

Disseny de màquines IV Selecció de materials 1

Carles Riba Romeva

Temes d'Enginyeria Mecànica



Temes d'Enginyeria Mecànica

Disseny de màquines IV

Selecció de materials 1

Carles Riba Romeva

Responsable de la col.lecció: Carles Riba Romeva

Aquesta publicació s'acull a la política de normalització lingüística i ha comptat amb un ajut del Departament de Cultura i de la Direcció General d'Universitats, de la Generalitat de Catalunya

En col·laboració amb el Servei de Llengües i Terminologia de la UPC i el Servei de Publicacions de la UPC

Primera edició: febrer de 1997
Segona edició: setembre de 1998
Reimpresió: febrer de 2005

© Carles Riba Romeva, 1997

© Edicions UPC, 1997
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
A/e: edicions-upc@upc.es

Producció: CPDA
Av. Diagonal 647, ETSEIB, 08028 Barcelona

Dipòsit legal: B-29862-98
ISBN (obra completa): 84-8301-260-X
ISBN: 84-8301-261-8

Són rigorosament prohibides, sense l'autorització escrita dels titulars del copyright, sota les sancions establertes a la llei, la reproducció total o parcial d'aquesta obra per qualsevol procediment, inclosos la reprografia i el tractament informàtic, i la distribució d'exemplars mitjançant lloguer o préstec públics.

Disseny de màquines IV

Selecció de materials 1

Carles Riba i Romeva

**Professor del
Departament d'Enginyeria Mecànica
ETSEIB - UPC**

Gener de 1997

Presentació

Una de les activitats més apassionants, i sovint més complexes, dintre de l'enginyeria és el procés de creació, o disseny, d'una màquina a partir d'unes funcions i d'unes prestacions prèviament especificades. Constitueix una matèria multidisciplinària que inclou, entre d'altres, la teoria de màquines i mecanismes, el càlcul i la simulació, les solucions constructives, els accionaments i el seu control, l'aplicació de materials, les tecnologies de fabricació, les tècniques de representació, l'ergonomia, la seguretat, la reciclabilitat, que s'integren en la forma d'un projecte.

Aquest text forma part d'un conjunt de cinc temes que tracten el *disseny de màquines* des de diferents punts de vista complementaris, cada un dels quals presenta un tractament autònom que fa que es pugui llegir o consultar amb independència dels altres. El seu objectiu és de donar unes orientacions conceptuals i metodològiques per a aquelles persones amb nivell de formació universitària que, en algun moment o altre de la seva activitat professional, hauran d'emprendre el disseny o la fabricació d'una màquina o d'un producte anàleg. Aquests temes són:

- I. *Mecanismes*
- II. *Estructura constructiva*
- III. *Accionaments*
- IV. *Selecció de materials*
- V. *Metodologia*

Aquest text tracta de la *selecció de materials* per a cada una de les peces o components d'un conjunt, una de les tasques més decisives en el disseny de màquines, i el contingut es reparteix en dos fascicles: el primer conté el capítol 11 sobre criteris de selecció i el 12 sobre els acers i foses; i el segon conté el capítol 13 sobre metalls no fèrrics, i el 14 sobre materials no metàl·lics.

Durant els darrers 50 anys, el dissenyador de màquines ha vist augmentar de forma decisiva l'oferta de materials disponibles, no tan sols amb la millora dels tradicionals (acers, foses, bronzes i llautons), sinó també amb el desenvolupament dels metalls lleugers

(especialment de l'alumini), dels acers inoxidable, d'una gamma creixent i cada cop més tècnica de plàstics i elastòmers, dels materials compostos i fins i tot d'algunes ceràmiques.

Alhora la selecció de materials va esdevenint una tasca cada cop més complexa, fruit de l'avaluació ponderada de nombroses propietats físiques (densitat, característiques elèctriques i tèrmiques), químiques (resistència a la corrosió, a les radiacions), mecàniques (resistència, rigidesa, fatiga, impacte, fluència, desgast) i tecnològiques (preu, fabricabilitat, temperatures de servei).

Els objectius d'aquest text són, alhora, proporcionar criteris per a la selecció de materials en el disseny de màquines i oferir una panoràmica dels principals materials usats en aquesta disciplina, tot facilitant una estructura comuna de les taules de propietats i ressaltant els trets més característics de l'aplicació de cada un d'ells.

En acabar aquesta presentació voldria agrair les opinions i criteris de molts professors companys de la Universitat Politècnica de Catalunya, especialment dels Departaments d'Enginyeria Mecànica (Josep Fenollosa Coral, Adrià Candaló Chàfer i l'exprofessor Albert Fortuny Garcia), Enginyeria Química (Josep M. Fernández Santin) i Enginyeria de Materials (J. Manuel Prado Pozuelo, Antoni Martínez Benasat, Jordi Tartera Barrabeig, Antonio Herrero Palomo, Ma. Lluïsa MasPOCH Ruldua) de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Voldria agrair especialment la col·laboració d'Oriol Adelantado Nogué, que ha seguit les vicissituds dels treballs des de l'inici, i la de Guillermo de Miguel Gambús que ha realitzat les figures.

També han estat de gran ajuda la documentació i les informacions proporcionades per diferents fabricants de materials (Thyssen, Schmidt+Clemens, Du Pont, Hoechst, Bayer, Basf, Cristalería Española), cases comercials (Urssa, AUSA, Rovalma, Hastinik, Alumafel, Coasol, Macla, Posa), empreses transformadores (Fundiciones de Roda, Ames, Industrias Plàstics Trilla, Gates-Vulca) o empreses amb producte (Girbau, Derbi, Construccions Margarit).

Finalment, voldria agrair la paciència i comprensió que han mostrat la meua esposa Mercè Renom Pulit i els meus fills Martina, Nolasc i Joana per les llargues hores de dedicació que hi he esmerçat.

ÍNDIX

Presentació

Selecció de materials 1

11	Criteris de selecció	9
11.1	Introducció	9
11.2	Propietats físiques	14
11.3	Propietats mecàniques	19
11.4	Propietats tecnològiques	32
11.5	Magnituds característiques	40
12	Metalls. Acers i foses	47
12.1	Introducció als metalls	47
12.2	Materials fèrrics	62
12.3	Acers de construcció	77
12.4	Acers de màquines	91
12.5	Acers d'eines	112
12.6	Acers inoxidable	119
12.7	Foses i acers d'emmotllament	125

Selecció de materials 2

13	Metalls no fèrrics	7
13.1	Alumini i aliatges d'alumini	7
13.2	Coure i aliatges de coure	22
13.3	Altres metalls	32
14	Materials no metàl·lics	47
14.1	Introducció als polímers	47
14.2	Plàstics	72
14.3	Elastòmers	104
14.4	Materials compostos	122
14.5	Ceràmiques	140

Bibliografia

11 Criteris de selecció

11.1 Introducció

La selecció del material per a cada una de les peces o components és una de les decisions centrals del procés de disseny d'una màquina. A continuació s'estableixen diverses consideracions generals sobre aquesta activitat.

Caràcter concurrent

La selecció de materials no pot fer-se independentment de les altres activitats del disseny de màquines. Entre els aspectes que concorren en aquesta tasca destaquen els que es relacionen amb les diferents etapes del cicle de vida de la màquina o aparell:

Resposta a la funció

El material elegit ha de respondre a les exigències de la funció de la peça o component. Aquest aspecte està íntimament relacionat amb les seves característiques físiques (densitat, propietats òptiques, tèrmiques i elèctriques) i mecàniques (resistència mecànica, rigidesa, propietats lliscants). Cal tenir en compte l'aspecte concurrent ja dintre de la mateixa funció: per exemple, la utilització d'un material costós però de propietats elevades en un element molt sol·licitat (un engranatge, un arbre) pot repercutir molt favorablement en el pes i les dimensions del conjunt de la màquina.

Conformació i fabricació

La selecció del material no pot deslligar-se del mètode de conformació i del procés de fabricació de la peça o component. En efecte, encara que un material s'adapti a les propietats necessàries per a la funció, ha de prestar-se al mètode d'elaboració desitjat (o disponible) amb un cost raonable.

Cost i subministrament

Entre materials candidats equivalents, el cost i les condicions de subministrament (productes semielaborats, regularitat en les propietats, disponibilitat, lots mínims) són determinants en la selecció del material.

Relació amb l'usuari

Aspecte que cada dia té més incidència en la selecció del material: facilitat per donar formes, colors i textures atractives, amigabilitat al tacte, sensació de solidesa o de lleugeresa. Cal tenir present els costos associats a les operacions d'acabament.

Facilitat de reciclatge

És el darrer dels condicionaments del caràcter concurrent que s'han incorporat en la selecció del material: ha de ser reciclable, tant per imposició legal com per la creixent sensibilitat ciutadana. Aquest és el motiu de moltes decisions referents a canvis de materials i també al seu tractament (els materials barrejats són més difícilment reciclables).

Grau d'innovació

Davant de la selecció de materials per a un determinat projecte, el dissenyador de màquines pot orientar-se vers solucions experimentades o vers solucions innovadores. La recomanació podria ser la següent:

Solucions experimentades

En general és bo d'analitzar els materials usats en solucions experimentades (la selecció de materials exigeix la consideració d'un gran nombre d'aspectes de difícil avaluació). Per tant, una solució prudent és basar-se en aplicacions experimentades i materials usals.

Solucions innovadores

Quan apareixen situacions noves (nous requeriments, nous materials o noves relacions de preus), la selecció de materials adquireix tot el seu sentit. Sovint, una màquina o un aparell esdevé competitiu en l'aplicació innovadora d'un material tradicional o d'un de nou.

Característiques i propietats dels materials

Dos dels aspectes més importants en la tasca de selecció de materials en el disseny de màquines és basar-se en una bona informació de base sobre les característiques i propietats dels materials, així com disposar d'eines per a processar i interpretar aquesta informació.

Organització de les dades sobre propietats dels materials

Tot i el gran volum disponible d'informació sobre propietats dels materials, pocs textos les presenten de forma sintetitzada i coherent, orientades a la fase inicial de selecció. Per a possibilitar les comparacions, les propietats quantificables dels materials s'han d'obtenir amb metodologies i unitats coherents, i les característiques no quantificables (que sovint s'obliden) s'han d'avaluar amb un barem fàcil d'interpretar. Aquest és un dels reptes assumits en aquest text. Les bases de dades existents, en general molt especialitzades, acostumen a ser útils en la fase final de selecció.

Quantificació de la selecció de materials

Les classificacions de materials segons una propietat individual (resistència a la tracció, conductivitat elèctrica, transmissivitat òptica) donen uns primers criteris d'avaluació. Tanmateix, quan es quantifica la influència combinada de diverses propietats (resistència per unitat de pes, conductivitat elèctrica per unitat de cost; denominades en aquest text *magnituds característiques*, Secció 11.5), s'obté una visió quantitativa més profunda i alhora més ajustada a una aplicació determinada.

Els materials en el disseny de màquines

Els materials disponibles en enginyeria són molt nombrosos i es distingeixen fonamentalment per la seva composició química, l'estat (sòlid, líquid, gas), l'estructura (cristal·lina, amorfa), les diferents fases, les impureses i la distribució d'aquests components. El disseny de màquines s'interessa fonamentalment pels materials sòlids que realitzen *funcions estructurals* (suporten adequadament les tensions i les deformacions) i altres funcions mecàniques (adherència i lliscament, resistència a l'abradió).

L'objectiu d'aquest text no inclou els materials destinats a aplicacions elèctriques o magnètiques (conductors, semiconductors, imants), òptiques (lents) o tèrmiques (resistències, aïllants, refractaris), però sí la consideració d'aquestes propietats quan apareixen indissolublement lligades a les funcions de les màquines (rotor d'un motor elèctric, parabrisa de motocicleta, dissipació de calor en un motor tèrmic, en un coixinet de lliscament).

