre la ignición. El flujo de los gases y la proporción de la mezcla los controlan los reguladores de presión y las válvulas ubicadas en la antorcha. Las uniones se producen mediante el cordón de metal fundido de metal base y material de aporte (en su caso) por el contacto con la llama. El uso de fundentes separa el óxido y las costras del área de soldadura y contribuye a asegurar una soldadura de calidad.

Las operaciones de corte son similares, pero con la diferencia de que la llama se concentra para precalentar y mantener el metal a su temperatura de fusión, mientras un chorro de oxígeno se dirige al área precalentada, de manera que rápidamente se oxida el metal en un camino angosto y la escoria se expulsa, con lo cual se genera una ranura y se facilita la separación. El equipo básico necesario para efectuar las operaciones de soldadura y corte incluyen una antorcha con boquillas de soldadura, una extensión o accesorio para cortar, mangueras y reguladores para ambos gases, oxígeno y acetileno u otro gas combustible. En la mayoría de los casos, generalmente es más práctico y seguro utilizar una antorcha o soplete especial para las operaciones de corte.

Para los aceros, el gas de combustión más utilizado es el acetileno ( $C_2H_2$ ) y el proceso recibe el nombre de *soldadura oxiacetilénica*. Las instalaciones en que se realicen estos procesos deben estar bien ventiladas, pues el acetileno es un gas más ligero que el aire y su acumulación en los techos de los locales es sumamente peligrosa, dada su inflamabilidad. La herramienta básica de la operación es el soplete oxiacetilénico, que permite mezclar adecuadamente los gases utilizados y proyectar la llama producida por la combustión sobre la zona de soldadura.

En los procesos de *soldadura por arco*, el aporte de calor necesario lo suministra un arco voltaico que se forma entre dos electrodos convenientemente separados. Generalmente se utiliza la pieza a soldar como electrodo positivo y una varilla especial que lleva incorporado el material de aportación como electrodo negativo (Fig. 4.62).

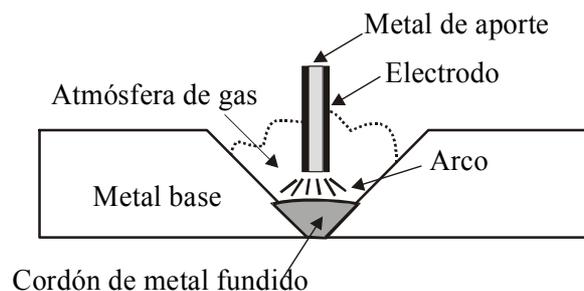


Fig. 4.63 Esquema del proceso de soldadura por arco.

La gran cantidad de calor que genera se debe al paso de electrones de la varilla al metal base a través de la capa de aire intermedia, que está fuertemente ionizada, llegándose a alcanzar temperaturas próximas a  $3.800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La elección del electrodo requiere gran experiencia y lo más aconsejable es atenerse a las instrucciones y normas presentadas por los fabricantes. La soldadura por arco se puede utilizar incluso bajo el agua.

La soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*) es un procedimiento particular de soldadura por arco para el que se utiliza un electrodo de tungsteno con aportación simultánea en una atmósfera inerte,

generalmente de argón, cuya función es la de proteger la zona soldada de la oxidación. Este proceso también recibe otros nombres, como GTAW (*Gas-Tungsten Arc Welding*), y su uso está muy extendido en la soldadura de aceros inoxidable, aleaciones de aluminio, magnesio, cobre, e incluso de titanio. Además, es una técnica muy adecuada y utilizada para soldar metales disimilares (por ejemplo, hierro y aluminio).

Cabe mencionar la *soldadura aluminotérmica*, desarrollada por Delachaux en 1902 a raíz de que las prestaciones exigidas al ferrocarril obligasen a soldar los carriles de acero de las vías férreas. Consiste en aportar acero fundido, gracias a una reacción aluminotérmica, en un molde situado en los extremos de las piezas a unir. La reacción exotérmica se basa en las propiedades reductoras del aluminio en presencia de óxido de hierro, según



La operación se realiza *in situ* y, por tratarse de una reacción fuertemente exotérmica, requiere un adiestramiento y unas precauciones especiales.

El aluminio y sus aleaciones presentan una serie de características propias, inherentes al metal, que hacen que sus técnicas de soldeo presenten diferencias significativas respecto a las aplicadas a otras aleaciones.

En primer lugar, se ha de considerar que el aluminio presenta una gran afinidad con el oxígeno, de manera que, incluso a temperatura ambiente, ambos elementos se combinan muy rápidamente para formar alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Esta ligera capa de óxido superficial, que se adhiere fuertemente a la base de aluminio, impide que progrese el proceso de formación de óxido (*pasivación*), pero también se interpone en el contacto metal-metal, necesario para cualquier operación de unión.

La alúmina posee un elevado punto de fusión (aproximadamente de 2.050 °C) y su presencia es un inconveniente para la obtención de soldaduras correctas. Así pues, se hace necesario recurrir a ciertos procedimientos para eliminar esta capa de óxido y también para proteger el baño de soldadura de la acción del oxígeno atmosférico, evitando la nueva formación de alúmina.

Por otro lado, el hecho de que las aleaciones de aluminio presenten una gran conductividad térmica supone un problema técnico adicional, ya que obliga a utilizar grandes concentraciones de energía para alcanzar la temperatura de fusión en un período muy breve, y minimizar las pérdidas de energía a causa de la conducción del calor a través del material. Esta combinación de requerimientos obliga a emplear corrientes eléctricas de intensidades muy elevadas, lo cual implica un diseño diferente de los equipos de soldadura.

Las aleaciones de aluminio son susceptibles de ser soldadas tanto por soldadura autógena como por soldadura de baja temperatura (blanda o fuerte), si bien la ejecución de las soldaduras requiere precauciones especiales.

La soldadura autógena proporciona uniones que, cuando están bien ejecutadas, presentan una buena resistencia. La principal dificultad con la que hay que enfrentarse en estos procesos de soldadura es el elevado coeficiente de dilatación de estas aleaciones, que pueden dar lugar a deformaciones e incluso a roturas al enfriarse. La formación de alúmina, especialmente a temperaturas elevadas, hace necesaria la utilización de fundentes, cuya principal finalidad es disolver esta alúmina y evitar que se interponga entre las piezas, lo cual impediría su correcta unión. Las uniones mediante soldaduras blandas son poco utilizadas por la pobre resistencia y la baja plasticidad que proporcionan, los que se suma a una resistencia a la corrosión escasa como resultado de la presencia de materiales disimilares en contacto.

Se emplea en aquellas situaciones en que es materialmente imposible la ejecución de otros métodos de soldadura, y en tales casos debe recubrirse la parte soldada con productos apropiados para evitar la corrosión (pintura, barniz, etc.). Por el contrario, las uniones con soldadura fuerte encuentran una gran aplicación en las aleaciones de aluminio, utilizando aleaciones ligeras de bajo punto de fusión como metal de aporte.



## **Módulo III**

Este tercer módulo incide en los materiales polímeros y, por tanto, comprende el tema 5 del texto. El objetivo principal de esta parte del texto es conseguir una visión global de las características más relevantes de los materiales polímeros, así como de las principales características de aplicación de los distintos grupos.

Cabe indicar que en este módulo se intentará proporcionar una visión general de los principales procesos de transformación de polímeros que se llevan a cabo a nivel industrial en la actualidad.



## 5 Materiales polímeros

De los principales grupos de materiales de aplicación industrial, los polímeros son los más recientes, ya que, salvo el hule natural, el caucho, la celulosa y algún otro, prácticamente todos son productos sintéticos obtenidos como productos de reacciones químicas. Así, los *plásticos* y los *polímeros* suelen distinguirse en que los primeros se ha obtenido sintéticamente, mientras que los segundos serían materiales derivados de productos de la naturaleza. Un *polímero* es un compuesto formado por la repetición de unidades, o *meros*, conectadas entre sí mediante enlaces covalentes. Dado que la gran mayoría de polímeros provienen de cadenas de hidrocarburos, con enlaces carbono-carbono como unión principal, se consideran productos orgánicos, aunque existen polímeros inorgánicos.

En volumen, los polímeros constituyen uno de los grupos de materiales de mayor aplicación tecnológica e industrial, dado que el conjunto de propiedades que poseen los hacen sumamente atractivos:

- Los procesos de conformado, en general, son sencillos y no requieren de operaciones posteriores, con lo que suelen obtenerse productos finales.
- Su gran estabilidad química, a temperaturas moderadas, los bajos valores de conductividad térmica y eléctrica y la también baja densidad de estos productos, son algunas de sus características más atractivas.
- El costo de obtención y proceso de los polímeros es muy inferior al de cerámicos y metales, tanto a nivel de materias primas como de procesos y costos energéticos de elaboración.
- Dado que pueden ser transparentes o translúcidos, son materiales que pueden competir con los vidrios en determinadas aplicaciones.

Si bien las propiedades de los polímeros constituyen un buen aval para estos materiales, también poseen algunas características, no tan atractivas, que limitan sus aplicaciones, como por ejemplo:

- Pueden verse afectados por la luz o por otras radiaciones, degradándose y alterándose su comportamiento macroscópico.
- Suelen tener valores muy bajos de resistencia y de rigidez.
- Su respuesta mecánica se ve muy seriamente afectada por las variaciones de temperatura, ya que a temperaturas elevadas son mucho menos resistentes y a temperaturas bajas a menudo se comportan como materiales frágiles, lo que limita notablemente el rango de temperaturas de servicio de los polímeros.

Por su complejidad estructural, la clasificación de los polímeros no resulta sencilla, si bien habitualmente se agrupan en función de la *distribución espacial de sus cadenas* (Fig. 5.1), que puede ser sencilla (cadenas *lineales* o *ramificadas*), o compleja (estructuras *reticuladas*), que determinará el comportamiento mecánico que presentarán los polímeros en función de la temperatura, y que constituye otro de los criterios de clasificación más utilizados.

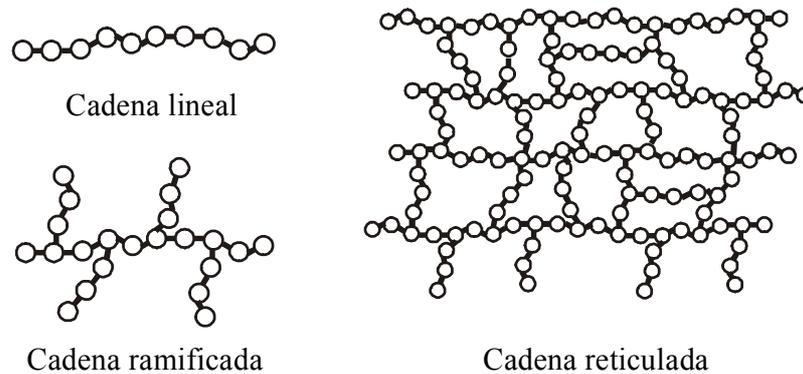


Fig. 5.1 Clasificación de los materiales polímeros en función de la disposición estructural de sus cadenas.

Así, los polímeros *termoplásticos* son aquellos que al calentarse se convierten en productos viscosos fáciles de ser conformados por moldeo, que recuperan las características iniciales al enfriarse, y que son susceptibles de someterse a numerosos ciclos de calentamiento-ablandamiento-enfriamiento sin degradarse. Los polímeros termoplásticos constituidos por un único tipo de unidad repetitiva (*homopolímeros*) adoptan *estructuras lineales*, y en aquellos polímeros en que un átomo de H ha sido sustituido por uno de C, se pueden adoptar *estructuras ramificadas*, de manera que puede iniciarse en ese punto un nuevo proceso de adición.

Los polímeros *termoestables*, en cambio, pueden ser calentados y ablandados de manera que se puedan deformar permanentemente en caliente con facilidad, pero no se funden (como los termoplásticos), sino que se produce un proceso de degradación química provocado por la temperatura. Hasta aquí, esta clasificación no es excluyente, ya que puede darse el caso de que un mismo polímero se comporte como termoplástico en determinadas condiciones de servicio y como termoestable en condiciones distintas. Es común en los polímeros termoestables hallar *estructuras transversales*, que se generan cuando algunos de los monómeros pueden unirse por más de un punto (si poseen más de un enlace doble), de manera que se convierten en “puentes” entre cadenas lineales. Cuando se produce un elevado número de uniones transversales, se considera que el polímero está *reticulado*, y se comporta como un material de elevada rigidez.

Un último grupo de clasificación de polímeros lo constituyen los *elastómeros*, que son aquellos que presentan mayoritariamente deformación elástica, de manera que son capaces de deformarse en gran manera y recuperar la forma inicial prácticamente en su totalidad al cesar el esfuerzo aplicado.

## 5.1 Polimerización y cristalinidad

La unión de *meros* que conduce a la formación de largas cadenas constituyentes de los polímeros se define como *polimerización*. Los *enlaces primarios*, entre los átomos de los propios meros y entre ellos mismos, son covalentes y proporcionan una gran estabilidad a los productos resultantes. Sin

embargo, la cohesión de los polímeros depende en gran medida de los *enlaces secundarios*, que mantienen unidas las cadenas poliméricas entre ellas mediante uniones débiles, pero muy numerosas (*puentes de hidrógeno* y *enlaces de Van der Waals*). Así, un material que por su enlace covalente debería ser extremadamente rígido y duro, no se comporta como tal, ya que las uniones que se destruyen en primer lugar (por acción de la temperatura o la tensión) son los enlaces secundarios y no los covalentes.

La unión de dos meros durante el proceso de síntesis de un polímero puede realizarse de dos formas: por *adición* o por *condensación*. En la *polimerización por adición*, se precisa que las moléculas de partida dispongan de dobles enlaces (C=C) que se puedan abrir, dando lugar a cuatro lugares de unión y favoreciendo la expansión de la molécula. Se requiere de un producto que inicie la reacción (*iniciador*), favoreciendo la apertura de los dobles enlaces. Esta reacción de polimerización continúa a medida que se van añadiendo meros a la cadena principal (Fig. 5.2), o bien por adición de cadenas cortas que se han formado paralelamente. El final de la polimerización se produce cuando no quedan monómeros o cadenas cortas disponibles.

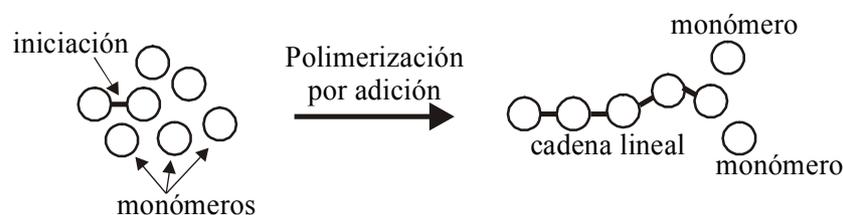


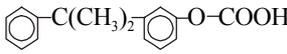
Fig. 5.2 Proceso de unión de monómeros para obtener una cadena lineal de polímero por adición.

La *polimerización por condensación* es un proceso de unión de dos monómeros, o de dos cadenas cortas, en que suele obtenerse un subproducto formado por una molécula pequeña que, en el caso del agua, se condensa. Los polímeros obtenidos por condensación pueden ser tanto termoplásticos como termoestables. En las tablas 5.1 y 5.2 se recogen las características estructurales de las principales familias de polímeros de adición y de condensación, respectivamente.

Tabla 5.1 Características de polimerización de algunos polímeros de adición.

<b>Polímero de adición</b>	<b>Monómero</b>	<b>Unidad repetitiva</b>	<b>Fórmula</b>
<b>Polietileno (PE)</b>	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	$-\text{[CH}_2-\text{CH}_2\text{]}_n-$	$(\text{C}_2\text{H}_4)_n$
<b>Poliestireno (PS)</b>	$\text{CH}_2=\text{CH}$ 	$-\text{[CH}_2-\text{CH}]_n-$ 	$(\text{C}_8\text{H}_8)_n$
<b>Cloruro de Polivinilo (PVC)</b>	$\text{CH}_2=\text{CH}$ $\text{Cl}$	$-\text{[CH}_2-\text{CH}]_n-$ $\text{Cl}$	$(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})_n$
<b>Politetrafluoroetileno (Teflón / PTFE)</b>	$\text{CH}_2=\text{CF}_2$	$-\text{[CH}_2-\text{CF}_2\text{]}_n-$	$(\text{C}_2\text{F}_4)_n$

Tabla 5.2 Características de polimerización de algunos polímeros de condensación.

Polímero de condensación	Monómero	Fórmula	Subproducto
Poliamida (diácido+diamina / PA)	$\begin{array}{c} \text{COOH} - \text{R} - \text{COOH} \\ + \\ \text{NH}_2 - \text{R}' - \text{NH}_2 \end{array}$	$[\text{CO}-\text{R}-\text{CONH}-\text{R}'-\text{NH}]_n$	H <sub>2</sub> O
Poliamida (Nilón-6,6 / PA)	$(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}-\text{NH}_2$	$[(\text{CH}_2)_6(\text{CONH})_2(\text{CH}_2)_4]_n$	H <sub>2</sub> O
Policarbonato (PC)		$(\text{C}_3\text{H}_6(\text{C}_6\text{H}_4)_2\text{CO}_3)_n$	HCl

Así, sea cual sea el proceso de unión, el *polímero* es el producto resultante de la reacción de  $n$  monómeros. El parámetro  $n$  se denomina *grado de polimerización* y es un indicador del tamaño de la molécula, siendo la masa molecular  $n$  veces el peso molecular del monómero. La gran mayoría de las propiedades del polímero vendrán determinadas por su peso molecular. A modo de ejemplo, cabe indicar que la resistencia mecánica y la viscosidad de un polímero son tanto mayores cuanto más elevada es su masa molecular (Fig. 5.3).

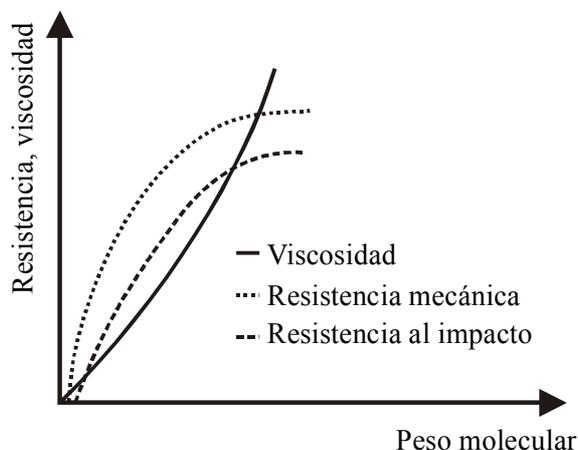


Fig. 5.3 Efecto del peso molecular en las principales propiedades mecánicas de materiales polímeros.

Tal como se ha representado en la figura 5.3, la longitud de las cadenas constituyentes de los polímeros determinará algunas de sus características mecánicas, así como otras características que no dependen exclusivamente de su composición química. En la tabla 5.3 se recogen algunos de los productos obtenidos al repetir el monómero de metano en mayor o menor grado, y las características físicas que se observan en cada uno de los casos.

Si la cadena polimérica tiene del orden de centenares de carbonos, el material se considera *oligómero*, mientras que los plásticos comerciales suelen alcanzar las decenas de miles de carbonos, e incluso existen los denominados *polietilenos de masa molecular ultra alta*, que poseen centenares de miles de

carbonos en su molécula. Los plásticos comerciales no tienen todas las cadenas con la misma longitud, por lo que no se puede hablar de una masa molecular, sino que se suelen obtener distribuciones de masas moleculares que dan lugar a diferentes *masas moleculares medias*.

Tabla 5.3 Características de algunos productos resultantes de la repetición del monómero de metano.

Nº de átomos de C	Fórmula	Nombre	Características
1	CH <sub>4</sub>	Metano	Gas, más ligero que el aire
4	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	Butano	Gas, más pesado que el aire
8	CH <sub>3</sub> -(CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> -CH <sub>3</sub>	n-Octano	Líquido, volátil como la gasolina
16 (aprox.)	CH <sub>3</sub> -(CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> -CH <sub>3</sub>	Aceite mineral	Líquido, viscoso
32 (aprox.)	CH <sub>3</sub> -(CH <sub>2</sub> ) <sub>30</sub> -CH <sub>3</sub>	Parafina	Sólido, con consistencia de pomada
64 (aprox.)	CH <sub>3</sub> -(CH <sub>2</sub> ) <sub>62</sub> -CH <sub>3</sub>	Cera	Sólido, blando y de punto de fusión bajo
> 100	CH <sub>3</sub> -(CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> -CH <sub>3</sub>	Polietileno	Sólido

Si un polímero se ha generado por reacción de un solo tipo de monómero, se denomina *homopolímero*, pero en el caso de que la polimerización se produzca entre monómeros distintos, recibe el nombre de *copolímero*. En el caso de los copolímeros, la distribución de los distintos monómeros constituyentes puede ser más o menos ordenada, presentando alternancia de monómeros, agrupación de bloques o cadenas de cada uno de los copolímeros (Fig. 5.4).

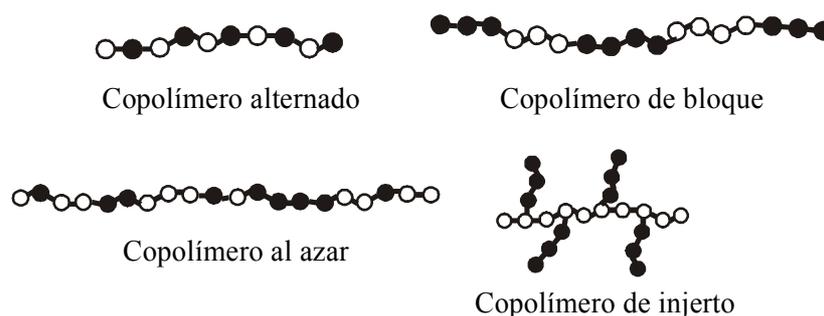


Fig. 5.4 Estructuras típicas de materiales copolímeros.

Si bien los metales y los cerámicos iónicos se caracterizan por presentar estructuras ordenadas o cristalinas, los polímeros suelen presentar estructuras amorfas, ya que la tendencia a cristalizar es inferior en estos materiales. Sin embargo, es posible hallar combinaciones de ambos tipos de agrupaciones en algunos polímeros, coexistiendo una parte amorfa, en que las cadenas no guardan ningún tipo de orden, con otra parte cristalina, en la que se encuentran grupos de largas cadenas plegadas sobre sí mismas (Fig. 5.5).

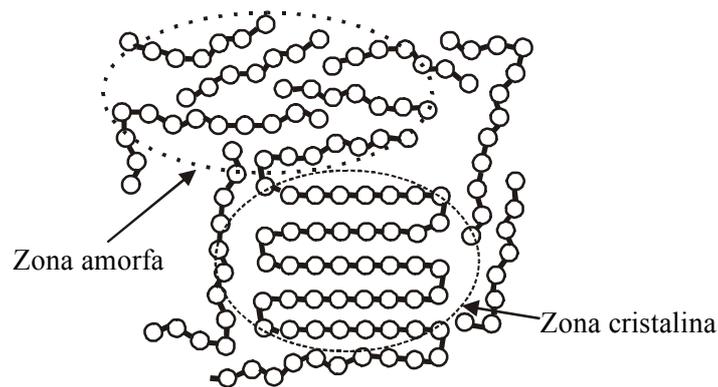


Fig. 5.5 Estructura polimérica que presenta una región cristalina rodeada de cadenas no ordenadas (región amorfa).

Estas agrupaciones tan sólo se observan en materiales con cadenas lineales largas, que pueden plegarse sobre ellas mismas. Si las cadenas son excesivamente largas, la cristalinidad se ve dificultada, de la misma manera que un elevado grado de copolimerización afecta a la capacidad de adoptar estructuras cristalinas, salvo que sean copolímeros de bloque.

Cuanto más cristalino es un polímero, mayor es su densidad, a causa de la compactación en el ordenamiento de cadenas. También se observa que un alto grado de cristalinidad va acompañado de un incremento en la rigidez y en la resistencia. Por otro lado, cuanto más amorfa es una estructura polimérica, más transparente es el material, con lo cual se puede decir que el incremento de cristalinidad se traduce en una mayor opacidad.

En general, se puede afirmar que las propiedades mecánicas de los polímeros dependen de la temperatura de trabajo, ya que por encima de un valor característico y propio de cada polímero, denominado temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), todos los polímeros experimentan un cambio importante en su rigidez. Así, por debajo de esta temperatura los polímeros suelen ser sólidos rígidos, mientras que, por encima, se favorece la movilidad de los segmentos de las cadenas poliméricas, con lo que el polímero puede adquirir un grado de flexibilidad tanto mayor cuanto menos reticulada esté su estructura.

Cuando un polímero semicristalino se calienta por encima de  $T_g$ , se aprecia un ablandamiento del material, favoreciéndose el conformado por deformación plástica, ya que se requieren esfuerzos menores. Si la temperatura sigue aumentando y se supera el punto de fusión ( $T_m$ ), el polímero se comporta como un fluido viscoso, momento en que puede ser inyectado. Cuando un polímero amorfo se calienta a  $T > T_g$ , se observa que directamente adopta el estado "gomoso", comportándose como un líquido muy viscoso.

Algunos de los factores que afectan al valor de  $T_g$  para un polímero determinado son:

- Los *grupos laterales* o *estructuras rígidas*, que se encuentran unidos a un átomo de C de la cadena, en sustitución de un átomo de H ( $-\text{CH}_3$ ,  $-\text{C}_6\text{H}_5$ , etc.). Cuanto más numerosos o más voluminosos sean, mayor será la energía requerida para su rotación, con lo cual se incrementará el valor de  $T_g$ .
- La existencia de *puentes de hidrógeno* entre cadenas, que aumenta la cohesión de la estructura y dificulta la pérdida de rigidez, con lo cual aumenta la temperatura de transición vítrea,  $T_g$ .

- El *grado de polimerización* ( $n$ ), que determina su masa molecular media. Cuanto mayor sea el valor de  $n$ , más larga será la cadena polimérica y se harán precisos mayores valores de temperatura para alcanzar esa transición del estado sólido al gomoso.

Las propiedades mecánicas de los materiales polímeros, como las de cualquier otro material, se determinarán estableciendo una relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación observada en el material. Estas relaciones pueden ser muy diferentes para los distintos tipos de polímeros, o bien depender de las condiciones de aplicación de un esfuerzo (velocidad de deformación, temperatura, etc.). Además, la respuesta de un polímero dependerá en gran manera de su capacidad de adoptar un estado viscoelástico bajo la acción de una carga aplicada.

De la misma forma descrita en el apartado 3.2, a partir de un ensayo de tracción se pueden determinar gran cantidad de parámetros mecánicos característicos para los distintos materiales polímeros. Así, los polímeros *rígidos* presentarán una relación tensión/deformación totalmente lineal bajo cargas aplicadas a tracción, respuesta propia de un material rígido y elástico. Por otro lado, un comportamiento *elastoplástico* corresponderá a aquellos polímeros que, a tracción, presenten una primera etapa lineal seguida de una etapa viscoelástica en la que la deformación se incrementará notablemente aunque la tensión aplicada apenas varíe. Por último, un comportamiento *elastomérico* se caracteriza por presentar grandes niveles de deformación bajo tensiones aplicadas muy bajas. En la figura 5.6 se representan los comportamientos descritos anteriormente.

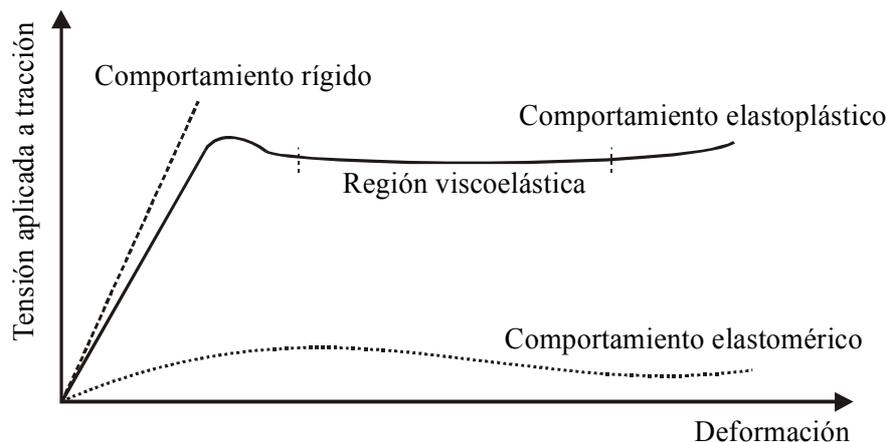


Fig. 5.6 Curvas características de los distintos comportamientos que suelen presentar los materiales polímeros bajo cargas aplicadas de tracción.

En el tramo lineal, la constante de proporcionalidad entre los valores de tensión y los de deformación corresponderá al módulo elástico ( $E$ ), que puede adoptar valores comprendidos entre  $10^{-3}$  GPa (espumas) y 5 GPa (poliamidas). El valor de tensión correspondiente al final del tramo lineal se conoce como *tensión de fluencia* o de *cedencia* y es tanto menor cuanto más elevada es la temperatura de ensayo.

Cabe decir que, a diferencia de lo que suele ocurrir al ensayar materiales metálicos a tracción, en los polímeros un incremento en la temperatura de ensayo induce un notable descenso en los valores de rigidez ( $E$ ) y también en los de la tensión de fluencia. Por el contrario, a temperaturas bajas la tensión de fluencia se localiza a valores superiores y, simultáneamente, la ductilidad disminuye bruscamente. Así, puede darse la situación de que se produzca la rotura al inicio de la deformación plástica, con lo cual no habrá tramo plástico y el material se comportará como un sólido rígido (elástico).

De este modo, aunque el comportamiento rígido sea característico de polímeros cristalinos, también puede observarse en polímeros semicristalinos y amorfos cuando son ensayados a velocidades de deformación muy elevadas o bien a temperaturas muy bajas. Por último, cabe indicar que el comportamiento elastomérico es la respuesta habitual de las gomas sometidas a tracción.

## 5.2 Polímeros termoplásticos

Constituyen el grupo más voluminoso de los materiales polímeros, en cuanto a aplicaciones industriales (del orden del 70 % en peso), y están constituidos por cadenas lineales o ramificadas que no reticulan, ni durante la polimerización ni durante su procesamiento. Como se ha indicado anteriormente, pueden calentarse desde su estado sólido hasta el viscoso-fluido, y posteriormente pueden enfriarse y calentarse de nuevo sin que se aprecien alteraciones en el aspecto ni en la gran mayoría de propiedades del material.

Si bien un polímero termoplástico puede ser reutilizado (calentado y conformado de nuevo), el comportamiento mecánico del producto final es ligeramente distinto del obtenido a partir de un polímero “virgen”, y esta diferencia se va haciendo más notable cuanto mayor es el número de utilizaciones.

Las propiedades mecánicas de los polímeros termoplásticos dependen en gran medida de la temperatura de trabajo, ya que su rigidez varía considerablemente cuando se aproximan a la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ). En el esquema de la figura 5.7 se representa la variación de la resistencia mecánica con la temperatura para distintos grados de cristalinidad de los polímeros termoplásticos.

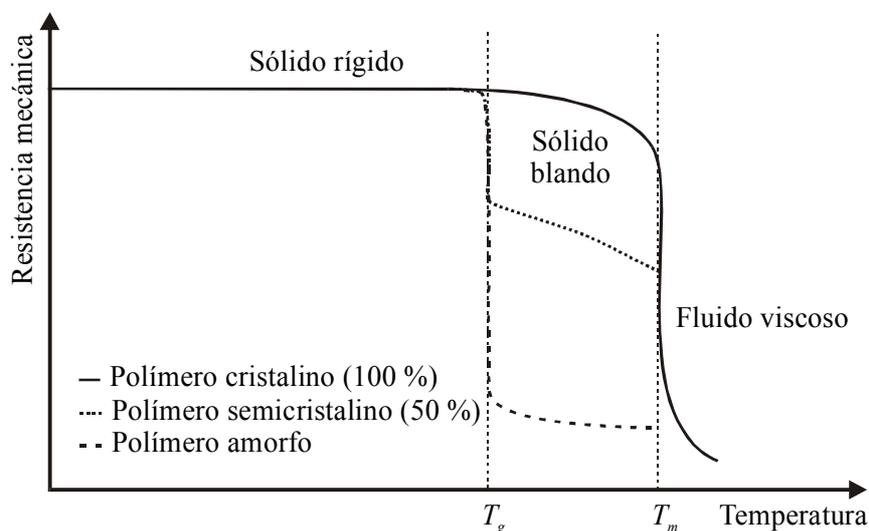


Fig. 5.7 Variación de la resistencia a la deformación según la temperatura para polímeros termoestables con distinto grado de cristalinidad.

Así pues, cuando un polímero amorfo se calienta por encima de su temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), su resistencia disminuye notablemente, mientras que uno totalmente cristalino (situación teórica) revelaría la existencia de un punto de fusión ( $T_m$ ) antes de mostrar transición vítrea. Los polímeros con cristalinidad parcial tienen curvas resistencia/temperatura con dos descensos súbitos en la resistencia mecánica, uno al alcanzar la temperatura de transición vítrea y otro al alcanzar el punto de fusión.

Cuando un polímero se halla en estado líquido (fluido viscoso), la velocidad de enfriamiento hasta la temperatura ambiente, o la de servicio, determinará sus propiedades. En el caso de los polímeros amorfos, que no tienen  $T_m$  y presentan valores de  $T_g$  moderados, se alcanza la temperatura correspondiente a su estado sólido sin que se produzca cristalización, y se conserva la transparencia tanto a velocidades de enfriamiento rápidas como lentas. Para los polímeros semicristalinos, una velocidad de enfriamiento lenta favorece la cristalinidad, mientras que una velocidad rápida conducirá al polímero a una temperatura inferior a  $T_g$  sin que haya tenido tiempo de cristalizar, lo que favorecerá su estructura amorfa.

A modo de ejemplo, el policarbonato (PC) con el que se elaboran los discos compactos tiene una  $T_g$  próxima a 140 °C y cuando se enfría desde la temperatura de inyección, conserva su estructura amorfa, con lo que el producto final presenta una gran transparencia. En cambio, para el nilón 6-6 (de la familia de las poliamidas y semicristalino), la transición vítrea se produce a una temperatura ligeramente inferior a la ambiente, por lo que la velocidad de enfriamiento es lenta y se favorece la cristalización, con lo cual el producto final es opaco y su estructura es muy compacta.

La clasificación de los polímeros termoplásticos no es sencilla. Un criterio habitual consiste en agrupar los distintos tipos de polímeros en familias, en función de sus características moleculares, pero también en función de sus aplicaciones. Así, entre los polímeros de gran consumo, denominados así por su bajo costo (< 1 € / kg) y su gran volumen de producción, destacarían:

- Las *poliolefinas*, químicamente muy simples, ya que sus cadenas están formadas únicamente por átomos de C y H. Dentro de las poliolefinas se encontrarían el *polietileno* (PE) y el *polipropileno* (PP). Se utilizan para envases, productos de uso alimentario y componentes domésticos.
- Los *poliestirenos* (PS), basados en el estireno (C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>). Se caracterizan por su transparencia, consecuencia de una estructura amorfa, y por ser fácilmente moldeables, si bien su resistencia a entornos agresivos es más bien pobre y se degrada con facilidad con la temperatura y algunos disolventes. Se utilizan para elaborar juguetes, utensilios domésticos, y esponjas. El *acrilonitrilo butadieno estireno* (ABS) es un copolímero mecánicamente muy resistente que suele utilizarse en automoción y en accesorios de tuberías.
- El *cloruro de polivinilo* (PVC), muy rígido y resistente, adecuado para elaborar componentes sometidos a presión (mangueras) y productos de construcción. Es autoextinguible y esta característica lo hace muy adecuado para su utilización en componentes eléctricos.
- La *celulosa*, que es un polímero natural que se halla en la madera y en el algodón. Sintetizado y conformado en forma de fibras, constituye uno de los polímeros más habituales en el sector textil. Un inconveniente es su baja resistencia a la temperatura, ya que se aprecia degradación por descomposición antes de alcanzar su temperatura de fusión.
- El *polietileno-tereftalato* (PET) es un polímero de gran transparencia y rigidez, que tiene una baja permeabilidad a los gases, por lo que su utilización se ha disparado en la última década para la elaboración de envases de bebidas carbónicas.

Dentro de los plásticos de ingeniería, que se caracterizan por poseer mejores propiedades mecánicas y térmicas que los polímeros de las familias anteriores, y también mayor costo (del orden de 2 a 6 € / kg) destacarían:

- Los *poliacrílicos*, derivados del ácido acrílico, se caracterizan por ser amorfos y por presentar una transparencia excelente, que los convierte en alternativas al vidrio muy adecuadas en aplicaciones ópticas y en el sector de la automoción. Un exponente de estos polímeros lo constituye el *polimetilmetacrilato* (PMMA).

- Las *poliamidas* (PA), que son muy resistentes, rígidas y de gran tenacidad, por lo que se elaboran fibras que se tejen en forma de tejidos o cuerdas. El Nilón-6,6 es una de las poliamidas de uso más extendido.
- Los *policarbonatos* (PC) destacan por su elevada tenacidad y por su resistencia mecánica a temperaturas moderadas (por debajo de 150 °C). Son muy transparentes y suelen utilizarse para la fabricación de cascos, maquinaria, receptáculos, estuches de discos compactos, etc.
- Las *resinas poliacetálicas*, que es el nombre habitual del *polioximetileno* (POM), son productos derivados del formaldehído que se caracterizan por poseer una gran rigidez y resistencia. Polimerizan según procesos de adición y presentan una gran estabilidad química, por lo que son muy resistentes a la acción de los disolventes. El conjunto de propiedades de estos polímeros los hace muy adecuados para la elaboración de componentes de precisión (maquinaria, ferretería, etc.).

Los termoplásticos utilizados en aplicaciones especiales constituirían una tercera categoría. Su coste es muy superior al de los materiales descritos anteriormente, superando fácilmente los 10 €/kg.

### 5.3 Polímeros termoestables

Como se ha indicado en la introducción de este tema, algunos polímeros poseen estructuras reticuladas tridimensionalmente a causa del cruzamiento de cadenas que se produce durante una etapa de *curado* o *fraguado*, posterior a la polimerización (generalmente por condensación). Estos materiales, ya sólidos tras la reticulación, se denominan *polímeros termoestables* o *termofijos*, mientras que leproyecto sin elaborar y sin reticular suele recibir el nombre de *resina*. Los polímeros termoestables suelen ser amorfos.

La reticulación convierte al sólido en una gran macromolécula que puede deformarse moderadamente si se calienta, pero que no presenta fluencia ni siquiera a temperaturas elevadas, por lo que una vez curado no podrá ser nuevamente moldeado. Cabe decir que un calentamiento excesivo, lejos de favorecer el moldeado, provocaría la degradación del material por descomposición.

Las diferencias más notables entre polímeros termoplásticos y termoestables provienen básicamente del proceso de fraguado y de la estructura resultante de este proceso. Los valores del módulo elástico (E) de los termoestables suelen estar próximos a los 10 GPa, por encima de los correspondientes a los polímeros termoplásticos. La deformación total que pueden llegar a desarrollar los polímeros termoestables no suele superar el 2 % en condiciones de temperatura ambiente y por debajo de su  $T_g$ , y sus valores de resistencia a tracción se localizan entre los mayores valores de los termoplásticos (entre 30 y 70 MPa).

Cabe considerar que el cruzamiento de cadenas requiere que se creen lugares de unión, situación que se suele producir cuando la resina reacciona químicamente con un aditivo (*activador*, habitualmente denominado *catalizador*) que se añade en pequeñas cantidades. Sin este reactivo, que suele ser un peróxido orgánico, la resina podría permanecer estable durante períodos de tiempo muy largos, pero en presencia del activador se inicia una reacción en cadena, tanto más importante cuanto mayor sea la cantidad de este aditivo. En ocasiones, la creación de lugares de unión no requiere de ningún reactivo y se inicia espontáneamente cuando la resina alcanza una temperatura determinada.

Las aplicaciones de los polímeros termoestables no son tan amplias y comunes como las de los termoplásticos, especialmente por las limitaciones asociadas al proceso de curado, y su presencia en el ámbito de polímeros industriales es mucho menor (por debajo del 10% frente al 40% de los

termoplásticos). Las familias de termoestables de uso más extendido son las que se indican a continuación:

- *Resinas epóxicas*, basadas en grupos epoxi, de los cuales el más simple es el óxido de etileno y el más extendido el óxido de cloropropileno (Fig. 5.8). El grado de polimerización previo al curado es pequeño, pero estas resinas curadas destacan por sus características mecánicas y su estabilidad química. Se utilizan como recubrimientos sobre sustratos poliméricos o metálicos (alimentación), como aislantes eléctricos y como matriz de materiales compuestos reforzados con fibras.
- *Resinas fenólicas, melaminas y aminoplásticos* (resinas de urea-formaldehído). En este grupo destaca el fenol formaldehído (Fig. 5.8), conocido como *baquelita*, por su gran estabilidad química y su rigidez, además de poseer una notable resistencia a tracción para temperaturas intermedias. Pueden reticularse por la acción del calor y la presión, adoptando la forma del recipiente (moldeado).

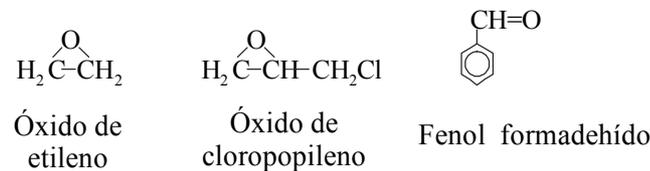


Fig. 5.8 Estructura de los componentes básicos de alguna resinas epóxicas y fenólicas

- *Poliésteres insaturados*, que son de uso común como matrices en materiales compuestos reforzados con fibras para la elaboración de componentes voluminosos y en automoción. Pueden curarse por calor (termofraguado) o bien por adición de un activador, proporcionando un material de resistencia moderada y de gran rigidez.
- *Siliconas*, distintas de todos los termofijos por su enlace Si-O, repetido en la molécula junto con monómeros metilo (-CH<sub>3</sub>). En función de la proporción de ambas unidades pueden ser líquidas (pesos moleculares bajos) o sólidas. En este último caso, pueden ser elastoméricas o termoestables, en función del grado de uniones transversales. No se combinan con el agua, que las convierte en productos adecuados para recubrimientos o aislamientos eléctricos. En todos los casos, sus propiedades mecánicas son más bien pobres.
- *Poliuretanos*, con arquitecturas moleculares variadas, atendiendo a la gran diversidad química existente dentro de esta familia, se caracterizan por tener grupos uretanos (NHCOO). Es común su utilización en forma de *espumas*, presentando densidades muy bajas y gran capacidad de absorción de impactos.

## 5.4 Elastómeros

Un tercer gran grupo de materiales polímeros lo constituyen los *elastómeros*, que destacan por su gran capacidad para deformarse elásticamente por la acción de esfuerzos muy pequeños, si bien no siempre siguen la ley de Hooke. Los *cauchos* son los elastómeros más conocidos y utilizados, y están formados por polímeros de cadenas flexibles, con fuerzas intermoleculares pequeñas y ligeramente entrecruzados a intervalos de 50-100 unidades repetitivas.

El fenómeno de la elasticidad en los elastómeros puede interpretarse suponiendo que las porciones de cadenas localizadas entre cruces están retorcidas y que el efecto de la tensión aplicada endereza las cadenas, lo cual induce un estiramiento en el polímero. Cuando cesa la acción de la carga aplicada, las cadenas vuelven a retorcerse y el material se encoge, volviendo a las dimensiones iniciales (Fig. 5.9).

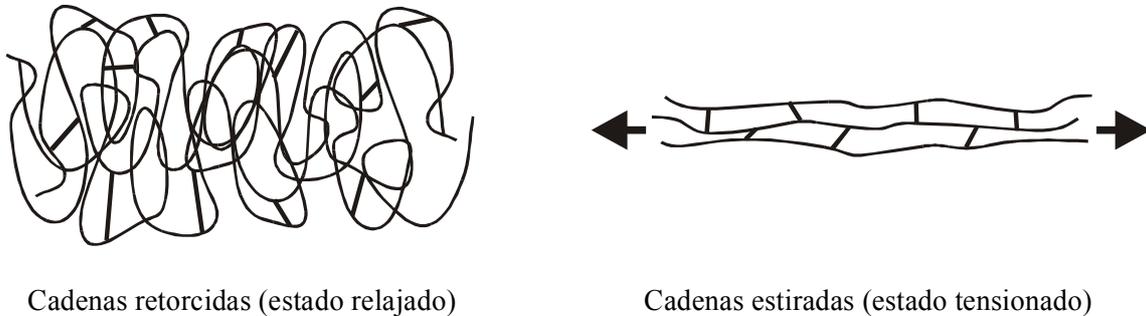


Fig. 5.9 Redistribución de las cadenas poliméricas de un elastómero cuando actúa una tensión de tracción.

El módulo elástico de los elastómeros va aumentando a medida que actúa la carga aplicada, ya que en un primer momento no son los enlaces covalentes de las cadenas los que sufren esta tensión, sino los enlaces secundarios que mantienen la molécula retorcida, y éstos son mucho más débiles. Cuando las cadenas se han estirado, la acción de la tensión de tracción se ejerce sobre los enlaces de la cadena, mucho más resistentes, y el material se revela mucho más rígido.

Cabe decir que el grado de cruzamiento de los elastómeros tendrá un efecto decisivo en el valor del módulo elástico, ya que será más difícil estirar las cadenas cuanto mayor sea el número de cruzamientos. Así, por ejemplo, el caucho natural apenas tiene cruzamientos y se comporta como un material con una rigidez muy baja, mientras que el caucho vulcanizado posee valores de módulo elástico notablemente superiores, debido al mayor número de enlaces transversales que presenta. También es importante destacar que los elastómeros han de ser amorfos, ya que un ordenamiento cristalino de las cadenas poliméricas no permitiría un comportamiento como el indicado en la figura 5.9.

Los elastómeros sintéticos se han desarrollado en el siglo XX y están elaborados a partir de copolímeros en los que el grado de unión entre cadenas (cruces) es moderado. De entre los elastómeros más utilizados actualmente, destacarían los siguientes:

- *Poliisoprenobutadieno* (PIB), que puede alcanzar deformaciones elásticas próximas al 700 % y posee una muy baja permeabilidad al aire, con lo cual es muy adecuado para aplicaciones en que se requiere elasticidad y estanqueidad (cámaras).
- *Policloropreno* (CR de *chloroprene rubber*, conocido como neopreno), que se distingue por su capacidad de endurecer bajo tensión (al ordenarse sus cadenas, incrementando su rigidez) y por su gran estabilidad frente a productos derivados del petróleo y en condiciones atmosféricas. No se deforma tanto como el PIB, pero el resto de sus propiedades lo convierten en un material muy adecuado para componentes de automoción y para recipientes de combustible.
- *Elastómeros termoplásticos*, que son algunos polímeros termoplásticos que se comportan como elastómeros en determinadas condiciones. En este grupo se hallarán el SBS (*estireno-butadieno-estireno*) y el SBR (*stirene butadiene rubber*). La capacidad de deformación es

prácticamente la mitad que la del PIB, pero económicamente son muy competitivos y se utilizan en numerosas aplicaciones. El TEPD (*etileno-propileno-dieno*) pertenece también a este grupo y es más resistente al desgaste y más rígido que el neopreno, por lo que es más adecuado para fabricar componentes de ruedas de automóviles y recubrimientos de cableado eléctrico.

## 5.5 Procesos habituales de conformado de materiales polímeros

Los polímeros se caracterizan por la versatilidad de formas que pueden adoptar mediante numerosos procesos de conformado. Los termoplásticos son los materiales polímeros que pueden adaptarse a mayor número de procesos de conformado, ya que desde su estado sólido pueden conformarse por mecanizado, como cualquier otro tipo de material, si bien generalmente se procesan en caliente, sea en estado líquido o gomoso (por encima de  $T_m$  o de  $T_g$ , según el polímero), por inyección, por extrusión o mediante otras operaciones de moldeado. Así, se describirán en primer lugar las técnicas más habituales de conformado de polímeros, detallando en último lugar algunos otros procesos, de aplicación más moderada.

Es importante tener presente que los polímeros muestran un elevado comportamiento elástico, tanto en frío como en caliente, de manera que en el diseño de los diferentes procesos de conformado se ha de considerar esta característica. Así, para los procesos en que el polímero, en frío o en caliente, está sometido a tensiones de compresión elevadas (matriz, boquilla), se observa una *dilatación* cuando salen de la zona de máxima presión (comportamiento *viscoelástico*), como, por ejemplo, a la salida de la boquilla de una extrusora, en la que la presión se aplica desde la región posterior.

De igual forma, atendiendo a los elevados coeficientes de expansión térmica de los polímeros, es habitual que presenten contracción (mayor cuanto más elevado sea el grado de cristalinidad) cuando se enfrían, tanto en estado sólido como desde su estado fluido. Por tanto, será preciso sobredimensionar las cavidades de los moldes para compensar este efecto.

### 5.5.1 Moldeo por inyección

El proceso de inyección es un método de conformado semicontinuo que consiste en introducir a presión un material fluido dentro de una cavidad que posee las dimensiones del componente a elaborar. En los procesos de inyección de termoplásticos, el material que alimenta la máquina (*inyectora*) se halla en una *tolva*, generalmente en forma de *granza* (Fig. 5.10), y cuando se calienta hasta alcanzar un estado suficientemente fluido se introduce a presión en un molde cerrado.

Los equipos de inyección inicialmente disponían de un *émbolo* para ejercer presión sobre el fluido, si bien en la actualidad es un *husillo* el que ejerce esta función. El husillo, rodeado de *bandas calefactoras*, va girando mientras se introduce el polímero desde la tolva de alimentación. El giro del husillo desplaza hacia la zona de salida (*boquilla*) el material plastificado que se acumula en esta zona y empuja el husillo hacia atrás. En este momento, un movimiento axial del husillo hacia delante introduce el plástico fundido en la cavidad (*molde*). En este momento, es preciso que el husillo se mantenga en la posición de inyección, cerrando la boquilla y ejerciendo presión sobre el material que llena el molde, durante el tiempo para que el polímero solidifique. Entonces, el husillo retrocede, se extrae el componente del molde y vuelve a iniciarse un *ciclo de inyección*. En la figura 5.11 se representan las partes de una inyectora estándar.



Fig. 5.10 Granza de polímeros termoplásticos.

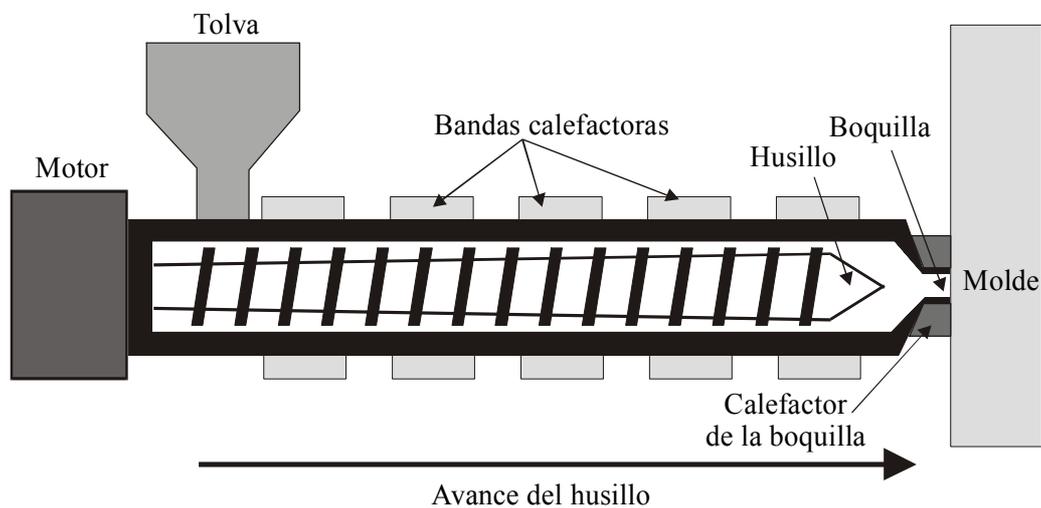


Fig. 5.11 Esquema de las partes de una inyectora de husillo.

Las formas finales que pueden obtenerse mediante este proceso pueden ser muy complejas y también es posible inyectar varias piezas simultáneamente (moldes de cavidades múltiples), con lo que se incrementa notablemente la eficacia del proceso. El conformado por inyección es muy rápido, ya que los tiempos de un ciclo completo suelen ser inferiores al minuto, lo cual favorece los niveles de producción elevados.

Uno de los inconvenientes de las operaciones de inyección, en cuanto a los componentes obtenidos, reside en que el diseño de las cavidades ha de permitir la extracción de las piezas elaboradas sin dificultad, evitando degradaciones o alteraciones en el molde. Por otro lado, se ha de tener presente la imposibilidad de obtener componentes con paredes delgadas, debido a las características del proceso.

Los costes asociados al diseño y elaboración de moldes para este tipo de operaciones son considerables, pudiendo amortizarse únicamente si los niveles de producción son muy elevados. Por ellas, la inyección es una técnica muy habitual para la obtención de componentes de uso muy común o de gran consumo.

Si bien ésta es una técnica común para el conformado de termoplásticos, que alcanzan su máxima temperatura antes de entrar en el molde, es posible el conformado por inyección de polímeros termoestables, siempre y cuando el diseño del proceso permita que alcancen su máxima temperatura una vez dentro de la cavidad y pueda realizarse el curado durante su permanencia en el molde.

Es habitual combinar procesos de inyección con otros que impliquen grandes niveles de deformación plástica, como la inyección-soplado, que permiten obtener componentes voluminosos, de paredes sumamente delgadas, a velocidades de producción elevadas. Este proceso se utiliza para elaborar envases de bebidas (agua, carbónicas, aceite, etc.), según se representa en el esquema de la figura 5.12.

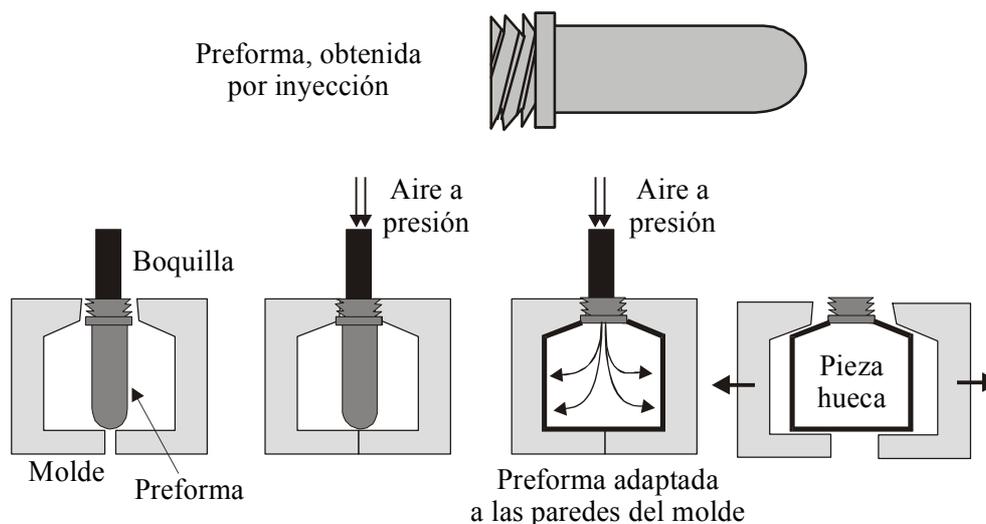


Fig. 5.12 Esquema del proceso de inyección-soplado para la fabricación de envases.

Uno de los defectos más comunes que suelen presentar los componentes elaborados por inyección es que la pieza resulte *incompleta*, normalmente a causa de una inadecuada alimentación, bien sea por solidificación prematura o por presión insuficiente. Es también habitual la presencia de huecos o *rechupes*, provocados por una solidificación de la capa externa del material mientras hay líquido debajo que, al solidificar, se contrae. En ocasiones se forman *rebabas*, producidas al introducirse polímero fundido entre las dos mitades del molde, que quedan como unas líneas de material que sobresale en la pieza final.

Los parámetros que determinan la bondad del proceso son:

- Las características del material, especialmente la viscosidad y la temperatura de fusión.
- La temperatura de proceso, que determinará el grado de fluidez y el tiempo que será preciso esperar para la solidificación de la cavidad y para poder iniciar un nuevo ciclo.
- La posibilidad de disponer de un molde con control de temperatura para evitar cambios bruscos de temperatura durante la inyección, que podrían provocar solidificaciones previas y/o componentes defectuosos.
- La complejidad del molde, que determinará la velocidad a la que ha de introducirse el fluido para garantizar una correcta distribución.

- Los niveles de presión alcanzados.
- El tiempo necesario para completar un ciclo de inyección, ya que de éste dependerá el rendimiento del proceso.

### 5.5.2 Extrusión

Estos procesos se caracterizan por la obtención de perfiles al forzar el paso del polímero fluido por una boquilla, que proporciona la forma definitiva. La presión que fuerza el movimiento de material se aplica mediante un husillo, y en el momento en que el material ha atravesado la boquilla (zona de máxima presión), ya no se halla sometido a ningún tipo de esfuerzo aplicado. En estas condiciones se pone de manifiesto la capacidad de recuperación elástica del polímero (*viscoelasticidad*), que se revela como un *hinchamiento* a la salida de la boquilla (Fig. 5.13), provocado por el carácter elástico de los polímeros y que conduce a unas dimensiones finales difíciles de prever en el componente elaborado.

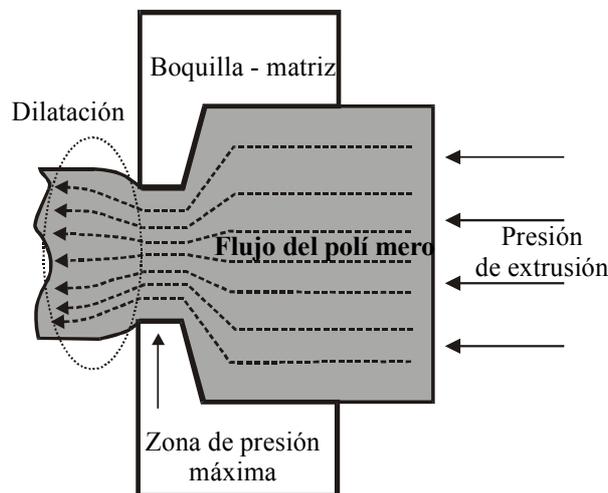


Fig. 5.13 Dilatación producida por recuperación elástica del polímero a la salida de la extrusora.

La dilatación que se produce a la salida de la extrusora será menos importante cuanto más tiempo haya permanecido el material bajo presión, por lo que es común que el diseño de los equipos de extrusión favorezca un mayor tiempo de permanencia en la zona de máxima presión (boquillas o matrices largas). Otra forma de reducir este efecto sería disminuir la velocidad de extrusión, con lo cual la presión sería menor y se incrementaría el tiempo de tránsito por la boquilla, o bien incrementando la temperatura de extrusión, lo que favorecería una disminución del carácter elástico de los polímeros.

Los equipos utilizados para la extrusión de termoplásticos alojan la granza en una *tolva* que dosifica la entrada del material a la *zona de alimentación*, que se halla en la región posterior del *husillo*. En este caso, el movimiento del husillo es tan sólo giratorio, sin desplazamiento axial, y provoca el desplazamiento del material hacia la región intermedia (*zona de compresión*) en la que se calienta por la acción de unas *bandas calefactoras* y también por fricción. Al calentarse, se inicia la plastificación del polímero y su volumen se reduce, fenómeno que se contrarresta con un incremento progresivo de la sección del husillo, favoreciendo la compactación del plástico fundido y su avance hacia la zona de salida (*zona de dosificación*). En la figura 5.14 se representan esquemáticamente las distintas partes de una extrusora.

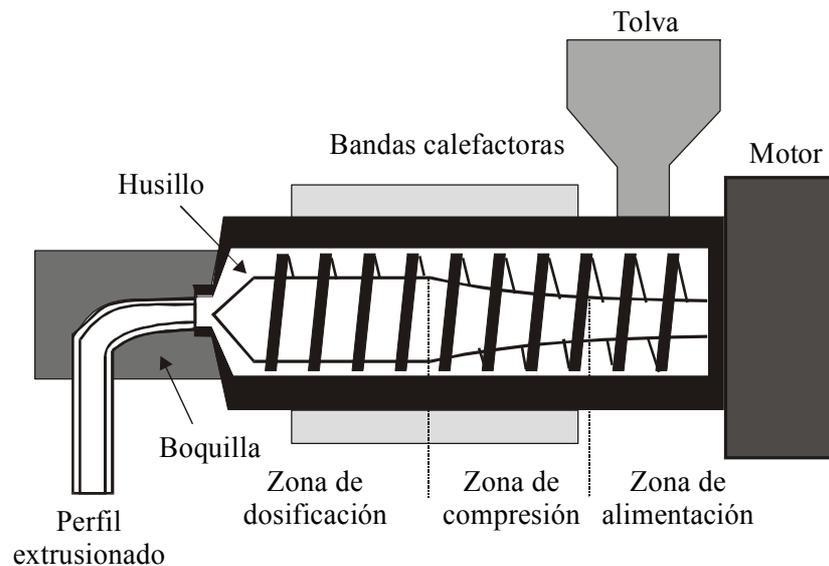


Fig. 5.14 Representación esquemática de las partes de una extrusora.

En estos equipos, el husillo no actúa como un émbolo, sino como una bomba, de manera que el plástico fundido pasa a través de la boquilla, la cual le proporciona un perfil determinado (macizo o hueco), y el hecho de que la alimentación de polímero fundido sea constante (a diferencia de los procesos de inyección) permite la obtención de perfiles tan largos como se deseen. La extrusión se convierte así en el proceso ideal para la elaboración de tubos, recubrimientos de cables, perfiles, etc. Combinando la acción de una boquilla con perfil plano y la de unos rodillos en la zona inmediata de salida del perfil, se pueden obtener láminas de espesor variable que se pueden almacenar en bobinas.

Es común combinar la extrusión con el soplado (extrusión-soplado) para elaborar objetos huecos. En estos procesos, una porción de tubo se corta, de manera que uno de los extremos quede sellado, y se introduce en una cavidad más ancha. Al introducir aire a presión por el extremo abierto del tubo, éste se deforma y adopta la forma de la cavidad. Al separar las dos mitades del molde, se extrae el componente hueco (Fig. 5.15).

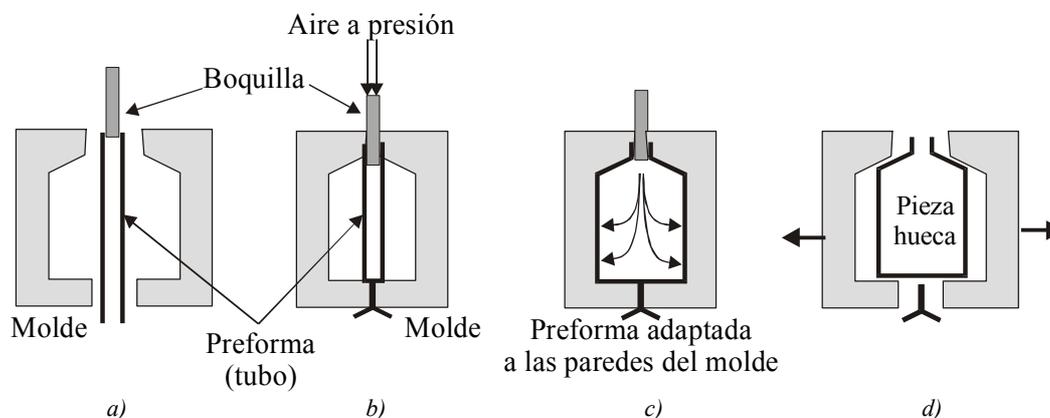


Fig. 5.15 Extrusión-soplado: a) preforma hueca de partida; b) preforma atrapada por el molde, introducción de la boquilla; c) por soplado, el tubo adopta la forma del molde; d) extracción del componente hueco.

Mediante extrusión-soplado pueden elaborarse *films*, o componentes de muy bajo espesor. El proceso es muy similar al descrito en la figura 5.15, ya que se parte de una preforma (tubo) que se deforma mucho por soplado, de manera que el volumen de la preforma se distribuye uniformemente en una gran superficie, con lo que se consiguen espesores mínimos. Esta técnica es la que se utiliza para fabricar bolsas.

También es posible la elaboración de fibras mediante operaciones de extrusión. Para ello se utilizan boquillas con orificios pequeños que proporcionan perfiles de sección muy reducida, que se estiran mientras están aún calientes, en cuanto salen de la extrusora. Este proceso aprovecha la gran capacidad de deformación plástica que poseen los polímeros en caliente y el hecho de que, además, con el estirado se orientan las cadenas, lo que confiere mayor resistencia mecánica al producto resultante. Una vez obtenidas las fibras, se enrollan en bobinas y quedan disponibles para su uso.

La combinación de una boquilla plana y una sucesión de rodillos permite la obtención de películas muy finas por *calandrado*, partiendo de perfiles rectangulares estrechos que van reduciendo su sección a medida que los rodillos van actuando. La reducción de sección se combina con un estirado, a fin de aumentar la resistencia del material y, dependiendo del espesor y del material, pueden también almacenarse en forma de bobinas hasta su utilización.

La complejidad de los esfuerzos que actúan sobre el material a la salida de la boquilla provoca a veces la presencia de defectos en los perfiles extrudidos. Así, en ocasiones aparecen irregularidades (fisuras, arrugas) en la superficie provocadas por la generación de un flujo turbulento de polímero fundido, que rompe la piel ya sólida recién salida de la boquilla.

### 5.5.3 Termoconformado y otras operaciones

En las operaciones de *termoconformado* se parte de una plancha o lámina de polímero termoplástico o termoestable. Con un calentamiento suficiente, el material adquiere la capacidad para adaptarse a una forma (molde), y por succión o presión se acerca la lámina a la pared del molde (Fig. 5.16).

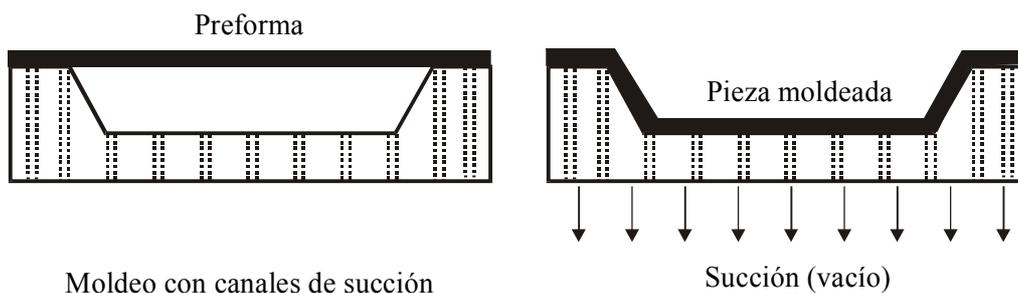


Fig. 5.16 Etapas del proceso de termoconformado.

También es posible la elaboración de recipientes herméticos (balones) o de componentes de perfil muy complejo gracias a un proceso de moldeo del material polímero en estado pulverulento. En este caso, el polvo se introduce en un recipiente cerrado que reproduce las dimensiones del componente a elaborar. Las paredes del recipiente se calientan y, mediante un movimiento de rotación, se distribuye el polvo por todo el molde caliente (*moldeo rotacional* o *rotomoldeo*). Por efecto del calor se produce la fusión del polvo directamente sobre las paredes del molde, a la vez que se consigue una distribución muy homogénea del material, obteniéndose componentes huecos. Este proceso es ideal para la elaboración de bidones, contenedores, jarrones, muñecas, etc. (Fig. 5.17).

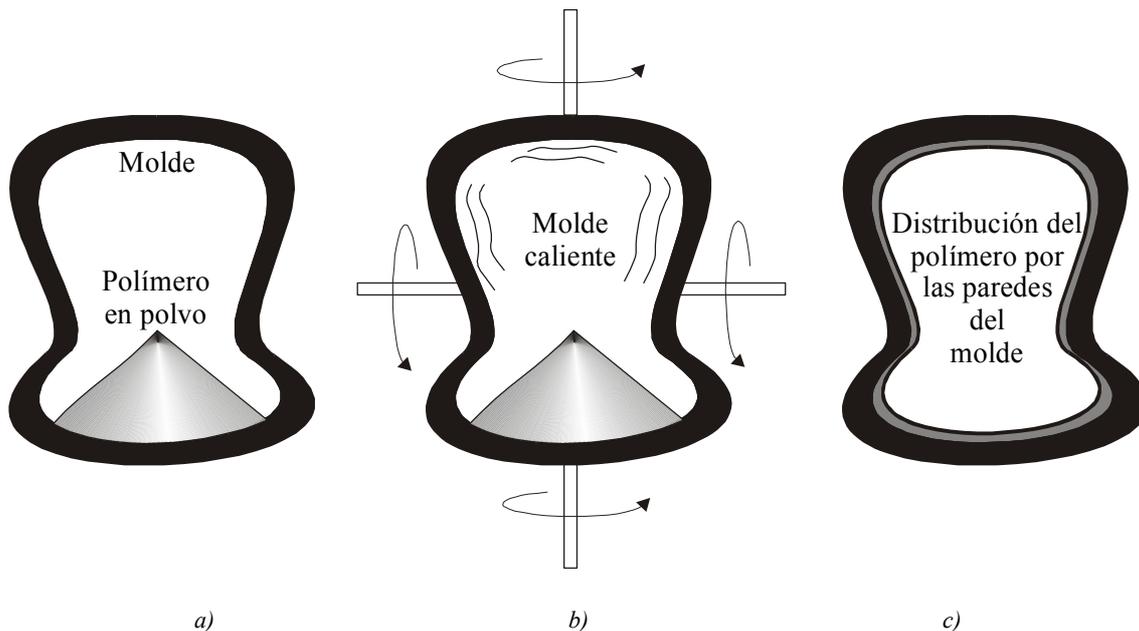


Fig. 5.17 Etapas del moldeo rotacional: a) el polímero en polvo se introduce en el recipiente y se cierra; b) se calientan las paredes del molde y se somete a movimiento rotacional; c) el polímero funde en contacto con las paredes calientes y se forma un componente hueco.

Otros procesos de conformado de polímeros serían el de moldeo por colada, que es similar al proceso de fusión y moldeo para metales, y que requiere que los polímeros estén en estado fluido y se viertan en un molde. Por último, citar el *moldeo por compresión*, generalmente utilizado con termoestables, que consiste en la elaboración de un perfil a partir de una porción de polímero de dimensiones próximas a las del componente que se desea obtener, que se coloca entre las dos mitades de un molde. Cuando éstas se cierran, el polímero se adapta a la cavidad, y el curado se realiza por la acción del calor combinado con la presión de cierre del molde. El *moldeo por transferencia* también es un proceso de conformado de polímeros termoestables, pero en esta ocasión se parte de un volumen de polímero de dimensiones iniciales muy distintas y que, bajo la acción de un émbolo, se distribuye por el interior de una cavidad. La presión de cerrado y el molde caliente inducen el curado del polímero que, una vez finalizado el ciclo, se extraerá totalmente sólido (Fig. 5.18).

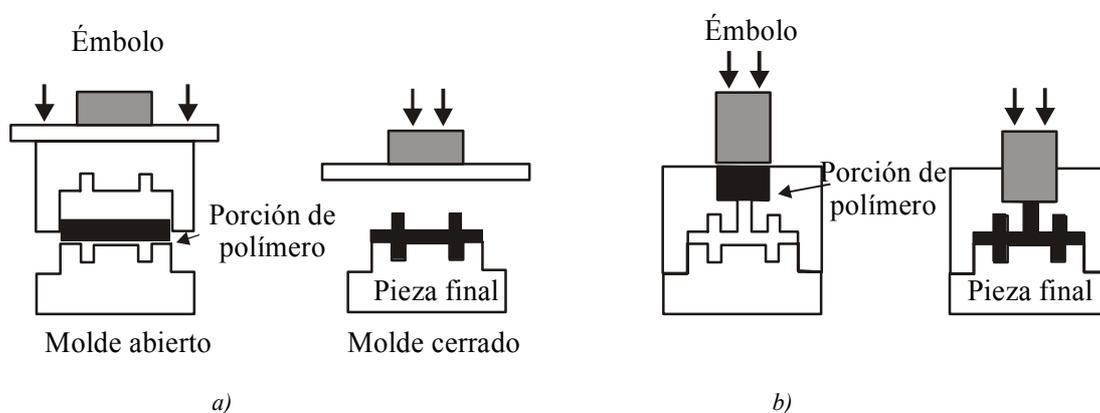


Fig. 5.18 a) Etapas del moldeo por compresión; b) etapas del moldeo por transferencia.



## **Módulo IV**

Este último módulo comprende los temas 6 y 7 del texto y recoge los aspectos más destacados relacionados con los materiales cerámicos y los composites, así como los componentes que de ellos se derivan.

El objetivo principal de esta cuarta parte del texto podría darse por conseguido, si después de consultar la parte de texto correspondiente, es posible hacerse una idea de las peculiaridades de estos dos grupos y de las limitaciones que presentan por sus procesos de conformado.