La classificació més usual dels materials comprèn els *metalls*, els *polímers* i les *ceràmiques*. Les dues primeres famílies constitueixen el gruix dels materials utilitzats en enginyeria mecànica (se'ls dedica la major part d'aquest text), mentre que les ceràmiques encara presenten avui dia un ús molt limitat (Secció 14.5).

Metalls

Es basen en una xarxa cristal·lina regular d'un element metàl·lic, en la qual pot mesclar-se quantitats variables d'un o més metalls diferents o altres compostos (aliatges). L'enllaç metàl·lic es caracteritza per no fixar els electrons a cap àtom en concret, d'on se'n deriva la seva bona conductivitat elèctrica i tèrmica. Les propietats més destacades dels materials usuals són:

- Densitat relativament elevada ($1,75 \div 9,00 \text{ Mg/m}^3$)
- Resistència mecànica elevada ($50 \div 2500 \text{ MPa}$)
- Rigidesa elevada ($40 \div 240 \text{ GPa}$)
- Bona ductilitat
- Conductivitat elèctrica i tèrmica elevades
- Estabilitat química de mitjana a baixa

Polímers

Es basen en macromolècules orgàniques resultat de la polimerització d'un o més monòmers amb la incorporació de diversos tipus d'additius. Els enllaços que configuren les macromolècules són de tipus covalent, fet que no facilita la conducció elèctrica ni tèrmica. Els materials basats en polímers inclouen els *plàstics*, els *elastòmers* i molts dels components dels *materials compostos* (la major part de les matrius i algunes fibres). Les propietats més destacades són:

- Densitat baixa ($0,85 \div 2,20 \text{ Mg/m}^3$)
- Resistència mecànica baixa ($1 \div 100 \text{ MPa}$)
- Rigidesa baixa o molt baixa ($0,001 \div 10 \text{ GPa}$)
- Bona ductilitat (excepte els termostables i elastòmers)
- Conductivitat elèctrica i tèrmica molt baixes (fora d'excepcions)
- Estabilitat química elevada

Ceràmiques

Es basen en compostos químics de composició fixa formats per metalls i no metalls. Tenen una gran varietat de composicions químiques que es reflecteixen en una gran diversitat d'estructures cristal·lines, atès que en general els àtoms que formen la xarxa són diferents. Les propietats més destacades són:

- Densitat relativament baixa ($2,20 \div 5,60 \text{ Mg/m}^3$)
- Resistència mecànica moderadament elevada ($50 \div 850 \text{ MPa}$)
- Rigidesa molt elevada ($60 \div 460 \text{ GPa}$)
- Gran fragilitat
- Conductivitat elèctrica i tèrmica baixes
- Estabilitat química molt elevada

Taula 11.1 Taula comparativa de materials de les principals famílies

	Materials metàl·lics			Materials basats en polímers	
	Acer	Aliatge d'alumini	Llautó	Termoplàstic	Elastòmer
	2 C 45 TQ	AlMg0,5Si T6	CuZn30 H4	PE-HD	NR

Composició química	Unitats					
Alumini	%	-	>98,5	-	-	-
Carboni	C %	0,45	-	-	-	-
Coure	Cu %	-	-	70	-	-
Ferro	Fe %	> 99	-	-	-	-
Magnesi	Mg %	-	0,70	-	-	-
Silici	Si %	-	0,40	-	-	-
Zenc	Zn %	-	-	30	-	-
Propietats físiques	Unitats					
Densitat	Mg/m ³	7,85	2,69	8,53	0,9	0,93
Coefficient dilatació	µm/m·K	12,0	23,4	20,0	200	216
Calor específic	J/kg·K	440	900	375	2500	-
Conductivitat tèrmica	W/m·K	50	200	120	0,45	0,165
Resistivitat elèctrica	Ω·m	150·10 ⁻⁹	53·10 ⁻⁹	62·10 ⁻⁹	>10 ¹⁵	10 ¹³ ÷10 ¹⁵
Propietats mecàniques	Unitats					
Resistència tracció	MPa	750	240	525	18÷35	20÷28
Límit elàstic	MPa	450	215	435	-	-
Allargament ruptura	%	15	12	62	100÷900	300÷850
Mòdul d'elasticitat	GPa	210	68,5	110	0,7÷1,4	10 ⁻³ ÷10 ⁻²
Duresa	HB	350	70	80	40÷65 ⁽¹⁾	30÷95 ⁽²⁾
Prop. tecnològiques						
Cost	pta/kg	100	700	500	95	100
Temperatura de fusió	°C	1580	615÷655	-	160÷200	-
Temp. màxima d'ús	°C	450	100÷150	-	70÷80	70÷90

⁽¹⁾ Duresa a la bola (MPa)⁽²⁾ Duresa IRHD (Shore A)

11.2 Propietats físiques

Diverses propietats físiques són determinants en la selecció de materials per al disseny de màquines. Les més destacades són la densitat, les propietats òptiques, les propietats tèrmiques i les propietats elèctriques i magnètiques.

Densitat

Relació entre la massa i el volum que ocupa el material (en $\text{Mg/m}^3 = \text{g/cm}^3$). Se sol mesurar amb mètodes basats en el principi d'Arquímedes.

Propietat fonamental dels materials que incideix en diversos aspectes del disseny de màquines: *a)* En el *pes* de les peces i components, factor que condiciona la facilitat de manipulació (especialment en aparells domèstics), la transportabilitat (és un dels factors decisius en les prestacions i els consums dels vehicles) i que repercuteix sobre les estructures i edificacions que sostenen les màquines. *b)* Indirectament, en el *cost*, ja que aquest s'acostuma a donar per unitat de massa. *c)* En els sistemes vibratoris i de rotació, ja que la densitat determina la massa i, per tant, les freqüències pròpies de vibració i les velocitats crítiques; en determinats casos, les densitats elevades són positives (contrapès d'una rentadora).

Els materials més densos són els metalls ($1,75 \div 9,00 \text{ Mg/m}^3$, els més usuals en el disseny de màquines), seguits de les ceràmiques ($2,20 \div 5,60 \text{ Mg/m}^3$), i els menys densos són els polímers ($0,85 \div 2,20 \text{ Mg/m}^3$). La pre-ocupació per alleugerir les màquines i els aparells ha impulsat en molts casos la substitució dels metalls per plàstics o materials compostos.

Propietats òptiques

Resposta d'un material a les radiacions electromagnètiques i, en especial, a la llum visible. La llum incident en la superfície d'un material es reparteix entre la fracció (o percentatge) que es transmet (o travessa el material, *transmissivitat*), la que s'absorbeix (o es transforma en energia tèrmica, *absortivitat*) i la que es reflecteix (o retorna pel cantó de la llum incident, *reflectivitat*).

Segons el comportament davant de la llum, els materials es poden classificar en: *a)* *Transparents*: transmeten la major part de la llum i permeten la visió dels objectes (absorció i reflexió baixes); *b)* *Translúcids*: transmeten una part de la llum de forma difusa, però no permeten la visió dels objectes; *c)* *Opacs*: no transmeten la llum (el color dels objectes es relaciona amb la composició de la llum reflectida).

Els materials transparents (fonamentalment els vidres i determinats polí-mers, tots ells d'estructura amorfa) es caracteritzen per: *a) Transmissivitat* alta (generalment, 80÷95%); *b) Índex de refracció, n* , (o relació entre les velocitats de la llum en el buit i en el si del material; també, relació entre els sinus dels angles d'incidència i de refracció): valors generalment com-presos entre 1,3÷2,0; és una propietat d'interès en aplicacions òptiques.

Propietats tèrmiques

El comportament tèrmic dels materials, o la seva resposta quan se'ls aplica calor, constitueix un dels aspectes determinants del disseny de màquines. Engloba diverses propietats com ara la dilatació tèrmica, la capacitat calorífica, la conducció tèrmica, així com determinades temperatures específiques. Les tres primeres propietats varien amb la temperatura i, si no s'indica el contrari, s'entén que són a la temperatura ambient (20°C).

Dilatació tèrmica

Propietat dels materials de dilatar-se quan augmenta la seva temperatura; es mesura a través del *coeficient de dilatació lineal, α* , increment unitari de longitud d'una barra del material quan la temperatura augmenta 1°K (la unitat és $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$). El *coeficient de dilatació volumètric* en materials homogenis és $3\cdot\alpha$. La dilatació tèrmica té importants conseqüències en el disseny de màquines: *a) Canvi dimensional* de les peces quan varia la temperatura (cal especificar la temperatura de referència); *b) Modificació del joc* en els enllaços entre peces de diferents materials en variar la temperatura (joc entre pistó i cilindre en els motors d'explosió); *c) Origen de tensions tèrmiques* entre peces de diferents materials unides (per soldadura, determinades unions cargolades) o rígidament encaixades (unions forçades d'arbres i botons) en variar la temperatura; *d) Origen de tensions internes* en processos de conformació amb zones de refredament desigual (materials emmotllats de gruixos desiguals, aliatges que han sofert tractament tèrmic, escalfaments localitzats en soldadures). Els metalls i les ceràmiques tenen dilatacions tèrmiques petites (5÷25 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$), mentre que els polímers presenten dilatacions molt més grans (50÷250 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$), circumstància que associa als primers a una estabilitat dimensional més gran que als segons.

Capacitat calorífica

Capacitat d'un material per absorbir energia calorífica en augmentar la seva temperatura; es mesura a través del *calor específic*: energia absorbida per unitat de massa i per grau de temperatura (la unitat és $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$).

Els valors del calor específic dels metalls són els més baixos (350÷900 J/kg·K per els aliatges més usuals en el disseny de màquines), els de les ceràmiques són lleugerament superiors (500÷1200 J/kg·K), mentre que els dels polímers són els més alts (850÷2500 J/kg·K). El calor específic referit al volum (en lloc de referit a la massa) presenta valors més uniformes (1750÷3750 kJ/m³·K), essent ara els dels metalls els més alts i els dels polímers els més baixos. Un calor específic gran té importància en aplicacions que exigeixen una gran inèrcia tèrmica (forns).

Conductivitat tèrmica

Tots els materials transmeten energia calorífica des de les regions de temperatura més alta a les de temperatura més baixa. Aquesta propietat es mesura per mitjà de la *conductivitat tèrmica* (la unitat és W/m·K), quocient entre l'energia (o flux) calorífic que travessa una unitat de superfície en una unitat de temps i la variació (o gradient) de temperatura per unitat de longitud. Generalment la conductivitat tèrmica i l'elèctrica van associades. La conductivitat tèrmica és un aspecte que cal tenir en compte en aquells sistemes on són crítics: *a) La conducció de calor* (anivelladors de temperatura, planxes tèrmiques); *b) L'intercanvi de calor* (radiador); *c) La dissipació de calor* (culata de motor d'explosió). Els millors conductors tèrmics són els metalls (16÷400 W/m·K), després vénen les ceràmiques (1,5÷50 W/m·K) i, en darrer terme, els polímers (0,10÷0,60 W/m·K). Els metalls (especialment el Cu i Al) s'utilitzen en aplicacions que exigeixen una bona conductivitat tèrmica, mentre que els polímers i certes ceràmiques s'utilitzen com a aïllants tèrmics o per a objectes en contacte amb l'usuari (sensació de temperament).