## 6 Materiales compuestos

Los materiales utilizados por el hombre han dado nombre a las distintas civilizaciones que se han vivido hasta el momento. Así, desde la edad de piedra, pasando por la del bronce y la de hierro, se ha hablado de la edad del aluminio al hacer referencia a estas últimas décadas. Se podría, por tanto, hablar del siglo XXI como la edad de los materiales compuestos o *composites*.

Es posible encontrar referencias históricas muy antiguas en lo que se refiere a la utilización de materiales compuestos, ya que la utilización de adobes (mezcla de paja y barro no cocido, utilizada para la construcción de edificios) y de embarcaciones de juncos impermeabilizadas con betún se remonta a las culturas antiguas.

Si se parte de la definición de *material compuesto* o *composite* que proporcionan los diccionarios, se podría describir como *material constituido por distintas partes o constituyentes*. De esta manera, una aleación metálica se consideraría un material compuesto, puesto que está formada por más de un tipo de átomo. De la misma forma, también podría decirse que un acero eutectoide, de microestructura perlítica, es un material compuesto, dada la naturaleza bifásica de sus cristales.

A la hora de considerar un material como un compuesto, es la constitución macroscópica la que se tiene en cuenta, tanto si las fases constituyentes presentan dimensiones *micro* (entre  $10^{-4}$  y  $10^{-2}$  cm) como si son *macro* ( $> 10^{-2}$  cm). De esta forma, un composite estaría formado por una mezcla o combinación de dos o más constituyentes básicos que pueden tener formas y/o composiciones químicas distintas y que pueden ser separados físicamente.

Este tipo de materiales despierta un gran interés en el ámbito de la ingeniería aplicada, ya que, generalmente, al combinar dos materiales para formar un tercero, este último posee propiedades únicas y superiores a las de los constituyentes por separado e incluso, en ocasiones, a su suma. La combinación de los materiales constituyentes, es decir, su distribución y proporción, debe realizarse teniendo en cuenta las necesidades del producto resultante.

Dentro de la categoría de compuestos, se pueden encontrar infinidad de materiales que suelen clasificarse en función de la naturaleza del constituyente mayoritario o, en su caso, continuo (*matriz*). Independientemente de la naturaleza de la fase matriz, la segunda fase (o *refuerzo*) puede ser del mismo tipo (compuestos polímero-polímero), o no (compuestos de matriz metálica y refuerzo cerámico, o *cermets*).

Es también común clasificar los compuestos basándose en el tipo de segunda fase o de refuerzo que tengan, y en los apartados siguientes se considerarán ambos criterios.

## 6.1 Tipos de materiales compuestos

La necesidad de disponer de materiales con combinaciones inusuales de propiedades ha sido la principal fuerza impulsora del desarrollo de los materiales compuestos. Así, el objetivo principal en este ámbito de desarrollo ha sido disponer de materiales que presenten, simultáneamente, características propias de otros tipos de materiales distintos.

La fase matriz de un compuesto puede ser de naturaleza metálica, cerámica o polimérica. Su principal función es la de actuar de ligante de la fase de refuerzo, sea de la naturaleza que sea, transmitiéndole cualquier esfuerzo aplicado al conjunto, a la vez que la protege del deterioro superficial. También es importante destacar que una función muy común de la matriz es mantener separados los volúmenes de la segunda fase, a fin de evitar la propagación de fisuras entre distintos volúmenes de la misma.

Generalmente se utilizan metales y polímeros como matriz de materiales compuestos, ya que la ductilidad es una de las propiedades más aceptadas de este tipo de constituyentes. Cabría destacar el *hormigón* como ejemplo de material compuesto de matriz y de refuerzo cerámicos, ya que la matriz es de cemento y la fase de refuerzo está constituida por una mezcla de grava y arena.

### 6.1.1 Compuestos de matriz metálica (CMM)

La gran mayoría de metales son dúctiles en condiciones normales de servicio y se utilizan como matriz de compuestos reforzados con segundas fases cerámicas y, eventualmente, metálicas. Los metales más utilizados en este tipo de materiales son las aleaciones de aluminio, las de cobre y las de titanio, que se suelen reforzar con fibras de vidrio, de carbono, de boro, de carburo de silicio (SiC), o bien con fibras metálicas en porcentajes no superiores al 20%. En algunas aplicaciones en que se requiere una importante resistencia a temperaturas elevadas, se utilizan aleaciones de níquel y de cobalto como matriz, ya que estos metales pueden soportar esfuerzos notables y ambientes agresivos a temperaturas considerables (por ejemplo, turbinas de turborreactores).

Cuando la fase de refuerzo es de naturaleza cerámica, los CMM se denominan *cermets* y, dentro de éstos, los más comunes son los *carburos cementados*, constituidos por carburos metálicos, en porcentajes muy elevados, embebidos en una matriz metálica. Estos materiales combinan la tenacidad de un metal con la dureza del cerámico, y los carburos más habituales utilizados para la elaboración de *cermets* son los de wolframio (WC), tantalio (TaC), titanio (TiC) y cromo ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ), con aglutinantes metálicos de cobalto y de níquel. Un *cermet* de uso común y extendido es el *metal duro*, constituido por partículas de carburo de wolframio o de titanio (del orden del 90 % en volumen) unidas por una matriz metálica de cobalto, con un conjunto de características que lo hacen muy adecuado para la elaboración de herramientas de corte para cerámicos o metales endurecidos. Los *cermets* suelen destinarse también a la fabricación de matrices de conformado de metales y de componentes de motores que deban resistir altas temperaturas en servicio sin perder prestaciones.

Es también común encontrar materiales compuestos elaborados con una matriz metálica de cromo o de otros metales y una fase de refuerzo constituida por óxidos metálicos, como óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y de magnesio (MgO). Si la fase de refuerzo presenta morfología fibrosa, se consigue un material extremadamente resistente en la dirección paralela a la de orientación de las fibras.

En el caso de matrices de aleaciones de aluminio o de titanio, se obtienen materiales compuestos de baja densidad, pero muy resistentes, gracias a la acción de la fase de refuerzo. De esta manera, las propiedades mecánicas específicas se incrementan considerablemente y, en consecuencia, que estos materiales compuestos son altamente indicados para aplicaciones en la industria aeroespacial y en motores de última generación.

### 6.1.2 Compuestos de matriz cerámica (CMC)

Los CMC combinan las principales características del material cerámico constituyente de la matriz, como sería la dureza, la resistencia a compresión y la rigidez, y persiguen compensar aspectos menos afortunados, como sería la fragilidad, con las propiedades de la segunda fase. Aunque los CMC son los compuestos menos habituales, dentro de este grupo cabe destacar el hormigón como producto de gran consumo, de uso habitual y cotidiano, y quizá el CMC más conocido.

El hormigón se utiliza en construcción y se compone de una matriz cerámica (cemento) y de una segunda fase también cerámica (arena y grava), presente en porcentajes próximos al 70%. La fase de refuerzo, además de actuar como tal, reduce notablemente los costos del material, puesto que es mucho más económica que el cemento y se halla presente en porcentajes de volumen importantes. Las propiedades mecánicas del hormigón son moderadas, con lo que se consideran siempre volúmenes relativamente grandes, y es altamente adecuada la introducción de refuerzos adicionales, como sería una red de acero (*hormigón armado*), o bien de fibras muy rígidas (fibra de vidrio, nilón, etc.).

En el caso del hormigón armado, el material resultante es producto de la acción de un doble refuerzo: el proporcionado por el conjunto de partículas de grava y arena y, por otro lado, el debido a la presencia de una estructura de acero que otorga al conjunto una importante resistencia a la tracción, a la compresión y a la cizalladura, de manera que, aunque se generen grietas en el hormigón, la red metálica evita o retarda la fractura total del conjunto. En la elaboración del hormigón armado es habitual utilizar *estructuras de acero pretensadas*, que se introducen en la cavidad sometidas a esfuerzos de tracción que se eliminan durante el fraguado del hormigón, provocando tensiones de compresión en la matriz. De esta forma, cuando el hormigón armado se someta a tracción, no se producirá rotura hasta que no se supere la resistencia del material y, además, la tensión de compresión existente, con lo cual la resistencia efectiva del componente será muy superior a la teórica.

El resto de CMC suelen estar constituidos por una fase cerámica, generalmente alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), carburo de boro ( $\text{B}_4\text{C}$ ), y nitruros de boro y/o de silicio ( $\text{BN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Como refuerzo, suelen utilizarse fibras cortas (*whiskers*) o fibras largas, pero este último tipo es menos habitual.

### 6.1.3 Compuestos de matriz polimérica (CMP)

Consisten en una fase matriz polimérica, que puede ser termoestable, termoplástica o elastomérica, y una segunda fase o refuerzo que suele tener morfología de fibras, de partículas o de láminas. Dentro de este grupo de materiales, los CMP formados por una matriz termoestable (resina) y un refuerzo de fibras son los más comunes y de uso más extendido, lo que contribuye a que sean los más conocidos y los primeros que vienen a la cabeza a la hora de poner un ejemplo de material compuesto.

Cuando el refuerzo utilizado presenta forma de fibras, es muy común encontrar refuerzos de fibras de vidrio, de *Kevlar* y de carbono, que pueden hallarse distribuidas en capas alternas, con distinta orientación en cada capa, dando lugar a materiales compuestos que tienen valores sorprendentemente elevados de rigidez y de resistencia. La combinación de estas propiedades mecánicas con una baja densidad da lugar a materiales cuyas propiedades específicas son inmejorables, que se convierten en candidatos ideales para la fabricación de componentes estructurales que actúan bajo sollicitaciones importantes, y que presentan buena resistencia a la fatiga.

Es también muy habitual la utilización de otros tipos de refuerzos, no fibras, que en este caso reciben el nombre de *rellenos*. Entre estos cabe destacar el polvo de mica, el talco, el negro de humo y el serrín. En ocasiones, se llega a considerar que un gas puede actuar de relleno, convirtiendo una matriz polimérica en una *espuma*, en la que las burbujas de gas contribuyen a disminuir notablemente la

densidad del conjunto y, por tanto, a incrementar sus propiedades específicas. En estos casos, la segunda fase gaseosa reduce en gran medida la conductividad del conjunto, lo que aumenta las características aislantes del polímero matriz.

Por otro lado, cabe destacar que los CMP se caracterizan por presentar una gran estabilidad química y, especialmente, unos costos de fabricación muy inferiores a los de otros materiales compuestos. Ahora bien, también presentan inconvenientes que no deben obviarse, como es una baja resistencia a la perforación bajo la acción de cargas estáticas, y la gran sensibilidad que suelen presentar a la temperatura.

Las principales aplicaciones de los CMP se hallan en productos en que se requieren niveles de resistencia y de rigidez similares a los de los metales, pero con densidades muy inferiores (industrias aeronáutica, de automoción y náutica entre otras). Un sector en el que estos compuestos se han ido abriendo camino es el de material deportivo y de recreo (raquetas, palos de golf, cascos, arcos, flechas, esquís, etc.).

## 6.2 Tipos de refuerzo

Como se ha indicado al principio de este capítulo la segunda fase de un material compuesto, o *fase reforzante*, suele proporcionar un criterio de clasificación y permite distinguir distintos grupos de compuestos, según la distribución representada en el esquema de la figura 6.1.

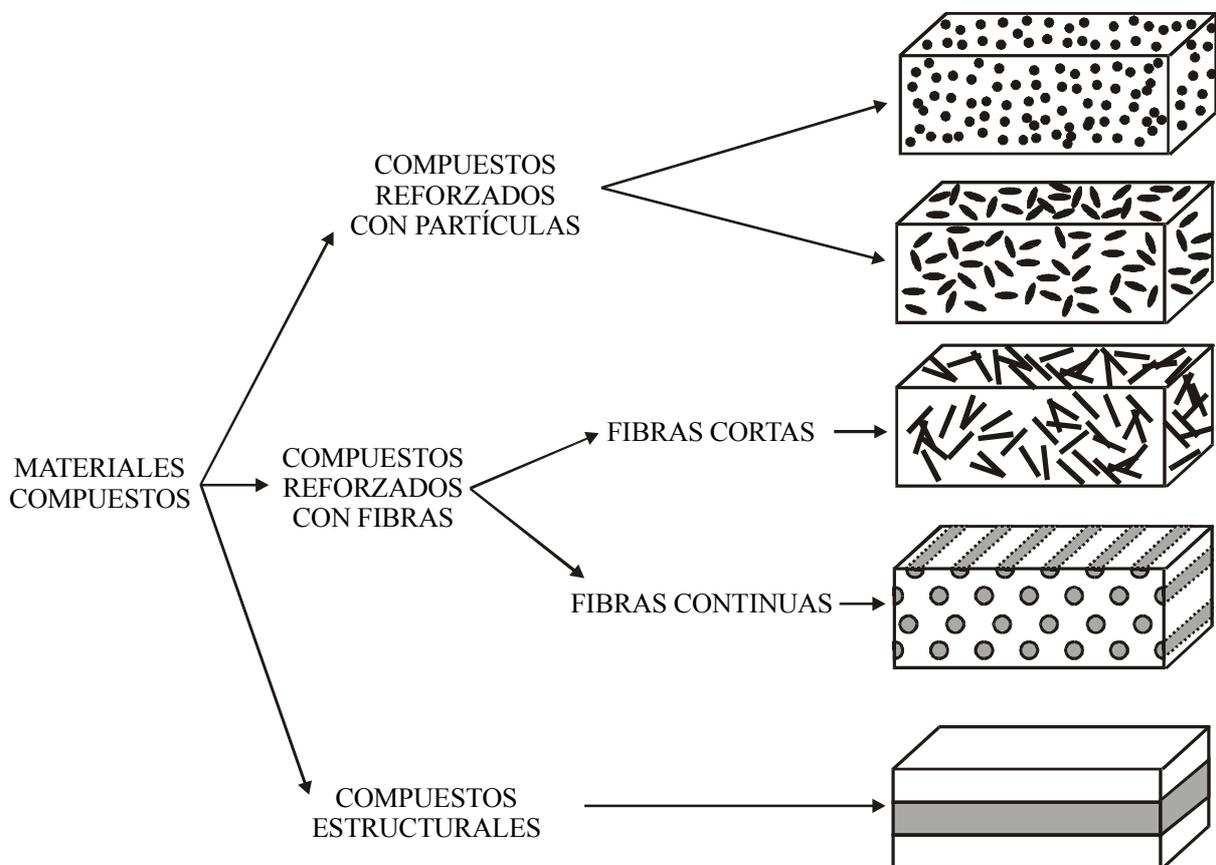


Fig. 6.1 Esquema de clasificación de los materiales compuestos en función del tipo de refuerzo.

### 6.2.1 Materiales compuestos reforzados con fibras

Cuando un refuerzo está constituido por porciones de sólido para los cuales la relación longitud-diámetro es muy elevada, se considera que el material es un compuesto de *fibras*. Atendiendo a la variedad de aplicaciones que pueden tener este tipo de materiales compuestos, se podría decir que los compuestos de fibras son los más importantes de todos. Generalmente, la combinación de una matriz continua con un refuerzo fibroso suele pretender la obtención de un producto final muy rígido con una densidad moderada o baja. Obviamente, cuanto menor sea la densidad de ambos constituyentes (matriz y fibras), mayores serán las propiedades específicas del compuesto. Cabe destacar que, en este tipo de compuestos, además de las propiedades del material constituyente de las fibras, el tamaño de éstas y el grado de unión con la matriz determinarán las características del producto final.

Se requiere un elevado grado de cohesión entre la matriz y el refuerzo, ya que en este caso habrá una transferencia de esfuerzos mucho más eficaz. Cuando un material compuesto reforzado con fibras se somete a la acción de una tensión,  $\sigma$ , tan sólo hay transmisión de carga desde la matriz en la zona donde hay intercara matriz-fibra, de manera que en los extremos del refuerzo es la matriz la que padece el efecto de la tensión. Es por ello que una fibra demasiado corta se considera como un refuerzo de partículas, actuando de forma distinta.

Dado que tan sólo es la región de la fibra la que actúa de refuerzo y soporta la carga que actúa ( $\sigma = \sigma_F$ ), para que un refuerzo se comporte como fibra se ha de cumplir que su longitud supere una longitud crítica ( $L_C$ ), determinada por la expresión

$$L_C = \frac{\sigma_F \cdot D}{\sigma_{M-F}} \quad (6.1)$$

donde  $\sigma_F$  es la resistencia a tracción de la fibra,  $D$  su diámetro y  $\sigma_{M-F}$  la resistencia de la unión matriz-fibra.

Cuando el tamaño de la fibra es inferior a  $L_C$ , se observa que todos los puntos de la fibra soportan valores de tensión inferiores a  $\sigma_F$  (Fig. 6.2), pero si la longitud de la fibra es del orden de  $L_C$ , se aprecia que los extremos soportan una carga nula mientras que el punto central está sometido a una tensión igual a  $\sigma_F$  (Fig. 6.2). Si la fibra tiene una longitud  $L > L_C$ , ocurre que existe una zona intermedia que se hallará sometida a la tensión  $\sigma_F$ , y esta zona está comprendida entre  $L_C/2$  desde ambos extremos, como puede observarse en el esquema de la figura 6.2.

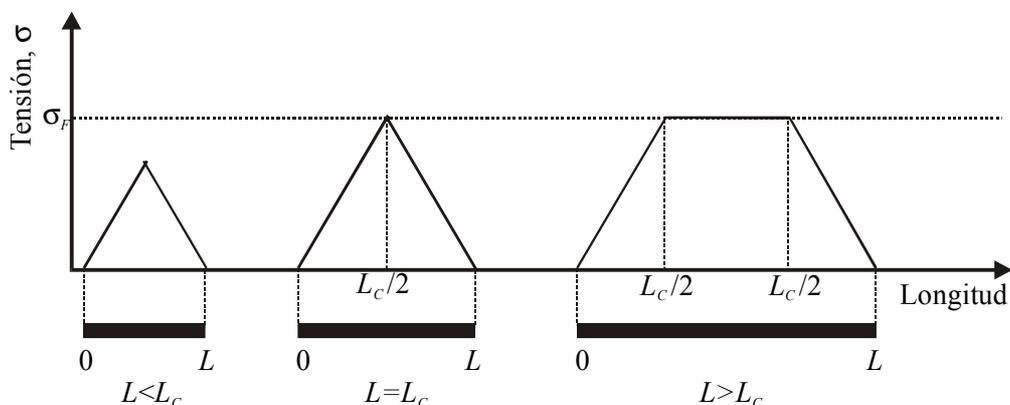


Fig. 6.2 Perfiles de tensión soportada por las fibras de un compuesto reforzado en función de su longitud respecto de la longitud crítica ( $L_C$ ).

Cuando el refuerzo está constituido por fibras de longitud moderadamente superior  $L_C$ , los compuestos se denominan *de fibra corta*, a diferencia de aquellos en que la longitud de la fibra supera ampliamente el valor de  $L_C$  y que se denominan *de fibra continua*. Estos últimos son los que revelan un mayor efecto reforzante de la segunda fase. Además de la longitud, la distribución y la orientación de las fibras pueden proporcionar respuestas muy distintas en un mismo tipo de material compuesto. Así, se puede distinguir entre compuestos con *fibras alineadas*, en los que se observa una orientación paralela de todas las fibras del refuerzo, y compuestos de *fibra orientada al azar*. Generalmente, los compuestos de fibra continua presentan alineación, mientras que los de fibra corta pueden ser con fibras alineadas o con orientación al azar.

La *regla de las mezclas* constituye una herramienta sencilla con la cual se puede aproximar el valor de algunas propiedades de un material compuesto a partir de expresiones analíticas. Así, propiedades como la densidad de un compuesto se pueden determinar a partir de las propiedades (densidades) de los constituyentes, según

$$\rho_C = \rho_M \cdot f_M + \rho_F \cdot f_F \quad (6.2)$$

donde  $\rho_C$ ,  $\rho_M$  y  $\rho_F$  son los valores de la densidad del compuesto, del material de la matriz y de las fibras, respectivamente, y los parámetros  $f_M$  y  $f_F$  corresponden a las fracciones en volumen de las fases constituyentes, matriz y fibras.

Un material de fibra continua y alineada presenta un comportamiento muy distinto en la dirección de las fibras, con respecto a la respuesta proporcionada en cualquier otra dirección. Esta *anisotropía* se puede comprobar cuando la carga se aplica de forma *longitudinal*, esto es, en la dirección de alineación de las fibras, ya que en este caso la fuerza se distribuye entre la matriz y la fibra, y se produce la misma deformación en todos los puntos del material compuesto (*isodeformación*).

Si bien esta situación implica que se cumplen las condiciones indicadas por la expresión siguiente

$$F_C = F_M + F_F \quad (6.3)$$

al considerar que la tensión que actúa en cada componente por separado (fibra y matriz) es igual al cociente entre la fuerza soportada y su sección correspondiente ( $S_C$ ,  $S_M$  o  $S_F$ , respectivamente), se cumple que

$$\sigma_C \cdot S_C = \sigma_M \cdot S_M + \sigma_F \cdot S_F \quad (6.4)$$

Aislando el valor de la tensión que actúa en el material compuesto,  $\sigma_C$ , se tiene que

$$\sigma_C = \sigma_M \cdot \frac{S_M}{S_C} + \sigma_F \cdot \frac{S_F}{S_C} \quad (6.5)$$

Si la longitud de la fibra es la misma que la longitud del compuesto, se cumple que  $L_C = L_M = L_F$  y, en este caso, los cocientes entre secciones corresponden a las fracciones de volumen ( $f_M$  o  $f_F$ ), pudiendo indicarse la expresión anterior según

$$\sigma_C = \sigma_M \cdot f_M + \sigma_F \cdot f_F \quad (6.6)$$

Considerando que en condiciones de *isodeformación* se ha de cumplir que

$$\varepsilon_C = \varepsilon_M = \varepsilon_F \quad (6.7)$$

al combinar las expresiones 6.6 y 6.7 se tiene

$$\frac{\sigma_C}{\varepsilon_C} = \frac{\sigma_M}{\varepsilon_M} \cdot f_M + \frac{\sigma_F}{\varepsilon_F} \cdot f_F \quad (6.8)$$

Por otro lado, siempre que la deformación del conjunto, es decir, las deformaciones de las fases matriz y de refuerzo, se mantenga en un régimen elástico, se cumplirá la ley de Hooke ( $\sigma = E \varepsilon$ ), con lo cual el valor del esfuerzo que actúa en el conjunto y en cada una de las fases vendrá indicado por la deformación y el módulo elástico correspondiente, cumpliéndose que

$$E_C = E_M \cdot f_M + E_F \cdot f_F \quad (6.9)$$

o bien,

$$E_C = E_M \cdot (1 - f_F) + E_F \cdot f_F \quad (6.10)$$

lo que indica que, para la obtención del módulo de elasticidad de dicho compuesto, en la dirección de alineación de las fibras, se cumple la regla de las mezclas, como en la expresión (6.2).

Cuando un compuesto reforzado con fibras continuas alineadas soporta una carga *transversal*, es decir, en la dirección perpendicular a la de alineación de sus fibras, la situación es muy distinta, ya que en este caso tanto la matriz como las fibras soportan el mismo esfuerzo,  $\sigma$ , de manera que se cumple

$$\sigma_C = \sigma_M = \sigma_F \quad (6.11)$$

que corresponde a una situación de *isotensión*.

En este caso, la deformación del compuesto,  $\varepsilon_C$ , es la suma de las deformaciones de cada uno de sus constituyentes, según

$$\varepsilon_C = \varepsilon_M \cdot f_M + \varepsilon_F \cdot f_F \quad (6.12)$$

y cuando todos los componentes se hallan en régimen elástico, se cumple que

$$\frac{\sigma}{E_C} = \frac{\sigma}{E_M} \cdot f_M + \frac{\sigma}{E_F} \cdot f_F \quad (6.13)$$

o, lo que es lo mismo,

$$E_C = \frac{E_M \cdot E_F}{E_F \cdot f_M + E_M \cdot f_F} = \frac{E_M \cdot E_F}{E_F \cdot (1 - f_F) + E_M \cdot f_F} \quad (6.14)$$

En los compuestos de matriz polimérica son muy comunes los refuerzos de fibras de vidrio, de *aramida* y de carbono. Las dos últimas son mucho más costosas, ligeras y resistentes que las de vidrio, con lo cual se utilizan, principalmente, en aplicaciones de ingeniería aeroespacial, en las cuales el peso es un factor crítico. Las fibras de vidrio son las más utilizadas con diferencia, dado que su precio es muy inferior al del resto de fibras. Con fibra de vidrio se obtienen productos finales que poseen una buena relación resistencia/peso, muy estables químicamente, aislantes de la electricidad y con un precio altamente competitivo.

### 6.2.2 Materiales compuestos reforzados con partículas

Cuando un refuerzo está constituido por pequeños volúmenes de sólido, aproximadamente equiaxiales, se considera de *partículas*. En la gran mayoría de materiales compuestos en los que la fase de refuerzo posee morfología de partícula, el material constituyente de esta fase es mucho más duro y resistente que el de la fase matriz.

De la misma forma que para los compuestos de fibras, se cumple que un refuerzo de partículas será tanto más eficaz cuanto más homogénea sea su distribución y cuanto mayor sea su capacidad de soportar las condiciones del proceso de elaboración, que vendrán determinadas por la matriz. Si una de las principales funciones del refuerzo es la de limitar el desplazamiento por deformación de la matriz, contribuyendo a conservar las dimensiones del conjunto, es preciso que el grado de cohesión entre la fase matriz y las partículas sea elevado, a fin de evitar que la matriz pueda deformarse plásticamente bajo la acción de una tensión aplicada y se produzca descohesión de las partículas. De nuevo, como sucede en los compuestos reforzados con fibras, cuanto mayor sea la compatibilidad de la intercara matriz-partícula tanto mejor será la transferencia de esfuerzos entre ambas fases.

El grado de mejora de las propiedades mecánicas que puede introducir una segunda fase de partículas en un compuesto, está en función del tamaño, de la distribución y de la proporción de las mismas. Así, la *eficacia* de este tipo de refuerzos es tanto mayor cuanto menor sea el tamaño de las partículas (considerando el diámetro si son esféricas, o el diámetro equivalente en caso distinto) y cuanto mayor sea su fracción de volumen en el compuesto.

Como se ha indicado para los compuestos de fibras, se puede determinar la densidad de un compuesto de partículas a partir de la regla de las mezclas, según una expresión equivalente a la (6.2):

$$\rho_C = \rho_M \cdot f_M + \rho_P \cdot f_P \quad (6.15)$$

donde  $\rho_C$ ,  $\rho_M$  y  $\rho_P$  son los valores de la densidad del compuesto, del material de la matriz y del de las partículas, respectivamente, y los parámetros  $f_M$  y  $f_P$  corresponden a las fracciones en volumen de las fases constituyentes, matriz y partículas.

En el caso del módulo elástico (E), para los compuestos reforzados con partículas se puede prever un valor comprendido entre un máximo definido por la expresión

$$E_C = E_M \cdot f_M + E_P \cdot f_P \quad (6.16)$$

y un mínimo, descrito por

$$E_C = \frac{E_M \cdot f_P}{E_M \cdot f_P + E_P \cdot f_M} \quad (6.17)$$

donde  $E_C$ ,  $E_M$  y  $E_P$  son los valores de módulo elástico de los tres materiales (compuesto, matriz y partículas, respectivamente). Las expresiones (6.16) y (6.17) corresponden a los valores de E para los compuestos de fibras en dirección paralela y en dirección perpendicular a las fibras, respectivamente, situaciones en que se producen, en cada caso, condiciones de *isotensión* o de *isodeformación*. Para los compuestos de partículas no suelen producirse condiciones de *isodeformación*, por lo que es preciso introducir un parámetro  $K_C$ , siempre inferior a la unidad y determinado empíricamente para cada material, que permite obtener el valor del módulo elástico de una forma muy aproximada, según una expresión del tipo

$$E_C = E_M \cdot f_M + K_C \cdot E_P \cdot f_P \quad (6.18)$$

Es común hallar materiales compuestos con matrices poliméricas, elaboradas con cualquier tipo de polímero, tanto termoplásticos como termoestables y elastómeros. Así, por ejemplo, el *caucho vulcanizado* multiplica su resistencia gracias a la acción del refuerzo de *negro de humo*, constituido por partículas de carbono aproximadamente esféricas y de diámetros comprendidos entre 20 y 50 nm, que se obtienen por combustión de derivados de petróleo.

En cuanto a las matrices metálicas, cabe destacar que es común observar en algunos metales un incremento de su resistencia por la acción reforzante de una dispersión de precipitados de pequeño tamaño y de elevada dureza. La naturaleza de esta segunda fase tanto puede ser metálica (*intermetálicos*) como no metálica (óxidos, carburos, nitruros, etc.). En cualquiera de estos casos, el mecanismo de refuerzo de las partículas se observa a nivel microscópico, ya que actúan limitando el desplazamiento de átomos en la red metálica matriz y, por tanto, proporcionan una respuesta mecánica propia de un material más rígido, más duro y más resistente que el metal de origen sin precipitados. Un ejemplo lo constituirían las aleaciones de níquel reforzadas con óxido de torio ( $\text{ThO}_2$ ), que ya a partir de un 3% en volumen basta para que se observe un incremento significativo en la resistencia mecánica a temperaturas elevadas (superaleaciones).

### 6.2.3 Compuestos estructurales

Dentro de los materiales compuestos, los estructurales se caracterizan por poder elaborarse a partir de materiales “puros” (metales, polímeros y cerámicos), o bien combinando éstos con materiales compuestos (*capas reforzadas*).

Dentro de estos materiales compuestos, un gran grupo está constituido por los denominados *compuestos laminares*, formados por láminas unidas sólidamente y en los que suelen alternarse capas anisotrópicas de polímero reforzado con fibras continuas. Al superponer las capas, se varía la orientación, de manera que el producto final es un sólido con una elevada resistencia en numerosas direcciones del plano común a las capas apiladas.

Otro gran grupo lo forman por los compuestos tipo *sándwich*, que se elaboran combinando paralelamente láminas de gran resistencia con capas de relleno de baja densidad y de espesor mucho mayor que el de las láminas externas. Así, láminas de metal o de resina con rellenos de espumas, caucho, cemento o estructuras metálicas de nido de abeja, constituyen compuestos *sándwich* comunes. Si las cargas aplicadas actúan sobre las láminas (*caras del sándwich*), perpendicularmente a la capa intermedia, es posible utilizar materiales de relleno poco rígidos y poco resistentes, ya que en este caso la única función del relleno es la de evitar la deformación del conjunto en el plano perpendicular, por flexión. Generalmente, estos compuestos lámina-relleno-lámina se caracterizan por combinar una baja densidad con valores muy elevados de rigidez, por lo que son productos ideales para aplicaciones estructurales (de ahí su nombre) en la elaboración de paneles, suelos, fuselajes, alas y colas de aviones, y otros componentes de la industria aeronáutica.

## 6.3 Conformado de compuestos de matriz polimérica

Dentro de los materiales compuestos, los de uso más extendido son los de matriz polimérica (CMP) y, dentro de estos, los refuerzos de fibras son los más comunes. Es por ello que este apartado se dedicará a proporcionar una breve descripción de los principales procesos de conformado de los materiales compuestos de matriz polimérica y refuerzo de fibras.

En el esquema de la figura 6.3 se presentan los principales procesos de elaboración de estos materiales.

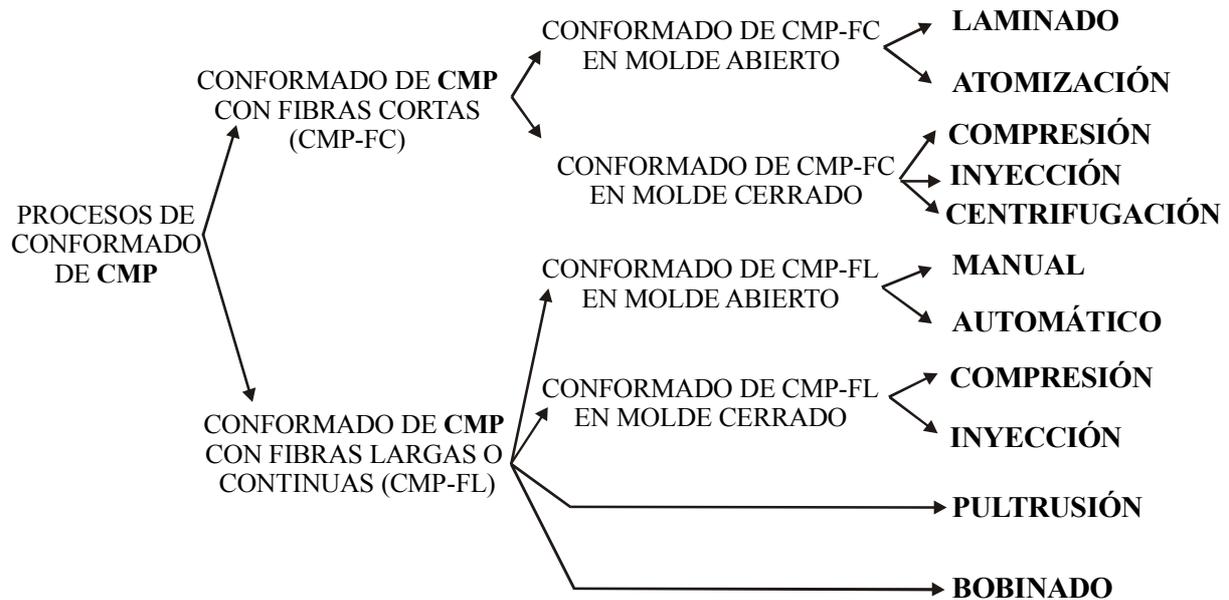


Fig. 6.3 Principales procesos de elaboración de materiales compuestos de matriz polimérica (CMP).

Estos procesos pueden realizarse en *moldes abiertos* o bien utilizando *moldes cerrados*. A continuación se describen las principales operaciones de conformado con molde abierto, que son adecuadas tanto para refuerzos de fibra corta como para fibras continuas, y que precisan de una sola superficie (*negativo*) sobre la que se distribuyen los dos constituyentes (matriz y refuerzo), en capas alternas o bien simultáneamente.

Como se ha indicado anteriormente, cualquier polímero puede ejercer de matriz en un CMP, si bien la gran mayoría tienen matrices termoestables. Los elastómeros en estado natural adolecen de una rigidez muy baja, lo que puede mejorarse mediante la adición de refuerzos de partículas a matrices elastoméricas, con lo que se obtienen productos finales de rigidez considerable.

En los procesos de conformado de CMP con matriz termoestable, la incorporación del refuerzo a la matriz suele realizarse en el momento del conformado, aunque en ocasiones se combinan ambos constituyentes antes de iniciarse la operación correspondiente. El proceso más sencillo es el de *laminado*, que consiste en la combinación de fibras (cortas, largas o tejidas) con resina líquida a la que se ha añadido un agente *acelerante* de la polimerización, cuya función es la de favorecer la *reticulación* de la matriz (*curado*). El curado es una etapa generalmente exotérmica y, además, puede favorecerse por calentamiento, reduciendo el tiempo de curado. Una vez finalizado el proceso, se obtienen componentes finales de elevada rigidez.

Es importante tener presente el efecto de la temperatura en el curado de las resinas, ya que una temperatura excesiva en esta etapa podría conducir a la degradación de la matriz, del refuerzo o del molde que los contiene. Si el componente a elaborar es tubular, el conformado se realiza a partir de capas de fibras (tejidas o no) ya impregnadas de resina y que se enrollan alrededor de un cuerpo hueco hasta alcanzar el espesor deseado, endureciendo el conjunto por calentamiento.

Si se aplica presión en el inicio del curado, como en el laminado por rodillos, se optimiza el contacto resina-refuerzo (Fig. 6.4a), con lo cual se incrementa la resistencia del conjunto y se evita la oclusión de pequeñas burbujas de aire, que darían lugar a componentes defectuosos. Esta etapa suele realizarse manualmente, aunque el componente presente una gran superficie. Si el proceso es automático, la presión aplicada por el rodillo se realiza mediante un puente transversal móvil que recorre la

superficie. Si bien el resultado es más uniforme que en el proceso manual, no siempre es un proceso más rápido, ya que para perfiles complicados la programación de la máquina suele ser sumamente compleja. Una vez endurecido el conjunto, se separa la capa de compuesto que recubre el negativo. La cara que está en contacto con el molde es la cara visible del componente obtenido (Fig. 6.4b), ya que su acabado suele ser mucho mejor que el de la superficie que ha estado en contacto con el rodillo.