Temperatures característiques

Existeixen diverses temperatures que caracteritzen determinats aspectes del comportament dels materials. En ordre creixent, són: *a) Temperatura de fragilització*, per sota de la qual determinats metalls i polímers perden sobtadament la seva tenacitat; *b) Temperatura de transició vítria, T_g* , pròpia dels materials no cristal·lins (vidres, plàstics i elastòmers), per sota de la qual experimenten un gran augment de la rigidesa; *c) Temperatura de fusió, T_m* , per sobre de la qual els materials cristal·lins perden la seva consistència sòlida; *d) Temperatura de descomposició, T_d* , per sobre de la qual els polímers es degraden químicament; *e) Llíndar baixa/alta temperatura*: valor aproximat ($T \approx 0,4 \cdot T_m$ o $T \approx 0,65 \cdot T_m$, en graus K) que separa el comportament mecànic de *baixa/alta temperatura* pel que fa a la fluència; en els acers se situa a 400÷450°C, en els aliatges d'Al, entre 40÷100°C i, en els polímers, per sota de la temperatura ambient.

Propietats elèctriques i magnètiques

Hi ha nombroses propietats elèctriques dels materials que són útils per a diverses aplicacions; tanmateix, en el disseny de màquines ha semblat bo de limitar l'anàlisi de tres d'elles: la *conductivitat elèctrica*, pròpia dels metalls; les *propietats dielèctriques*, pròpies dels polímers i de les ceràmiques; i les *propietats magnètiques*, pròpies dels materials ferromagnètics (determinats metalls i ceràmiques).

Conductivitat elèctrica

Facilitat amb què un material deixa circular un corrent elèctric a través seu quan s'aplica entre dos punts una diferència de potencial. En general, es mesura per mitjà de la magnitud inversa, la *resistivitat*, o resistència elèctrica d'un conductor de longitud i secció transversal unitàries (la unitat de mesura és $\Omega \cdot m$). Els materials es classifiquen en *conductors* (fonamentalment els metalls; resistivitats de $10^{-8} \div 10^{-7} \Omega \cdot m$) i *no conductors* (fonamentalment els polímers i la major part de ceràmiques; resistivitats de $10^{10} \div 10^{16} \Omega \cdot m$); enmig queden els *semiconductors* (resistivitats de $10^{-4} \div 10^6 \Omega \cdot m$), d'una importància determinant en l'electrònica, però sense que constitueixin un objectiu directe del disseny de màquines. En els materials destinats a fer de conductor elèctric (aliatges del Cu i l'Al), la conductivitat pot donar-se en percentatge de la del Cu especificat en la norma americana ASTM B 3, o International Annealed Copper Standard (%IACS).

Propietats dielèctriques

Els materials aïllants (la gran majoria de polímers i ceràmiques) tenen, en major o menor grau, un comportament dielèctric, o sigui que són susceptibles de polaritzar-se en presència d'un camp elèctric. Les propietats que caracteritzen els materials dielèctrics són: *a) Constant dielèctrica*, relació adimensional entre la capacitat d'un condensador amb el material interposat, i la capacitat del mateix condensador en el buit; és un indicador de l'eficàcia de la polarització. *b) Factor de pèrdues dielèctriques*, tangent de l'angle de desfasament entre la intensitat i el voltatge en el condensador ($\tan \delta$); avalua les pèrdues energètiques provocades per histèresi del dielèctric en un camp elèctric altern (augmenta amb la freqüència). *c) Rigidesa dielèctrica*, quocient entre el voltatge de perforació del material i el gruix de la proveta (la unitat de mesura és MV/m), que varia inversament amb el gruix; mesura la intensitat del camp elèctric que pot suportar el material dielèctric.

En el disseny de màquines l'interès se centra en les aplicacions en què el material ha de fer funcions de conductor o d'aïllant elèctric; en aquest darrer cas convenen una resistivitat elèctrica i una rigidesa dielèctrica altes, mentre que és preferible una constant dielèctrica baixa (sobretot per a grans potències) i un petit factor de pèrdues (especialment per a altes freqüències) per evitar les pèrdues per histèresi. Els polímers tenen constants dielèctriques baixes ($2 \div 8$) i rigideses dielèctriques altes ($10 \div 25$ MV/m), mentre que les ceràmiques tenen constants dielèctriques altes ($6 \div 20$, adequades per a condensadors) i rigideses baixes ($3 \div 10$ MV/m).

Propietats magnètiques

Els materials *ferromagnètics* (aliatges de Fe, Co, Ni i determinades ceràmiques) presenten la propietat de polaritzar-se en presència d'un camp magnètic, essent la *permeabilitat magnètica*, μ (unitat H/m), la relació entre la densitat de flux magnètic, B , i la intensitat de camp magnètic, H , la qual pot arribar a ser 10^6 vegades la que tindria en el buit. Quan se sotmet un material ferromagnètic a un camp magnètic creixent, la densitat de flux augmenta ràpidament fins a un valor de *magnetisme de saturació* (B_s , Wb/m^2) en què tots els dipòls magnètics estan orientats. Si aleshores s'anul·la el camp magnètic, la densitat de flux disminueix fins a un valor de *magnetisme remanent* (B_r , Wb/m^2) el qual, per a desaparèixer, necessita l'acció d'un camp magnètic de sentit contrari que rep el nom de *camp coercitiu* (H_c , A/m). Aquest comportament al llarg de tot un cicle dóna lloc a un fenomen d'histèresi, amb una energia dissipada associada. En aplicacions de potència (generadors, motors, transformadors, electroimants) convé que la histèresi sigui baixa (ferromagnetisme tou), mentre que en d'altres aplicacions (imants permanents, ferrites de memòria d'ordinadors) convenen alts valors de magnetisme remanent i de camp coercitiu (ferro-magnetisme dur).

Els materials mecànicament tous són també ferromagnèticament tous (faciliten el retorn a l'orientació inicial dels dipòls), mentre que els materials deformats en fred, amb elements d'aliatge, i especialment els endurits per precipitació (dificulten els canvis d'orientació dels dipòls), tendeixen a ser ferromagnèticament durs. Com a materials de ferromagnetisme tou s'utilitzen el ferro dolç, el ferro al Si i determinats aliatges d'histèresi molt baixa (supermalloy), mentre que per a imants permanents s'utilitzen acers martensítics i aliatges amb un camp coercitiu elevat (alnico); per a altes freqüències s'utilitzen les *ferrites*, materials ferromagnètics ceràmics que, com que no són conductors, eviten els corrents induïts.

11.3 Propietats mecàniques

El comportament mecànic dels materials és complex, ja que no totes les aplicacions requereixen el mateix tipus de sol·licitacions, ni tots els materials responen de la mateixa manera. En primer lloc, i fora de casos excepcionals (peces que fan de fusible), cal evitar la ruptura de les peces, però també cal considerar altres tipus de fallada, com són una deformació excessiva (elàstica o plàstica) o el deteriorament superficial (picat, desgast, pèrdua de les propietats lliscants) en els enllaços amb moviment relatiu entre peces (articulacions, rodaments, guies, lleves, engranatges).

S'han normalitzat diversos assaigs per a avaluar les propietats mecàniques dels materials: Es poden agrupar en: *a) Assaigs de ruptura* (propietats relacionades amb tensions, deformacions i energies); *b) Assaigs superficials* (propietats relacionades amb el comportament superficial dels materials).

Assaigs de ruptura

La *velocitat de deformació*, el *tipus de sol·licitació* i la *temperatura* són determinants en el comportament a la ruptura d'un material, i donen lloc a diversos tipus d'assaig.

Velocitat de deformació

Segons velocitats de deformació creixents, s'estableixen quatre tipus d'assaig de ruptura: *a) Assaig de fluència*, realitzat a alta temperatura per al material (velocitats de deformació compreses entre $10^{-8} \div 10^{-5}$ $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{s}$); *b) Assaig de tensió-deformació* o pseudoestàtic (velocitats de deformació compreses entre $10^{-5} \div 10^{-1}$ $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{s}$); *c) Assaig dinàmic* o de fatiga (velocitats de deformació compreses entre $10^{-1} \div 10^2$ $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{s}$); *d) Assaig d'impacte* (velocitats de deformació compreses entre $10^2 \div 10^4$ $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{s}$).

Tipus de sol·licitació

Els assaigs de ruptura poden ser de *tracció*, de *compressió*, de *flexió*, de *cisallament* o de *torsió*, tot i que el més freqüent és el primer.

Temperatura de l'assaig

Seguint aquest criteri, els assaigs poden ser a *alta temperatura* (es manifesta de forma acusada el fenomen de fluència sota càrrega) o a *baixa temperatura* (apareix una sobtada fragilitat del material).

Assaig de tensió-deformació (Figura 11.1a)

Sobre una proveta s'aplica una sol·licitació creixent fins a la ruptura en un temps breu, i es fa un registre de la relació entre la tensió i la deformació (les tensions i les deformacions es calculen a partir de les dimensions inicials de la proveta). L'assaig més freqüent en els metalls i polímers és el de tracció (en els polímers també s'utilitzen els de flexió i compressió); en les ceràmiques s'utilitza l'assaig de flexió. Aquests assaigs proporcionen les següents propietats mecàniques de referència (Figura 11.1a):

Resistència a la ruptura (R_m , en MPa)

Tensió convencional (referida a la secció inicial) a la ruptura en el diagrama de tensió-deformació; indica la capacitat resistent del material, i constitueix una referència de càlcul per als materials fràgils, els quals no presenten un límit elàstic diferenciat.

Límit elàstic (R_e , en MPa)

Tensió que separa la zona de deformacions elàstiques (zona habitual de treball del material) de la zona de deformacions plàstiques, i constitueix la referència de càlcul per als materials dúctils; quan aquesta transició no és nítida, s'accepta la tensió per a una deformació residual màxima, normalment de 0,2% (*límit elàstic convencional*, $R_{p0,2}$).

Allargament a la ruptura (A , en %)

Percentatge de deformació a la ruptura referit a una longitud inicial. Permet caracteritzar els materials en *fràgils* ($A < 5\%$) i *dúctils* ($A > 5\%$). En materials que no compleixen la llei de Hooke, es pot donar com a propietat diferenciada l'*allargament en el límit elàstic*, A_e . El *coeficient d'estricció*, Z , és la reducció percentual de la secció mínima de la proveta després de la ruptura.

Mòdul d'elasticitat (E , en MPa)

En els materials que compleixen la llei de Hooke, relació entre la tensió i la deformació en la zona elàstica. En els materials que no compleixen la llei de Hooke (determinats termoplàstics, elastòmers), o bé es defineix el *mòdul d'elasticitat secant*, E_{sec} , entre dos valors de deformació (útil per a la caracterització del material), o bé el *mòdul d'elasticitat tangent*, E_{tan} , a l'origen o en un altre punt (útil per al càlcul de vibracions).

L'assaig de tensió-deformació també permet avaluar la *resiliència* (energia elàstica capaç d'absorbir un material) i la *tenacitat* (energia total de deformació, elàstica i plàstica, capaç d'absorbir abans de la ruptura), per a velocitats de deformació baixes (àrees subratllades en la Figura 11.1a).

Assaig de fatiga (Figura 11.1b)

S'aplica sobre una proveta una sol·licitació alternativa d'una determinada amplitud (més baixa que la resistència a la ruptura) durant un nombre de cicles suficientment gran per a produir la ruptura (presenta una fractura fràgil sobtada i catastròfica). L'assaig més freqüent consisteix a sotmetre una proveta de revolució giratòria a una sol·licitació de flexió per mitjà d'un pes, de manera que qualssevol de les seccions diametral queda sot-mesa a una flexió alternativa a cada volta. Per a construir la corba de fatiga (o de Whöler) d'un material, amb la tensió de ruptura en les ordenades i el logaritme del nombre de cicles en les abscisses, cal realitzar una costosa tanda d'assaigs amb provetes iguals i sol·licitacions descendents (es comença amb un valor $\approx 2/3 \cdot R_m$). Per a caracteritzar els materials a fatiga s'estableixen els següents paràmetres:

Resistència a la fatiga / Límit de fatiga

En molts materials (aliatges d'Al, Cu, Mg, i la major part de plàstics), la corba de Whöler disminueix contínuament amb el nombre de cicles, i en aquest cas es defineix una *resistència a la fatiga* per a un nombre de cicles convencional (usualment 10^8 o més alt). En d'altres materials (acers i determinats plàstics) la corba de Whöler presenta un punt d'inflexió entre $10^6 \div 10^7$ cicles i esdevé fonamentalment plana, valor de tensió que rep el nom de *límit de fatiga*, per sota del qual no es produeix la ruptura encara que s'augmenti indefinidament el nombre de cicles.