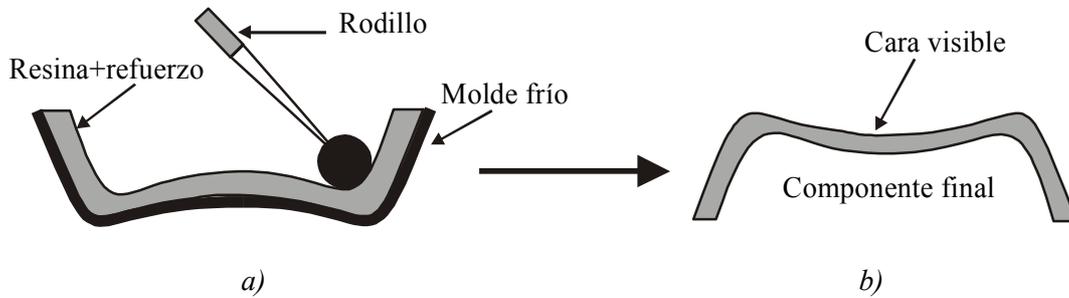


Fig. 6.4 Esquema del proceso de conformado de CMP por laminado de rodillos en molde abierto.

Un proceso alternativo al laminado y que proporciona una compactación mucho más uniforme es el *moldeo con membrana*. En este caso, es una membrana flexible la que ejerce la presión de compresión sobre el conjunto resina-refuerzo mediante succión, utilizando una bomba de vacío (Fig. 6.5), o bien por la acción de aire inyectado a presión (Fig. 6.6). En ambos casos, esta técnica proporciona componentes de espesor uniforme y de gran calidad.

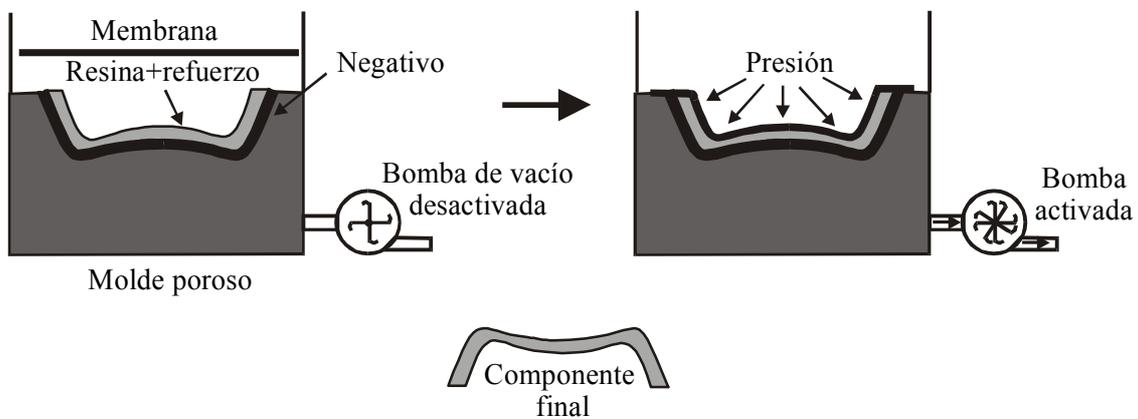


Fig. 6.5 Moldeo de CMP con membrana succionada por presión en un molde poroso.

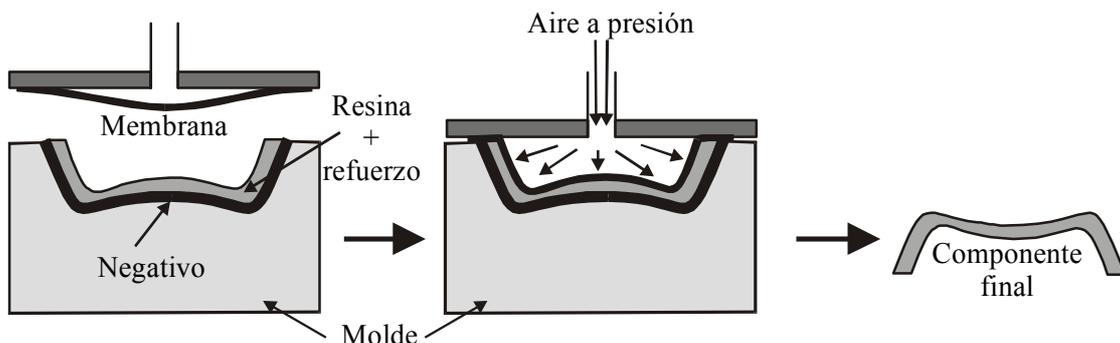


Fig. 6.6 Moldeo de CMP con membrana comprimida por aire a presión sobre el conjunto matriz-refuerzo.

Otro proceso común de conformado de CMP con matriz termoestable y fibra corta en molde abierto es el de *atomización*, en el cual refuerzo y matriz se aplican simultáneamente, mezclándose ambos mientras se recubre el negativo. En estas operaciones se utiliza una bobina de fibras continuas y un depósito con émbolo que contiene la matriz líquida. Se hace pasar la fibra por una boquilla a la que también irá a parar la matriz y en la salida de la boquilla se coloca una cuchilla. Cuando el émbolo inicia el paso de resina, se inicia un movimiento de la bobina que permite el avance de la fibra y la cuchilla va seccionando porciones regulares de fibra a medida que ésta avanza, a fin de que tan sólo estas porciones (fibras cortas), impregnadas de matriz, alcancen la superficie a reproducir (Fig. 6.7). La mezcla matriz-refuerzo se proyecta sobre el molde y, una vez alcanzado el grueso deseado, se lamina por la acción de unos rodillos o se aplica presión mediante membranas, finalizando el proceso de conformado como en los descritos anteriormente.

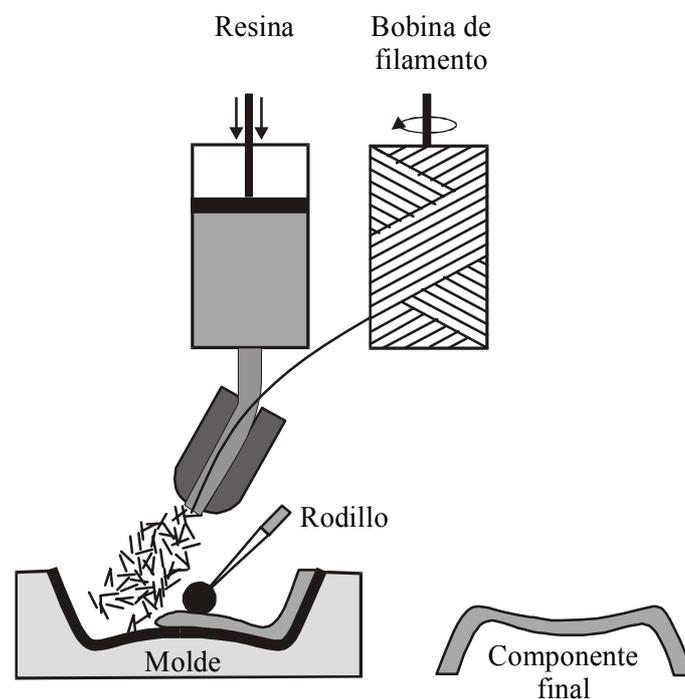


Fig. 6.7 Esquema del proceso de atomización.

Los procesos de conformado de CMP con *molde cerrado* generalmente requieren de moldes con dos mitades, entre las cuales se coloca un volumen determinado de mezcla matriz-refuerzo. Si bien estas técnicas suelen ser más costosas que las de molde abierto, proporcionan un mejor control dimensional, permitiendo la obtención de componentes de espesor uniforme y con acabados de mejor calidad en todas sus superficies. Además, los procesos de conformado de CMP con moldes cerrados favorecen niveles de producción más elevados, incluso en la elaboración de perfiles complejos.

En el *moldeo por compresión en molde cerrado*, la presión de cierre favorece el contacto entre ambos constituyentes durante la etapa de endurecimiento (Fig. 6.8). Una vez finalizado el proceso, se abre el molde y se extrae el componente.

El *vaciado por centrifugación* es una operación de conformado de CMP en molde cerrado con fibras generalmente cortas, especialmente adecuado para la obtención de componentes huecos. El conjunto matriz-refuerzo se vacía en un molde, colocado dentro de un horno que va girando a alta velocidad. El

efecto de la fuerza centrífuga es suficiente para compactar el conjunto matriz-refuerzo y asegurar un buen contacto entre los constituyentes para un correcto curado. Una vez alcanzado el espesor deseado, se detiene el movimiento del molde y, una vez frío, se retira el componente. El esquema de este proceso se representa en la figura 6.9.

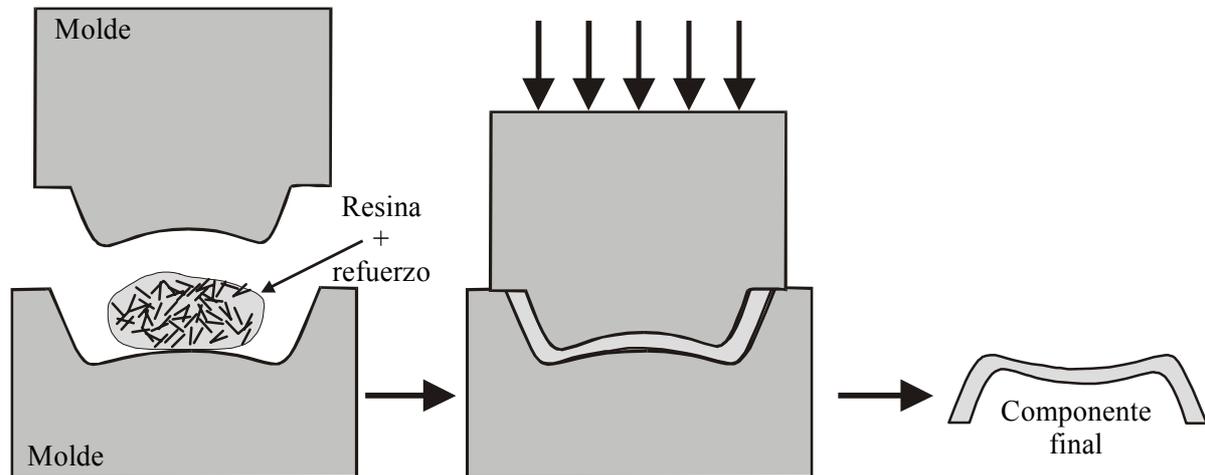


Fig. 6.8 Representación esquemática de la distribución de la matriz y el refuerzo durante el moldeo por compresión de CMP en molde cerrado.

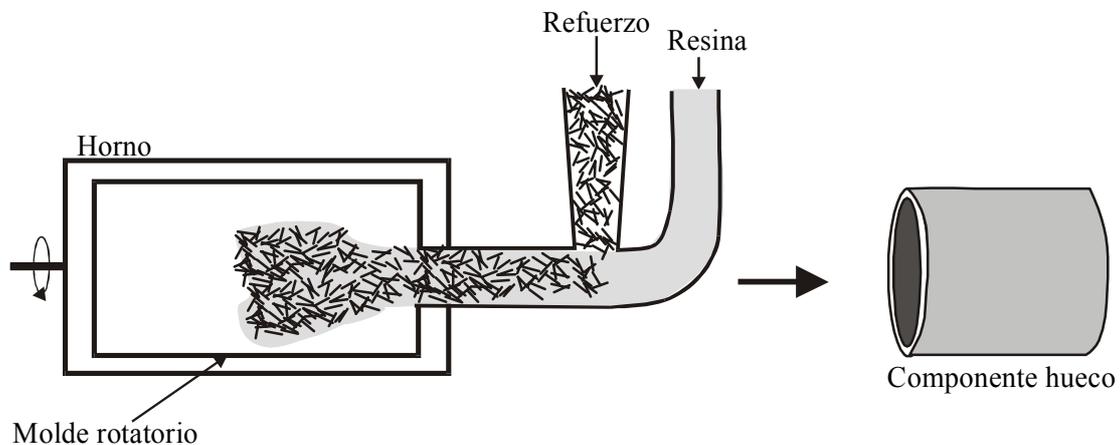


Fig. 6.9 Vaciado por centrifugación.

También es posible conformar CMP mediante procesos de *inyección*. En estos casos, suelen utilizarse fibras cortas que se introducen en el molde cerrado mezcladas con la matriz, por la acción de un émbolo, de forma similar a los procesos de conformado por transferencia de polímeros (ver figura 5.18b). Si la inyección se realiza aprovechando la presión del avance de un husillo, el proceso se denomina de *extrusión-inyección*, y puede realizarse tanto con fibras cortadas (Fig. 6.10a) como con fibras continuas (Fig. 6.10b). Durante el proceso de llenado de la cavidad en la inyección-extrusión con fibras cortas, se produce un alineamiento de las fibras al pasar por la boquilla, de manera que el producto resultante es anisotrópico. Los productos elaborados por inyección presentan, generalmente, un buen control dimensional y un acabado superficial de gran calidad.

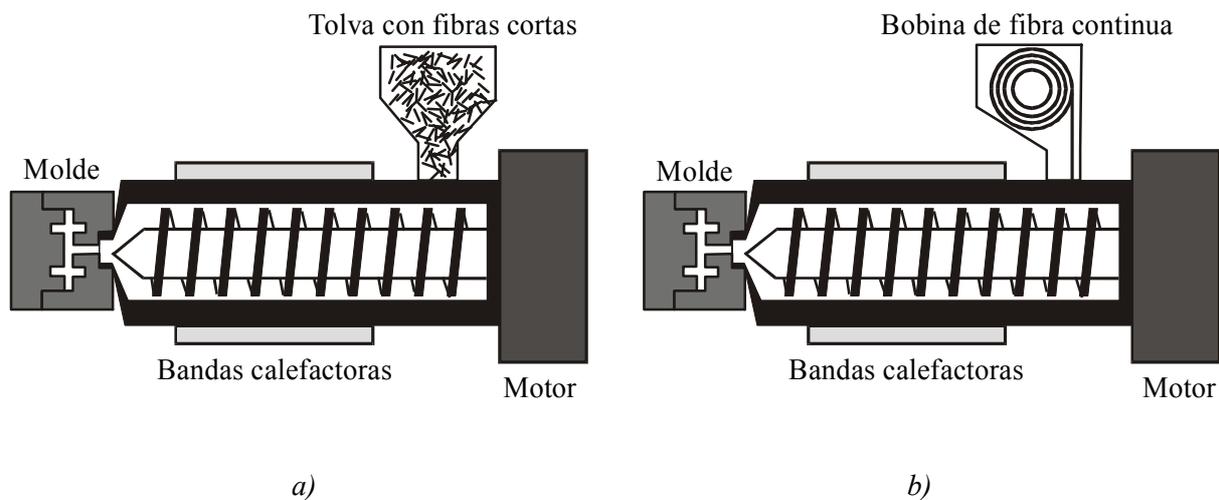


Fig. 6.10 Proceso de conformado por extrusión-inyección a) con fibra cortada; b) con fibra continua.

Otra técnica de conformado con fibras continuas es por *pultrusión*, que permite elaborar componentes largos de *sección constante*. El proceso es similar al de la inyección-extrusión pero el avance de las fibras lo genera un esfuerzo de tracción que “tira” de ellas, de ahí el prefijo derivado del inglés “*pull*” (Fig. 6.11). Las fibras se sumergen en una cubeta de resina y se estiran a través de una hilera que, a su vez, hace de horno, de manera que el endurecimiento del conjunto se produce en esta región.

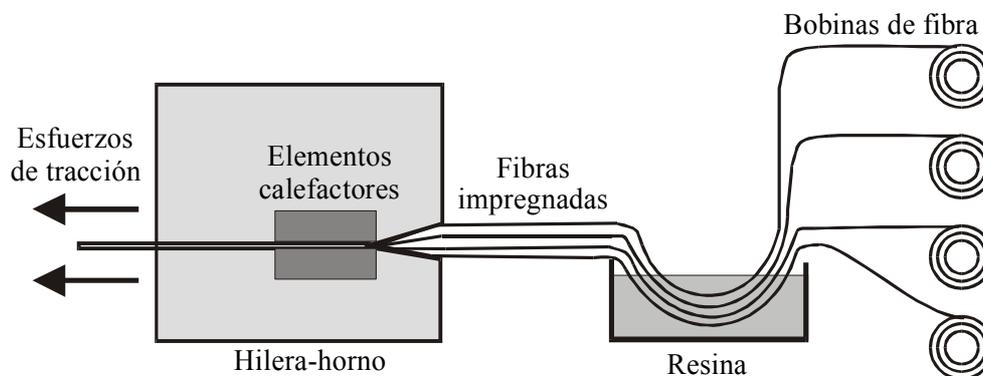


Fig. 6.11 Descripción del proceso de conformado por pultrusión.

El *bobinado de filamentos* es un proceso de conformado de CMP con fibras continuas impregnadas de resina, que se distribuyen alrededor de un cuerpo hasta que lo cubren. Tras el curado de la resina se puede retirar el cuerpo central y se obtiene un *componente hueco*, muy rígido y con las dimensiones del cuerpo extraído. La etapa de impregnación de las fibras suele realizarse por inmersión en una cubeta con resina justo antes de iniciarse el bobinado, aunque es posible realizar el proceso en dos etapas: una primera de bobinado de fibras sin resina, y una segunda de aplicación de la matriz cubriendo las fibras (*postimpregnación*). Durante el enrollado de las fibras alrededor del cuerpo a cubrir, se pueden combinar movimientos giratorios y horizontales del eje que lo soporta, consiguiéndose así una *distribución helicoidal* del refuerzo, que proporciona gran resistencia al componente resultante.

## 7 Materiales cerámicos y vidrios

Los materiales cerámicos son materiales inorgánicos y no metálicos, constituidos tanto por elementos metálicos como por no metálicos en proporciones muy diversas, pero siempre con mayor cantidad de no metálicos. Las uniones entre átomos pueden ser iónicas o covalentes, pudiendo presentar tanto estructuras cristalinas (carburos, nitruros, óxidos) como no cristalinas (sílice y derivados). Las composiciones químicas de los materiales cerámicos varían considerablemente, desde compuestos sencillos hasta mezclas en las que coexisten fases numerosas y complejas, y sus valores de densidad, salvo raras excepciones, son muy inferiores a los correspondientes a las aleaciones metálicas.

De su enlace se derivan algunas de sus principales características, como su estabilidad química, su capacidad para actuar como barrera térmica y eléctrica, o la de tener puntos de fusión muy elevados generalmente. También es consecuencia del tipo de enlace el conjunto de propiedades mecánicas, como su elevada rigidez, su elevado límite elástico y su ductilidad prácticamente nula. En la tabla 7.1 se recogen propiedades características de algunos materiales cerámicos.

Tabla 7.1 Propiedades físicas y mecánicas de algunos materiales cerámicos.

<i>Material Cerámico</i>	<i>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Temperatura de fusión (°C)</i>	<i>Dureza Vickers (HV)</i>	<i>Módulo Elástico (MPa)</i>
<i>Ladrillo (arcilla cocida)</i>	2,3	--	--	95.000
<i>Cemento Portland</i>	2,4	--	--	50.000
<i>Carburo de Silicio (SiC)</i>	3,2	2.700	2.600	460.000
<i>Sílice vítrea (SiO<sub>2</sub>)</i>	2,2	1.200-1.800	≥ 500	69.000
<i>Nitruro de Silicio (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)</i>	3,2	1.900	1.400	225.000
<i>Nitruro de Boro (BN)</i>	2,3	3.000	6.000	150.000
<i>Alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</i>	3,8	2.050	2.200	345.000
<i>Carburo de Titanio (TiC)</i>	4,9	3250	3.200	300.000
<i>Zirconia (Zr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</i>	5,7-6,1	2.680	2.500	205.000
<i>Carburo de Wolframio (WC)</i>	15,7	2.850	2.600	700.000

De forma muy similar a lo que se ha descrito para los materiales metálicos y los polímeros, las propiedades de los materiales cerámicos se hallan también muy ligadas a la composición química, observándose variaciones notables con modificaciones mínimas en los porcentajes de los elementos constituyentes.

El conjunto de propiedades que poseen los materiales cerámicos, especialmente su dureza y su fragilidad, limitan en gran medida sus aplicaciones y también los procesos de conformado, si bien pueden ser procesados de tal forma que su resistencia mecánica sea lo más elevada posible. Cabe destacar que una propiedad característica de numerosos materiales cerámicos, que se halla íntimamente ligada a la dureza, es su gran *resistencia al desgaste*. También merece una mención especial la gran estabilidad química que presentan a temperaturas elevadas, lo cual los convierte en materiales ideales para la elaboración de *refractarios*.

Los *coeficientes de expansión térmica* de los materiales cerámicos son muy inferiores a los que presentan las aleaciones metálicas, de manera que la más pequeña dilatación, combinada con su gran rigidez, induce la presencia de tensiones muy elevadas en el material, que pueden derivar en la formación de fisuras e, incluso, en la rotura del componente. La existencia de un gradiente de temperaturas entre dos puntos es especialmente importante cuando el coeficiente de dilatación térmica es elevado, ya que puede inducir la rotura catastrófica de componentes cerámicos por *choque térmico*. El vidrio *PYREX* se caracteriza por soportar altas temperaturas y, sobre todo, cambios térmicos bruscos sin que aparezca fisuración, y este comportamiento se debe a que su valor de coeficiente de expansión térmica es bajo.

Los materiales cerámicos pueden clasificarse en tres grandes grupos, que se indican a continuación:

- Los *cerámicos tradicionales*, que engloban mayoritariamente los materiales derivados de la arcilla (porcelana, material de construcción) y los que pueden obtenerse a partir de productos naturales (óxidos, sulfuros, etc.). Las aplicaciones son muy diversas y, en general, son los más económicos de todos, si bien su comportamiento bajo la acción de cargas aplicadas es moderado. Pueden tener composiciones muy variadas y, en numerosas ocasiones, muy complejas. Mayoritariamente sus estructuras son cristalinas.
- Los cerámicos de uso específico en ingeniería o *nuevos cerámicos* son el fruto del desarrollo tecnológico de los materiales cerámicos y pueden destinarse a aplicaciones en el ámbito de la electrónica, de la informática, de la industria aeroespacial, etc. Se caracterizan por presentar composiciones químicas generalmente simples y sus propiedades mecánicas son muy superiores a las de los cerámicos tradicionales. La gran mayoría tienen una estructura cristalina y la unión atómica es principalmente covalente.
- Los *vidrios* se caracterizan porque tienen enlaces químicos básicamente covalentes, ya que la gran mayoría son derivados de la sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Se podrían incluir en los cerámicos tradicionales, pero la principal característica diferencial es que los vidrios no son cristalinos. Presentan puntos de fusión muy bajos, si se comparan con los del resto de materiales cerámicos, por lo que pueden conformarse por fusión y moldeo. Algunos productos de este grupo pueden presentar una parte cristalina y una vítrea, actuando esta última como aglomerante de la primera (vitrocerámicas).

Los materiales cerámicos que presentan enlaces iónicos poseen una estructura atómica consistente en una ordenación alterna de cationes (+) y aniones (-), adoptando estructuras cristalinas generalmente más complejas que las de los materiales metálicos, dado que es común que posean más de dos tipos de átomos constituyentes. La distribución de aniones y cationes dependerá de su carga, de manera que el cristal resultante sea eléctricamente neutro. También dependerá de la relación entre los

correspondientes radios atómicos, ya que los aniones suelen ser mucho más voluminosos que los cationes y cada tipo de ión tiende a rodearse del mayor número posible de iones de carga opuesta. Una estructura iónica es estable cuando todos los aniones que rodean a un catión están en contacto (Fig. 7.1).

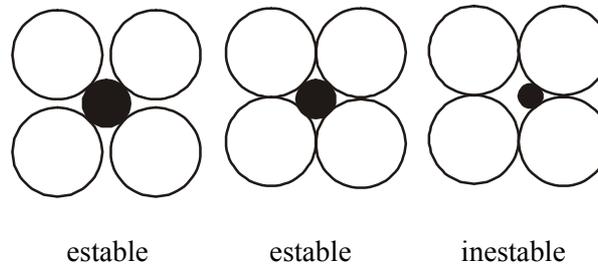
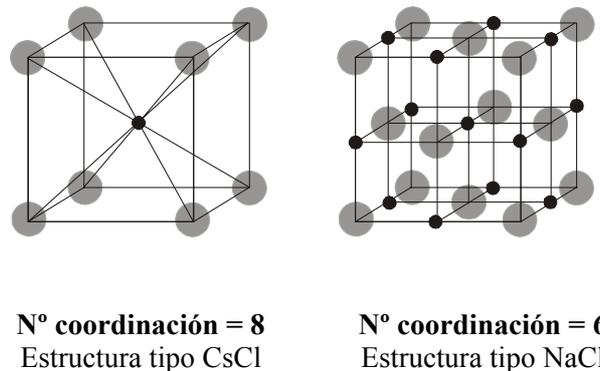


Fig. 7.1 Distribución estable e inestable de aniones y cationes en estructuras cerámicas iónicas.

El número de aniones más próximo a un mismo catión se define como *número de coordinación* y, en función de los radios respectivos, cada pareja de iones (anión-catión) tendrá un número de coordinación que determinará la *estequiometría* del conjunto y la estructura cristalina estable que será posible. En la figura 7.2 se representan dos estructuras cristalinas con números de coordinación distintos.



**Nº coordinación = 8**  
Estructura tipo CsCl

**Nº coordinación = 6**  
Estructura tipo NaCl

Fig. 7.2 Estructuras cristalinas con números de coordinación distintos.

Así, una estructura con un número de coordinación de 6 será aquella en que cada anión estará rodeado de 6 cationes a la misma (y mínima) distancia, y viceversa. De la misma forma, una estructura cristalina con un número de coordinación de 8 será aquella en la que cada tipo de ión esté rodeado de 8 iones de signo contrario.

La estequiometría de los materiales cerámicos representa la proporción de cada uno de los iones presentes y su complejidad puede ser muy variable. Así, una estructura  $AX$  corresponde a un material para el cual aniones ( $A$ ) y cationes ( $X$ ) tienen la misma carga, por lo que unos y otros se alternan en idénticas proporciones a fin de obtener un cristal neutro. Por el contrario, si la carga del anión y del catión es distinta, la proporción de ambos tipos de iones ha de permitir la neutralidad de cargas de la estructura (estructuras tipo  $A_aX_b$ ), y si hay más de un tipo de catión, el conjunto de cargas positivas ha de quedar compensado por la cantidad de carga aniónica, pudiendo dar lugar a estructuras sumamente complejas como, por ejemplo, de tipo  $A_aB_bX_c$ .

Algunos de los defectos propios de las redes cristalinas que se han definido anteriormente para los metales (descritos en el apartado 2.3.1) pueden también presentarse en los sólidos cerámicos iónicos. Así, es posible encontrar defectos vacantes (aniónicos y catiónicos) e intersticiales (generalmente cationes, dado su menor volumen). Es también común que se produzcan soluciones sólidas (sustitucionales e intersticiales), siempre y cuando se conserve la neutralidad de cargas de la red y los radios de los iones o átomos ajenos provoquen en la red una distorsión moderada.

Además de las irregularidades a nivel atómico, existen los *defectos de procesamiento*, que se originan en ocasiones durante la elaboración de los materiales cerámicos, como poros, segundas fases o heterogeneidades microestructurales. Estos defectos se comportan como *concentradores de tensión*, de manera que bajo la acción de un esfuerzo aplicado (a tracción o flexión), un volumen de material en el que se concentren defectos de procesamiento será mucho más sensible que el resto, y si se considera la gran fragilidad de los cerámicos, queda patente que los defectos disminuyen la resistencia a la rotura en estos materiales.

La fragilidad que presentan los cerámicos no es tan acusada cuando los esfuerzos aplicados lo son a compresión, de manera que estos materiales son mucho más resistentes bajo este tipo de tensiones, superando incluso a los metales, ya que no presentan deformación plástica y mantienen su sección aun cuando las cargas aplicadas sean muy elevadas. La relación entre la resistencia a compresión y a tracción suele estar en proporción de 10/1. Así, por ejemplo, la alúmina policristalina ( $Al_2O_3$ ) se rompe bajo la acción de esfuerzos de tracción del orden de 280 MPa, mientras que, a compresión, puede soportar esfuerzos superiores a 2.000 MPa.

Para aplicaciones estructurales en que se utilicen componentes cerámicos, el diseño de los mismos es de especial relevancia, a fin de conseguir que las cargas que actúen en los componentes sean, en todo momento, de compresión y no de tracción o flexión. El desarrollo de los materiales cerámicos ha tenido como principal objetivo incrementar su resistencia mecánica, básicamente minimizando la superficie y la cantidad de defectos internos definidos anteriormente, con lo que se homogeneiza y uniformiza la composición y la estructura. Estas características se pueden conseguir cuando el material cerámico presenta una estructura policristalina de grano muy fino y con porosidad muy reducida.

## 7.1 Cerámicos tradicionales

La gran mayoría de materiales cerámicos *tradicionales* están constituidos básicamente por *arcilla*, *silice* y *feldespato*, siendo este último un silicato de Al combinado con K, Na, Ca o Ba. Las combinaciones de estos tres productos pueden dar lugar a un numeroso abanico de materiales que pueden distinguirse, además de por su composición, por presentar características muy diversas y por las aplicaciones que se les pueden dar. Así, en la tabla 7.2 se proporcionan las características más destacadas y las aplicaciones más habituales de los principales grupos de materiales cerámicos tradicionales.

La antigüedad de los productos cerámicos elaborados a partir de arcilla se remonta a los inicios de la humanidad, ya que la gran estabilidad química de estos componentes ha permitido que perduren hasta la actualidad. El efecto de la presión de conformado y de la temperatura de cocción es notable, ya que cuanto mayores sean estos parámetros, más resistente será el producto final, de manera que variando la temperatura y la presión de conformado es posible la elaboración de componentes funcionalmente comparables, aunque de sección menor.

Los procesos de conformado de los productos derivados de la arcilla son relativamente sencillos y una característica importante es su bajo costo. Las materias primas requeridas para estos procesos pueden ser muy diversas, en función de las propiedades requeridas para el componente final, y el agua suele

ser el aglutinante más común, de ahí que se conozcan como procesos de *hidroconformado*. En estos procesos, una vez se ha conseguido la aglomeración de las partículas de arcilla, se obtiene una masa plástica que puede conformarse por compresión o por extrusión, bajo la acción de cargas bajas o moderadas, adoptando el perfil de una matriz (Fig. 7.3).

Tabla 7.2 Clasificación de los materiales tradicionales, principales características y aplicaciones.

<i>Productos cerámicos</i>	<i>Clasificación general</i>	<i>Características</i>	<i>Aplicaciones</i>
<i>Derivados de arcilla</i>	Estructurales	Muy económicos Presiones de conformado bajas	Material de construcción (ladrillos, tejas, etc.)
	Porcelanas (línea blanca)	Económicos Presiones de conformado moderadas	Loza sanitaria Porcelanas eléctricas y domésticas
<i>Refractarios</i>	Ácidos ( $\text{SiO}_2$ ) Básicos ( $\text{MgO}$ ) Neutros ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	Capacidad de soportar temperaturas muy altas en servicio Estabilidad química elevada	Revestimientos de hornos
<i>Abrasivos</i>	Carburos Óxidos Diamante	Elevada dureza Resistencia al desgaste	Corte, desbaste y pulido de materiales
<i>Cementos</i>	Variable (según composición)	Elevada rigidez Resistencia elevada bajo esfuerzos de compresión Estabilidad química Facilidad de fabricación	Material de construcción Hormigón Pavimentos, encofrados, estructuras, etc.

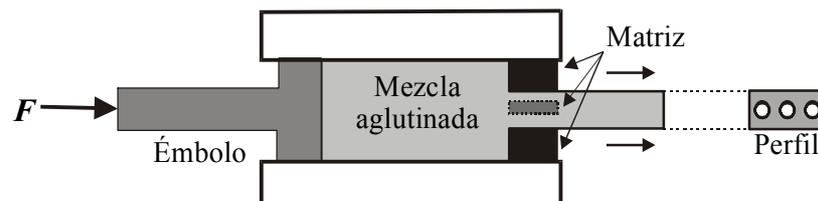


Fig. 7.3 Representación esquemática del proceso de conformado hidrolástico por extrusión.

Otro método muy común de elaboración de componentes cerámicos es el *conformado en barbotina*, que consiste en introducir la mezcla, muy fluida, en un molde de paredes porosas, en el que puede ser prensada para adoptar las dimensiones de una preforma libre del exceso de agua. Es el tipo de operación utilizada para elaborar los componentes de loza sanitaria según un esquema como el representado en la figura 7.4. En cualquiera de los dos procesos descritos, el producto obtenido inmediatamente después de la etapa de compactación, sea por compresión o por extrusión, se denomina *pieza en verde*.

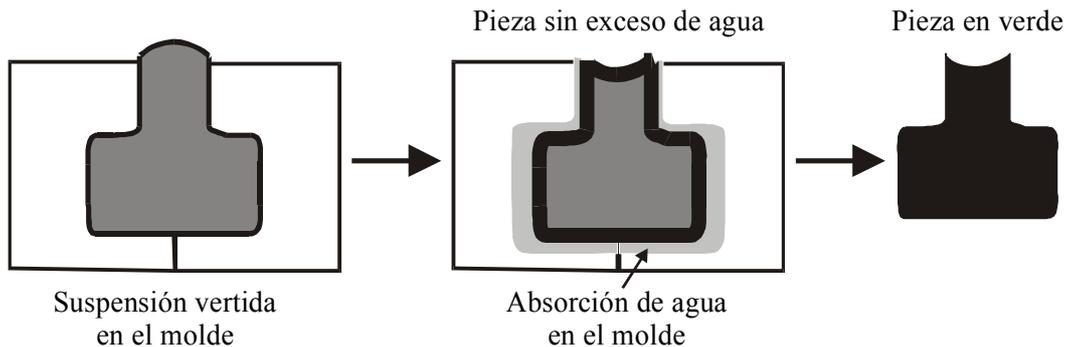
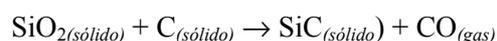


Fig. 7.4 Representación esquemática de las etapas del moldeado en barbotina.

Con las piezas en verde, en ocasiones se hace necesaria una etapa de secado por calentamiento, previa al horneado (*cocción*), que acaba de proporcionar consistencia al producto y cohesiona las partículas de arcilla, de forma similar al proceso que ocurre durante la etapa de sinterización de componentes metálicos. Prácticamente todas las porcelanas y algunos productos cerámicos de construcción suelen recubrirse con una fina capa de mezcla de  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  que proporciona un acabado *impermeable*, satinado o brillante, al ser horneados a temperaturas comprendidas entre 900 y 1.400 °C (*vitrificado*).

Los *refractarios cerámicos* poseen una elevada resistencia a la temperatura, propiedad fundamental para la elaboración de componentes críticos en numerosos procesos industriales para los que se precisa la utilización de hornos y crisoles para calentar y/o fundir metales. Se pueden distinguir refractarios ácidos, básicos o neutros y su selección depende, principalmente, del tipo de producto o ambiente con el que haya de tener contacto, a fin de evitar degradación por reacción química. Estos productos suelen obtenerse a partir de la compactación de polvos o partículas cerámicas en matrices que reproducen las dimensiones del componente final, con adición de pequeñas cantidades de agua y/o pegamentos orgánicos (*prensado en seco*) hasta obtener una pieza en verde. El horneado de esta pieza en verde (*cocción*) permite la unión de partículas, de la misma forma en que se ha descrito anteriormente. El tiempo de proceso en este caso es mucho menor que en los procesos de hidroconformado y permite la elaboración de gran variedad de piezas muy uniformes, con tiempos de fabricación cortos y tolerancias pequeñas.

Otro tipo de cerámicos convencionales de uso muy habitual son los *abrasivos*, en los cuales la dureza y la resistencia al desgaste son las propiedades más relevantes. Los más comunes son la *alúmina* ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y el *carburo de Silicio* ( $\text{SiC}$ ), cuyas propiedades se han detallado en la tabla 7.1. En el caso de la alúmina, su obtención parte del procesado de minerales de aluminio (principalmente bauxitas) que se hallan en la naturaleza, a diferencia del carburo de silicio, que no existe como tal en estado mineral. Este último se obtiene por calentamiento de mezclas de arena ( $\text{SiO}_2$ ) con carbón de coque (C) a temperaturas superiores a 2.000 °C, condiciones en que se produce la siguiente reacción química:



El conformado de abrasivos se realiza, como en el caso de los refractarios, por compactación de polvos mediante prensado en seco, etapa a la que sigue un horneado a temperatura suficiente para favorecer la unión de las partículas.

## 7.2 Cerámicos tecnológicos

Esta terminología hace referencia al conjunto de productos cerámicos, químicamente simples y de pureza considerable, como el óxido de zirconio ( $ZrO_2$ ), el nitruro de boro (BN) o el nitruro de silicio ( $Si_3N_4$ ), entre otros. Aunque algunos productos se encuentran también formando parte de las materias primas de numerosos cerámicos tradicionales, como la alúmina ( $Al_2O_3$ ) o el carburo de silicio (SiC), la diferencia entre ambos grupos radica en que los cerámicos tecnológicos se han obtenido sintéticamente y el producto tiene un elevado grado de pureza, así como con una distribución de partículas mucho más homogénea, de menor tamaño y con una proporción de defectos de procesamiento muy inferior que los que se hallarían en cerámicos tradicionales.

Entre las principales características de este grupo de materiales, cabe destacar que sus propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas y mecánicas son excepcionales, y que poseen una extraordinaria estabilidad química a temperaturas elevadas. Las principales aplicaciones de estos productos son las que suponen un aprovechamiento de sus características, como los blindajes cerámicos para equipos que trabajan a temperaturas muy altas. Cabe destacar la utilización del SiC en las zonas de alta temperatura de algunas turbinas de motor de gas, o la utilización del  $Al_2O_3$  en sustratos de circuitos integrados en módulos de conducción térmica y en aplicaciones biomédicas (huesos y dientes artificiales).

Los carburos metálicos (WC, TiC, TaC y  $Cr_3C_2$ ) son apreciados por su elevada dureza y se utilizan para la elaboración de herramientas de corte. La combinación de carburos metálicos con un metal como ligante da lugar a los carburos cementados (*cermets*), que se destinan principalmente a la fabricación de componentes de matricería.

Los nitruros como  $Si_3N_4$ , BN y  $Ti_3N_4$  son, dentro de los cerámicos avanzados, los materiales más frágiles. Aunque poseen puntos de fusión inferiores a los de los carburos, suelen presentar valores mayores de dureza, especialmente el BN en su variedad alotrópica cúbica, con una red cristalina como la del diamante (ver tabla 7.1).

El conformado de los cerámicos tecnológicos se realiza generalmente por prensado en seco y por sinterizado de las piezas en verde, para elaborar componentes de tamaños variables (entre unos pocos milímetros y varios centímetros) con las propiedades deseadas y con tolerancias muy pequeñas. Si la etapa de prensado se realiza en caliente, se incrementa la densidad del producto final y se mejoran las propiedades mecánicas. Si bien por compresión tan sólo pueden conformarse perfiles sencillos, los procesos que incorporan una etapa de *prensado isostático* favorecen la elaboración de componentes con perfiles complejos. En este caso, el polvo cerámico se coloca dentro de un recipiente flexible (generalmente de caucho) y hermético, que se introduce en una cámara de fluido hidráulico y se somete a presiones elevadas, con lo cual se compacta el polvo uniformemente en todas direcciones, adoptando la forma del molde. Posteriormente, es preciso realizar una etapa de sinterización convencional.

Es posible realizar la etapa de prensado isostático en caliente, proceso conocido como HIP (*Hot Isostatic Pressing*), de manera que se produce la sinterización simultáneamente con el prensado y se obtienen productos con densidades muy elevadas y con propiedades mecánicas excelentes. Con esta técnica se elaboran componentes como aislantes de bujías, cúpulas, crisoles, herramientas de corte y cojinetes, así como productos refractarios de perfil complejo.

### 7.3 Vidrios

La definición de vidrio como un estado de la materia hace referencia a aquella situación en que no se ha constituido una estructura cristalina, generalmente a causa de un enfriamiento súbito (Fig. 7.5). Así, cualquier tipo de material (cerámico, polímero o metálico) puede adoptar una estructura vítrea, aunque en algún caso (como en los metales) no sea la situación más común.

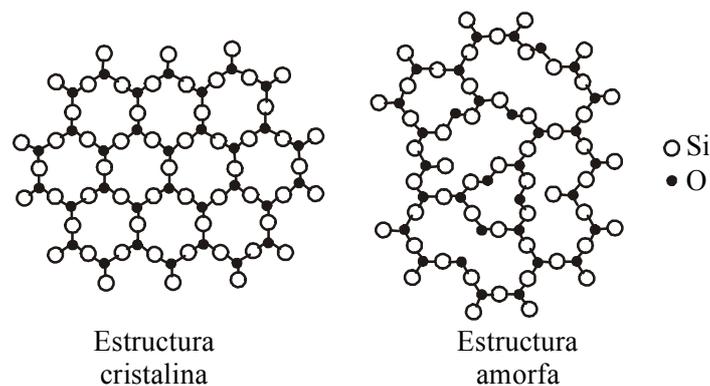


Fig. 7.5 Distintas agrupaciones de  $\text{SiO}_2$ , ordenada (cristalina) y amorfa (vítrea).

Como material cerámico, el vidrio es distinto a cualquiera de los anteriormente descritos, ya que se solidifica sin cristalizar a partir de una mezcla compleja de compuestos inorgánicos que incluye sílice ( $\text{SiO}_2$ ), que actúa como vitrificante, y otros óxidos metálicos y no metálicos que pueden actuar como fundentes ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ) o como estabilizantes ( $\text{CaO}$ ).

El vidrio industrial es el de uso más general y es una sustancia *amorfa*, es decir, no cristalina, aunque comúnmente se suelen utilizar las palabras “vidrio” y “cristal” como si fueran sinónimos. Las características más destacadas del vidrio son las siguientes:

- Es un producto relativamente barato, pero tremendamente versátil en cuanto a posibilidades de aplicación.
- Generalmente es transparente e incoloro, pero son posibles numerosas alternativas de color y de grados de opacidad.
- Tiene un punto de fusión moderado, lo cual permite su conformado por fusión y moldeo y posibilita la obtención de formas finales complejas.
- Presenta una dureza notable a temperatura ambiente y mecánicamente es resistente, de manera que es posible la elaboración de recipientes a presión.
- Es impermeable, por lo que es ideal para la elaboración de envases estancos. La combinación de esta característica con su resistencia a la presión ha dado lugar a la consideración del vidrio para la fabricación de envases al vacío.
- Resulta estéticamente atractivo, por lo que se utiliza para elementos ornamentales y de uso cotidiano, dado su bajo precio.
- Muestra una excelente estabilidad química y en la mayoría de los entornos habituales es posible su reutilización.

- Es posible la elaboración de vidrio reciclado mediante un proceso relativamente sencillo de fusión de vidrio usado.
- Presenta conductividades eléctricas y térmicas muy bajas, por lo que resulta muy adecuado para la fabricación de aislamientos térmicos y eléctricos.

Así, los vidrios se caracterizan por presentar un conjunto de propiedades que difícilmente se encontrarían, de forma simultánea, en otros materiales de aplicación en ingeniería, como la combinación de transparencia con dureza a temperatura ambiente, o de rigidez con resistencia química, etc. De aquí que sean materiales utilizados de forma habitual en la elaboración de conducciones, depósitos y reactores para la industria química.

El vidrio empleado en los utensilios domésticos (*crystaleries*) es el resultado de la combinación de silicato de potasio con pequeñas cantidades de óxido de plomo. El punto de fusión del vidrio puede variar con la composición química y es posible reducirlo para favorecer el conformado por moldeo. El contenido en  $\text{SiO}_2$  de los vidrios comunes oscila entre el 50 y el 75 %, siendo el resto de componentes, generalmente óxidos metálicos, los que confieren las propiedades características a cada producto. A modo de resumen, en la tabla 7.3 se recogen la composición y las características más relevantes de los principales tipos de vidrios, así como sus principales aplicaciones.

Tabla 7.3 Composición, características y aplicaciones de los principales tipos de vidrios.

<b>Vidrio</b>	<b>Composición</b>	<b>Características</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b>Vidrio de sílice (Vycor)</b>	99,5% $\text{SiO}_2$	Resistente al choque térmico y al ataque químico	Vidrio de laboratorio y lana de vidrio para filtros
<b>Vidrios de sosa-cal</b>	72% $\text{SiO}_2$ 14% $\text{Na}_2\text{O}$ 8% $\text{CaO}$ 5% otros	Temperatura de fusión baja, estable durante largos períodos de tiempo, baja resistencia al choque térmico	Recipientes, envases y ventanas
<b>Vidrios de borosilicato (Pyrex)</b>	80% $\text{SiO}_2$ 15% $\text{B}_2\text{O}_3$ 5% otros	Estabilidad química. Bajo coeficiente térmico de dilatación (muy resistente al choque térmico)	Vidrio de laboratorio resistente al fuego
<b>Vidrios al plomo</b>	55% $\text{SiO}_2$ 40% $\text{PbO}$ 5% otros	Densidad muy elevada. Alto índice de refracción (gran transparencia), notable capacidad de absorción de radiaciones	Lentes ópticas
<b>Fibras de vidrio</b>	55% $\text{SiO}_2$ 15% $\text{CaO}$ 15% $\text{Al}_2\text{O}_3$ 10% $\text{B}_2\text{O}_3$ 5% otros	Posibilidad de ser estirado en forma de fibras	Refuerzo en materiales compuestos
<b>Vitrocerámicas</b>	70% $\text{SiO}_2$ 18% $\text{Al}_2\text{O}_3$ 5% $\text{TiO}_2$ 5% $\text{LiO}_2$ 2-3% otros	Gran resistencia al choque térmico	Hornos, encimeras de cocina

El óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) ayuda principalmente a incrementar la fluidez, mientras que el de magnesio ( $\text{MgO}$ ) contribuye a retardar la desvitrificación y el de boro ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) reduce la expansión térmica. El óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) mejora la resistencia al ataque químico por parte de álcalis, ácidos o agua, y son los óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), cobre ( $\text{CuO}$ ) y cobalto ( $\text{CoO}$ ) los que proporcionan coloraciones diversas. Por otro lado, el óxido de plomo ( $\text{PbO}$ ) provoca una alteración en el índice de refracción, incrementando la transparencia de los productos y resultando un componente esencial en la elaboración de vidrios ópticos. Las propiedades mecánicas del vidrio se ven mejoradas por la adición de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

La formulación exacta de los vidrios de renombre (como el *cristal de Bohemia*) no es única, sino que suele ser variable y relativamente “secreta”, según el ente industrial que lo produce.

Los principales métodos que se utilizan para conformar componentes de vidrio son el moldeo, el soplado, el estirado, y el laminado. Si bien todos ellos tienen un origen milenario, que en la producción artesanal se han mantenido prácticamente inalterados, la producción de vidrios con fines industriales ha comportado la adopción de ciertas modificaciones.

Las botellas, envases y otros recipientes de vidrio de uso cotidiano se fabrican mediante un proceso automático que combina una etapa de prensado con una (o varias) de soplado (Fig. 7.6).

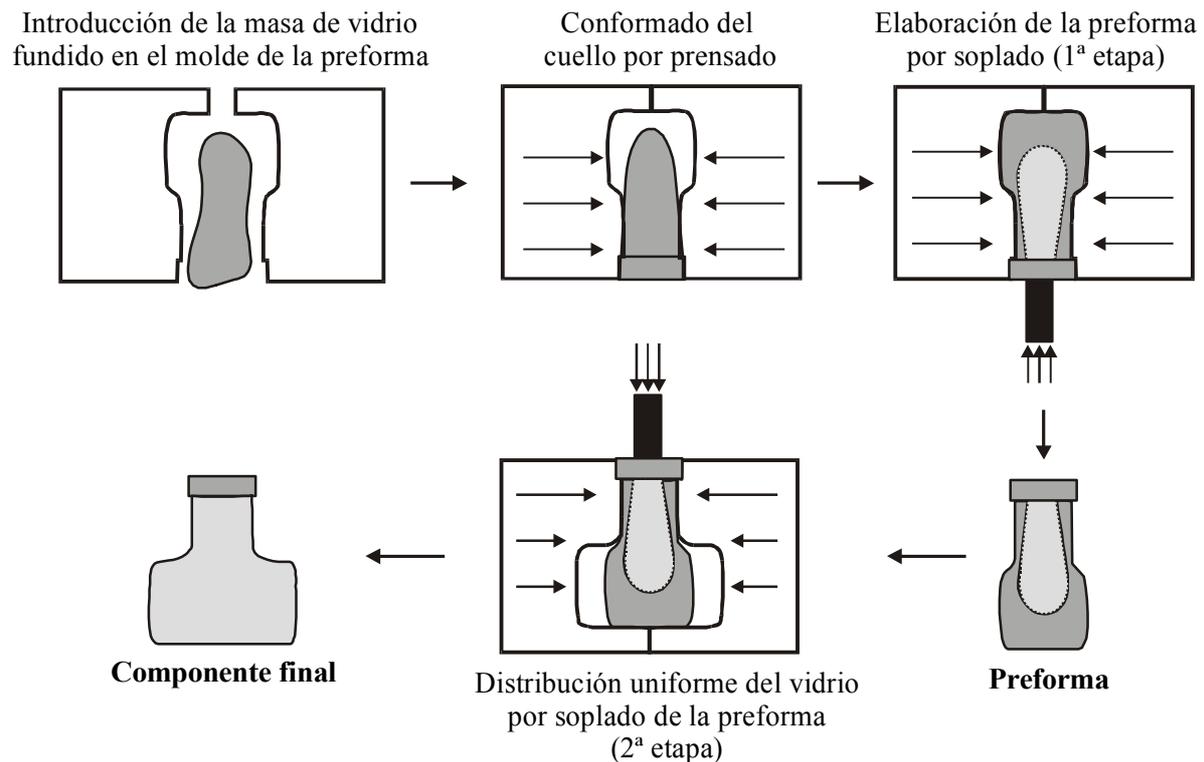


Fig. 7.6 Etapas de elaboración de envases de vidrio por prensado-soplado.

La *primera parte* de la operación de conformado permite obtener el extremo abierto del componente a partir de una porción de vidrio fundido que se introduce en una cavidad estrecha invertida; por efecto de aire a presión, se obtienen las dimensiones de la abertura del recipiente por compresión. Posteriormente, se genera una cavidad interior por soplado que proporciona un recipiente hueco de

paredes gruesas (*preforma*). Si es preciso, se realizan etapas sucesivas de soplado, hasta alcanzar las dimensiones (interiores y exteriores) deseadas. En el caso de componentes de boca ancha y poca profundidad, como tarros de cosméticos o algunos envases alimentarios, sólo es necesaria una operación de prensado, como la primera parte del proceso representado en la figura 7.6.

El vidrio plano se obtiene mediante técnicas de conformado distintas que permiten la elaboración de una fina lámina a partir de vidrio fundido. Cabe destacar el proceso de *flotación*, desarrollado en los últimos 50 años y que ha permitido la utilización del vidrio en el diseño de estructuras al proporcionar grandes superficies planas de vidrio de una sola pieza. Una etapa previa al proceso de conformado es la *fusión* del vidrio, que se mantiene en un depósito y que rebosa por una boquilla, proporcionando una primera capa de vidrio que solidifica mientras avanza a través de una superficie de estaño fundido (*flotado*). Esta capa es forzada a avanzar bajo la acción de una tensión (*estirado*) y así se consigue una lámina plana consistente, de espesor uniforme y con un buen acabado superficial. La realización de una etapa posterior de calentamiento (*recocido*) alivia las tensiones residuales que pudieran existir en el material como consecuencia de la etapa de estirado. En la figura 7.7 se describe esquemáticamente el proceso de flotación.

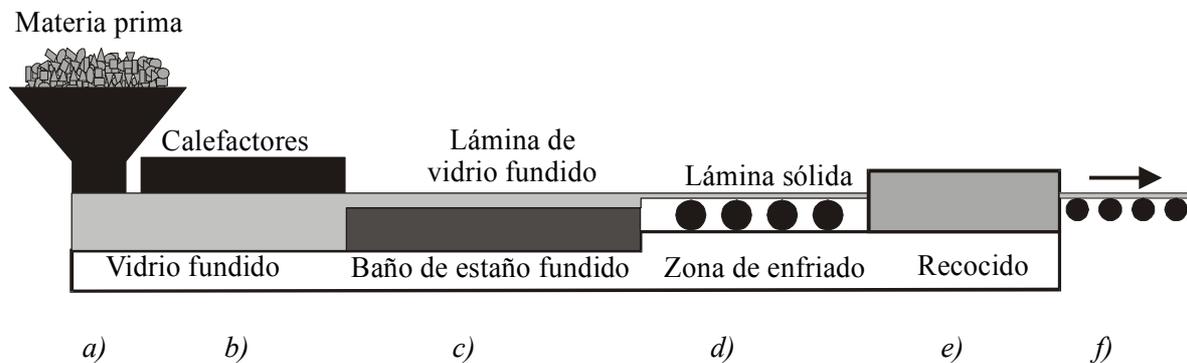


Fig. 7.7 Obtención de vidrio plano por flotación: a) zona de carga de los productos de partida; b) fusión; c) flotado; d) estirado; e) recocido; f) salida (corte).

Las etapas de calentamiento y enfriamiento controlados (templado) mejoran la resistencia de los vidrios, ya que introducen tensiones compresivas en la superficie del material, según se muestra en el esquema de la figura 7.8.

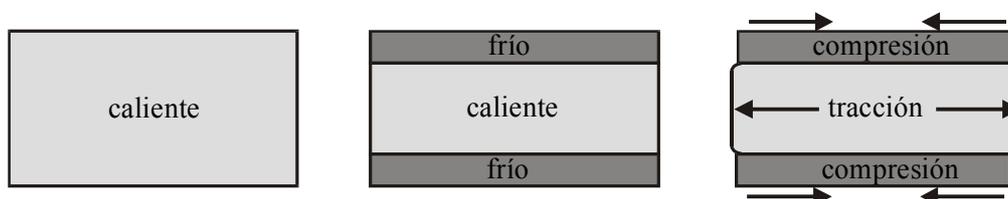


Fig. 7.8 Esfuerzos de compresión superficiales en el vidrio templado.

La existencia de estos esfuerzos de compresión permite que, en caso de generarse una fisura, se retarde la fractura del componente, ya que los esfuerzos de compresión cerrarían los bordes de la fisura y evitarían su propagación (Fig. 7.9).

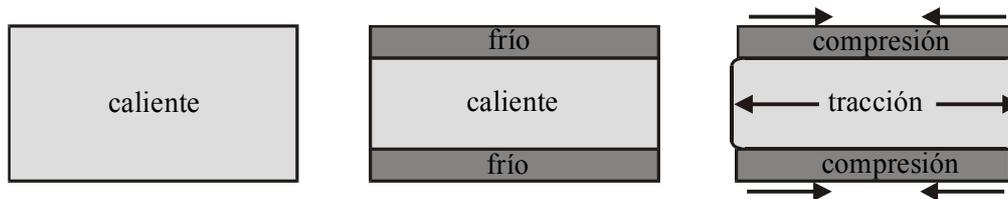


Fig. 7.9 Cierre de una fisura en la zona superficial de un vidrio templado.

El *vidrio laminado* consiste en un doble vidrio con una lámina intermedia de material polímero cuya finalidad principal es la de evitar el desprendimiento de porciones en caso de fractura.

La mayoría de las lentes que se utilizan en la fabricación de gafas e instrumentos ópticos (cámaras fotográficas, microscopios, etc.) se fabrican con *vidrio óptico*, según un proceso delicado y exigente que requiere la utilización de materias primas de una gran pureza y, en la medida de lo posible, la ausencia de imperfecciones durante el proceso de fabricación, dado que la presencia de pequeñas burbujas de aire o inclusiones de materia prima no vitrificada puede provocar distorsiones en la superficie de la lente. La existencia de tensiones procedentes de un tratamiento térmico imperfecto afecta también a las cualidades ópticas de este tipo de productos.

La producción de *fibras de vidrio* se realiza por estirado de una masa de vidrio fundido, hasta alcanzar diámetros del orden de la centésima de milímetro, e incluso inferiores, que pueden tejerse a fin de obtener telas (*mats* de fibra de vidrio). La aplicación principal de estos productos se halla en la elaboración de materiales compuestos (laminados), según se ha indicado en el apartado 6.3.

## Módulo V

Este módulo comprende un primer tema, que corresponde al apartado de prácticas y ejercicios de laboratorio relacionados con los contenidos de los cuatro módulos anteriores. Un segundo tema de este quinto módulo contiene ejercicios y cuestiones relacionadas con los ejercicios prácticos, pero que se han vinculado, en la medida de lo posible, con los contenidos teóricos de los temas correspondientes de los módulos anteriores.

La descripción de las sesiones prácticas se plantea de un modo general y las especificaciones de cada ejercicio se proporcionarán en laboratorio, en el momento de su realización, a fin de adecuar los contenidos a la disponibilidad de las instalaciones. Los guiones que se proporcionen en el laboratorio diferirán del contenido de los apartados siguientes básicamente en que indicarán cantidades concretas (volúmenes, masas, períodos de tiempo, etc.), mientras que los apartados del tema 8 sólo se refieren a dichas magnitudes de forma aproximada.

Así, los objetivos específicos de este módulo se podrían definir como de visualización y aplicación práctica de los contenidos teóricos de los módulos previos.



## 8 Prácticas de laboratorio

### 8.1 Materiales metálicos

A continuación se proporciona el contenido de las prácticas que pueden realizarse en laboratorio y que permiten visualizar o poner en práctica aspectos tratados en distintos apartados de los temas de este texto relacionados con los materiales metálicos. En los laboratorios se dispondrá de guiones que especificarán los pasos a seguir en cuanto a la utilización de equipos, cosa que en este apartado no se detallará.

#### 8.1.1 Metalografía de aleaciones férricas

La aplicación de los fundamentos de la metalurgia a los problemas técnicos exige la utilización de métodos que permitan determinar las estructuras de los materiales. La caracterización de un material metálico posibilita su identificación, o bien la detección de las variaciones que se puedan producir a lo largo de los procesos de fabricación de componentes o durante la vida en servicio de los mismos, correlacionando la microestructura con las propiedades finales o su respuesta mecánica. La finalidad de esta práctica es conseguir una correcta preparación de una superficie para su estudio y para la identificación de su microestructura.

El instrumento más importante en este tipo de estudios es el *microscopio metalográfico*, que posibilita la observación de la distribución y del tamaño de los granos o cristales que los constituyen, y dispone de un sistema de iluminación que hace incidir un haz de luz sobre la superficie de estudio y recoge el haz reflejado (Fig. 8.1).



Fig. 8.1 Microscopios metalográficos.

Si se dispone de un pequeño volumen de material, este mismo puede ser la probeta; en cambio, en caso de disponer de un componente de gran tamaño, es preciso extraer una porción lo bastante pequeña para manejarse fácilmente, pero también lo bastante grande para ser representativa de la microestructura. Este volumen se denomina *probeta*. Se requiere una preparación de la superficie de las probetas, ya que el microscopio recogerá la imagen de un plano determinado, de modo que una superficie irregular no sería adecuada para ser observada con este tipo de microscopio.

La preparación de una probeta consiste en un *desbaste* seguido de un *pulido brillante* (especular). El desbaste se realiza restregando durante unos minutos la superficie de estudio contra un papel abrasivo (SiC, generalmente) bajo un chorro fino de agua, que sirve para eliminar los restos de material arrancados durante el proceso y también partículas de abrasivo. Si el papel abrasivo está sobre un soporte giratorio, se ha de sujetar la probeta contra el papel, en la zona exterior del giro, a fin de evitar el riesgo de impacto si se escapa. Cuando la superficie de la probeta revele rayas paralelas e iguales, se puede considerar finalizado el paso por este abrasivo. La granulometría del papel abrasivo es inicialmente gruesa, pero sucesivamente se van utilizando papeles menos groseros (lavando con agua la probeta ante cada cambio), de manera que las rayas que se generen sean cada vez más finas. El último papel ha de dejar la superficie uniformemente cubierta de rayas paralelas, sin que destaquen rayas más gruesas.

El período de permanencia en cada papel ha de ser aproximadamente el mismo, y en función de la calidad del pulido serán necesarios 5 minutos o un período mayor. Es conveniente realizar un giro de 90° con la probeta hacia la mitad del proceso, de manera que se generen nuevas rayas, perpendiculares a las anteriores, que permitan determinar en qué momento se ha alcanzado el estado ideal de desbaste: cuando ya no se vean las primeras rayas. Entre papel y papel se ha de lavar la probeta con abundante agua, a fin de eliminar restos de abrasivo y evitar contaminaciones de los papeles más finos con partículas más groseras. Las granulometrías de los papeles del laboratorio son, de grueso a fino, 300, 500 y 800, ya que el número indica la cantidad de partículas de abrasivo por área unidad. Después del papel de 800, se ha de lavar la probeta y se iniciará el pulido.

En la etapa de pulido, el agente abrasivo suele ser alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) muy finamente dividida y distribuyéndola por un paño de terciopelo con agua, que sigue actuando como dispersante. Se procede de la misma forma que en el desbaste, con la diferencia de que las rayas generadas ahora son mucho más finas. Se suelen utilizar diferentes groesos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , también de mayor a menor, de manera que, tras el último paño, las rayas son tan finas que no se aprecian, y la superficie se muestra brillante (especular). En el laboratorio se dispone de dos tipos de alúmina: la primera contiene partículas de 1  $\mu\text{m}$  de diámetro medio y la segunda es de 0,3  $\mu\text{m}$ , y se tiene también la precaución de lavar bien las probetas al cambiar de paño y, por tanto, de granulometría de alúmina.

Llegado este punto, se ha de revelar la microestructura, generalmente mediante un *ataque químico* que altera la superficie de observación, reaccionando con las zonas más sensibles de la microestructura policristalina (principalmente bordes de grano), y provocando irregularidades que permiten distinguirlos. Si la acción del ataque es más intensa, se pueden apreciar las diferentes orientaciones de los cristales que componen la microestructura. En caso de que el metal posea una microestructura con más de una fase, se observará que la fase más sensible al ataque es la más afectada, por lo que se revelará de forma distinta. El reactivo de ataque utilizado será NITAL-2 (solución al 2 % de  $\text{HNO}_3$  en alcohol), que actuará durante 20 segundos (aproximadamente) sobre la superficie pulida. A continuación es preciso lavar con agua para interrumpir el ataque.

Una vez finalizada la preparación de la muestra, se coloca ésta en la platina del microscopio y se enfoca hasta que la imagen es nítida. Como en cualquier proceso de observación microscópica, el primer objetivo que debe considerarse es el de menor magnificación (x5 en los microscopios que se han tomado como referencia) y, progresivamente, se girará el revolver hasta el objetivo de mayor

número de aumentos (x10, x20, x50). La magnificación total será el producto de los aumentos del ocular (x 10) por los del objetivo correspondiente. Si bien mayores aumentos deberían facilitar la identificación microestructural, y es cierto que pueden proporcionar información, debe tenerse presente que disminuirá la nitidez de las imágenes observadas.

La identificación de las microestructuras se realizará por comparación con las imágenes de referencia que se proporcionan a continuación (Fig. 8.2-8.13):

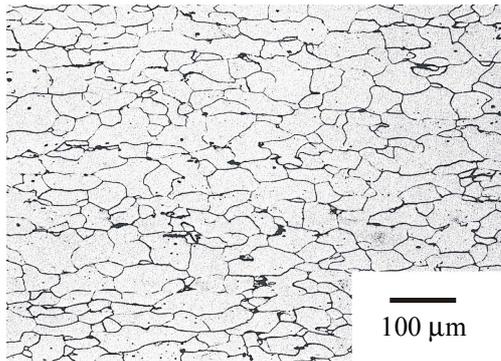


Fig. 8.2 Ferrita.

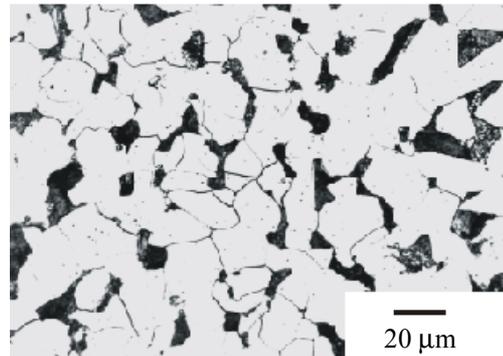


Fig. 8.3 Ferrita (80%) y perlita (20 %).

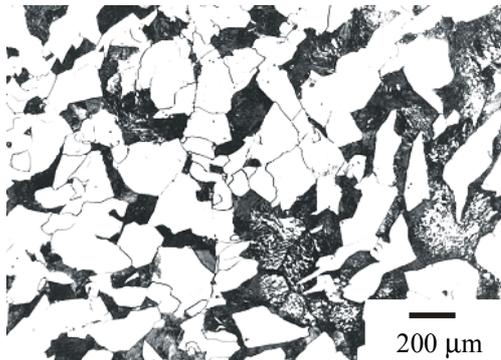


Fig. 8.4 Ferrita (50 %) y perlita (50 %).

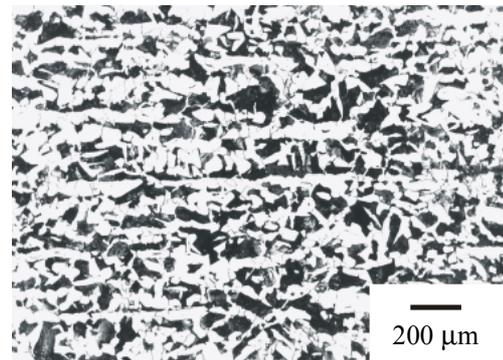


Fig. 8.5 Ferrita (50 %) y perlita (50 %) en bandas.

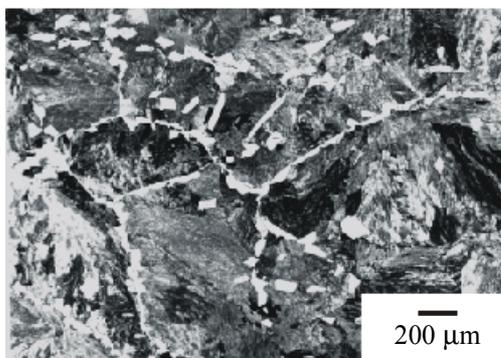


Fig. 8.6 Perlita y ferrita (90 % - 10 %).

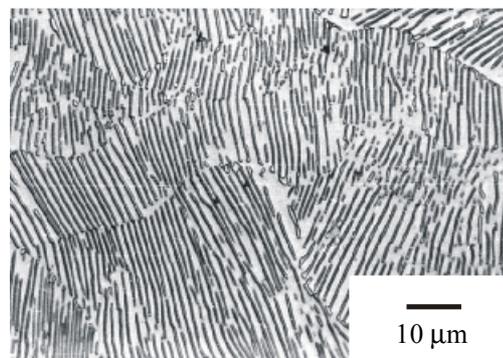


Fig. 8.7 Perlita.

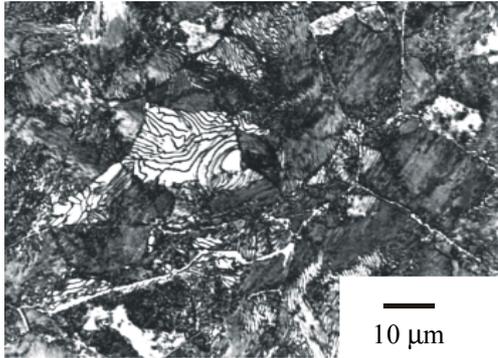


Fig. 8.8 Perlita (95 %) y cementita (5 %).

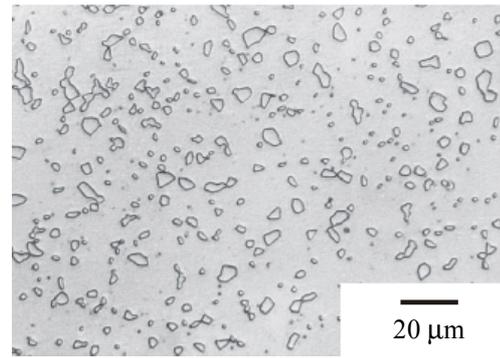


Fig. 8.9 Acero hiperteutoide con cementita globulizada.

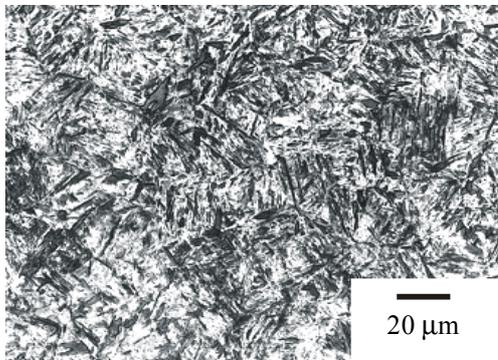


Fig. 8.10 Martensita.

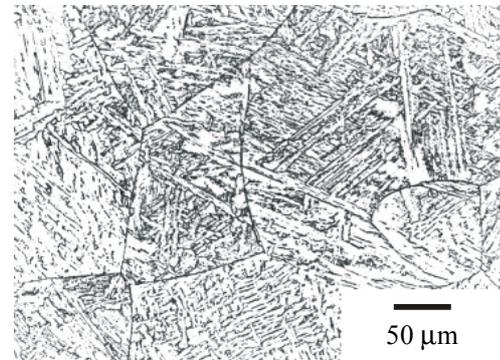


Fig. 8.11 Bainita.

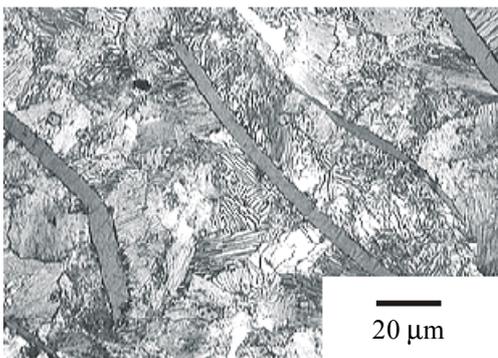


Fig. 8.12 Fundición perlítica gris.

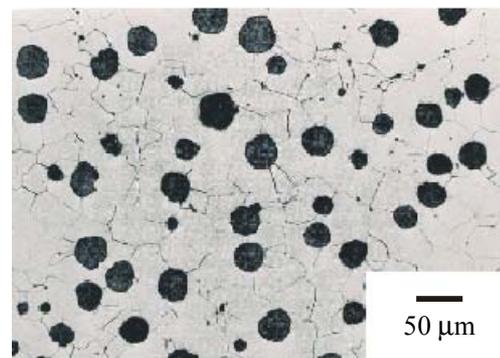


Fig. 8.13 Fundición ferrítica nodular.

### 8.1.2 Corrosión I: Localización de zonas sensibles

La corrosión es un fenómeno físico-químico que provoca la degradación de numerosos componentes mayoritariamente metálicos. Es necesario tenerlo presente, ya que el nivel de pérdidas económicas asociadas a este fenómeno es elevado y puede llegar a alcanzar el 15 % del PIB de un país. Es habitual, pues, destinar parte de un presupuesto al estudio de la corrosión y al diseño de técnicas de protección con la finalidad de retardar el deterioro y alargar la vida en servicio.

Los procesos de corrosión pueden ser relativamente lentos, aunque determinados ambientes (salinos, clorurados, sulfurados, etc.) pueden alterar esta velocidad, aumentándola notablemente. A fin de prever la “vida segura” de un determinado material o componente, se realizan ensayos de corrosión que simulan un entorno agresivo que actúe de forma muy acelerada, a fin de poder realizar una previsión de la degradación en función de factores como la temperatura, la composición química del ambiente, la humedad, la vecindad (materiales en contacto directo con el componente a estudiar), etc.

Sin embargo, si bien prácticamente todos los materiales son susceptibles de padecer corrosión, no todos lo hacen a la misma velocidad. Así, los cerámicos y los polímeros son más resistentes a la degradación que los metales, y dentro los metales hay también notables diferencias de comportamiento. Además, es posible observar que un mismo metal (de composición química única) puede responder de forma distinta a un mismo entorno agresivo, si presenta diferencias de tamaño de grano o de grado de deformación en frío, entre otros aspectos que influyen, existiendo entonces zonas más sensibles a la oxidación que el resto del material.

Así, el principal objetivo de esta práctica consiste en determinar la zona más sensible a la corrosión en un ambiente salino para un mismo sistema metálico (acero al carbono).

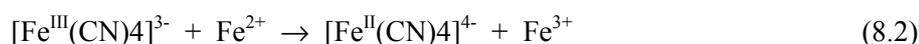
Para ello, se preparará el medio de ensayo calentando 250 ml de solución salina (ya disponible en el laboratorio) con 8 g de agar-agar (alga que convertirá la solución final en un medio gelatinoso). Cuando el conjunto alcance la ebullición, se retira del fuego y se añaden unas gotas de ferricianuro potásico ( $K_3Fe(CN)_4$ ) y unas gotas de fenolftaleína (indicador que vira de transparente a rosa-rojo intenso cuando el pH está próximo a 10), mezclando bien con una varilla.

Una vez tibia, la solución preparada se vierte dentro de varias cubetas en la que se hallan probetas de igual composición, pero con distintos grados de deformación, o bien probetas de distintos metales (en este caso, vigilando que estén en contacto). Se espera hasta que el conjunto esté completamente frío y se observan las coloraciones que hayan aparecido alrededor de las barras metálicas.