Cal tenir en compte dos aspectes: *a)* El comportament d'una peça a fatiga és sensiblement pitjor que el d'una proveta (influeixen negativament la dimensió, l'acabament superficial i els canvis sobtats de forma); *b)* La resistència a la fatiga és un paràmetre adequat per a un nombre elevat de cicles ($10^4 \div 10^5$ o més); per a un nombre de cicles inferior (*fatiga oligo-cíclica*), les peces poden treballar a tensions més elevades i el càlcul es basa en l'avaluació del creixement de la fissura.

Assaig d'impacte (Figura 11.1c)

Se sotmet una proveta, entallada o no, a l'impacte d'una massa suficient per a trencar-la (quan un material és sotmès a impacte, la fractura és fràgil i la tenacitat pràcticament coincideix amb la resiliència). La proveta pot estar suportada pels extrems i ser percutida pel centre (Charpy), o estar subjectada per un extrem i ser percutida per l'altre extrem (Izod). L'apa-rell d'assaig, constituït per un pèndol, permet mesurar l'energia absorbida per mitjà de la diferència d'altures abans i després de la percussió.

Resiliència per impacte

Mesura de l'aptitud d'un material per a absorbir xocs. Diferents assaigs normalitzats donen els resultats en diferents magnituds: la norma EN 10045 (materials metàl·lics) mesura la resiliència en energia (J); la norma ASTM D 256 (plàstics), en energia per unitat de gruix de la proveta (J/m); i la norma ISO 179 o DIN 53453 (també per a plàstics), en energia per àrea de la secció de la proveta (J/m²).

Els assaigs d'impacte s'utilitzen per caracteritzar el comportament dels materials a *baixes temperatures* (especialment de determinats acers i aliatges metàl·lics, dels plàstics i elastòmers), els quals esdevenen fràgils en disminuir la temperatura per sota de determinats valors.

Assaig de fluència, de relaxació (Figura 11.1d)

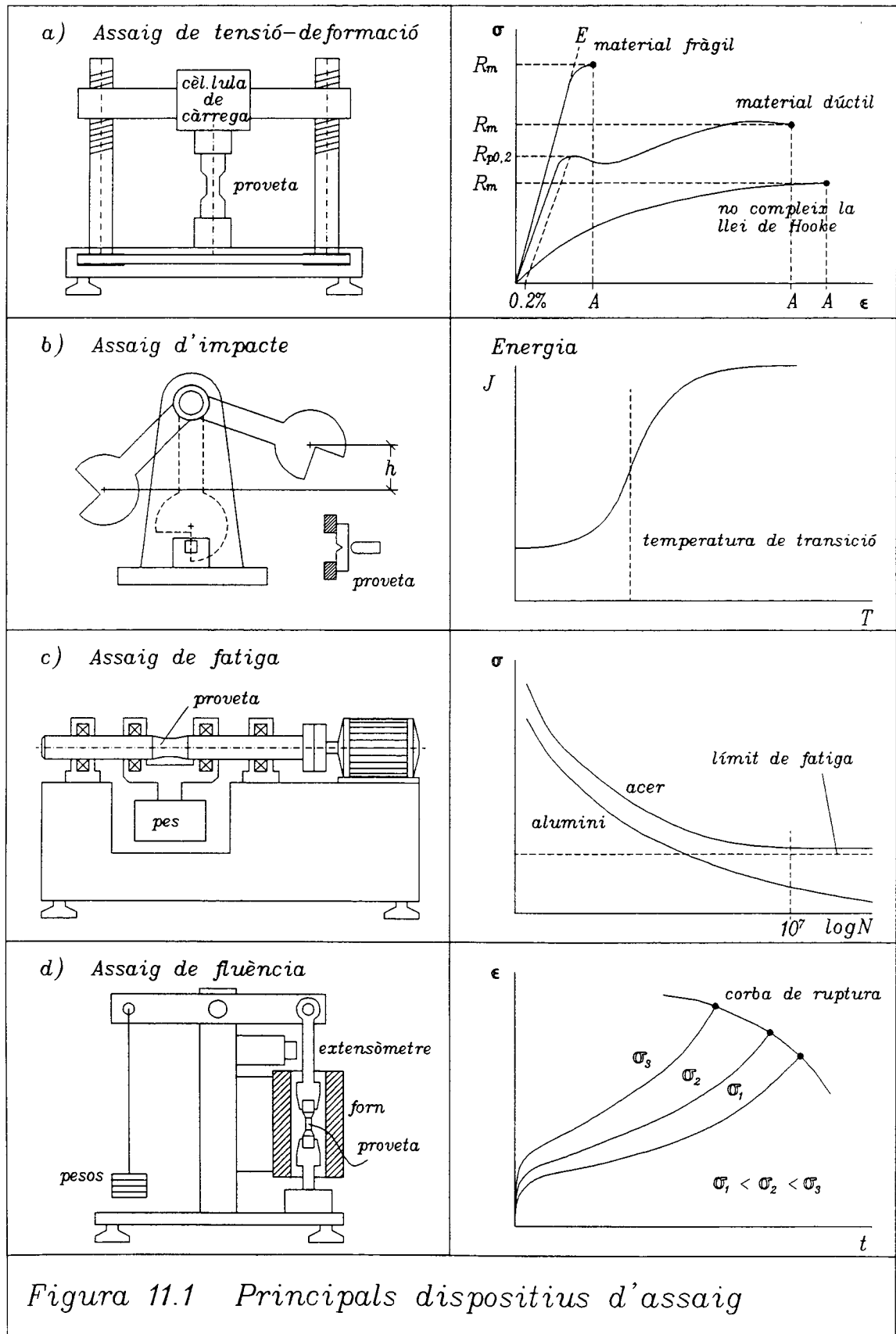
Els materials sotmesos a una *tensió* o a una *deformació* mantinguda durant llargs períodes de temps (d'hores a anys) a alta temperatura (superior a $0,4 \cdot T_m$ K, Secció 11.2), experimenten una deformació progressiva (o *fluència*) que pot arribar a la ruptura o una disminució progressiva de les tensions (o *relaxació*). Aquest comportament rep el nom de *viscoplasticitat*. Els *assaigs de fluència* i de *relaxació* (llargs i costosos, els primers de realització més fàcil que els segons) es duen a terme amb provetes mantingudes a temperatura controlada i sotmeses o bé a una sol·licitació constant inferior al límit elàstic (generalment de tracció), o bé a una deformació inicial corresponent a una tensió inicial inferior al límit elàstic. Els resultats d'ambdós assaigs (en general, equivalents) relacionen quatre paràmetres (deformació, tensió, temperatura, temps) i es poden presentar de múltiples maneres: *Corbes de fluència* (deformació-temps funció de la tensió i la temperatura); *Corbes de relaxació* (tensió-temps funció de la deformació i la temperatura); *Corbes isòcrones* (tensió-deformació per a un temps constant, funció de la temperatura). A efectes de comparació, es pot caracteritzar el comportament a fluència d'un material amb un sol paràmetre a base de definir:

Resistència a la fluència ($\sigma_{R/t}$)

Tensió que, per a una temperatura, produeix la ruptura en un temps determinat ($\sigma_{R/1000}$ a 800°C és la resistència a la fluència per a 1000 hores).

Mòdul de fluència ($E_{f/t/\sigma}$)

Quocient entre la tensió constant i l'allargament variable, funció del temps i del valor de la tensió, per a una temperatura ($E_{f/1000/10}$ a 20°C, indica el mòdul de fluència a 1000 hores per a una tensió de 10 MPa).



La fluència té incidència en peces que treballen a altes temperatures (funció de cada material) amb sol·licitacions mecàniques mantingudes durant temps prolongats (àleps de turbina sotmesos a la força centrífuga, peces de plàstic constantment carregades); en aquests casos cal evitar deformacions excessives per mitjà de l'avaluació de la vida de l'element. La relaxació té importància en unions forçades (unió botó de roda i eix, unions per ecliuetatges, especialment en els plàstics), casos en què cal prevenir una disminució excessiva de les tensions que comportaria la fallada de la funció.

criteris de disseny

En els assaigs de ruptura, les tensions i les deformacions van indissolublement unides; tanmateix, en les aplicacions al disseny de màquines, unes i altres donen diferents tipus de limitacions i de deteriorament que cal analitzar per separat.

Evitar la ruptura

Els materials presenten dos tipus de ruptura: *a) Fractura dúctil*, pròpia dels *materials dúctils*, en què la ruptura es produeix després d'una important deformació plàstica; es manifesta en forma de *ruptura dúctil* quan, després d'una deformació plàstica, la tensió arriba a la resistència de ruptura del material, o de *ruptura per fluència* quan es produeix després d'una prolongada deformació a altes temperatures (els materials fràgils poden presentar fluència a altes temperatures); les deformacions plàstiques dels materials dúctils, prèvies a la ruptura, de fet constitueixen un marge important de seguretat en el disseny, i les peces es calculen per limitar les deformacions. *b) Fractura fràgil*, pròpia dels *materials fràgils*, en què la ruptura es produeix sense deformació plàstica aparent; es manifesta en forma de *ruptura catastròfica*, sobtada i pràcticament instantània, quan se superen determinats nivells de tensió aplicada, en forma de *ruptura per impacte*, quan se sotmet el material a xocs (els materials dúctils sotmesos a xoc, en cas de trencar-se, sofreixen també una ruptura fràgil), o en forma de *ruptura per fatiga*, que es produeix després d'un gran nombre de cicles de càrregues variables a tensions relativament baixes respecte a la resistència a la ruptura i sense deformació plàstica aparent (es dona tant en els *materials fràgils* com els *materials dúctils*).

Atès que la integritat de les peces i elements és una de les principals preocupacions del disseny de màquines, existeixen diversos mètodes de càlcul específics destinats a assegurar-la (*càlcul de resistència a càrregues estàtiques*, *càlcul de fatiga*).

Limitar les deformacions

Els materials experimenten deformacions de diversa naturalesa: *a) Deformacions elàstiques*, quan el material recupera les formes i dimensions inicials en cessar la causa (materials fràgils i elastòmers fins a la ruptura; materials dúctils fins al límit elàstic); *b) Deformacions plàstiques*, quan romanen els canvis de formes i dimensions després de cessar la causa (materials plàstics des del límit elàstic fins a la ruptura); *c) Deformacions viscoelàstiques*, quan es produeixen deformacions (o recuperacions) retardades i lentes de les formes i dimensions després d'aplicar (o retirar) la causa (termoplàstics, especialment els flexibles, i alguns elastòmers).

El disseny de màquines concep les peces perquè els materials treballin dintre del camp elàstic (a excepció de les peces que fan de fusible), de manera que una deformació elàstica excessiva o una deformació plàstica es considera una fallada (hi ha peces que fallen per deformació sense fallar per tensió); per contra, les tècniques de fabricació fan un ús extensiu en els seus processos de la deformació plàstica en fred o en calent (doblegament, tall, embotició, forja, extrusió, en els metalls; injecció, extrusió, termoconformació, en els termoplàstics).

En determinades aplicacions, la rigidesa de les peces i els elements és primordial (transmissions, bancades de màquina eina), la qual s'assegura per mitjà de materials amb mòduls d'elasticitat elevats i de formes adequades. En d'altres aplicacions es desitja una gran deformació elàstica (molles, unions d'ecliquetatge, suports elàstics), que s'aconsegueix per mitjà de materials, o bé de mòdul d'elasticitat baix (elastòmers), o bé de límit elàstic elevat (acers de molles) combinat amb formes adequades.

Assaigs superficials

Les màquines es caracteritzen per l'existència d'unions mòbils entre peces (o enllaços), materialitzades per un *contacte lliscant* (coixinets de fricció, guies lineal de fricció), per un *contacte rodolant* (rodaments, cargols de boles) o per un *contacte lliscant-rodolant* (lleves, engranatges), cada un dels quals requereix unes propietats superficials específiques dels materials: el *contacte lliscant* requereix un coeficient de fricció baix i una bona resistència a l'abració i a la temperatura; el *contacte rodolant*, una bona duresa i resistència a la fatiga superficial; i el *contacte lliscant-rodolant*, la combinació de qualitats dels dos anteriors. Els assaigs superficials estan menys desenvolupats que els assaigs de ruptura, tot i que, en moltes aplicacions, les propietats superficials dels materials són determinants en el disseny de màquines. Els assaigs superficials de duresa són els més habituals, però també són d'interès els assaigs de frec i d'abració.

Assaigs de duresa

La duresa és una mesura de la resistència d'un material a la deformació superficial (elàstica o plàstica) quan se li aplica un punxó o marcador sota càrrega, però no constitueix una propietat intrínseca dels materials, amb unes unitats ben definides (això explica la gran diversitat de mètodes d'as-saig i d'escales: Shore, IRHD, Brinell, Vickers, Rockwell, i la dificultat per establir correspondències). Tanmateix, els assaigs de duresa són fàcils de realitzar, generalment són no destructius, i proporcionen una caracterització molt útil dels materials pel que fa al control de fabricació, per a l'avaluació de les tensions admissibles de fatiga superficial i, en el cas dels elastòmers, com a paràmetre mecànic de referència. Els assaigs més utilitzats són (vegeu-ne les escales en la Taula 11.2):

Duresa Brinell (HB)

S'aplica un marcador amb una força determinada sobre la proveta o peça i s'estableix la duresa per mitjà de la mesura del diàmetre de l'empremta. Hi ha dues escales, amb penetradors de bola d'acer (HBS 3÷450) i de bola de metall dur (HBW 3÷650). Existeixen aparells manuals que permeten mesurar aproximadament la duresa Brinell sobre una peça d'una màquina.

Duresa Vickers (HV) i Knoop (HK) (també microdureses)

Assaigs anàlegs al Brinell, però amb un marcador en forma de piràmide recta de base quadrada (Vickers) o de rombe molt allargat (Knoop), que estableixen la duresa dividint la força per l'àrea (Vickers, escala 4÷3000) o segons la diagonal més llarga (Knoop). La nitidesa de l'empremta permet aplicar forces molt petites sobre provetes o peces molt primes.

Duresa Rockwell

S'aplica un marcador sobre la proveta amb dues càrregues successives i es mesura la diferència de profunditats de penetració. Hi ha diverses escales per a provetes gruixudes (de A a K) i per a provetes primes (de 15N a 45T), però la més usada és la HRC (pràcticament un estàndard per a dureses elevades, 20÷70), i en menor grau la HRB (per a dureses més moderades, 20÷100).

Duresa per a plàstics i elastòmers

Existeixen diversos procediments de mesura de la duresa per a plàstics i elastòmers amb les corresponents escales, que s'estudien més endavant en les Seccions 14.1, 14.2 i 14.3.

Taula 11.2 Diferents escales de dureses

Dureses per a metalls i ceràmiques (correspondències per als acers, UNE 36.415; no per a altres metalls i ceràmiques)					Dureses per a polímers (correspondències aproximades; no amb les dels metalls i ceràmiques)			
HRC	HV	HK	HB	HRB	Bola	ShD	IHRD	ShA
	3000							
70,0								
68,0	940	920						
67,0	900	895						
65,6	850	860						
64,0	800	822						
62,1	750	780						
60,1	700	735						
57,8	650	687	(611)					
55,2	600	636	(564)					
52,3	550	583	(517)					
49,1	500	528	(471)					
45,3	450	471	425					
40,8	400	412	379					
35,5	350	356	311					
29,8	300	309	284					
26,4	275	286	261					
22,2	250	262	238	99,5				
(20)	225	248	214	97,5	200			
	200	216	190	91,5				
	180	196	171	87,1				
	160	175	152	81,7	140	90		
	140	154	133	75,0				
	120	133	114	66,7				
	100	112	95	56,2	60	75		
	90	102	85	48,0				
					25	50		
				20				
							98	
								90
					5	30	80	80
							40	40
	5		3				10	10

Assaigs de frec i desgast

Els fenòmens del *frec* (resistència al moviment tangencial relatiu entre dues superfícies en contacte) i del *desgast* (pèrdua progressiva de material de les superfícies en contacte amb moviment relatiu) que, juntament amb la *lubri-cació*, constitueixen l'objecte de la ciència i la tecnologia anomenada *tribo-logia*, són presents en tots els enllaços (o unions mòbils) entre peces, de manera que el funcionament i la qualitat de les màquines depenen en un elevat grau de la capacitat de limitar-ne o controlar-ne els efectes. En alguns elements de màquines (coixinets, rodaments, guies lineals i altres sistemes de guiatge) convé minimitzar el frec i el desgast (assegurar un alt rendiment, mantenir la geometria de l'enllaç), mentre que en d'altres dispositius (frens, embragatges, corretges, rodes de fricció), el frec (i de vegades el desgast controlat) són utilitzats positivament per a realitzar una funció. Per tant, la comprensió d'aquests fenòmens i el coneixement dels paràmetres que els caracteritzen són sovint aspectes fonamentals en la selecció de materials per al disseny de màquines.

Lamentablement, el frec i el desgast no són fàcils d'avaluar per les causes següents: *a*) Depenen de la parella de materials en contacte (no són una característica d'un sol material); *b*) Poden ser modificats per mitjà de substàncies interposades (sovint reduint-ne els efectes), ja siguin de formació espontània (capes d'òxids o d'altres compostos) o artificial (recobriments superficials com el cromatge, la nitruració, la fosfatació), ja sigui per la interposició de lubricants sòlids (grafit, bisulfur de molibdè), líquids (greixos i olis) o eventualment per un gas; *c*) Són influïts per factors relacionats amb la geometria de les superfícies en contacte, com ara la rugositat (microgeometria de les superfícies) o la curvatura i l'elasticitat en els contactes lineals i puntuals.

El frec i el desgast són fenòmens que van indissolublement lligats entre ells (no es dona un sense l'altre), tot i que no s'hi pot establir una relació unívoca. En efecte, hi ha sistemes amb un elevat frec i un petit desgast, i viceversa. En general, el desgast és diferent en els dos materials en contacte i no necessàriament el material més tou experimenta el desgast més gran (hi ha materials plàstics relativament tous, com el polietilè d'ultra elevat pes molecular, PE-UHMW, amb una extraordinària resistència a l'abració enfront de l'acer). També cal tenir en compte que els valors obtinguts de diferents assaigs sobre frec i desgast poden presentar grans discrepàncies a causa de les diferents condicions de realització (forces, velocitats, rugositat, lubricant, temperatura, humitat).

El frec i el desgast responen, fonamentalment, a dos mecanismes diferents: *a) Fricció* (o *frec de lliscament*) i *desgast per fricció*. Es donen quan dos cossos, que s'exerceixen una força normal mútua a través d'un contacte superficial, llisquen (o tendeixen a lliscar) entre ells; les forces que s'oposen al moviment i la pèrdua progressiva de material s'expliquen, entre altres causes, per la formació i immediat estripament de microsoldadures entre les aspreses superficials sotmeses a altes pressions, així com també per l'abrasió mútua. *b) Resistència al rodolament* i *desgast per picat*. Es donen quan dos cossos, que s'exerceixen una força normal mútua a través d'un contacte puntual o lineal (en realitat s'estableix una distribució de pressions en la zona de contacte a causa de la deformació del material), rodolen, o tendeixen a rodolar, entre ells; les forces que s'oposen al rodolament s'expliquen, entre d'altres causes, pel retard (o histèresi) en la recuperació elàstica del material, fet que desplaça la resultant de la distribució de tensions en el sentit d'avanç del rodolament; amb la repetició dels cicles de càrrega en la zona de contacte es produeix un deteriorament superficial de fatiga consistent en un progressiu despeniment de petites porcions de material de la superfície (desgast per picat). Les forces tan-gencials necessàries per a produir el rodolament són sempre molt inferiors (10÷100 vegades) a les de fricció, motiu pel qual el rodolament s'utilitza en sistemes de guiatge (rodaments, guies lineals) i de transmissió (cargols de boles) d'elevat rendiment.

El frec i els seus efectes

El frec és la resistència al moviment relatiu entre dos cossos que s'exerceixen una força normal mútua a través de la superfície de contacte, i els seus efectes en les màquines es tradueixen en l'aparició de forces tangencials d'acció-reacció en els enllaços i, si hi ha moviment relatiu, en una dissipació d'energia mecànica en forma de calor i en una disminució del rendiment. En l'enllaç puntual, que és el de mobilitat més gran, es poden definir tres tipus de moviment relatiu en: *a) Lliscament*, qualsevol desplaçament segons direccions contingudes en el pla tangent; *b) Rodolament*, gir al voltant de qualsevol eix contingut en el pla tangent que passi pel punt de contacte; *c) Pivotament*, gir segons l'eix perpendicular al pla tangent que passa pel punt de contacte. Els dos primers donen lloc respectivament al *frec per lliscament* i a la *resistència al rodolament* ja definits anteriorment, mentre que el tercer dóna lloc a la *resistència al pivotament*, variant del frec de lliscament, amb una determinada distribució de pressions normals i de velocitats tangencials al voltant de l'eix de gir.

Frec de lliscament

Pot ser: *a) Frec viscos*, quan es forma una capa gruixuda fluïda entre les superfícies (lubricació hidrostàtica, lubricació hidrodinàmica), essent les característiques del lubricant les que en determinen fonamentalment el seu comportament; *b) Frec sec*, quan les superfícies no són lubricades o presenten una lubricació límit (presència de lubricant, però amb contacte material-material), el qual s'acostuma a estudiar per mitjà del model de Coulomb. La resistència al moviment abans d'iniciar-se el lliscament en el frec sec rep el nom d'*adherència* (o *frec estàtic*) i, un cop iniciat el lliscament, *fricció* (o *frec dinàmic*), fenòmens que, suposant que es compleix el model de Coulomb per al frec de lliscament, s'avaluen amb els següents paràmetres: *Límit d'adherència*, valor més alt del quocient entre la força tangencial i la força normal abans d'iniciar-se el moviment; *Coefficient de fricció*, valor d'aquest mateix quocient després d'iniciar-se el lliscament (en general és lleugerament inferior al límit d'adherència).

Resistència al rodolament

La resistència al rodolament pur té lloc amb adherència en el punt de contacte (boles i corrons dels rodaments, rodes de fricció, de tracció), mentre que en altres aplicacions es combina amb el frec per lliscament (lleves, engranatges). La resistència al rodolament s'avalua per mitjà del *coeficient de resistència al rodolament*, quocient entre el moment de rodolament aplicat i la força normal (té dimensions de distància) abans d'iniciar-se el moviment de rodolament (*coeficient de resistència al rodolament estàtic*) i un cop iniciat el moviment de rodolament (*coeficient de resistència al rodolament dinàmic*). En primera una aproximació, es consideren constants per a una parella de materials donats.