Las zonas que hayan quedado rodeadas de un halo azul-verdoso serán aquéllas en las que el hierro se ha oxidado, según la reacción



y el catión  $Fe^{2+}$  reaccionará con el anión ferrocianuro del medio según la reacción siguiente:



obteniendo como producto el ferrocianuro ( $[Fe^{II}(CN)_4]^{4-}$ ), que es de color azul intenso. Estas regiones corresponden a las más sensibles a la acción de la oxidación (zonas deformadas o tensionadas).

Por otro lado, las regiones o los metales que hayan quedado con una tonalidad rosa intenso-rojo revelarán que no ha habido tendencia a la oxidación, ya que se han rodeado de los electrones resultantes de la reacción descrita en (8.1), que reaccionan con el agua del medio según la reacción



Los iones hidroxilo ( $OH^-$ ) reaccionarán con la fenolftaleína y provocarán su viraje, proporcionando la tonalidad rojiza que se observa.

Así, puede observarse qué zonas de un mismo material son más sensibles a la oxidación (comparando un componente deformado con uno que no lo está), o qué metal, de una pareja, es más sensible a la oxidación, actuando como ánodo de sacrificio y protegiendo al otro metal.

### 8.1.3 Corrosión II: Elaboración de una serie electrogalvánica

En esta práctica se comparará la tendencia de distintas aleaciones a oxidarse según una reacción del tipo



donde  $n$  es la valencia de oxidación del metal  $M$ .

Así, es posible establecer un grado de *nobleza* entre los metales como un índice de la resistencia de éstos a la corrosión, de manera que un metal será más noble cuanto mayor sea su dificultad para oxidarse. Al comparar distintas aleaciones, dos a dos, una de ellas siempre será más sensible a la corrosión, actuando entonces como un ánodo de sacrificio y favoreciendo la protección de la otra aleación en un determinado medio agresivo.

Para ello, se sujetarán dos probetas metálicas de dos metales  $M1$  y  $M2$  a los extremos de un téster y se sumergirán en una cubeta que contenga solución salina, procurando que las pinzas del téster no se mojen.

- Si  $M1$  está en el terminal (+) y la lectura del téster en la escala de potenciales es un valor *positivo*, el metal  $M1$  actúa de cátodo(+) y el  $M2$  de ánodo(-), de manera que el metal  *$M1$  es más noble que  $M2$  y menos sensible a la oxidación.*
- Si  $M1$  está en el terminal (-) y la lectura del téster es un valor negativo, será  $M2$  el metal más noble de los dos (cátodo) y  $M1$  será más sensible a la oxidación.

Los resultados obtenidos pueden recogerse en una tabla, de manera que el metal que siempre haya actuado como cátodo será el más noble de toda la serie, mientras que aquel que siempre haya actuado como ánodo será el menos noble y el más sensible a la oxidación. Entre ambos extremos, se localizarán, de forma gradual, las tendencias a la oxidación de los demás metales.

El resultado es una serie ordenada de los metales estudiados, según su tendencia a la oxidación, lo que se define como una serie electrogalvánica.

### 8.1.4 Corrosión III: Recubrimiento electroquímico (depósito de níquel)

Esta práctica aplica los criterios de los procesos de electrólisis en vía húmeda en los que se realizan transferencias químicas a causa del paso de corriente. Para todos estos procesos, puede aplicarse la ley de Faraday, que proporciona la masa de metal ( $m$ ) que puede consumirse o depositarse cuando actúa una corriente de intensidad determinada ( $I$ ) durante un tiempo dado ( $t$ ), en una solución que contiene iones de metal  $M$  disueltos ( $M^{n+}$ ):

$$m = \frac{I \cdot t \cdot M}{n \cdot F} \quad (8.5)$$

El valor obtenido,  $m$ , es directamente proporcional a estas variables, así como a la masa atómica del metal a depositar ( $M$ ). La expresión indica también que el valor de  $m$  es inversamente proporcional a la valencia del metal ( $n$ ) y a la constante de Faraday ( $F$ ), que equivale a la cantidad de carga existente en un mol de electrones y tiene un valor de 96.500 C/ mol  $e^{-}$ .

Un recubrimiento electrolítico consiste en provocar la deposición de una masa  $m$  de metal M por reducción de los iones  $M^{n+}$  disueltos en el medio, aplicando la expresión 8.5. El rendimiento de la operación es el cociente entre la cantidad de metal depositada (masa real,  $m_R$ ) y a la cantidad teórica que indicaría la ley de Farada (masa teórica,  $m_T$ ), según

$$\eta = \frac{m_R}{m_T} \times 100 \quad (8.6)$$

y determina la eficacia del proceso dependiendo del valor obtenido, que habrá de aproximarse a 100.

Un factor importante a considerar es el efecto de la intensidad de corriente, ya que la linealidad de la proporción entre  $I$  y  $m$ , indicada en la expresión 8.5, deja de cumplirse a intensidades elevadas debido a las reacciones secundarias que consumen parte de la energía eléctrica (hidrólisis de la solución con desprendimiento de hidrógeno u oxígeno en los electrodos, calentamiento del baño, posible depósito de otro metal M' que se halle en solución en el electrolito, etcétera). El tipo de metal que actúe de sustrato también afectará al rendimiento de la operación (posibilidad de oxidación superficial, etc.).

Así, el principal objetivo de esta práctica es aplicar la ley de Faraday sobre diferentes sustratos e intensidades de corriente distintas, a fin de determinar el efecto de estas variables en el rendimiento de la operación y en la calidad del producto obtenido. El metal depositado, en este caso, es níquel.

Se utilizará una solución elaborada por disolución de sales de níquel ( $\text{NiSO}_4$ ,  $\text{NiCl}_2$ ) en medio ácido (pH entre 3 y 5). La temperatura del baño ha de estar comprendida entre 40 y 50 °C. Se utilizará un ánodo de níquel metálico de gran pureza, que se sumergirá en el baño sujeto por una pinza, en el cual se producirá, por efecto de la corriente eléctrica, la siguiente reacción:



Por otro lado, en el cátodo (sustrato) se colocará la probeta a recubrir, también sujeta por una pinza, y se sumergirá en la solución, produciéndose la deposición de níquel gracias a la reacción de los electrones liberados en el ánodo con los iones  $\text{Ni}^{2+}$  de la solución:



Aunque podría utilizarse un ánodo de cualquier metal, es conveniente utilizar uno de Ni a fin de mantener constante la concentración de iones  $\text{Ni}^{2+}$  del baño.

Se considerarán 6 probetas metálicas (tres de Fe y tres de Cu), pesadas en una balanza de precisión, para recubrir, para las cuales se aplicarán distintas condiciones de intensidad de corriente eléctrica y de tiempo, a fin de determinar el efecto de estos parámetros en el rendimiento. En la tabla 8.1 se indican los valores de intensidad y de tiempo.

Tabla 8.1 Condiciones de intensidad y tiempo consideradas para los distintos procesos de recubrimiento.

<b>Probetas Fe</b>	<b>Intensidad (A)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Probetas Cu</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Tiempo (s)</b>
<b>n° 1</b>	0,2 – 0,3	300	<b>n° 4</b>	0,2 – 0,3	300
<b>n° 2</b>	0,5 – 0,6	300	<b>n° 5</b>	0,5 – 0,6	300
<b>n° 3</b>	0,8 – 1,0	180	<b>n° 6</b>	0,8 – 1,0	180

Una vez finalizado el proceso de recubrimiento, se desconecta la fuente de alimentación y se retiran los electrodos. Se separa la probeta de la pinza y, con sumo cuidado, se lava la superficie con agua a fin de eliminar restos de solución que pudieran quedar adheridos al recubrimiento y se seca con un chorro de aire caliente.

Una vez las probetas están limpias y secas, se vuelven a pesar en la balanza de precisión. La diferencia de masa que presenten respecto del momento previo a la inmersión, será la masa real depositada ( $m_R$ ). Introduciendo en la expresión 8.5 los valores de intensidad y de tiempo correspondientes a cada probeta, así como la masa atómica del níquel (58,75 g/mol) y la valencia ( $n = 2$ ), se determina la masa teórica ( $m_T$ ) en la expresión 8.5, y con la expresión 8.6 se obtendrán los valores de rendimiento para cada uno de los ensayos. La calidad de los distintos recubrimientos se puede indicar, comparativamente, basándose en el aspecto y la uniformidad de los mismos, mediante observación visual o con lupa. El grado de adherencia se puede comparar también desprendiendo la capa depositada con la uña (adherencia baja), o con una espátula (adherencia media), considerando que, si no se desprende en ningún caso, la adherencia es elevada.

Los procesos electroquímicos proporcionan recubrimientos relativamente uniformes, ya que la distribución de la intensidad de corriente no es la misma en distintos puntos de una superficie irregular (*efecto punta*). Las velocidades de deposición son más elevadas que en los procesos de deposición química. La principal aplicación de los recubrimientos metálicos es la de proporcionar acabados que superen alguna característica de las del metal sustrato, como podría ser una mejor resistencia a la corrosión (níquel, cobre), una buena resistencia al desgaste (cromo), o un aspecto exterior estéticamente mejorado (plateados, dorados).

### 8.1.5 Recuperación de metales nobles

La *nobleza* de un metal es un indicador de su estabilidad en estado metálico ( $M^0$ ) y de la baja o nula tendencia a formar óxidos en ambientes oxidantes, incluso a temperaturas elevadas. Esta característica permite que estos metales se puedan hallar en estado metálico (nativo) en la naturaleza, como metales puros, posibilita su separación entre otros metales por fusión, ya que no se oxidarán a temperaturas elevadas, y pueden recogerse como un residuo metálico entre una escoria de óxidos del resto de metales.

Si bien este proceso ha permitido, desde la antigüedad, la separación de oro y plata de otros minerales con los que pueden aparecer mezclados en las minas, en la actualidad se ha hecho extensivo a la recuperación de estos metales a partir de componentes en los que se hallan pequeñas cantidades (restos de material informático y electrónico, baterías, etc.).

El ejercicio propuesto simula, a una escala muy pequeña, el proceso de separación de plata de una mezcla metálica producto de un proceso de concentración de residuos metálicos de componentes industriales de desecho, sin tener en cuenta cuál haya sido la operación de concentración. El objetivo principal de esta práctica es el de separar, mediante un proceso pirometalúrgico, el contenido en plata de una mezcla metálica. Para ello se calentará una mezcla metálica de punto de fusión bajo de manera que los metales nobles se fundan y los no nobles se oxiden y se fundan en estado oxidado.

El proceso se realiza en un crisol troncocónico y poroso de MgO, denominado copela, que tiene una cavidad en la región superior donde se coloca la mezcla problema (*botón*) y puede absorber los óxidos metálicos fundidos, pero no puede absorber los metales, ya que el ángulo de humectación de los metales fundidos es notablemente distinto (Fig. 8.14). El botón se cubre de plomo (Pb), que a temperaturas elevadas forma un óxido muy pesado (PbO) que arrastrará por gravedad al resto de óxidos metálicos, favoreciendo que queden absorbidos por la copela.

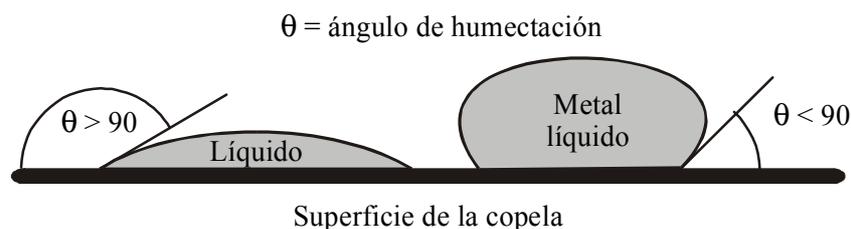


Fig. 8.14 Esquema que representa el grado de humectación de una gota de metal líquido ( $\theta < 90$ ) con una gota de otro líquido, como un óxido metálico ( $\theta > 90$ ).

La *riqueza* de un material es la cantidad (porcentaje) que contiene de un determinado elemento o compuesto. Si el porcentaje hace referencia a un metal noble (oro, plata), la riqueza suele definirse como *ley*. Cuanto mayor es el porcentaje, mayor es la ley. Los conceptos de *recuperación* o *eficacia* que se mencionen en esta práctica hacen referencia a la parte que puede extraerse del total del metal de interés que contenga la muestra. Si bien la riqueza no puede modificarse, la eficacia del proceso estará más cerca del 100 % cuanto mejor se lleve a cabo la operación.

Para la realización de esta práctica, se ha de pesar la muestra problema (en una balanza de precisión), se ha de colocar en la cavidad de la copela y se ha de cubrir de plomo, utilizando una masa de Pb aproximadamente 2,5 veces superior a la masa del botón. El plomo no es necesario pesarlo en la balanza de precisión, ya que ha de ser una masa aproximada. En este momento, se introduce la copela con la muestra y el plomo en el horno, a la temperatura requerida (próxima a 1.000 °C), y se deja aproximadamente 20 minutos.

Una vez finalizado el tiempo de permanencia, se extrae la copela del horno y se deja sobre una superficie resistente al calor. Se observará que en el fondo de la copela ha quedado una gota metálica y cómo su piel forma una especie de tela, que se va rompiendo por la formación de unas *crestas* en la superficie metálica ya sólida. Estas crestas se forman debido a que el oxígeno que está disuelto en el metal líquido intenta pasar al ambiente, ya que el metal sólido no puede disolverlo, y para ello ha de romper la piel de metal sólida. Este fenómeno se conoce como *galleo*.

Cuando el metal de la copela está frío, se desprende del crisol y se pesa en la balanza de precisión, a fin de comprobar la riqueza de la muestra. Si se conoce (o se estima) la riqueza, se podrá determinar la eficacia del proceso.

## 8.2 Materiales polímeros

A continuación se describe el contenido de dos prácticas de laboratorio que permiten visualizar o poner en práctica aspectos tratados en distintos apartados de los temas previos de este texto, relacionados con las propiedades mecánicas o con los materiales polímeros. Como se indicó en el apartado anterior, en los laboratorios se dispondrá de guiones que especificarán los pasos a seguir para la utilización de los equipos, cosa que en este apartado no se detallará.

### 8.2.1 Identificación de polímeros a la llama

Los polímeros pueden clasificarse en familias en función de su estructura química, que será la responsable de que adopten un comportamiento u otro frente a una fuente de calor (humo, olores, fusión, etc.).

El principal problema de esta práctica es identificar la familia a que pertenece cada una de las probetas poliméricas de la colección de probetas problema, dentro de las familias de materiales polímeros más comunes, en función de su respuesta a la llama. Para ello, cada una de las probetas se someterá a la acción de una llama (encendedor Bunsen) y se observarán los aspectos diferenciales, como tipo, olor, color e intensidad del humo, o bien si el polímero se funde o se carboniza directamente. En la tabla 8.2 se indican las características más relevantes de cada una de las familias y qué aspecto es o puede ser determinante.

Tabla 8.2 Características principales del comportamiento de las distintas familias de materiales polímeros ante una llama.

<i>Familia de polímeros</i>	<i>Comportamiento a la llama</i>	<i>Olores y humos</i>	<i>Características</i>	<i>Características especiales</i>
<b><i>Poliiolefinas</i></b>	Se quema suavemente Se funde y gotea con mucha facilidad Llama amarilla en el centro y azul en los bordes	Olor a parafina (recuerda el olor de una vela cuando arde)	Apenas desprende humo mientras arde, pero cuando se apaga la llama, el humo es blanco e intenso	Flotan en agua
<b><i>Poliestirénicos</i></b>	Se quema suavemente Llama de color naranja	Olor de estireno (similar al que se desprende cuando se quema el tubo transparente de un bolígrafo BIC)	Humo negro, muy intenso, y partículas en suspensión	
<b><i>PVC</i></b>	Es autoextinguible La llama es amarilla y naranja, aunque en ocasiones muestra tonos verdosos en los bordes (*)	Olor muy picante (recuerda al ácido clorhídrico)	Humo poco intenso mientras hay llama	(*) Un hilo de cobre en contacto con la llama la torna de color verdoso
<b><i>Poliámidas</i></b>	Se quema suavemente Se funde y gotea, menos intensamente que las poliolefinas La llama adopta tonos amarillos y azules	El olor es muy característico, de pelo quemado (“olor a chamuscado”)	Poco humo	
<b><i>Poliacrílicos</i></b>	Se quema suavemente La llama es amarilla y azul alrededor del componente	Olor afrutado e intenso (recuerda al olor dulzón del pegamento IMEDIO)	Poco humo Crepita	
<b><i>Resinas poliacetáticas</i></b>	Se quema suavemente con una llama pequeña Se funde y gotea con mucha facilidad	Olor muy picante (a formaldehído)	Sin humo	La llama apenas se ve y puede parecer apagado cuando no lo está

### 8.2.2 Tracción de materiales polímeros

Los ensayos mecánicos permiten evaluar la respuesta de un material a la acción de una fuerza aplicada, y de todos ellos el que proporciona mayor cantidad de información es el de tracción. Este ensayo consiste en provocar la elongación de una porción de material ( $\Delta x$ ) con unas dimensiones determinadas (probeta), controlando el valor de carga ( $F$ ) requerido en cada momento para mantener constante la velocidad de desplazamiento de sus extremos.

Los datos ( $\Delta x$ ,  $F$ ) tomados en cada momento se representan gráficamente y se obtiene una curva de la fuerza con respecto al desplazamiento que se denomina *registro de la máquina*. Si se normalizan los valores de fuerza con la sección de la probeta y los valores de elongación con la longitud inicial de la probeta, la curva registrará los valores del esfuerzo con respecto a la deformación, pasando a denominarse *curva ingenieril*.

A partir de la curva ingenieril se obtienen los parámetros característicos de un material a tracción, como el límite elástico ( $\sigma_y$ ), la resistencia a tracción ( $\sigma_m$ ), el módulo elástico ( $E$ ), el alargamiento porcentual ( $A\%$ ) y la estricción ( $Z\%$ ), como se ha indicado en el tema 3.

Los materiales metálicos suelen presentar registros en los que se pueden distinguir claramente dos tramos, uno recto (régimen elástico) y uno curvado (régimen plástico); los materiales cerámicos, por el contrario, presentan registros que sólo poseen un tramo recto, ya que no presentan deformación plástica cuando se someten a cargas de tracción y el valor final del tramo recto corresponde a la resistencia del material; por último, los materiales polímeros suelen presentar tres tipos principales de curvas, que se indican en la figura 8.15.

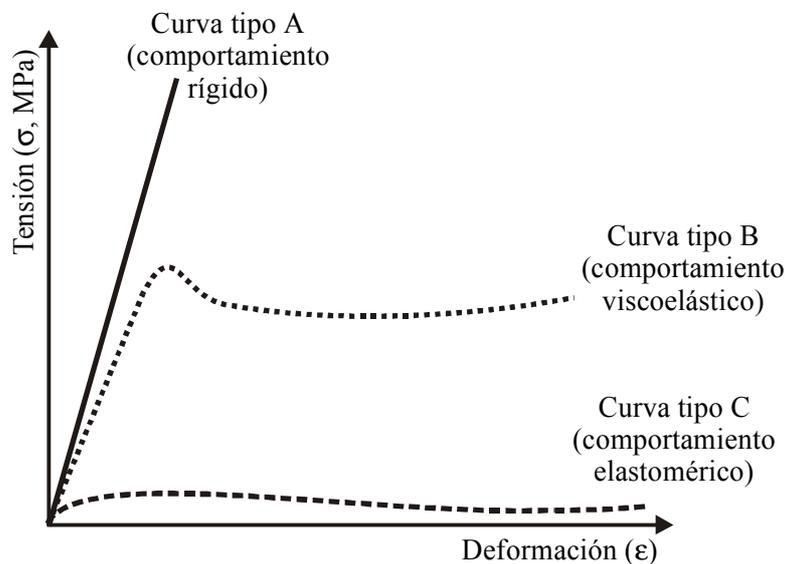


Fig. 8.15 Curvas de tracción características de materiales poliméricos.

Las curvas de la figura 8.15 no se corresponden necesariamente con un determinado tipo de polímero, en cuanto a su composición o a su clasificación por familias, sino que se refieren a los comportamientos más habituales de los polímeros a tracción. Este comportamiento es muy sensible a las variaciones de temperatura y a la velocidad de deformación, de manera que se pueden observar distintas curvas para un mismo material polímero ensayado en distintas condiciones de temperatura o de velocidad de deformación, como se indica en la figura 8.16.

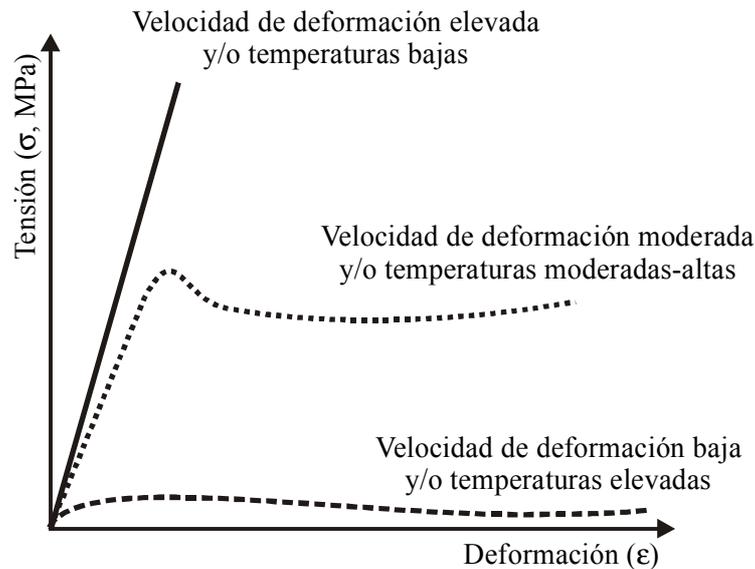


Fig. 8.16 Efecto de la temperatura y la velocidad de deformación en las curvas de tracción para materiales poliméricos.

Una curva de tipo A (según la figura 8.15) corresponde a un polímero muy rígido, que podría ser un polímero altamente reticulado a temperatura ambiente. Sin embargo, un polímero no reticulado, que a temperatura ambiente podría deformarse plásticamente, si se ensaya a temperaturas muy bajas o bien muy rápidamente, también puede desarrollar un comportamiento a tracción como el indicado por la curva de tipo A., como se indica en la figura 8.16.

Por otro lado, una curva de tipo B (según la figura 8.15) indica que el polímero presenta un comportamiento viscoelástico, y si se obtiene a temperatura ambiente es indicativo de que las cadenas de polímero, una vez superado el límite elástico (fin del tramo recto), pueden fluir unas sobre otras, orientándose y colocándose paralelamente a la dirección de aplicación del esfuerzo, de manera que se observa deformación sin que la fuerza requerida sea mayor. En esta etapa, la curva registrada es una línea horizontal, que finaliza cuando las cadenas se han alineado tanto como era posible. En este momento, se requiere un incremento del esfuerzo para deformar el polímero (ligera subida en la parte final de la curva), pero la capacidad de deformación es muy limitada y rápidamente se alcanzan las condiciones de ruptura.

Por último, las curvas indicadas como tipo C en la figura 8.15 son las que se observarían, a temperatura ambiente, en un material elastomérico (por ejemplo, hule, gomas y otros derivados del caucho). En este caso, el comportamiento del material es muy característico y se observa una gran capacidad de deformación aunque las cargas aplicadas sean pequeñas. Si bien el registro no es una línea, cuando la carga cesa, la probeta recupera sus dimensiones iniciales, lo cual indica que el comportamiento es elástico, aunque no siga una ley de Hooke. Un material polímero ensayado a temperaturas suficientemente elevadas puede presentar un comportamiento similar al aquí descrito.

Para la realización de la práctica, se dispone de diferentes probetas poliméricas con forma de halterio y con las dimensiones determinadas por la norma de tracción (ASTM E8). Generalmente se utilizarán probetas poliolefinicas con distintos grados de carga (porcentajes variables de talco o negro de humo) y algunas de ellas se habrán introducido previamente en un congelador.

Las probetas, cuando van a ensayarse, se sujetan a las mordazas de la máquina mediante unas mandíbulas que se cierran con la ayuda de una llave Allen. En ese momento, se introducen los

parámetros de la probeta (anchura y espesor de la zona central o calibrada de la probeta y longitud inicial de dicha zona central), así como las condiciones del ensayo (velocidad de desplazamiento del cabezal móvil), y se inicia el ensayo. La máquina está conectada a un PC en el que se ha instalado un programa que recoge datos y los representa instantáneamente en una curva ( $F/\Delta x$ ), o bien ( $\sigma/\epsilon$ ), según se haya indicado.

*Ensayo I:* Inicialmente se observará que las dimensiones de la probeta apenas varían, aunque el gráfico que se dibuja en la pantalla del PC indique una deformación creciente. Si en este momento se interrumpiera en ensayo y se soltaran las mordazas, la probeta recuperaría totalmente las dimensiones que presentaba antes de iniciarse el ensayo. Cuando la curva abandona el registro lineal y se inicia el tramo plástico, se aprecia en las probetas translúcidas que la zona central se va tornando progresivamente más blanca, opaca. Cuando se supera el punto máximo de la curva (límite elástico), se observa que tan sólo una parte de la probeta presenta deformación, coincidiendo con el inicio de un tramo lineal en la curva registrada. En el momento en que finaliza el tramo recto y vuelven a subir los valores registrados de las ordenadas, se aprecia cómo se van descohesionando distintos puntos de la sección que ha sufrido el estiramiento más importante, hasta que la probeta se rompe. Al inspeccionar la superficie de fractura, puede apreciarse que ésta presenta unas “fibras” que, al romperse, han conducido al colapso del material.

*Ensayo II:* Si se coloca otra probeta y se ensaya con mayor rapidez, la curva registrada será más alta (se alcanzan valores mayores de  $F$ ) y más estrecha (la deformación del material es menor) cuanto mayor sea la velocidad de desplazamiento programada.

*Ensayo III:* Si se diseña un ensayo como el I, con probetas idénticas y con la misma velocidad de desplazamiento, pero las probetas se hallan a temperaturas muy inferiores (probetas extraídas de un congelador), se observará que las curvas registradas son muy similares a las obtenidas en II.

*Ensayo IV:* Se han de utilizar probetas con distintos grados de carga, de manera que se diseña una batería de ensayos que parte del material no cargado (% carga = 0). La temperatura de ensayo y la velocidad de desplazamiento serán siempre las mismas. Cuando se hayan realizado todos los ensayos, al comparar las curvas se podrá apreciar que el grado de carga mayor se corresponde con una curva proporcionalmente más estrecha y más alta.

### 8.3 Materiales compuestos: Elaboración de un laminado

Los materiales compuestos de matriz polimérica pueden estar constituidos por una matriz termoplástica o bien por una termoestable. La adición de una segunda fase o refuerzo se realiza con la finalidad de mejorar la respuesta mecánica de la matriz y suele proporcionar al conjunto unos niveles de resistencia y de rigidez de que no le son propios en condiciones normales.

Los laminados son compuestos de matriz polimérica que suelen estar constituidos por una matriz termoestable (resina) y un refuerzo de fibra de vidrio que proporcionará al conjunto propiedades mecánicas relativamente buenas (elevada resistencia y rigidez con baja densidad) a precios muy competitivos. La fibra de vidrio puede ser más o menos larga y puede estar más o menos tejida, proporcionando una respuesta distinta al resultado final en función de cada una de las morfologías indicadas.

Una matriz termoestable está formada por cadenas poliméricas enlazadas entre sí mediante enlaces cruzados, formando una red o entramado tridimensional que proporciona gran rigidez. El cruzamiento entre cadenas se produce por la reacción de un polímero inicial, con un número de puntos reactivos en

su cadena superior a 2, en presencia de reactivos (iniciadores y acelerantes) que abren dobles enlaces del polímero inicial y estimulan la unión de los puntos reactivos de distintas cadenas mediante vínculos cruzados. Esta reacción es irreversible y, como consecuencia, el material ya conformado posee una forma definitiva que **no** se modifica por la acción del calor (*termoablandamiento*), a diferencia de los termoplásticos. Una temperatura suficientemente elevada produce la degradación y la descomposición del material.

La reacción de polimerización o reticulación (cruzamiento de cadenas) se ha de producir en un intervalo de tiempo concreto, y este intervalo puede hacerse mayor o más breve en función de la cantidad de agentes reticulantes añadida: mayor cantidad de reactivos favorece una reacción más rápida, y viceversa. Durante esta etapa de polimerización se pueden considerar distintos parámetros:

- *Tiempo de gel*: Es el tiempo necesario, desde la adición de reactivos, para que la resina haya pasado del estado fluido al estado de gel. A partir de este punto, la resina adquiere una consistencia que ya no permite su distribución sobre una superficie o en un molde. El tiempo de gel puede acortarse si se añade una mayor cantidad de reactivos.
- *Temperatura de gel*: Es el pico de temperatura que alcanza la resina durante la polimerización. Este valor de temperatura aumenta más cuanto más rápida es la polimerización, es decir, cuanto más corto es el tiempo de gel. Si la temperatura es excesiva, puede producirse degradación del refuerzo, del molde o bien de la propia resina (se quema).
- *Intervalo punto de gel-pico exotérmico*: Es el intervalo de tiempo que transcurre desde que se produce la gelificación de la resina hasta que ésta alcanza su máximo de temperatura. El sistema de conformado ha de permitir evacuar la energía (calor) liberada en este tramo.

Los parámetros descritos son fundamentales a la hora de diseñar un proceso de fabricación (tiempo de gel) y a la hora de determinar el refuerzo o el material del molde (que no se degrade a la temperatura de gel). Si bien se ha indicado que se pueden modificar los valores de estos parámetros, la estabilidad del producto final dependerá de una selección cuidadosa.

Las principales resinas que se utilizan como matrices termoestables de composites son las resinas epoxi y las de poliéster insaturado, y se suministran en forma de polímero inicial, no reticulado, adoptando la forma definitiva del componente en el momento de la elaboración del mismo, por adición de los agentes reticuladores. Los procesos de elaboración de laminados permiten un sinfín de formas finales, con grados de complejidad muy diversos, y los productos finales se caracterizan por una gran estabilidad química en ambientes industriales muy diversos.

Las propiedades específicas de un composite dependerán de las características individuales de la matriz y de la carga, del porcentaje en que se hallen presentes y de la distribución de ambas fases en el conjunto final. Es también fundamental conseguir que haya una buena adherencia entre matriz y refuerzo y que se evite, en lo posible, la existencia de burbujas de aire, que constituyen defectos que debilitan las estructuras laminadas.

El objetivo principal de esta práctica es la elaboración de un laminado de material compuesto formado por una matriz de resina de poliéster y un refuerzo de fibra de vidrio tramada, pero no tejida (*mat*). Se pretende que, durante y tras la realización del ejercicio, se analice la influencia de la carga (refuerzo) y de la matriz en el comportamiento global del producto resultante. También se considera interesante visualizar los términos indicados en el texto previo (punto de gel, reticulación, etc.).

Para la realización del trabajo, en primer lugar se ha de preparar una superficie lisa (limpia y con una capa de cera) y se han de recortar dos capas de *mat* de fibra de vidrio con las dimensiones adecuadas.

En ese momento, se puede colocar un volumen determinado de resina en una cubeta adecuada y se añadirá el agente reticulador, agitando con una varilla de vidrio el conjunto. Se observará que la resina cambia de color, señal de que la polimerización progresa. En el momento en que el producto pierda la fluidez, antes de que alcance el punto de gel, se procederá a verter una tercera parte de la resina sobre la superficie encerada. A continuación se coloca una capa de fibra de vidrio y se cubre con más resina. Se coloca la segunda capa de fibra de vidrio y se acaba de cubrir todo con la resina restante. Rápidamente se ha de proceder a extraer las posibles oclusiones de aire, presionando sobre el conjunto resina+refuerzo con un rodillo, etapa que favorecerá el contacto resina+refuerzo y da una mayor resistencia al conjunto.

Tras unos 20-30 minutos, el conjunto estará totalmente reticulado (puede acortarse este tiempo mediante la adición de calor, con un secador o similar) y se puede separar de la superficie encerada. En este momento, antes de que se enfríe el laminado, se puede moldear el producto obtenido si se coloca el conjunto sobre una superficie curvada.

#### 8.4 Materiales cerámicos: Choque térmico

Los materiales cerámicos, debido a la naturaleza de su enlace covalente/iónico, no son buenos conductores del calor, comportándose como excelentes barreras térmicas. La dilatación que sufren los materiales metálicos cuando se calientan no es un fenómeno que se pueda apreciar con los cerámicos, de manera que, en caso de producirse, el cambio de dimensiones es muy pequeño.

Si la variación de temperatura (bien sea calentamiento o enfriamiento) es brusca, se generan tensiones muy elevadas entre la piel y el núcleo que, en materiales de rigidez tan elevada, pueden ser fatales, llegando a provocar la fisuración o la fractura de los componentes. Este fenómeno se conoce como *choque térmico*.

Esta práctica pretende reproducir las condiciones en las que un cerámico de uso habitual puede sufrir choque térmico, y también cuantificar el grado de choque que puede producirse en función del gradiente de temperatura que pueda existir, en un momento dado, entre dos puntos de un mismo componente.

Para ello, se someterán distintas porciones de cerámico de uso habitual (3-4 probetas de porcelana blanca vitrificada) a distintas diferencias de temperatura en tiempos breves.

El horno del laboratorio se habrá programado a una temperatura inicial ( $T_1$ ) y se introducirán todas las probetas simultáneamente. Tras esperar el tiempo suficiente ( $t_1$ ) para garantizar que la temperatura será la misma en cualquier punto, se abrirá el horno y UNA PROBETA se sumergirá rápidamente en agua a temperatura ambiente. En ese momento, se programará una nueva temperatura ( $T_2$ ) en el horno y se empezará a contar el tiempo ( $t_2$ ) cuando ésta se haya alcanzado. Tras este nuevo período, se extraerá UNA PROBETA de las que quedaban en el horno, se sumergirá rápidamente en agua y se programará una nueva temperatura ( $T_3$ ), y así sucesivamente.

Los valores de temperatura de las distintas etapas ( $T_1, T_2, T_3, \dots$ ) y los de tiempo ( $t_1, t_2, t_3, \dots$ ) dependerán del tipo de cerámica que se utilice y se indicarán en el laboratorio.

Cuando todas las probetas se han extraído del horno y se han enfriado sumergidas en agua, se identifican y se secan con ayuda de un secador de aire. En este momento, si se ha producido algún tipo de fisuras por choque térmico será muy difícil observarlas ya que serán pequeñas o poco profundas. Para facilitar el hallazgo de estos defectos, se rociarán las probetas con un spray de color (spray

revelador rojo). Como la superficie está vitrificada, no absorberá revelador, pero éste penetrará por las fisuras que se hayan podido generar y la zona interior quedará teñida.

En este momento, se lavan las probetas bajo un chorro de agua para eliminar el exceso de spray superficial, y se secan, pudiéndose apreciar entonces la densidad de fisuras que exista en cada condición.

Para cuantificar el grado de choque térmico, se dibujan  $n$  líneas rectas al azar sobre la superficie de las probetas tratadas con un rotulador permanente, tomando nota de la longitud de las líneas ( $L$ ). Al contabilizar el número de intersecciones ( $I$ ) de las líneas trazadas con las fisuras teñidas que haya en la superficie, se podrá determinar una “distancia media” entre fisuras,  $\delta$ , que será distinta para cada temperatura considerada, según

$$\delta(T_i) = \frac{\sum \left( \frac{L_j}{I_j} \right)}{n} \quad (8.9)$$

Si una línea trazada no tiene puntos de intersección con ninguna fisura, se ha de desestimar ese valor.

## 9 Ejercicios y cuestiones de laboratorio resueltos

### 9.1 Ejercicios y cuestiones sobre materiales metálicos

#### 9.1.1 Cuestiones sobre metalografía de aleaciones férricas

Observando las microestructuras de la práctica 8.1.1 (Figuras 8.2-8.13), será posible responder a las preguntas siguientes:

- a) ¿Qué microestructuras corresponden a aceros hipoeutectoides?
- b) ¿Qué microestructuras corresponderán a un acero eutectoide?
- c) ¿Hay alguna microestructura de acero hipereutectoide? ¿Cuál o cuáles?
- d) Localizar, en el diagrama Fe-C (Fe-Fe<sub>3</sub>C) de la figura 4.5, la composición aproximada de los aceros a los que corresponden las micrografías 8.2, 8.3, 8.4, 8.6, 8.7 y 8.8.
- e) ¿Es posible que las microestructuras de las figuras 8.4 y 8.5 correspondan a un mismo material? ¿A qué se debe la diferencia mostrada por las micrografías?
- f) ¿Qué microestructura corresponde al acero presumiblemente de mayor dureza?
- g) ¿Qué tratamiento térmico conduce a la microestructura de la figura 8.9?
- h) ¿Qué velocidad de enfriamiento provocará una microestructura como la de la figura 8.10?
- i) ¿Qué velocidad de enfriamiento conducirá a una micrografía como la de la figura 8.11?
- j) ¿Es posible convertir una fundición como la de la figura 8.12 en una a la que corresponda la microestructura de la imagen 8.13? ¿Cómo?
- k) ¿Qué diferencias se observarán entre las fundiciones grises de las figuras 8.12 y 8.13?