Resistència al pivotament

Com ja s'ha comentat, la resistència al pivotament és un fenomen derivat del frec per lliscament i, per tant, no dona lloc a cap nova propietat del material. Atès que en les màquines el pivotament es dona, en general, entre superfícies d'elevada duresa, normalment els seus efectes són petits, tot i que més elevats que els del rodolament.

El desgast i els seus efectes

El desgast és la pèrdua progressiva de material de la superfície d'un cos en contacte amb un altre causada pel moviment relatiu. Té dos efectes perjudicials: el canvi dimensional de les peces (augment dels jocs), i el deteriorament de les qualitats lliscants (augment del coeficient de fricció), o rodolants, de les superfícies.

Desgast per lliscament

Resulta dels següents mecanismes: *a) Adhesió*, per transferència de material d'una superfície a l'altra o per despreniment de partícules, a conseqüència de la formació i l'estripament de microsoldadures; *b) Abrasió*, per deformació plàstica o ratllament, causada per les aspreses de l'altra superfície, o per partícules dures atrapades entre elles o incrustades en l'altra part. Es mesura per: *Índex de desgast*, o volum de material perdut per unitat de superfície (o gruix perdut perpendicularment a la superfície) per unitat de longitud de lliscament relatiu, paràmetre adimensional que pot adquirir valors entre 10^{-12} i 10^{-6} .

Desgast per picat (o fatiga superficial)

Fenomen de fatiga, resultat de la combinació de les pressions de contacte i del moviment de rodolament (eventualment, també de lliscament), que es manifesta pel despreniment de petites partícules de la superfície (picat), procés que progressa fins al deteriorament total de la superfície. Per avaluar la resistència a la fatiga superficial d'un enllaç amb rodolament, es calcula la tensió màxima de contacte obtinguda per mitjà de la teoria de Hertz (funció dels mòduls d'elasticitat dels dos materials, del coeficients de Poisson i dels radis de curvatura mínims de les dues superfícies en el punt de contacte) i es compara amb els valors admissibles de tensió superficial dels materials (quan no es tenen dades precises, s'avaluen a partir de la duresa superficial; en els acers s'accepten valors compresos entre $3\div 5 \cdot \text{HB}$, en MPa). El desgast per picat es presenta en elements de màquines com rodaments, cargols de boles, rodes de fricció, lleves i engranatges. És un deteriorament propi dels metalls, ja que els plàstics presenten prèviament altres deterioraments (deformació plàstica, temperatura de fricció).

Deteriorament per temperatura

En els enllaços sotmesos alhora a pressions i velocitats elevades, la temperatura generada localment per fricció pot conduir a un ràpid deteriorament total de les superfícies de contacte. En els plàstics es produeix un estovament i una deformació superficial que acostuma a ser el principal factor limitador en moltes aplicacions (coixinets, engranatges), mentre que en els metalls es produeix més rarament quan es donen condicions extremes de pressió i velocitat, o per manca de lubricant, i es manifesta amb la ràpida formació i estripament de soldadures macroscòpiques generalitzades, fenomen conegut per *gripatge* (o *excoriació*). En enllaços de revolució amb freqüència de lliscament, les condicions límit de funcionament per evitar aquest deteriorament es donen per mitjà del valor PV_{adm} , resultat del producte de la pressió diametral, $P=F/(D \cdot L)$, per la velocitat de lliscament, $V=\omega \cdot (D/2)$.

11.4 Propietats tecnològiques

Es defineixen com a propietats tecnològiques d'un material aquelles que, sense estar lligades directament a una propietat física o mecànica, combinen una o diverses característiques o qualitats que tenen una important incidència en diverses etapes de la vida de la màquina o del producte, especialment en la fabricació, la utilització i la fi de vida. En aquest text, les propietats tecnològiques s'han agrupat en: *a)* Cost, subministrament i aptitud per a la conformació; *b)* Qualitats amb relació a l'usuari; *c)* Interacció dels materials amb l'entorn.

Cost, subministrament i aptitud per a la conformació

Cost

El cost d'un material s'acostuma a donar en valor monetari per unitat de massa, i la seva minimització sol ser un criteri determinant en la selecció entre diversos materials candidats, sempre que les característiques funcionals i d'ús siguin les adequades. El cost per unitat de volum tan sols s'usa amb finalitat comparativa i és molt influït per la densitat. Cal tenir en compte que el cost d'un material acostuma a variar d'acord amb les formes de subministrament (barres, tubs, perfils, xapes, lingots per a fondre, material granulat, pólvores per a sinterització) i amb les dimensions, toleràncies i estats superficials dels productes semielaborats subministrats (diàmetres, gruixos, dimensions calibrades, acabaments superficials).

Condicions de subministrament

En el moment de la selecció d'un material cal tenir present els condicionants del mercat en el subministrament dels diferents materials candidats, entre els quals es destaquen: *a)* *Formes habituals de subministrament.* Cal tenir present les formes, dimensions, toleràncies, acabaments, tractaments, recobriments i qualitats més habituals de subministrament i, si és possible, adaptar-s'hi; sortir dels estàndards del mercat comporta múltiples inconvenients (sobrecostos, volum mínim de compra, terminis llargs de lliurament) sols justificables en aplicacions especials o per optimitzar grans sèries; *b)* *Garantia de subministrament.* Comprèn dos aspectes: la fiabilitat de les característiques dels materials (composició, propietats, toleràncies de dimensions i formes, aspecte), i l'assegurament del subministrament futur en qualitats i quantitats adequades.

Aptitud per a la conformació o transformació

Cal tenir present les possibilitats de conformació o transformació de cada un dels materials, així com el cost associat, per tal d'aprofitar la sinergia material-procés en dues direccions: *a) Adaptar els processos al material.* Cada material té uns processos que s'adapten millor a les seves característiques i per als quals existeixen màquines eina i utilatges adequats, així com professionals experimentats (*emmotllament*, per a la fosa grisa; *injecció* o *extrusió* per als plàstics; *mecanització* per als metalls; *extrusió* per a l'alumini; *tall*, *doblegament* i *soldadura* per a les xapes i tubs metàl·lics). *b) Adaptar el material a la forma.* Sovint, segons el tipus de forma que es vol donar, és convenient elegir el material que s'adapti a un procés que pugui proporcionar-la-hi. En l'avaluació de les aptituds per a la conformació cal tenir presents les operacions associades (adreçament de xapes, tractaments tèrmics) i les d'acabament (desbarbatge, poliments, pintures i recobriments).

Qualitats amb relació a l'usuari

Molts dels materials que intervenen en el disseny de màquines tenen una relació directa amb l'usuari, i les qualitats que els fan aptes o no per a aquesta relació (combinacions de propietats no sempre quantificables) són sovint decisives en la selecció, generalment com a condicionants previs. Les principals qualitats que cal tenir en compte en relació amb l'usuari fan referència fonamentalment als aspectes estètics (sensacions relacionades amb la vista), al confort (sensacions relacionades amb el tacte, l'oïda i l'olfacte), a la compatibilitat sanitària i a la seguretat.

Aspectes estètics (sensacions relacionades amb la vista)

Els aspectes estètics són probablement els que pesen més en la selecció dels materials en relació a l'usuari, ja que incideixen en la primera percepció que n'obté. Entre aquests aspectes destaquen: *a) Possibilitats d'acoloriment.* Determinats plàstics i elastòmers poden adquirir, per addició de pigments, una àmplia gamma de colors en tota la seva massa (les ratllades o escrostonaments no afecten la coloració); altres materials, com l'alumini, poden acolorir-se de forma superficial en el procés d'anodització; la pràctica totalitat dels materials poden acolorir-se (i generalment també protegir-se de l'agressió exterior) per mitjà de pintures o altres recobriments superficials (zincatge, aluminiatge, cromatge, niquelatge), però el seu deteriorament comporta un desmillorament de l'aspecte del material.

b) Obtenció de textures i reflexos. Aquest és un aspecte complementari que acostuma a incidir molt en la selecció de determinats materials que formen l'exterior (carcasses, tapes) o elements visibles (interiors, parts desmuntables) de les màquines o dels productes. *c) Incidència del deteriorament.* En la major part d'aplicacions, el manteniment de l'aspecte inicial del material en el transcurs del temps és un factor molt positiu en la tria d'un material (carcassa d'electrodomèstics, maquinària per a l'alimentació); en d'altres casos, determinats deterioraments controlats són admesos (certa corrosió en estructures metàl·liques, la *pàatina* dels objectes antics de bronze). Quan són necessàries operacions d'acabament (neteja, poliment), o l'aplicació de recobriments superficials (pintura, anodització, cromatge), cal avaluar el cost total (material més tots els processos) a fi d'establir una correcta comparació entre alternatives.

Confort (sensacions relacionades amb el tacte, l'oïda o l'olfacte)

Les qualitats que proporcionen confort constitueixen també factors primordials en la selecció dels materials, entre les quals destaquen les relacionades amb el tacte: *a) Sensació de finor, d'aspror.* Alguns materials són de tacte fi, mentre que d'altres són de tacte aspre; *b) Sensacions tèrmiques.* Determinats materials (fusta, plàstics, de conductivitat tèrmica baixa) donen sensació de temperament (no cremen ni gelen amb el tacte; mànecs de fusta; nanses de plàstic), mentre que d'altres materials (els metalls i les ceràmiques de conductivitat tèrmica elevada) donen sensació de fred o calent (taules de marbre; objectes metàl·lics); *c) Sensació de pesantor, de consistència.* Per mitjà de l'esforç muscular, l'usuari percep la sensació de pesantor (materials fèrrics, aliatges del coure, de densitat elevada) o de lleugeresa (aluminis, plàstics, elastòmers, de densitat baixa), i la sensació de consistència (metalls, de mòdul d'elasticitat elevat) o de flexibilitat (determinats plàstics, elastòmers). Dintre de l'apartat de confort també s'hi pot incloure: *d) Sensació de sorollositat.* Determinats materials propaguen fàcilment el so (metalls, especialment l'alumini), mentre que d'altres l'aïllen (plàstics, elastòmers i, especialment, els materials expandits); per exemple, els fabricants d'automòbils esmercen importants esforços per tal que les portes dels vehicles facin un soroll "noble" en tancar-se; *e) Sensacions olfactivas.* Determinats materials (especialment els orgànics) poden desprendre olors que els fan no aptes per a determinades aplicacions.

Compatibilitat sanitària

Els materials que entren en contacte amb aliments o amb els teixits vius han d'oferir determinades qualitats específiques: *a) Compatibilitat amb els aliments.* Aquest aspecte té una gran importància en la indústria alimentària (dispositius de

manipulació, dipòsits de productes i aliments, forns de cocció i maquinària de procés en general) i en la indústria de l'envasament (*PE*, per a pel·lícules i envasos; *PVC* i *PET*, per a ampolles i envasos de begudes; *llauna*, per a conserves). *b) Compatibilitat amb els teixits vius*. Aspecte de gran incidència en la fabricació d'aparells mèdics i quirúrgics i, de forma especial, en el disseny i fabricació d'endopròtesis que han de mantenir un contacte íntim amb teixits vius durant períodes prolongats (aliatges especials de titani, determinats plàstics).

Seguretat

La seguretat en les màquines i aparells cada dia adquireix una importància més gran, sancionada per la norma europea EN 292-1 (*Seguretat de les màquines*) apareguda el setembre de 1991. Els materials participen de múltiples formes en la seguretat, entre les quals hi ha: *a) Seguretat contra ruptures*. La ruptura de peces i elements constitueix sempre un perill potencial en les màquines; una de les formes més perilloses és la ruptura fràgil (o catastròfica, ja que es produeix de forma sobtada i total, sense previ avís); la ruptura per fatiga també participa d'aquestes característiques, amb l'agreujaent pel fet que es produeix per a tensions (repetides) relativament baixes. Sovint, doncs, un factor de gran importància en la selecció dels materials en elements vitals de les màquines (direccions, suspensions de vehicles) és la seva tenacitat i resistència a la fatiga. *b) Seguretat contra incendis*. Molts polímers poden inflamar-se i propagar el foc amb més o menys facilitat (limitació especialment important en la selecció de plàstics i elastòmers), fet que pot agreujar-se pel desprendiment de gasos tòxics (especialment en els plàstics i els elastòmers clorats). Amb relació als incendis (o a l'exposició a altes temperatures) també cal tenir present la falta de consistència o la pèrdua de propietats mecàniques que poden experimentar els materials (tant els polímers com els metalls), i les conseqüències que aquest fet pot tenir respecte a l'estabilitat de les estructures i al funcionament de les màquines. *c) Seguretat contra electrocucions*. Cal utilitzar materials aïllants en contacte amb els usuaris (plàstics i elastòmers en lloc de metalls); *d) Seguretat contra cremades*. Cal també evitar el contacte de materials molt conductors de la calor amb l'usuari, especialment quan estan pròxims a zones de temperatura elevada (novament, cal utilitzar els plàstics i els elastòmers enlloc de metalls), tot tenint en compte els aspectes analitzats en el paràgraf de seguretat contra incendis.

Interacció dels materials amb l'entorn

En un major o menor grau, tots els materials experimenten una doble interacció (o agressió mútua) amb el medi que els envolta, que dóna lloc a dos fenòmens diferents de gran importància: *a) Deteriorament dels materials*, quan l'atenció se centra en l'agressió (més o menys lenta) del medi ambient vers els diversos materials que componen les màquines o els productes, i comprèn diversos tipus de danys com és ara la corrosió en els metalls, l'oxidació de les ceràmiques o l'envelliment dels plàstics i els elastòmers. *b) Impacte ambiental*, quan l'agressió es produeix en sentit contrari, des dels materials, les màquines o els productes vers el medi ambient, i dóna lloc a diferents tipus de contaminació nociva per a la vida de l'home, de les plantes i dels animals.

El deteriorament dels materials és un procés destructiu que comporta una enorme pèrdua econòmica per al sistema productiu (alguns autors avaluen els costos derivats del deteriorament dels materials, és a dir, la seva prevenció, manteniment i reposició, en un 5% de l'economia dels països industrialitzats). Per tant, és natural que s'hagi desenvolupat un enorme esforç tècnic i econòmic per procurar prevenir aquesta agressió.

Tot i que l'efecte invers (l'impacte ambiental) existeix des de temps històrics, en els darrers anys ha adquirit proporcions crítiques a causa de la creixent utilització de recursos sense avaluar-ne les conseqüències. Els efectes econòmics derivats (probablement superiors al 5% avaluat per al deteriorament dels materials) tradicionalment han revertit fora del sistema productiu, majoritàriament sobre la col·lectivitat. No ha estat fins recentment que les administracions, pressionades per la nova consciència ciutadana, han iniciat polítiques tendents a controlar els impactes ambientals (especialment en la indústria química, en l'automòbil i en els envasos). La selecció de materials per al disseny de màquines es troba plenament afectada per aquest canvi i ha d'adoptar nous punts de vista.

Deteriorament dels materials

Cada família de materials experimenta un tipus de deteriorament diferent que serà estudiat amb més gran deteniment en els capítols corresponents; tanmateix, se'n fa una breu descripció:

Corrosió dels metalls

Els principals tipus de deteriorament dels metalls són l'atac electroquímic amb pèrdua de material (*corrosió*) o la transformació de les capes superficials en compostos no metàl·lics (*oxidació*). No tots els metalls experimenten el mateix grau de deteriorament, per la qual cosa la resistència a la corrosió és un dels factors determinants en la selecció d'un metall.

Envelliment dels polímers

Els polímers sofreixen diversos tipus de deteriorament fruit de l'atac ambiental, com poden ser la pèrdua de material o d'algun dels seus components (plastificants) per dissolució o contacte amb determinades substàncies, l'inflament per absorció d'altres substàncies (aigua, oli) o l'alteració de l'estructura molecular causada per la combinació d'oxidació i de radiacions ultraviolades i/o per la temperatura (envelliment).

Corrosió a altes temperatures de les ceràmiques

Els materials ceràmics presenten una gran resistència al deteriorament per atac del medi ambient, i sols experimenten *corrosió* a altes temperatures.

Impacte ambiental

En aquest apartat s'estudia l'agressió contrària, o sigui, l'impacte dels materials sobre el medi ambient, en tres etapes ben diferenciades: *a)* La fabricació i transformació dels materials (emissions contaminants, producció de residus sòlids i líquids, consums d'energia); *b)* La utilització de màquines i productes que incorporen aquests materials (diversos impactes ambientals, consums d'energia); *c)* La fi de vida (possibles impactes ambientals en l'eliminació, possibilitats de reciclatge).

Fabricació: impactes ambientals i consum d'energia

Els *impactes ambientals* derivats de determinats processos de fabricació han obligat a disminuir (o eliminar) l'ús de determinats materials o determinats tractaments dels materials (el recobriment de *cadmiatge* en els cargols pràcticament ha estat eliminat a causa de la contaminació que provoca). La preocupació pel medi ambient obliga no tan sols a desestimar els materials i els processos més contaminants, sinó a incidir contínuament en la millora d'altres processos amb impactes inferiors.

El *consum d'energia* dels materials en la seva fase de fabricació i transformació (Taula 11.3) és també un altre aspecte que ha anat adquirint importància tecnològica i social, amb una repercussió directa sobre el disseny de màquines i productes, ja sigui a través del cost del material, ja sigui condicionant els processos d'obtenció o la seva disponibilitat en el mercat. Alguns materials (per exemple l'alumini) requereixen una gran quantitat d'energia per a la seva fabricació que sols es justifica quan posteriorment es produeixen economies en el consum (l'ús de l'alumini en els vehicles estalvia consum de combustible, mentre que aquesta justificació no existeix en la construcció). També és interessant destacar el menor cost energètic dels materials reciclats respecte als de primera obtenció (el cost

energètic de l'alumini reciclat és molt més baix que el de primera fabricació; sembla, doncs, inadmissible l'eliminació de tonelles d'alumini a través d'envasos de begudes no reciclables).

Taula 11.3 **Energia de primera fabricació i reciclatge dels materials**

Material	Primera fabricació		Reciclatge
	MJ/kg	GJ/m ³	kJ/kg
Magnesi	420	750	
Alumini	305	820	9÷18
Coure	105	900	2÷22
Acer	55	420	
Acer inoxidable	115	900	
Poliamida	175	200	
Polietilè	100	90	
Polipropilè	110	100	
PVC	80	115	
Cautxú natural	6	5,5	
Cautxú sintètic	130	118	
Compòsit fibra vidre	105	190	

Utilització: impactes ambientals i consum d'energia

Els *impactes ambientals* durant l'etapa d'utilització de les màquines i aparells poden provenir fonamentalment de tres causes: *a) Contaminació directa*, causada pel contacte directe del material sobre el medi ambient (els materials estructurals tenen, en general, un baix impacte ambiental directe, però no s'esdevé el mateix amb determinades pintures i recobriments, o amb els lubricants i altres fluids utilitzats per les màquines); *b) Contaminació fortuïta*, causada per accidents o males utilitzacions (per exemple: la combustió dels plàstics i els elastòmers clorats); *c) Contaminació per consum d'energia*, aspecte que s'amplia a continuació.

El *consum d'energia* durant la utilització de les màquines i productes pot ser minorat o eliminat, entre d'altres factors, per mitjà d'una utilització dels materials correcta: *a) Materials de baixa densitat*, aspecte de gran importància en vehicles (incideix de forma destacada en l'estalvi de combustible) o en màquines i dispositius de manipulació (ascensors, cintes transportadores, manipuladors); *b)*

Millora del rendiment en els enllaços. En moltes màquines, un alt rendiment en els sistemes de guiatge i en les transmissions evita importants consums d'energia innecessaris (per exemple: l'apariament correcte de materials en una articulació disminueix la fricció, augmenta el rendiment i evita escalfaments excessius).

Fi de vida: eliminació, reciclatge i reutilització

L'*eliminació* és la forma menys recomanable de produir-se la fi de vida; consisteix en l'abocament dels productes en llocs adequats (en general, després d'una compactació prèvia) o en la combustió (amb recuperació o sense d'energia). Comporta la pèrdua dels materials, de tota o part de l'energia invertida en la fabricació i, a més, se'n deriven impactes ambientals importants (paisatgístics i producció de lixiviats contaminants, en el cas de l'abocament; cendres residuals i contaminació atmosfèrica, en el cas de la incineració).

El *reciclatge* consisteix en la recuperació dels materials de les peces i components dels aparells i màquines per tornar-los a posar en circulació (per desgràcia, sovint en una forma més degradada); d'aquesta manera també es recupera una part significativa de l'energia invertida en la seva fabricació. El reciclatge dels metalls acostuma a ser relativament simple i econòmic, mentre que el dels plàstics i elastòmers esdevé una tasca molt més complexa i antieconòmica. Els reptes principals per a possibilitar un reciclatge rendible són la identificació dels materials (necessitat de marcar les peces de més de 100 g, especialment les de plàstic i d'elastòmer) i la seva separació i concentració, dificultats que es veuen incrementades per la multiplicitat de famílies de materials, les mescles, els aliatges i els materials compostos.

La *reutilització* consisteix a recuperar màquines i productes fora d'ús (o les seves parts) i donar-los noves aplicacions (reparació de components de vehicles, per a recanvis; utilització d'envasos retornables; aplicació de pneumàtics vells com a cobertura en l'agricultura). Aquest sistema de fi de vida no incideix directament sobre els materials.

Tot i que el reciclatge i la reutilització de les màquines i productes són filosofies preferibles, els processos d'eliminació (abocament i incineració) continuen essent encara els sistemes usats majoritàriament. El problema de la *fi de vida* difícilment podrà tenir una solució satisfactòria si no es reconsideren les màquines i els productes des del disseny, tot tenint present com un dels factors determinants la incidència dels materials en els impactes ambientals i energètics posteriors (fabricació, utilització i fi de vida). La indústria de l'automòbil i de l'envasament, estretament marcades per les administracions a causa del gran impacte ambiental que generen, han començat a aplicar nous criteris en la selecció de materials que obren un llarg camí que hauran de recórrer els restants sectors industrials.

11.5 Magnituds característiques

Concepte de magnitud característica

La comparació dels valors d'una propietat significativa és d'una gran utilitat en la selecció del material adequat per a una determinada aplicació. Per exemple, si s'analitza l'aptitud per a resistir un esforç estàtic de tracció sense experimentar deformacions plàstiques, és adequat de comparar el límit elàstic dels diversos materials candidats. Així, doncs, un acer de límit elàstic $R_e=350$ MPa sembla més adequat que un alumini de límit elàstic $R_e=170$ MPa. Tanmateix, si es compara l'aptitud d'aquests mateixos materials per resistir un esforç estàtic de tracció prenent com a referència una determinada massa de material, aleshores el resultat pot ser diferent. En efecte, l'alumini és unes tres vegades menys dens que l'acer i, per a una determinada massa, la secció resistent podrà ser tres vegades més gran. En aquest cas, cal comparar la *magnitud característica* R/ρ (quocient entre el límit elàstic, R_e , i la densitat, ρ) que rep el nom de *resistència a la tracció a massa constant*. Es defineix, doncs:

Magnitud característica.