*Soluciones:*

- a) 8.2, 8.3, 8.4, 8.5 y 8.6.

b) 8.7.

c) Sí. Las de las figuras 8.8 y 8.9.

d) Indicado en el diagrama de la figura 9.1.

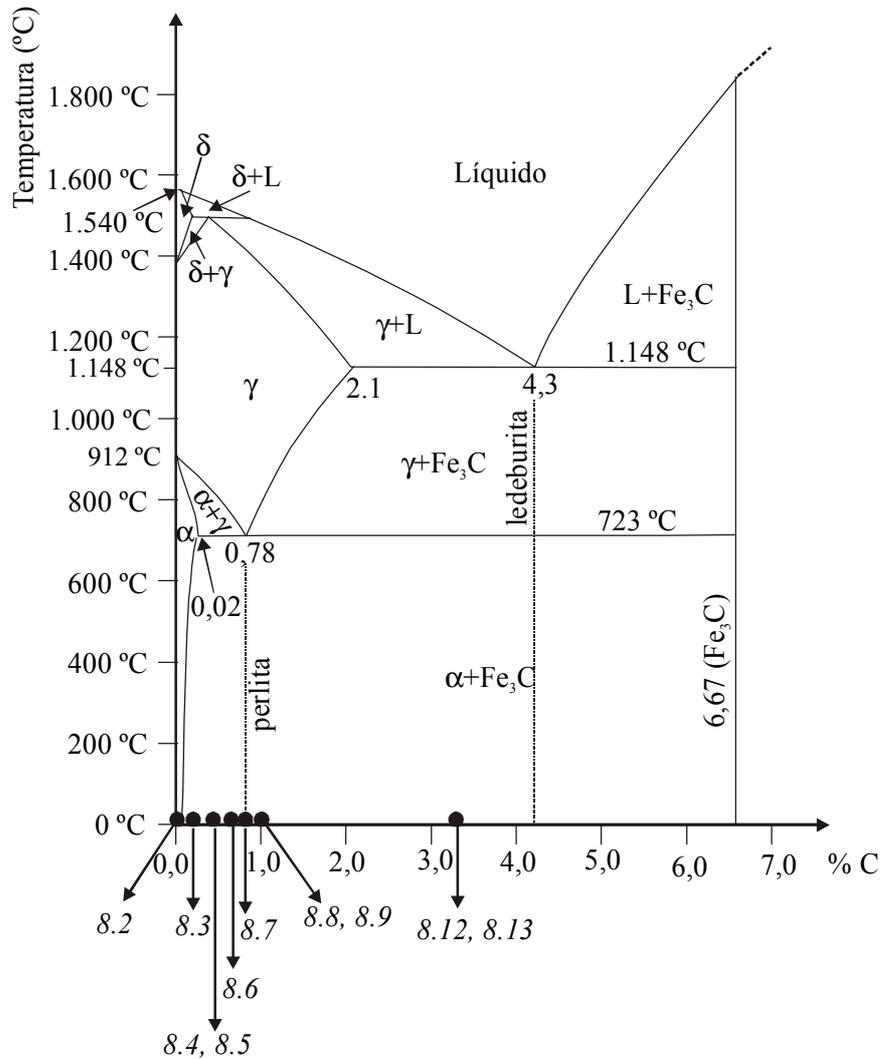


Fig. 9.1 Diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C con las soluciones al ejercicio d) del apartado 8.1.1.

e) Sí, es posible. Podrían pertenecer a una misma probeta que corresponda a distintas direcciones de observación de un mismo acero hipoeutectoide laminado. La figura 8.4 correspondería a una sección perpendicular a la dirección de laminado, y la figura 8.5 indicaría que la superficie de observación es paralela a la dirección de aplicación del esfuerzo durante la laminación.

f) La de la figura 8.10.

g) Recocido globular en acero hipereutectoide (Fig. 4.11).

h) Un tratamiento térmico de temple.

- i) *Un enfriamiento lo bastante lento como para evitar el temple, pero más rápido que el de un recocido convencional (entre las curvas 2 y 3 de la Fig. 4.15) o un tratamiento de austempering (Fig. 4.18).*
- j) *Sí. Añadiendo Mg y con un tratamiento térmico de nodularización.*
- k) *La fundición de la figura 8.12 apenas presenta ductilidad (0-0,3%), mientras que el tratamiento de nodularización aumenta esta propiedad en la fundición de la micrografía de la figura 8.13 hasta un 10 %.*

### 9.1.2 Cuestiones sobre localización de zonas sensibles

A partir de los resultados obtenidos en la práctica 8.1.2, será posible responder a las preguntas siguientes:

- a) *¿Por qué la zona acodada de la probeta férrica se rodea de una tonalidad azul?*
- b) *¿Se podría evitar la situación del apartado anterior?*
- c) *¿Aparecería color azul en una zona acodada de una probeta no férrica? ¿Por qué?*

*Soluciones:*

- a) *Porque las regiones más tensionadas de una probeta metálica son la más sensibles a la acción de la corrosión y, por tanto, se convierten en zonas anódicas por comparación con el resto de metal no tensionado (zona catódica).*
- b) *Es posible que un tratamiento térmico de recocido contribuyese a eliminar las tensiones originadas durante la deformación plástica, con lo cual podría desaparecer el carácter anódico de la zona afectada.*
- c) *No, porque el color azul es característico del producto de la reacción de los iones  $Fe^{2+}$  con el ferricianuro del medio, y los iones  $Fe^{2+}$  tan sólo se forman durante la oxidación del hierro.*

### 9.1.3 Cuestiones sobre la elaboración de una serie electrogalvánica

A partir de los resultados obtenidos en la práctica 8.1.3, será posible responder a las preguntas siguientes:

- a) *Si un metal alcanza una posición muy elevada (metal catódico) en la serie electrogalvánica, ¿se debería esperar una repuesta similar de aquellas aleaciones que posean porcentajes mayoritarios de dicho elemento?*
- b) *¿Por qué el aluminio, que suele caracterizarse por resistir la corrosión ambiental, alcanza una posición tan baja (metal anódico) en la serie electrogalvánica?*
- c) *Dos metales de composición química muy similar, ¿tendrán la misma respuesta en esta práctica?*

Soluciones:

- a) *En principio sí. Es el caso del cobre y de sus aleaciones (latones y bronce), que suelen ocupar posiciones muy elevadas en las series electrogalvánicas.*
- b) *Porque la tendencia a la oxidación del aluminio es muy marcada, pero la formación de una capa de óxido superficial, muy delgada y adherida, limita el progresivo ataque del entorno y el material deja de oxidarse (pasivación).*
- c) *No. Cada composición química corresponde a una aleación distinta, que también tendrá una respuesta particular. Si existe alguna diferencia, por pequeña que sea, uno de los dos metales actuará como ánodo y el otro como cátodo.*

#### 9.1.4 Cuestiones sobre recubrimientos electroquímicos

A partir de los resultados que se habrán obtenido durante la realización de la práctica 8.1.4, será posible responder a las preguntas siguientes:

- a) De la representación gráfica del rendimiento (y) con respecto a la intensidad de corriente (x) correspondientes a cada tipo de probetas, ¿se puede decir que la masa depositada aumenta de forma proporcional al incremento de intensidad de corriente aplicada?
- b) ¿Qué tipo de sustrato proporciona mayores valores de rendimiento?
- c) La uniformidad de la capa depositada ¿es siempre igual de uniforme en una superficie regular o se aprecia algún efecto del grado de intensidad aplicado?

Soluciones:

- a) *Generalmente no. Es habitual observar que, a mayores intensidades de corriente, el rendimiento disminuye, aunque la masa depositada sea mayor, ya que las reacciones secundarias que puedan producirse, serán tanto más intensas y desviarán una parte de la energía tanto mayor.*
- b) *Generalmente un sustrato más anódico puede mostrar rendimientos más elevados, como Cu sobre Fe, ya que se puede producir deposición química simultáneamente a la deposición electroquímica.*
- c) *Aunque una superficie sea regular, es posible apreciar irregularidades en el depósito, sobre todo en las probetas recubiertas a intensidades elevadas, ya que la posible formación de burbujas alrededor del cátodo por hidrólisis puede inducir depósitos irregulares.*

#### 9.1.5 Cuestiones sobre recuperación de metales nobles

A partir de los resultados que se habrán obtenido durante la realización de la práctica 8.1.5, será posible realizar los ejercicios siguientes:

- a) Cálculo de la riqueza en plata (% másico de Ag) de la muestra metálica problema del laboratorio.

- b) Cálculo de la masa de plata que había en la muestra problema.
- c) Si en el laboratorio se dispone de la riqueza real de la muestra, determinar el rendimiento de la operación.
- d) ¿Qué factor determinará la viabilidad de un proceso de extracción, la riqueza o el rendimiento?

*Soluciones:*

a)  $Riqueza_{CALCULADA} = (M_{RESIDUO} / M_{PROBLEMA}) \times 100$

b)  $M_{Ag} = M_{PROBLEMA} \times Riqueza$

c)  $\eta = (Riqueza_{CALCULADA} / Riqueza_{TEÓRICA}) \times 100$

d) *El rendimiento dependerá de la bondad del proceso, pero nunca se lograría modificar la riqueza, que es el parámetro determinante.*

### 9.1.6 Ejercicios sobre tracción de materiales metálicos

Si bien la práctica de tracción se realiza utilizando probetas poliméricas, se ha considerado adecuado introducir este subapartado extra con un ejercicio correspondiente a un ensayo de tracción convencional de un material metálico.

Una probeta metálica de 100 mm de longitud calibrada y de 5 mm de radio se somete a esfuerzos de tracción, proporcionando una curva esfuerzo-deformación como la de la figura 9.2.

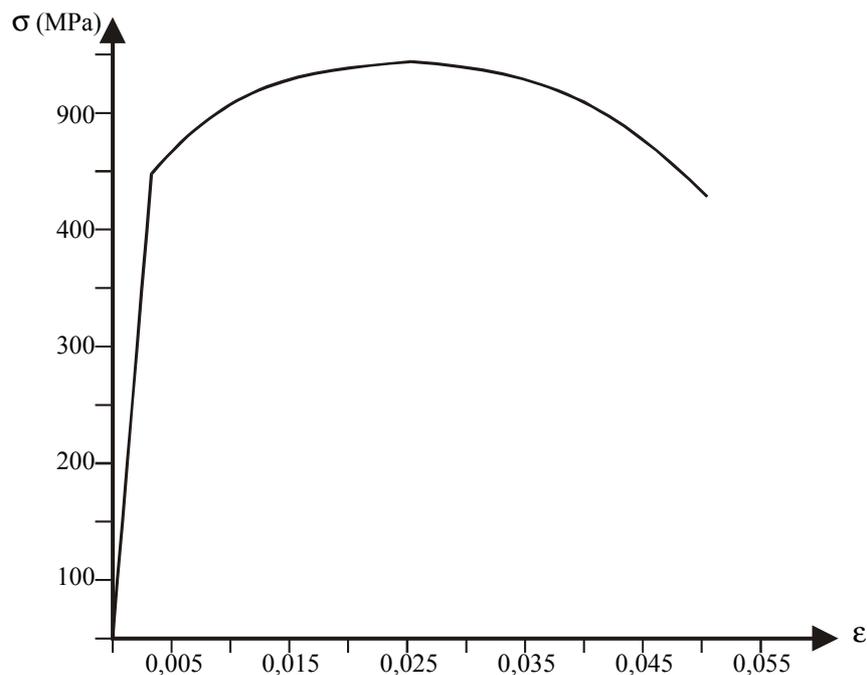


Fig. 9.2 Diagrama  $\sigma/\epsilon$  correspondiente a una probeta metálica ensayada a tracción.

A partir del gráfico de la figura 9.2, se pueden responder las preguntas siguientes:

- Calcular el valor del módulo elástico (E).
- Determinar el límite elástico convencional ( $\sigma_{0,2}$ ).
- Determinar el valor de la resistencia máxima a tracción ( $\sigma_m$ ).
- Determinar el valor de la tensión de fractura ( $\sigma_R$ ).
- Calcular el valor del alargamiento porcentual (A%) y de la máxima deformación elástica.
- Calcular el porcentaje de reducción de área (Z%), si el radio de la fractura mide 3 mm.

Soluciones:

- El módulo elástico (E) es la pendiente del tramo recto y se puede determinar entre el punto (0,0) y otro punto de la recta como, por ejemplo, el de abscisa  $x=0,004$  y ordenada  $y=700$  MPa. A partir de aquí, la pendiente de la recta se calcula como

$$E = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} = \frac{(700-0) \text{ MPa}}{(0,004-0)} = 175.000 \text{ MPa} \quad (9.1)$$

- Indicado en el gráfico de la figura 9.3 como el valor de tensión que se halla al trazar una paralela al tramo recto desde  $x = 0,002$  ( $\epsilon = 0,2\%$ ), y que es igual a  $\sigma_{0,2} = 850$  MPa (aprox.).

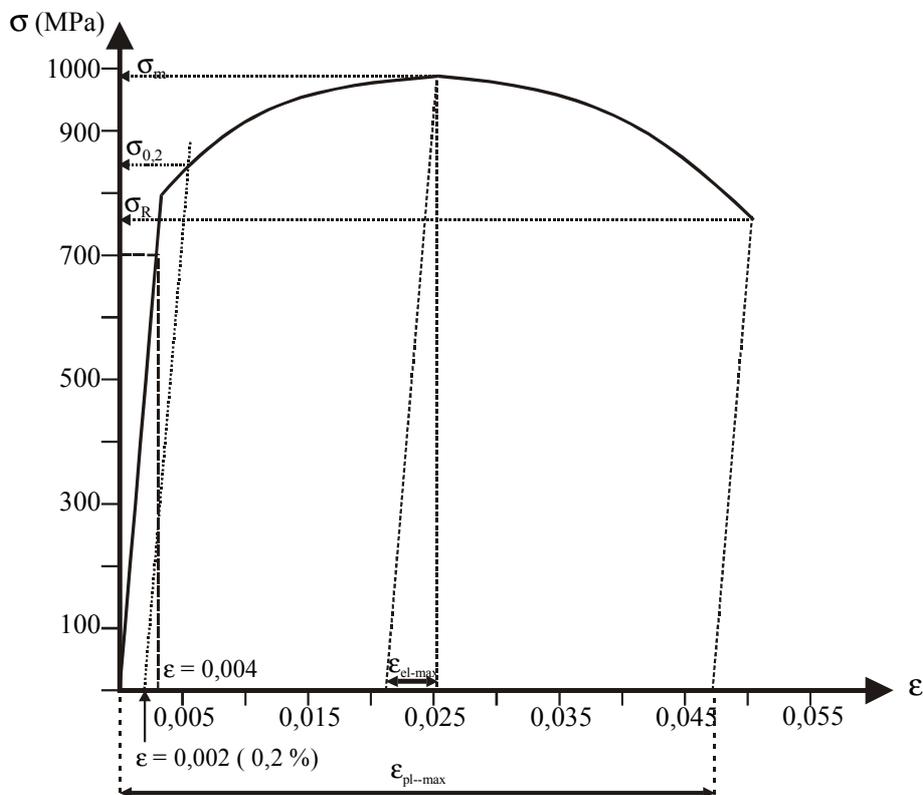


Fig. 9.3

- c) Indicado en el gráfico de la figura 9.3 como el valor de tensión en el punto máximo de la curva, que es igual a  $\sigma_{0,2} = 980 \text{ MPa}$  (aprox.).
- d) Indicado en el gráfico de la figura 9.3 como el valor de tensión en el punto final de la curva, que es igual a  $\sigma_R = 760 \text{ MPa}$  (aprox.).
- e) Partiendo de la definición de alargamiento porcentual, que se indicaba en la expresión 3.6, y utilizando el valor de  $\epsilon_{pl-max}$  (indicado en el gráfico de la figura 9.3), que es el valor de deformación obtenido al restar la deformación elástica a la deformación total en el punto final de la curva:

$$A\% = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 = \epsilon_{pl(max)} \times 100 = 0,0475 \times 100 = 4,75\% \quad (9.2)$$

La deformación elástica máxima ( $\epsilon_{el-max}$ ) se determina a partir del triángulo dibujado por la línea recta, paralela al eje de ordenadas, desde el punto máximo de la curva; por la línea recta paralela al tramo elástico desde el punto máximo, y por el tramo del eje de ordenadas entre las dos rectas anteriores (indicado en el gráfico de la figura 9.3).

- f) El valor de la reducción de área o estricción se determina a partir de la expresión 3.7, sustituyendo el área inicial y final de la probeta por los valores correspondientes, a saber,

$$S_0 = \pi \cdot r_0^2 = \pi \cdot 25 \text{ mm}^2 = 78,54 \text{ mm}^2$$

$$S_f = \pi \cdot r_f^2 = \pi \cdot 9 \text{ mm}^2 = 28,27 \text{ mm}^2$$

y se obtiene

$$Z\% = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \times 100 = \frac{78,54 \text{ mm}^2 - 28,27 \text{ mm}^2}{78,54 \text{ mm}^2} \times 100 = 64\% \quad (9.3)$$

## 9.2 Cuestiones sobre materiales compuestos laminados

A partir de los resultados que se habrán obtenido durante la realización de la práctica 8.3, será posible responder a las preguntas siguientes:

- a) ¿Qué podría suceder si se añadiese una cantidad muy pequeña (10 veces inferior a la requerida) de reactivos reticulantes?
- b) ¿Qué podría suceder si, por el contrario, se añadiese una cantidad muy superior (10 veces mayor de lo indicado) de dichos reactivos?

Soluciones:

- a) Si la cantidad de agente reticulante fuese tan pequeña, se podría dar el caso de que no se iniciase la polimerización y, por tanto, la resina no abandonaría su estado fluido. En caso de que fuera una cantidad pequeña, pero suficiente para iniciar la reacción, ésta sería muy lenta, y debería estudiarse la viabilidad del proceso.
- b) Con una cantidad excesiva de reactivos se producirá, por el contrario, una reacción muy rápida y muy exotérmica, alcanzándose picos de temperatura tan elevados que podría

*degradarse el material utilizado como refuerzo, o la resina, o el recipiente que contenga la mezcla resina+refuerzo. En el primer caso, se perdería el efecto reforzante de la segunda fase, con lo cual el producto final no cumpliría con los requisitos previstos y podría presentar una fractura prematura. En el segundo caso, se pueden producir situaciones más o menos graves, en función del grado de resistencia térmica de la resina, ya que, si durante la reticulación es común observar contracción de volumen del conjunto, una contracción súbita puede inducir fisuras en la matriz, por lo que el componente tampoco se adecuará a las prestaciones requeridas. Si es el continente el que se ve afectado por la excesiva temperatura del conjunto, se obtendrán componentes con dimensiones distintas a las diseñadas, y dado que la reacción de reticulación es irreversible, serán componentes que no se podrán recuperar de ninguna forma.*

### 9.3 Cuestiones sobre choque térmico de materiales cerámicos

A partir de los resultados que se habrán obtenido durante la realización de la práctica 8.4, será posible realizar el ejercicio siguiente:

- a) Representad el valor de  $\delta(T_i)$  con respecto a la temperatura ( $T$ ) y observad si el intervalo de temperaturas considerado se acerca a la temperatura de saturación, para la cual ya no se observa la formación de más fisuras aunque aumente la temperatura del proceso.
- b) Comprobad cuál es el tipo de curva resultante de la representación de los datos experimentales (comparándolos con los de la figura), e interpretad el resultado obtenido.

*Soluciones:*

- a) *Se puede encontrar una relación lineal de  $\delta(T_i)$  con la temperatura, o bien una relación no lineal, que revelase una tendencia asintótica para un determinado valor de temperatura.*
- b) *En el caso de que la relación entre  $\delta(T_i)$  y la temperatura de tratamiento ( $T$ ) sea lineal, el material no se halla próximo a las condiciones de saturación, de manera que la densidad de fisuras es mayor si la temperatura de calentamiento (previa al enfriamiento brusco) es también más elevada. Si, en cambio, la relación  $\delta(T_i)$ - $T$  revela una tendencia asintótica para un determinado valor de temperatura, se considerará que en esas condiciones de tratamiento el material se satura, es decir, que ya no se formará una mayor densidad de fisuras aunque se sometiese a enfriamientos bruscos desde temperaturas más elevadas.*

## 10 Anexos

### 10.1 Tablas de equivalencias de aleaciones metálicas según diferentes normas

En la tabla 10.1 se indica la composición de los aceros al carbono más comunes, en tanto por ciento en peso, y su denominación según las normas españolas (UNE), y en la tabla 10.2 se establecen las equivalencias entre las denominaciones correspondientes a las normas más utilizadas, indicando el país al cual pertenecen.

Tabla 10.1 Composición química de los aceros al carbono más comunes y denominación según normas UNE.

<b>Denominación UNE</b>	<b>C (% peso)</b>	<b>Mn (% peso)</b>	<b>Si (% peso)</b>
<b>F-1110</b>	0,15	0,60	0,25
<b>F-1120</b>	0,25	0,65	0,25
<b>F-1131</b>	0,32	0,70	0,25
<b>F-1130</b>	0,35	0,70	0,25
<b>F-1132</b>	0,38	0,70	0,25
<b>F-1140</b>	0,42	0,75	0,25
<b>F-1140</b>	0,45	0,70	0,25
<b>F-1142</b>	0,48	0,70	0,25
<b>F-1150</b>	0,55	0,70	0,25

Tabla 10.2 Equivalencias entre denominaciones de aceros al carbono según diferentes normas.

<b>UNE</b>	<b>DIN</b>	<b>Stand. N°</b>	<b>AFNOR</b>	<b>B.S.</b>	<b>AISI/SAE</b>	<b>JIS</b>
<b>España</b>	<b>Alemania</b>		<b>Francia</b>	<b>Gran Bretaña</b>	<b>EEUU</b>	<b>Japón</b>
<b>F-1110</b>	CK-15	1.1141	XC-15	080 A15	1015	S15C
<b>F-1120</b>	CK-25	1.1158	XC-25	070 M26	1025	S25C
<b>F-1131</b>	CK-30	1.1178	XC-32	080 A32	1030	S33C
<b>F-1130</b>	CK-35	1.1181	XC-35	080 A35	1035	S35C
<b>F-1132</b>			XC-38	080 A37	1038	S38C
<b>F-1140</b>			XC-42	080 A42	1042	S43C
<b>F-1140</b>	CK-45	1.1191	XC-45	080 M46	1045	S44C
<b>F-1142</b>			XC-48	070 A47	1049	S48C
<b>F-1150</b>	CK-55	1.1203	XC-54	070 M55	1055	S55C

En la tabla 10.3 se proporciona la composición química de algunos aceros aleados de uso común (tanto por ciento en peso), y en la tabla 10.4 se recogen las equivalencias entre los aceros indicados en la tabla 10.3 en función de la norma utilizada para su identificación.

Tabla 10.3 Composición química de los aceros aleados más comunes y denominación según normas UNE.

Denominación UNE	(% peso)					
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni
F-1515	0,22	1,50	0,25	-	-	-
F-1203	0,36	1,50	0,25	-	-	-
F-1200	0,38	0,70	0,25	0,50	-	-
F-1201	0,37	0,75	0,25	1,00	-	-
F-1202	0,41	0,75	0,25	1,05	-	-
F-222	0,25	0,75	0,25	1,00	0,20	-
F-1250	0,35	0,75	0,25	1,00	0,20	-
F-1252	0,42	0,75	0,25	1,05	0,20	-
F-123	0,32	0,60	0,25	0,70	-	3,00
F-122	0,30	0,60	0,25	1,15	-	4,20
F-1280	0,35	0,65	0,25	0,75	0,20	0,85
F-1262	0,32	0,60	0,25	0,70	0,40	2,75
F-1272	0,41	0,70	0,25	0,80	0,25	1,85
F-1270	0,34	0,50	0,25	1,55	0,40	4,00

Tabla 10.4 Equivalencias entre denominaciones de aceros aleados según diferentes normas.

UNE	DIN	Stand. N°	AFNOR	B.S.	AISI/SAE	JIS
España	Alemania		Francia	Gran Bretaña	EE UU	Japón
F-1515	20Mn5	1.1133	20M5	120M19	1024	SMn420
F-1203	36Mn5	1.1167	35M5	150M36	1036	SMn438
F-1200	38Cr2	1.7003	-	-	-	-
F-1201	37Cr4	1.7044	38C4	530A36	5135	SCr435
F-1202	41Cr4	1.7035	42C4	530M40	5140	SCr440
F-222	25CrMo4	1.7218	25CD4	708A25	-	SCM420
F-1250	34CrMo4	1.7220	34CD4	708A30	-	SCM435
F-1252	42CrMo4	1.7225	42CD4	708A37	4140	SCM440
F-123	31NiCr14	1.5755	30NC11	708M40	3435	SNC836
F-122	35NiCr18	1.5864	35NC15	-	-	-
F-1280	36CrNiMo4	1.6511	35NCD4	-	9840	-
F-1262	32NiCrMo12.5	1.6655	30NCD12	826M31	-	-
F-1272	40NiCrMo6	1.6565	-	817M40	4340	SNCM439
F-1270	35NiCrMo16	1.2766	39NCD16	835M30	-	-

A continuación se proporciona información referente a aceros inoxidable. Así, en la tabla 10.5 se recogen la composición química de aceros inoxidable (ferríticos, austeníticos, martensíticos y dúplex) y en la tabla 10.6 se indican las denominaciones y equivalencias de los mismos según distintas normas.

Tabla 10.5 Composición química de los aceros inoxidable más comunes (% en peso) y denominación según normas UNE.

Denominación UNE	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Otros
<b>Aceros inoxidable austeníticos</b>							
F-3517	0,15	2,00	1,00	17,00	7,00	-	-
F-3507	0,12	2,00	1,00	18,00	9,00	-	-
F-3508	0,15	2,00	1,00	18,00	9,00	opcional	S ≥ 0,15
F-3504	0,08	2,00	1,00	19,00	10,00	-	-
F-3503	0,03	2,00	1,00	19,00	10,00	-	-
-	0,03	1,70	0,50	18,25	9,75	-	-
F-3534	0,08	2,00	1,00	17,00	12,00	2,5	-
F-3533	0,03	2,00	1,00	17,00	12,00	2,5	-
-	0,08	2,00	1,00	18,00	13,00	2,3	S ≥ 0,10
F-3535	0,08	2,00	1,00	17,00	12,00	2,5	Ti ≥ 5xC
-	0,03	1,70	0,50	16,50	11,25	2,5	-
F-3523	0,08	2,00	1,00	18,00	10,50	-	Ti ≥ 5xC
F-3524	0,08	2,00	1,00	18,00	11,00	-	Cb+Ta ≥ 10xC
<b>Aceros inoxidable ferríticos</b>							
F-3113	0,12	1,00	1,00	17,00	-	-	-
F-3117	0,12	1,50	1,00	17,00	-	≤ 0,60	S ≥ 0,15
-	0,07	1,00	1,00	17,00	-		
<b>Aceros inoxidable martensíticos</b>							
F-3401	≥ 0,15	1,00	1,00	12,50	-	-	-
F-3411	≤ 0,15	1,50	1,00	13,00	-	≤ 0,60	S ≥ 0,15
F-3402	0,20	1,00	1,00	13,00	-	-	-
F-3403	0,30	1,00	1,00	13,00	-	-	-
F-3405	0,45	1,00	1,00	13,00	-	-	-
F-3423	0,45	1,00	1,00	14,50	-	0,53	V = 0,12
-	0,38	1,00	1,00	16,50	≤ 1,00	1,15	-
F-3427	0,48	1,00	1,00	16,50	≤ 1,00	1,15	-
-	0,17	1,00	1,00	16,50	2,25	-	-
F-3401	0,16	1,50	1,00	16,50	-	≤ 0,60	S ≥ 0,15
<b>Aceros inoxidable austenoferríticos (dúplex)</b>							
F-3309	0,10	2,00	1,00	27,00	4,50	1,80	

Tabla 10.6 Equivalencias entre denominaciones de aceros inoxidable según diferentes normas.

<i>UNE</i>	<i>DIN</i>	<i>Stand. N°</i>	<i>AFNOR</i>	<i>B.S.</i>	<i>AISI/SAE</i>	<i>JIS</i>
<i>España</i>	<i>Alemania</i>		<i>Francia</i>	<i>Gran Bretaña</i>	<i>EE UU</i>	<i>Japón</i>
<b><i>Aceros inoxidables austeníticos</i></b>						
<i>F-3517</i>	X12CrNi17 7	1.4310	Z11CN1808	301S21	301	SUS301
<i>F-3507</i>	X12CrNi18 8	1.4300	-	302S31	302	SUS302
<i>F-3508</i>	X10CrNiS18 9	1.4305	-	303S31	303	SUS303
<i>F-3504</i>	X5CrNi18 10	1.4301	Z3CN1809	304S15	304	SUS304
<i>F-3503</i>	X2CrNi19 11	1.4306	Z3CN1810	304S11	304L	SUS304L
-	X2CrNiN18 10	1.4311	Z3CND1810Az	304S62	304LN	SUS304LN
<i>F-3534</i>	X5CrNiMo17 12 2	1.4401	Z7CMD171102	316S31	316	SUS316
<i>F-3533</i>	X2CrNiMo17 13 2	1.4404	Z3CND171102	316S11	316L	SUS316L
-	-	-	-	-	316F	-
<i>F-3535</i>	X6CrNiMoTi17 12 2	1.4571	Z6CNDT1712	320S31	316Ti	-
-	X2CrNiMoN17 12 2	1.4406	Z3CND1711Az	316S61	316LN	SUS316LN
<i>F-3523</i>	X6CrNiTi18 10	1.4541	Z6CNT1810	321S31	321	SUS321
<i>F-3524</i>	X6CrNiNb18 10	1.4550	C6CNNb1810	347S31	347	SUS347
<b><i>Aceros inoxidables ferríticos</i></b>						
<i>F-3113</i>	X6Cr17	1.4016	Z8C17	430S17	430	SUS430
<i>F-3117</i>	X4CrMoS18	1.4105	Z10CF17	-	430F	SUS430F
--	X6CrMo17	1.4113	Z8CD17.01	434S17	434	SUS434
<b><i>Aceros inoxidables martensíticos</i></b>						
<i>F-3401</i>	X10Cr13	1.4006	Z12C13	410S21	410	SUS410
<i>F-3411</i>	X12CrS13	1.4005	Z12CF13	16S21	416	SUS416
<i>F-3402</i>	X20Cr13	1.4021	Z20C13	420S29	420	SUS420J1
<i>F-3403</i>	X30Cr13	1.4028	Z30C13	420S45	420	SUS420J2
<i>F-3405</i>	X46Cr13	1.4034	Z40C14	-	-	-
<i>F-3423</i>	X45CrMoV15	1.4116	-	-	-	-
-	X35CrMo17	1.4122	-	-	-	-
<i>F-3427</i>	X20CrNi17 2	1.4057	Z15CN16.02	431S29	431	SUS431
-	X12CrMoS17	1.4104	-	-	-	-
<b><i>Aceros inoxidables austenoferríticos (dúplex)</i></b>						
<i>F-3309</i>	X8CrNiMo27 5	1.4460	-	-	329	SUS329J1

En la tabla 10.7 se indican algunas de las aleaciones de cobre más importantes, así como la denominación que se les asigna en función de sus características más destacadas y su composición química (porcentajes en peso).

Tabla 10.7 Principales aleaciones de cobre, denominación según sus aplicaciones y composición química de todas ellas.

<b>Denominación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Composición química (%)</b>				
		<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Sn</b>	<b>Pb</b>	<b>P</b>
<b>C11000</b>	E.T.P. (alta conductibilidad eléctrica)	99,90	-			0,0050
<b>C12000</b>	D.L.P. (desoxidado - bajo fósforo)	99,90	-			0,004/0,012
<b>C12200</b>	D.H.P. (desoxidado - alto fósforo)	99,85	-		1,50	0,015/0,040
<b>C21000</b>	Cutal (cobre mecanizable)	98,50	-			
<b>C18700</b>	Gilding	95,00	5,00			
<b>C22000</b>	Símil-oro	90,00	10,00			
<b>C23000</b>	Símil-oro	85,00	15,00			
<b>C24000</b>	Tombac	80,00	20,00			
<b>C26000</b>	Latón cartuchería	70,00	30,00			
<b>C26800</b>	Latón amarillo	65,00	35,00			
<b>C27000</b>	Latón amarillo	63,00	37,00		1,00	
<b>C35000</b>	Latón tipo yale	58,00	41,00		2,00	
<b>C36000</b>	Latón mecanizable	58,00	40,00		2,00	
<b>C37700</b>	Latón para forja	59,00	39,00			
<b>C51000</b>	Bronce fosforoso	95,95	-	4,00		
	Alpaca al 12 % níquel	65,00	23,00			
<b>C75200</b>	Alpaca al 18 % níquel	65,00	17,00			

En la tabla 10.8 se indican las aleaciones de aluminio más utilizadas, así como sus características más relevantes y las características más destacadas. Las aleaciones de aluminio son susceptibles de ser tratadas térmicamente, y un código alfanumérico indica el estado de las mismas, según se indica en la tabla 10.9.

Tabla 10.8 Características y aplicaciones de las principales aleaciones de aluminio.

<i>Aleación</i>	<i>Características</i>	<i>Aplicaciones</i>
<b>1050</b>	Buena soldabilidad Buena conductividad eléctrica y térmica Muy buena calidad de anodizado	Es la clásica chapa de arquitectura y carpintería
<b>1200</b>	Resistencia a la corrosión	Envases para la industria de la alimentación y cervecera Utensilios domésticos
<b>2014</b> <b>2017</b> <b>2024</b>	Elevada resistencia mecánica Viruta muy fragmentada	Elementos estructurales en aviación y construcción Material de defensa-aeronáutica
<b>3003</b>	Elevada resistencia a la corrosión Muy buen comportamiento a bajas temperaturas	Importantes aplicaciones en laminación Indicada para embutición y extrusión en frío
<b>5083</b> <b>5754</b>	Resistencia a la corrosión en ambientes marino e industrial Mejor resistencia que el aluminio puro en ambientes marinos.	Construcción de estructuras de barcos, vagones de ferrocarril, condensadores de calor, frigoríficos industriales, recipientes para líquidos
<b>6005</b>	Excelente respuesta mecánica	Perfiles de secciones complejas para autobuses, vagones de tren y para la industria del automóvil Aplicación en secciones extruídas en que se requieren características elevadas
<b>6060</b> <b>6063</b>	Gran facilidad de extrusión Buen coloreado por anodizado Buena presencia decorativa	Es la aleación empleada en la carpintería de aluminio
<b>6082</b>	Buena forjabilidad Características mecánicas medias	Utilizada para perfiles estructurales y maquinaria industrial
<b>7075</b>	Aleaciones con las características mecánicas y fisicoquímicas más elevadas	Se emplea en armamento y en la industria del automóvil, compitiendo con el acero

Tabla 10.9 Estados térmicos y mecánicos básicos de las aleaciones de aluminio.

<i>Estado básico</i>		<i>Tratamiento térmico</i>	
<b>F,M</b>	Bruto de fabricación	<b>T1</b>	Enfriada después de deformación en caliente con maduración natural
<b>O</b>	Recocido, recristalizado	<b>T3</b>	Puesta en solución, endurecimiento por deformación en frío y maduración natural
<b>H1</b>	Endurecido por acritud	<b>T4</b>	Puesta en solución, temple y maduración natural
<b>H2</b>	Endurecido por acritud y recocido parcial posterior	<b>T5</b>	Enfriamiento después de transformación en caliente y maduración artificial
<b>H3</b>	Endurecido por acritud y estabilizado	<b>T6</b>	Puesta en solución, temple y maduración artificial
<b>H111</b>	Recocido y aplanado	<b>T8</b>	Puesta en solución, endurecimiento posterior por deformación en frío y maduración artificial

## 10.2 Descripción de los principales tratamientos térmicos de los aceros

Si bien en el apartado 4.2 se han introducido los tratamientos térmicos, se ha considerado adecuado realizar una descripción más detallada de los principales tratamientos que se aplican a los aceros de uso común, dando en cada caso valores de temperatura aproximados e indicaciones acerca de la microestructura que proporcionarían para los aceros al carbono a los que se apliquen.

### 10.2.1 Tratamientos térmicos másicos

- **RECOCIDO:** Tratamiento que permite la transformación total de la austenita en los constituyentes estables a temperatura ambiente, según el diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C (ferrita, perlita y cementita). Se realiza calentando el acero por encima de su temperatura de austenización ( $T_c$ ) y realizando a continuación un enfriamiento lo bastante lento para permitir la transformación completa de la austenita.
- **RECOCIDO DE ESTABILIZACIÓN:** Tratamiento que consiste en someter el acero a la temperatura más elevada posible, sin que llegue a quemarse (del orden de 200 °C por encima de  $T_c$ ) durante un período amplio de tiempo. Se enfría muy lentamente, lo que permite relajar las tensiones que pudieran haberse acumulado en el material, aunque se favorecen las microestructuras groseras, que pueden afinarse mediante un recocido de regeneración.
- **NORMALIZADO:** Consiste en un calentamiento de hasta 60 °C por encima de  $T_c$ , seguido de un enfriamiento al aire. Se consigue un afino notable del tamaño de grano y las características del acero son intermedias entre las de recocido y las de temple. Puede realizarse como tratamiento térmico previo a un temple, ya que el tamaño de grano fino favorece la templabilidad, o como tratamiento térmico por sí solo.
- **RECOCIDO DE REGENERACIÓN:** Se realiza calentando el acero a una temperatura del orden de 25 °C por encima de la  $T_c$ , seguido de un enfriamiento muy lento. Proporciona microestructuras finas, lo cual incrementa ligeramente la dureza en aceros blandos.
- **RECOCIDO GLOBULAR:** Este tipo de tratamientos se realiza en aceros bajos en carbono, mediante un calentamiento ligeramente por debajo de  $T_c$ , que se prolonga durante largo tiempo y se finaliza con un enfriamiento lento. Si los aceros son altos en carbono o tienen carburos, la temperatura no es constante y oscila entre valores por encima y por debajo de  $T_c$ . Se consigue una precipitación globular de los carburos, por lo que el material presenta una dureza notablemente inferior con la máxima maquinabilidad.
- **RECOCIDO CONTRA ACRIDUD:** Tratamiento que implica un calentamiento hasta la temperatura de recristalización ( $T_R$ ) de la ferrita (del orden de 300 °C por debajo de  $T_c$  para aceros bajos en carbono), seguido de un enfriamiento lento, que elimina las tensiones generadas por el trabajo en frío (acritud). Para contenidos mayores en carbono la temperatura de calentamiento es superior a  $T_c$ .
- **TEMPLE:** Este grupo de tratamientos térmicos se caracteriza porque proporciona constituyentes duros y estables a temperatura ambiente, como martensita, sorbita, troostita y bainita. Para su realización, es preciso calentar el acero hasta 50 °C por encima de  $T_c$  y, tras haber permanecido un tiempo suficiente, se enfría rápidamente. Si la velocidad de enfriamiento es superior a la velocidad crítica de temple, se obtiene una microestructura totalmente martensítica, mientras que una velocidad inferior a la velocidad crítica de temple conduce a microestructuras mixtas de martensita y otros constituyentes.

- **REVENIDO:** Tratamiento que permite reducir la dureza excesiva de un acero que ha sido templado, aumentando su ductilidad y su tenacidad al destruir tensiones originadas por el temple. Si la temperatura de revenido es inferior a 200 °C, sólo se eliminan tensiones internas, pero entre 200 y 400 °C existe una zona de fragilidad de revenido que reduce la resistencia del acero. Por encima de 400 °C, hasta los 700 °C, se halla la región de temperaturas que suele utilizarse y en este rango se observa que, cuanto más elevada es la temperatura, se favorecen valores de ductilidad y tenacidad mayores, a la vez que disminuyen el límite elástico y la dureza.
- **BONIFICADO:** Se denomina así al conjunto constituido por un tratamiento de temple más un revenido posterior.

### 10.2.2 Tratamientos isotérmicos

En estos tratamientos, la transformación de austenita en el componente final se produce a una temperatura constante, a diferencia de lo que ocurría en los tratamientos del apartado anterior, en los que la transformación se producía en un intervalo de temperatura.

- **RECOCIDO ISOTÉRMICO:** Tratamiento que consiste en un calentamiento hasta una temperatura 25 °C por encima de  $T_c$  seguida de un enfriamiento rápido hasta la temperatura de la región de transformación de la austenita en perlita. En este punto, se mantiene el acero durante el tiempo suficiente para garantizar una transformación completa de la austenita y se enfría al aire. La microestructura final está constituida por perlita homogénea, pero el tiempo requerido es menor que el correspondiente a un tratamiento másico de recocido.
- **AUSTEMPERING:** En este tipo de tratamientos, el acero se calienta hasta 50 °C por encima de  $T_c$  y se enfría bruscamente hasta la zona de bainita inferior (300 °C), manteniéndolo durante el tiempo suficiente para que se produzca la transformación total. Las características finales que proporciona este tratamiento son similares a las que produciría un temple seguido de un revenido, pero sin que exista riesgo de que la acumulación de tensiones internas pueda producir deformaciones o fisuras en el componente.
- **MARTEMPERING:** Es un tratamiento similar al anterior, pero en el que la zona isotérmica se localiza a temperaturas inferiores, inmediatamente por encima de la región martensítica, de manera que se pueda mantener el acero a la temperatura considerada, pero sin que se inicie la transformación bainítica. Un enfriamiento al aire desde este punto induce la transformación a martensita, análoga a la del temple clásico, pero con menor riesgo de grietas y acumulación de tensiones internas.

### 10.2.3 Tratamientos termoquímicos

Estos tratamientos se engloban dentro de los tratamientos superficiales y, a diferencia de los tratamientos descritos en los apartados anteriores, acompañan la transformación microestructural de una modificación en la composición química, ya que se incrementa el contenido en determinados elementos, generalmente carbono y/o nitrógeno.

- **CEMENTACIÓN:** Tratamiento por el cual se produce un aumento del contenido de carbono en la zona periférica del componente tratado, lo que permite alcanzar valores de dureza mucho mayores en esa región cuando, tras la difusión del carbono, se realiza un temple convencional y un revenido posterior.

- **NITRURACIÓN:** En este grupo de tratamientos es el nitrógeno el elemento que se introduce en la región superficial del componente, produce un endurecimiento muy superior al que proporciona el carbono, y genera capas extraordinariamente resistentes al desgaste por la formación de nitruros de hierro y de otros elementos de aleación presentes en el acero. Se realizan calentando los componentes a temperaturas de entre 500 y 570 °C, sobre piezas ya templadas y revenidas, en una atmósfera nitrurante. No se hace ningún tratamiento posterior.
- **CARBONITRURACIÓN:** Este tipo de tratamientos termoquímicos proporciona niveles considerables de endurecimiento superficial, con lo que la resistencia al desgaste también se incrementa, por adición de carbono y nitrógeno simultáneamente.

### 10.3 Tablas de tratamientos térmicos para aceros de uso común

En la tabla 10.10 se indican las condiciones de temperatura y de enfriamiento requeridas para los tratamientos másicos más comunes de los aceros del grupo F-110 (aceros al carbono). Estos aceros se utilizan para componentes en los que las prestaciones requeridas son moderadas.

En estado de recocido presentan valores de ductilidad (A%) comprendidos entre un 20 y un 30 % y su resistencia a tracción ( $\sigma_m$ ) se halla entre 400 y 600 MPa, pudiendo aumentar hasta 450 – 750 MPa tras un tratamiento de normalizado.

Tabla 10.10 Condiciones de temperatura y enfriamiento requeridas para tratamientos másicos en aceros al carbono.

Denominación		Elementos de aleación	Tratamiento	Temperatura (°C)	Enfriamiento
<b>F-111</b>	acero extrasuave	C 0,10-0,20 Mn 0,30-0,50 Si 0,15-0,30	RECOCIDO CEMENTACIÓN	900-940 875-925	aire agua o aceite
<b>F-112</b>	acero suave	C 0,20-0,30 Mn 0,40-0,70 Si 0,15-0,30	NORMALIZADO CEMENTACIÓN	875-925 850-900	aire aire
<b>F-113</b>	acero semisuave	C 0,30-0,40 Mn 0,40-0,70 Si 0,15-0,30	NORMALIZADO RECOCIDO TEMPLE REVENIDO TENAZ REVENIDO DURO	875-900 850-875 845-870 650 450	aire horno agua + sales aire aire
<b>F-114</b>	acero semiduro	C 0,40-0,50 Mn 0,40-0,70 Si 0,15-0,30	NORMALIZADO RECOCIDO TEMPLE REVENIDO TENAZ REVENIDO DURO	860-880 835-855 825-845 650 450	aire horno agua + sales aire aire
<b>F-115</b>	acero duro	C 0,50-0,60 Mn 0,40-0,70 Si 0,15-0,30	NORMALIZADO RECOCIDO TEMPLE REVENIDO TENAZ REVENIDO DURO	850-870 815-840 805-825 650 450	aire horno agua o aceite aire aire

Los aceros F-114 y F-115 no son soldables y su templabilidad es baja, por lo que sólo pueden templarse componentes de diámetro reducido.

En la tabla 10.11 se indican las condiciones de temperatura y de enfriamiento requeridas para los tratamientos másicos más comunes de los aceros del grupo F-120 y F-130 (aceros aleados de gran resistencia). Estos aceros son adecuados para la elaboración de componentes que requieran de gran resistencia mecánica y suelen utilizarse en estado de temple y revenido. El acero F-131 es el más habitual para la fabricación de bolas y cojinetes.

Tabla 10.11 Condiciones de temperatura y enfriamiento requeridas para tratamientos másicos en aceros aleados de gran resistencia.

Denominación		Elementos de aleación	Tratamiento	Temperatura (°C)	Enfriamiento
<b>F-121</b>	acero al níquel	C 0,25-0,35 Mn 0,40-0,70 Si 0,10-0,35 Ni 2,50-3,50	NORMALIZADO	890	aire
			RECOCIDO	875	horno
			TEMPLE	830-860	agua o aceite
			REVENIDO TENAZ	650	aire
			REVENIDO DURO	550	aire
<b>F-122</b>	acero al cromo-níquel duro	C 0,25-0,35 Mn 0,40-0,70 Cr 1,00-1,50 Ni 4,00-4,50	RECOCIDO	850	horno
			TEMPLE	810	aceite
			TEMPLE	830	aire
			REVENIDO TENAZ	650	agua
			REVENIDO DURO	550	agua
<b>F-123</b>	acero al cromo-níquel tenaz	C 0,25-0,35 Mn 0,40-0,70 Cr 0,50-0,80 Ni 2,75-3,25	RECOCIDO	860	horno
			TEMPLE	820-850	aceite
			REVENIDO TENAZ	650	agua
			REVENIDO DURO	550	agua
<b>F-124</b>	acero al cromo-molibdeno duro	C 0,30-0,40 Mn 0,40-0,70 Cr 2,50-3,50 Mo 0,40-0,60	NORMALIZADO	880-900	aire
			RECOCIDO	840-860	horno
			TEMPLE	850-900	aceite
			REVENIDO TENAZ	650	aire
			REVENIDO DURO	550	aire
			NITRURACIÓN	560-570	aire
<b>F-125</b>	acero al cromo-molibdeno tenaz	C 0,30-0,40 Mn 0,40-0,70 Cr 0,90-1,50 Ni 0,20-0,40	NORMALIZADO	870-890	aire
			RECOCIDO	840-860	horno
			TEMPLE	870-890	aceite
			REVENIDO TENAZ	650	aire
			REVENIDO DURO	500	aire
<b>F-126</b>	acero al Cr-Ni-Mo duro	C 0,25-0,35 Mn 0,40-0,70 Cr 1,00-1,50 Ni 4,00-4,50 Mo 0,20-0,60	RECOCIDO	850	horno
			TEMPLE	810	aceite
			TEMPLE	830	aire
			REVENIDO TENAZ	670	aire
			REVENIDO DURO	500	aire
<b>F-127</b>	acero al Cr-Ni-Mo tenaz	C 0,25-0,35 Mn 0,40-0,70 Cr 1,00-1,50 Ni 4,00-4,50 Mo 0,20-0,60	RECOCIDO	860	horno
			TEMPLE	820-850	aceite
			REVENIDO TENAZ	660	aire
			REVENIDO DURO	500	aire
<b>F-128</b>	acero de baja aleación, duro	C 0,35-0,45 Mn 0,40-0,80 Cr 0,90-1,40 Ni 1,20-1,60 Mo 0,10-0,30	NORMALIZADO	840-860	aire
			RECOCIDO	790-810	horno
			TEMPLE	820-840	aceite
			REVENIDO TENAZ	650	aire
			REVENIDO DURO	500	aire

Tabla 10.11 (Continuación).

Denominación		Elementos de aleación	Tratamiento	Temperatura (°C)	Enfriamiento
F-129	acero tenaz de baja aleación	C 0,35-0,45	NORMALIZADO	850-870	aire
		Mn 1,20-1,50	RECOCIDO	810-830	horno
		Cr 0,30-0,60	TEMPLE	830-860	aceite
		Ni 0,50-1,00	REVENIDO TENAZ	650	aire
		Mo 0,10-0,30	REVENIDO DURO	500	aire
F-131	acero al cromo-vanadio para cojinetes y bolas	C 0,95-1,20	RECOCIDO	820	horno
		Mn 0,20-0,40	TEMPLE	850	aceite
		Cr 1,40-1,80	REVENIDO	150-300	aire
		V 0,20-0,30			
F-132	acero al cromo-níquel autotemplable	C 0,30-0,40	RECOCIDO	810	horno
		Mn 0,40-0,70	TEMPLE	800	aceite
		Cr 1,00-1,50	TEMPLE	820	aire
		Ni 4,00-4,50	REVENIDO TENAZ	650	agua
			REVENIDO DURO	550	agua
F-133	acero al cromo-níquel-molibdeno autotemplable	C 0,30-0,40	RECOCIDO	825	horno
		Mn 0,40-0,70	TEMPLE	830	aceite
		Cr 1,00-1,50	TEMPLE	850	aire
		Ni 4,00-4,50	REVENIDO TENAZ	650	aire
		Mo 0,20-0,40	REVENIDO DURO	500	aire

La tabla 10.12 recoge las condiciones de tratamientos máxicos más comunes en aceros F-140 (aceros de gran elasticidad), que poseen valores de  $\sigma_{0,2} > 1.800$  MPa, adecuados para la fabricación de muelles y resortes, flejes, etcétera. Su templabilidad es baja, pudiendo sufrir descarburación superficial.

Tabla 10.12 Condiciones de temperatura y enfriamiento requeridas para tratamientos máxicos en aceros de gran elasticidad.

Denominación		Elementos de aleación	Tratamiento	Temperatura (°C)	Enfriamiento
F-141	acero al carbono de temple en aceite para muelles	C 0,60-0,80	NORMALIZADO	810	aire
		Mn 0,30-0,60	RECOCIDO	780	horno
		Si 0,10-0,35	TEMPLE	815-825	aceite
			REVENIDO	350-550	aire
F-142	acero al carbono de temple en agua para muelles	C 0,40-0,60	NORMALIZADO	830	aire
		Mn 0,50-1,00	RECOCIDO	800	horno
		Si 0,10-0,35	TEMPLE	800-820	agua
			REVENIDO	350-550	aire
F-143	acero al cromo-vanadio para muelles	C 0,45-0,55	NORMALIZADO	860	aire
		Mn 0,50-0,70	RECOCIDO	830	horno
		Cr 0,80-1,10	TEMPLE	850-900	aceite
		V 0,15-0,25	REVENIDO	350-550	aire
F-144	acero al manganeso-silicio para muelles	C 0,50-0,60	NORMALIZADO	850	aire
		Mn 0,70-1,00	RECOCIDO	820	horno
		Si 1,50-2,00	TEMPLE	850-900	aceite
			REVENIDO	350-550	aire
F-145	acero al manganeso-silicio de temple en agua para muelles	C 0,45-0,55	NORMALIZADO	875	aire
		Mn 0,60-0,90	RECOCIDO	850	horno
		Si 1,50-2,00	TEMPLE	875-900	agua
			REVENIDO	350-550	aire

En la tabla 10.13 se detallan las condiciones de tratamientos máxicos y superficiales (cementaciones) habituales en aceros F-150 y F-160 (aceros de cementación), que se caracterizan por sus bajos niveles de carbono y se utilizan para la elaboración de componentes que han de estar sometidos a rozamiento intenso (engranajes, rodillos, levas, ejes, etc.) a la vez que poseen valores aceptables de tenacidad.

Tabla 10.13 Condiciones de temperatura y enfriamiento requeridas para tratamientos máxicos y superficiales en aceros de cementación.

<i>Denominación</i>		<i>Elementos de aleación</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Enfriamiento</i>
<i>F-151</i>	acero de cementación al carbono	C 0,08-0,12 Mn 0,30-0,40 Si 0,15-0,35	RECOCIDO CEMENTACIÓN	890-900 900-950	horno aire
<i>F-152</i>	acero de cementación al níquel	C 0,10-0,15 Mn 0,30-0,60 Si 0,10-0,35 Ni 3,00-3,50	TEMPLE TEMPLE REVENIDO RECOCIDO CEMENTACIÓN REVENIDO TENAZ REVENIDO DURO	880-910 740-770 150-200 860-890 880-930 650 550	agua agua aire horno aire aire aire
<i>F-153</i>	acero de cementación al cromo-níquel	C 0,10-0,15 Mn 0,30-0,60 Si 0,10-0,35 Cr 0,90-1,10 Ni 3,80-4,50	RECOCIDO CEMENTACIÓN TEMPLE TEMPLE REVENIDO	820-840 880-930 800-830 760-780 150-200	horno aire aceite aceite aire
<i>F-154</i>	acero de cementación al cromo-níquel tenaz	C 0,10-0,15 Mn 0,30-0,60 Si 0,10-0,35 Cr 0,50-0,90 Ni 2,25-3,00	RECOCIDO CEMENTACIÓN TEMPLE TEMPLE REVENIDO	830-860 850-900 815-850 760-780 150-200	horno aire aceite aceite aire
<i>F-155</i>	acero de cementación al cromo-molibdeno	C 0,12-0,15 Mn 0,30-0,60 Si 0,10-0,35 Cr 1,00-1,30 Mo 0,15-0,25	RECOCIDO CEMENTACIÓN TEMPLE TEMPLE REVENIDO	890-910 890-940 870-900 780-810 150-200	horno aire aceite aceite aire
<i>F-156</i>	acero de cementación al cromo-níquel-molibdeno duro	C 0,12-0,18 Mn 0,50 Si 0,10-0,35 Cr 0,90-1,10 Ni 3,80-4,50 Mo 0,15-0,35	RECOCIDO CEMENTACIÓN TEMPLE TEMPLE REVENIDO	840-875 880-930 830-860 750-770 150-200	horno aire aceite aceite aire
<i>F-157</i>	acero de cementación al cromo-níquel-molibdeno	C 0,12-0,18 Mn 0,50 Si 0,10-0,35 Cr 0,50-0,80 Ni 2,50-3,50 Mo 0,25-0,36	RECOCIDO CEMENTACIÓN TEMPLE TEMPLE REVENIDO	840-875 880-930 830-860 760-780 150-200	horno aire aceite aceite aire
<i>F-158</i>	acero de baja aleación duro	C 0,15-0,20 Mn 0,40-0,70 Si 0,10-0,35 Cr 1,80-2,20 Ni 1,80-2,20 Mo 0,15-0,25	RECOCIDO CEMENTACIÓN TEMPLE TEMPLE REVENIDO	860-890 880-930 840-980 780-810 150-200	horno aire aceite aceite aire

Tabla 10.13 (Continuación).

<b>Denominación</b>		<b>Elementos de aleación</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Enfriamiento</b>
<b>F-159</b>	acero para cementación de baja aleación tenaz	C 0,15-0,20	RECOCIDO	860-890	horno
		Mn 0,40-0,70	CEMENTACIÓN	880-930	aire
		Si 0,10-0,35	TEMPLE	850-880	aceite
		Cr 0,40-0,60	TEMPLE	750-790	aceite
		Ni 1,50-2,00	REVENIDO	150-200	aire
		Mo 0,15-0,25			
<b>F-161</b>	acero III	C 0,15-0,20	RECOCIDO	860-880	horno
		Mn 0,80-1,20	CEMENTACIÓN	880-930	aire
		Si 0,10-0,35	TEMPLE	840-870	aceite
		Cr 0,80-1,20	TEMPLE	760-780	aceite
		Ni 0,80-1,20	REVENIDO	150-200	aire
		Mo 0,10-0,20			
<b>F-162</b>	acero II	C 0,12-0,16	RECOCIDO	860-890	horno
		Mn 0,55-0,85	CEMENTACIÓN	880-900	aire
		Si 0,10-0,35	TEMPLE	850-880	aceite
		Cr 0,80-1,20	TEMPLE	760-780	aceite
		Ni 0,80-1,20	REVENIDO	150-200	aire
		Mo 0,10-0,20			

En la tabla 10.14 se han recogido las condiciones de tratamientos máscicos y superficiales (nitruraciones) comunes en aceros F-170 (aceros para nitruración).

Tabla 10.14 Condiciones de tratamientos térmicos máscicos y superficiales en aceros para nitruración.

<b>Denominación</b>		<b>Elementos de aleación</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Enfriamiento</b>
<b>F-171</b>	acero para nitruración al cromo-molibdeno-vanadio de alta resistencia	C 0,30-0,35	RECOCIDO	890-900	horno
		Mn 0,65	TEMPLE	890-910	aceite
		Si 0,10-0,35	REVENIDO	600-625	aire
		Cr 3,00-3,50	NITRURACIÓN	560-570	aire
		Mo 0,30-0,50			
		V 0,20-0,25			
<b>F-172</b>	acero para nitruración al cromo-molibdeno-vanadio de resistencia media	C 0,20-0,28	RECOCIDO	910-920	horno
		Mn 0,65	TEMPLE	900-910	aceite
		Si 0,10-0,35	REVENIDO	600-685	aire
		Cr 3,00-3,50	NITRURACIÓN	560-570	aire
		Mo 0,30-0,50			
		V 0,20-0,25			
<b>F-173</b>	acero para cementación al cromo-molibdeno-vanadio de baja resistencia	C 0,18-0,22	RECOCIDO	910-920	horno
		Mn 0,65	TEMPLE	900-910	aceite
		Si 0,10-0,35	REVENIDO	600-625	aire
		Cr 2,75-3,00	NITRURACIÓN	560-570	aire
		Mo 0,30-0,50			
		V 0,20-0,25			
<b>F-174</b>	acero para cementación al cromo-aluminio-molibdeno de alta dureza	C 0,35-0,45	RECOCIDO	900-910	horno
		Mn 0,65	TEMPLE	890-900	aceite
		Si 0,10-0,35	REVENIDO	600-625	aire
		Cr 1,40-1,60	NITRURACIÓN	560-570	aire
		Mo 0,15-0,30			
		Al 0,90-1,20			

Es preciso que, antes de la nitruración, el componente haya sido normalizado (temple+revenido) y mecanizado hasta las dimensiones finales, ya que la nitruración no modificará el tamaño del componente, pero proporcionará capas excepcionalmente duras. Los componentes así tratados muestran una dureza superficial tan elevada como lo es su resistencia al desgaste y a la corrosión.

La tabla 10.15 recoge las condiciones de tratamientos máxicos habituales en aceros de fácil mecanización (F-200). Estos materiales permiten trabajar a velocidades de corte muy elevadas, siempre y cuando la dureza no supere los 200 HB. El contenido en plomo de los aceros F-212 proporciona una fina dispersión de este elemento en el metal, que favorece el arranque de viruta durante los procesos de mecanizado.

Tabla 10.15 Condiciones de temperatura y tiempo para tratamientos máxicos en aceros de fácil mecanización.

Denominación		Elementos de aleación	Tratamiento	Temperatura (°C)	Enfriamiento
<b>F-211</b>	acero de fácil mecanización al azufre	C 0,15-0,25 Mn 0,60-1,20 Si 0,10 S 0,20-0,30	NORMALIZADO RECOCIDO	875-915 860-890	aire aire
<b>F-212</b>	acero de fácil mecanización al plomo	C 0,10-0,30 Mn 0,75-1,50 Si 0,10-0,30 S 0,10-0,20 Pb 0,10-0,30	NORMALIZADO RECOCIDO	875-915 860-890	aire aire

Los aceros F-220 (aceros de fácil soldadura), como su nombre indica, pueden unirse fácilmente por soldadura y, además, sus uniones pueden soportar grandes niveles de esfuerzo a fatiga. En la tabla 10.16 se recogen las condiciones de tratamiento térmico más comunes para estos materiales.

Tabla 10.16 Condiciones de temperatura y tiempo para tratamientos máxicos en aceros de fácil soldadura.

Denominación		Elementos de aleación	Tratamiento	Temperatura (°C)	Enfriamiento
<b>F-221</b>	acero al carbono para piezas soldadas	C 0,15-0,25 Mn 0,40-0,70 Si 0,15-0,30	NORMALIZADO RECOCIDO	900-925 875-900	aire aire
<b>F-222</b>	acero de fácil soldadura al cromo-molibdeno	C 0,25-0,30 Mn 0,40-0,70 Si 0,15-0,30 Cr 0,80-1,10 Mo 0,15-0,25 Al 0,90-1,20	NORMALIZADO RECOCIDO TEMPLE REVENIDO TENAZ REVENIDO DURO	900-950 890-925 880-900 650 500	aire horno aceite aire aire
<b>F-223</b>	acero soldable al cromo-vanadio	C 0,25-0,30 Mn 0,40-0,60 Si 0,15-0,30 Cr 0,80-1,10 V 0,15-0,20	NORMALIZADO RECOCIDO TEMPLE REVENIDO TENAZ REVENIDO DURO	900-925 870-890 880-910 650 500	aire horno aceite aire aire
<b>F-224</b>	acero soldable al cromo-manganeso-vanadio	C 0,25-0,30 Mn 1,00-1,30 Si 0,15-0,30 Cr 0,60-0,90 V 0,10-0,25	NORMALIZADO RECOCIDO TEMPLE REVENIDO TENAZ REVENIDO DURO	850-900 830-860 860-890 650 400	aire horno aceite aire aire

Los aceros inoxidables (F-310) son materiales que se caracterizan por su resistencia a la temperatura y a la oxidación. Cuanto menor es el contenido en carbono de estos aceros, más eficaces resultan para trabajar en caliente, ya que la precipitación de carburos de cromo induce niveles considerables de fragilización y también reduce notablemente la resistencia a la oxidación. Las condiciones más habituales en que los aceros inoxidables son tratados térmicamente, se proporcionan en la tabla 10.17.

Tabla 10.17 Condiciones de temperatura y tiempo comunes para tratamientos térmicos de aceros inoxidables.

Denominación		Elementos de aleación	Tratamiento	Temperatura (°C)	Enfriamiento
<b>F-311</b>	acero inoxidable extrasuave 13 Cr	C < 0,15 Mn < 1 Si < 1 Cr 12,0-14,0	RECOCIDO TEMPLE REVENIDO	815-880 930-1000 600-730	horno aceite aire
<b>F-312</b>	acero inoxidable 13 Cr	C 0,30-0,40 Mn < 1 Si < 1 Cr 12,0-14,0	RECOCIDO TEMPLE REVENIDO REVENIDO	850-900 950-1000 200-400 600-725	horno aceite aire aire
<b>F-313</b>	acero inoxidable 16 Cr-2 Ni	C < 0,20 Mn < 1 Si < 1 Ni 1,5-2,5 Cr 15,0-17,0	RECOCIDO TEMPLE REVENIDO	720-770 950-1020 600-650	horno aceite agua
<b>F-314</b>	acero inoxidable al cromo níquel (18-8)	C < 0,18 Mn < 2 Si < 1 Ni 8,00-10,0 Cr 18,0-20,0	RECOCIDO	1000-1100	agua
<b>F-315</b>	acero inoxidable al cromo-manganeso	C < 0,14 Mn 17,0-19,0 Si 0,50-2,00 Cr 10,0-13,0	RECOCIDO	900-950	aceite
<b>F-321</b>	acero inoxidable al cromo-níquel-wolframio (12-12)	C 0,40-0,50 Mn 0,80-1,50 Si 0,80-1,80 Ni 12,0-15,0 Cr 12,0-15,0 W 2,00-4,00	RECOCIDO	1000-1050	aceite
<b>F-322</b>	acero Silicrom	C 0,35-0,45 Mn 0,40-0,60 Si 2,00-3,00 Ni 12,0-15,0 Cr 9,0-11,0 Mo 0,80-1,00	RECOCIDO	950-1000	horno
<b>F-323</b>	acero Silicrom B	C 0,55-0,65 Mn 0,30-0,60 Si 1,40-1,70 Cr 5,75-6,75	RECOCIDO TEMPLE REVENIDO	940-970 960-980 780-800	horno aire aire

Tabla 10.17 (Continuación).

<i>Denominación</i>		<i>Elementos de aleación</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Enfriamiento</i>
<i>F-331</i>	acero refractario Cr-Ni (25-20)	C <0,15 Mn <2 Si <1 Ni 19,0-21,0 Cr 24,0-26,0	RECOCIDO	1120-1180	agua
<i>F-332</i>	acero refractario Cr-Ni (18-8 estabilizado)	C <0,08 Mn 1,00-2,00 Si <1 Ni 8,0-11,0 Cr 17,0-19,0	RECOCIDO	970-1100	agua

## Bibliografía

### General

- ANDRÉS, A.; APARICIO, C.; ARANDES, P.; GIL, F. J.; MANERO, J. M.; PLANELL, J. M.; RODRÍGUEZ, D. *Aleaciones ligeras*. Barcelona (España), Ed. UPC, 2001.
- ANGLADA, M. J.; ALCALÁ, J.; LLANES, L. M.; MATEO, A. M.; SALÁN, M. N. *Fractura de Materiales*. Barcelona (España), Ed. UPC, 2002.
- APRAIZ, J. *Tratamientos térmicos de los aceros*. Madrid (España), Ed. Dossat, 1985 (8ª edición).
- ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. *Engineering Materials 1. An introduction to their Properties and Applications*. Oxford (U.K.), Pergamon Press, 1981.
- ASKELAND, D. R. *La Ciencia e ingeniería de los materiales*. México, Grupo Editorial Iberoamérica, 1987.
- ASM, *Specialty Handbook: Stainless Steels*. Ohio (EE UU), J.R. Davis (Ed.) ASM International, 1994.
- ASM HANDBOOKS COMMITTEE. *Interpretation of Scanning-Electron Microscope Fractographs*. Ohio (EE UU), ASM, 1992 (9ª edición).
- ASM INTERNATIONAL. *Ceramics and Glasses*, Engineering Materials Handbook, vol. 4, Ohio (EE UU), ASM, 1991.
- CALLISTER, W. D. Jr. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Vol. I y II. Barcelona (España), Ed. Reverté, 1996.
- COCA, P.; ROSIQUE, J. *Tecnología mecánica y metrotecnia*. Madrid (España), Pirámide, 1996 (6ª edición).
- DI CAPRIO, G. *Los aceros inoxidables*. Barcelona (España), GRUPINOX, 1999 (2ª edición española).
- DIETER, G. E. *Mechanical Metallurgy*. Londres (UK), McGraw-Hill, 1988.

- E 8M-86a. *Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials (Metric)*. Philadelphia (EE UU), Annual Book of ASTM Standards, V 03.01, p. 176 (1987).
- E 23-86. *Standard Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. Philadelphia (EE UU), Annual Book of ASTM Standards, V 03.01, p. 282 (1987).
- FRIED, J.R. *Polymers Science and Technology*. New Jersey (EEUU), Prentice Hall (1995).
- GIL, F. J.; CABRERA, J. M.; MASPOCH, M. L.; LLANES, L. M.; SALÁN, N. *Materiales en ingeniería. Problemas resueltos*. Barcelona (España), Ed. UPC, 1987.
- GIL, F.J.; MANERO, J.M. *Metalografía*. Barcelona (España), Ed. UPC, 2005.
- GROOVER, M. P. *Fundamentos de manufactura moderna. Materiales procesos y sistemas*. México, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1997.
- HERTZBERG, R. W. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. New York (EE UU), John Wiley and Sons, 1989.
- KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México, Pearson Education, 2002 (4ª edición)
- MARTÍNEZ, A. B. *Materiales compuestos*. Barcelona (España), ETSEIB (1995).
- MATTHEWS, F. L. *Composite materials engineering and science*. Cambridge (EEUU), Woodhead Publishing Ltd. (1999).
- PRADO, J. M. *et al. Apuntes de metalurgia general*, Barcelona (España), CPDA-ETSEIB, 1994.
- UNESID. *La fabricación del acero*. Madrid (España), Unesid, 1998.
- URETA, E. *Polímeros: Estructura, propiedades y aplicaciones*. México, Ed. Noriega (1989).
- RICE, R. W. *Mechanical properties of ceramics and composites grain and particle effects*. New York (EE UU), Marcel Dekker (1996).
- SMITH, W. F. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. España, McGraw-Hill Interamericana de España, S.A.U., 1998 (3ª edición).
- SHACKELFORD, J. F.; GÜEMES, A. *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Madrid (España), Prentice Hall Iberia, 1998 (4ª edición).
- TABOR, D. *The hardness of Metals*. J. Inst. Metals, 79, p. 1 (1951).
- TARTERA, J.; *Elaboració i reciclatge de materials*. Barcelona (España), CPDA-ETSEIB, 1999.
- WARD, I. M. *An Introduction to the mechanic properties of solid polymers*. New York (EE UU), John Wiley and Sons, 1993.
- WASSILIEFF, B. *Embutición de chapa metálica*. París (Francia), Ed. Hispano Europea, 1966.

**Direcciones electrónicas**

<http://class.et.byu.edu/mfg130/processes>

<http://www.matweb.com>

<http://www.geimd.com>

<http://www.recyclersworld.com>

<http://www.ssina.com>

<http://www.sz-metal.si/selector/microstructures>

<http://www.woodhead-publishing.com/engineering/metallurgy.html>

<http://www2.umist.ac.uk/material>



## Índice alfabético

### A

- Aleaciones
  - férricas, 72-78
  - no férricas, 78-84
- Alotropía, 25
- Alto horno, 73
- Austempering, 69
- Austenita, 62

### B

- Bainita, 67
- Bonificado, 65

### C

- Cadenas poliméricas, 122
- Cerámicos, 157
  - tecnológicos, 163
  - tradicionales, 160
  - choque térmico, 185
- Cermets, 143
- Charpy, 50
- Chvorinov, 88
- Comportamiento
  - elástico, 38
  - plástico, 39
- Compuestos
  - estructurales, 151
  - de matriz cerámica, 145
  - de matriz metálica, 144
  - de matriz polimérica, 145,151-156
  - reforzados con fibras, 147
  - reforzados con partículas, 150
- Conformado por deformación plástica, 98
- Copolímeros, 125
- Corrosión, 174-178

### D

- Defecto
  - intersticial, 24
  - sustitucional, 24
- Deformación plástica, 42-45
- Dendritas, 28
- Diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C, 61
- Diagramas
  - de fases, 59
  - TEC, 68-69
- Difusión en estado sólido, 30
  - intersticial, 30
  - vacantes, 30
- Doblado, 109
- Dureza
  - Brinell, 49
  - Rockwell, 49
  - Vickers, 49

### E

- Elastómeros, 33, 131
- Elementos, tabla periódica, 19-21
- Embutición, 110
- Enlaces
  - covalente, 21
  - iónico, 22
  - metálico, 22
  - secundarios, 23
- Ensayos
  - de dureza, 47
  - de impacto, 50
  - de tracción, 39
- Estirado, 108
- Extrusión, 107, 136-138

**F**

Ferrita, 62  
Forja, 103-106  
Fusión y moldeo, 85

**G**

Grado de polimerización, 127

**I**

Identificación a la llama, 179

**J**

Jominy, 70

**L**

Laminación, 101-103  
Laminado, 183

**M**

Martempering, 69  
Martensita, 63  
Metalografía, 171-174  
Módulo elástico, 41  
Moldeo  
    por compresión, 139  
    por inyección, 133  
    por inyección-soplado, 135  
    rotacional, 138

**N**

Normalizado, 65

**P**

Perlita, 62  
Polimerización  
    por adición, 123  
    por condensación, 123  
Polímeros  
    termoestables, 33, 130-131  
    termoplásticos, 33, 128-130  
Pulvimetalurgia, 93

**R**

Recocido, 65  
    de regeneración, 66  
    isotérmico, 66  
    globular, 66  
    subcrítico, 66  
Redes  
    BCC, 24  
    de Bravais, 23  
    FCC, 24  
    HCP, 24  
Refuerzos, 146  
Resistencia a tracción, 42

**S**

Sinterización, 93-98  
Soldadura, 113-117  
Solidificación, 28, 57-59  
Soluciones sólidas, 26

**T**

Temple, 65  
Tensión de fluencia, 42  
Termoconformado, 138  
Tracción de polímeros, 181  
Tratamientos  
    térmicos, 64  
    superficiales, 71

**V**

Vidrios, 157, 164-168