Combinació algebraica de les magnituds d'una o més propietats, significativa de l'aptitud de diversos materials candidats per a respondre a un determinat requeriment complex. Alguns exemples poden ser:

Resistència a tracció a massa constant

Energia tèrmica acumulada amb temps i temperatura fixades

Conductivitat elèctrica a cost constant

Alguns textos de càlcul de màquines utilitzen relacions entre magnituds per comparar la resistència o la rigidesa específiques dels materials (o sigui, amb relació a la densitat) amb l'objectiu d'alleugerir les màquines o vehicles. Més recentment, diversos autors [Crane-1984, Ashby-1992] han adoptat explícitament el concepte de magnitud característica (tot i que sota altres noms) com a eina quantitativa de caràcter general per a la selecció de materials. Ashby, a més, proposa uns gràfics ("material selection charts") on representa la relació entre dues magnituds característiques ("performance indice") en escales logarítmiques, els quals ofereixen una interessant visió de les possibilitats de les diferents famílies de materials. Tanmateix, quan es tracten noves aplicacions i nous materials cal una construcció laboriosa de nous gràfics.

La selecció quantitativa de materials basada en les magnituds característiques resulta més flexible a la pràctica, ja que permet l'adaptació a qual-sevol problema sense la construcció de nous gràfics. A continuació s'ofereix el desenvolupament d'un exemple complet, tot exposant la deducció de les expressions de les magnituds característiques i comparant els seus valors per a diverses funcions i diversos materials candidats.

Com a limitació de la selecció de materials per mitjà de mètodes quantitius cal fer notar que algunes propietats difícilment quantificables dels materials (aspecte, facilitat de subministrament, resistència a la corrosió) són sovint determinants en la seva selecció. Així, doncs, la comparació de magnituds característiques sols proporciona criteris útils de selecció quan la resta de propietats que incideixen en l'aplicació són equiparables.

Exemple d'aplicació

Es proposa comparar dos materials (aliatge d'Al 2017-T4, L-3120 UNE 38.312; acer 34CrNiMo6 UNE EN-10083) per a determinades aplicacions a vehicles (automòbil, avions). A tal fi s'analitzen les següents magnituds característiques: *Resistència a tracció/compressió*; *Rigidesa a tracció/compressió*; *Resistència a flexió*; *Rigidesa a flexió*; cada una d'elles a *massa*, *volum* i *cost* constants.

Deducció de les magnituds característiques

Resistència a tracció/compressió

Es considera una barra de longitud L i secció A sotmesa a la força màxima de tracció admissible, $F=A \cdot R_e$ (R_e , límit elàstic), essent el pes de la barra, $P=A \cdot L \cdot \rho$ (ρ , densitat del material). Les expressions del pes, P , el volum, V , i el cost, C (C_u , cost per unitat de massa), de les barres (les seccions són diferents) que resisteixen la força F sense que el material superi el seu límit elàstic són:

$$P = (F \cdot L) \cdot [\rho / R_e]$$

$$V = (F \cdot L) \cdot [1 / R_e]$$

$$C = (F \cdot L) \cdot [\rho \cdot C_u / R_e]$$

Els primers factors (entre parèntesis) depenen dels esforços aplicats i de la geometria de la barra (paràmetres independents del material), mentre que els segons factors (entre claudàtors), depenen exclusivament de les propietats del

material. El pes, volum i cost necessaris per assegurar la resistència a tracció/-compressió de cada un dels materials candidats són proporcionals als respectius valors de les tres *magnituds característiques* següents:

$$\begin{array}{ll} \text{Resistència a tracció/compressió a pes constant} & \Gamma_{TTP} = \rho/R_e \\ \text{Resistència a tracció/compressió a volum const.} & \Gamma_{TTV} = 1/R_e \\ \text{Resistència a tracció/compressió a cost const.} & \Gamma_{TTC} = \rho \cdot C_u/R_e \end{array}$$

Rigidesa a tracció/compressió

Es considera una barra de longitud L i secció A sotmesa a una força de tracció F que, en funció del mòdul d'elasticitat E del material, produeix un allargament δ , tal com estableix la llei de Hooke: $F/A = E \cdot (\delta/L)$, essent el pes de la barra: $P = A \cdot L \cdot \rho$. Les expressions del pes, P , volum, V , i cost, C , de les barres (les seccions són diferents) amb la mateixa rigidesa a tracció/compressió són:

$$\begin{array}{l} P = (F \cdot L^2 / \delta) \cdot [\rho / E] \\ V = (F \cdot L^2 / \delta) \cdot [1 / E] \\ C = (F \cdot L^2 / \delta) \cdot [\rho \cdot C_u / E] \end{array}$$

Els primers factors (entre parèntesis) depenen dels esforços, de l'allargament i de la geometria de la barra (paràmetres independents del material), mentre que els segons factors (entre claudàtors) depenen sols de les propietats del material. El pes, el volum i el cost necessaris per assegurar la mateixa rigidesa a tracció/compressió de cada un dels materials candidats són proporcionals als respectius valors de les tres *magnituds característiques* següents:

$$\begin{array}{ll} \text{Rigidesa a tracció/compressió a pes constant} & \Gamma_{RTP} = \rho / E \\ \text{Rigidesa a tracció/compressió a volum constant} & \Gamma_{RTV} = 1 / E \\ \text{Rigidesa a tracció/compressió a cost constant} & \Gamma_{RTC} = \rho \cdot C_u / E \end{array}$$

Resistència a flexió

Es considera una barra de longitud L i secció A sotmesa al màxim moment flector admissible M_f sense que el material superi el límit elàstic, R_e (W_f , moment resistent de la secció de la barra):

$$M_f = W_f \cdot R_e$$

Si es consideren barres de seccions geomètricament semblants, es pot establir una relació entre el moment resistent i la secció A de la barra (k_x , factor geomètric comú a tots els perfils semblants): $W_f = A^{3/2}/k_x$. Sabent que el pes és $P = A \cdot L \cdot \rho$, i introduint les expressions anteriors en aquesta darrera, es pot establir el pes P , el volum V i el cost C necessaris perquè la barra resisteixi el moment M_f sense que el material superi el seu límit elàstic:

$$\begin{aligned} P &= ((M_f \cdot k_x)^{2/3} \cdot L) \cdot [\rho / R_e^{2/3}] \\ V &= ((M_f \cdot k_x)^{2/3} \cdot L) \cdot [1 / R_e^{2/3}] \\ C &= ((M_f \cdot k_x)^{2/3} \cdot L) \cdot [\rho \cdot C_u / R_e^{2/3}] \end{aligned}$$

Els primers factors (entre parèntesis) depenen dels esforços aplicats i de la geometria de la barra (paràmetres independents del material), mentre que els segons factors (entre claudàtors) depenen de les propietats del material. El pes, el volum i el cost necessaris per a assegurar la resistència a flexió de cada un dels materials candidats són proporcionals als respectius valors de les tres *magnituds característiques*:

<i>Resistència a flexió a pes constant</i>	$R_{TFP} = \rho / R_e^{2/3}$
<i>Resistència a flexió a volum constant</i>	$R_{TFV} = 1 / R_e^{2/3}$
<i>Resistència a flexió a cost constant</i>	$R_{TFC} = \rho \cdot C_u / R_e^{2/3}$

Rigidesa a flexió

La fletxa lateral δ que experimenta una barra de longitud L i secció A sotmesa a un moment flector M_f s'expressa de forma genèrica per:

$$\delta = k_f \cdot (M_f \cdot L^2 / (E \cdot I))$$

(E és el mòdul d'elasticitat del material, I el moment d'inèrcia de la secció, i k_f un factor geomètric que té en compte els punts d'aplicació de les forces que produeixen el moment flector M_f).

Per altre cantó, per a seccions geomètricament semblants es dona la relació: $I = K_i \cdot A^2$, (K_i factor geomètric). Sabent que el pes és $P = A \cdot L \cdot \rho$, i introduint les primeres expressions en aquesta darrera, es pot establir el pes, P , el volum, V , i cost, C , necessaris perquè el moment M_f provoqui una fletxa lateral de la barra de valor δ :

$$\begin{aligned} P &= ((K_f \cdot k_i) \cdot (M_f \cdot L^4 / \delta))^{1/2} \cdot [\rho / E^{1/2}] \\ V &= ((K_f \cdot k_i) \cdot (M_f \cdot L^4 / \delta))^{1/2} \cdot [1 / E^{1/2}] \\ C &= ((K_f \cdot k_i) \cdot (M_f \cdot L^4 / \delta))^{1/2} \cdot [\rho \cdot C_u / E^{1/2}] \end{aligned}$$

Els primers factors (entre parèntesis) depenen dels esforços aplicats, de la fletxa, i de la geometria de la barra (paràmetres independents del material), mentre que els segons factors (entre claudàtors) depenen de les propietats del material. El pes, el volum i el cost necessaris per a assegurar la mateixa rigidesa a flexió de cada un dels materials candidats són proporcionals als respectius valors de les tres *magnituds característiques* següents:

Rigidesa a flexió a pes constant

$$\Gamma_{RFP} = \rho/E^{1/2}$$

Rigidesa a flexió a volum constant

$$\Gamma_{RFV} = 1/E^{1/2}$$

Rigidesa a flexió a cost constant

$$\Gamma_{RFC} = \rho \cdot C_u/E^{1/2}$$

Interpretació de resultats

A partir de les definicions anteriors i aplicant valors dels dos materials candidats, es poden extreure les següents conclusions:

1. L'acer sempre resulta molt més barat que l'aliatge d'alumini. En el cas més igualat (*rigidesa a flexió*), l'acer costa menys de la meitat que l'alumini (41%) mentre que, en el cas més extrem (*resistència a tracció/compressió*), costa tan sols una cinquena part (20%).
2. L'acer sempre resulta menys voluminós que l'aliatge d'alumini. En el cas més igualat (*rigidesa a flexió*), l'acer ocupa una mica més de la meitat del que ocupa l'alumini (59%) mentre que, en el cas més extrem (*resistència a tracció/compressió*), ocupa tan sols una mica més de la quarta part (28%).
3. Amb relació al pes, l'acer i l'alumini es reparteixen els papers. L'acer és millor a *resistència a tracció/compressió* (80% del pes de l'alumini), està igualat a *rigidesa a tracció/compressió* (99% del pes de l'alumini), però és desfavorable tant a *resistència a flexió* com a *rigidesa a flexió* (122% i 167% del pes de l'alumini, respectivament).

Per tant, en aplicacions on sigui crític el cost (automòbil) o el volum (tren d'aterratge d'avió), l'acer és el candidat millor situat, mentre que en aplicacions on sigui crític el pes (avió, tenda de campanya), el millor candidat pels elements sotmesos a flexió és l'alumini i per als elements sotmesos a tracció és l'acer. Aquesta és la solució adoptada en la construcció dels avions ultralleugers (perfil d'alumini i cables d'acer).

Taula 11.4 Comparació de magnituds característiques

Propietats dels materials

Propietats	Unitats	Alumini 2017-T4		Acer 34CrNiMo6	
		Valor	A=100	valor	Al=100
Densitat	Mg/m ³	2,79	100	7,84	281
Límit elàstic	MPa	285	100	1000	351
Mòdul d'elasticitat	GPa	74	100	210	284
Cost unitari	pta/kg	725	100	180	25

a) Resistència a la tracció/compressió

Magnituds característiques	Unitats	Alumini 2017-T4		Acer 34CrNiMo6	
		valor	Al=100	valor	Al=100
$\Gamma_{TTP} = \rho/R_e$	Mg/m ³ ·MPa	0,0098	100	0,0078	80
$\Gamma_{TTV} = 1/R_e$	MPa ⁻¹	0,0035	100	0,0010	28
$\Gamma_{TTC} = \rho \cdot C_u/R_e$	kpta/m ³ ·MPa	7,079	100	1,411	20

b) Rigidesa a la tracció/compressió

Magnituds característiques	Unitats	Alumini 2017-T4		Acer 34CrNiMo6	
		valor	Al=100	valor	Al=100
$\Gamma_{RTP} = \rho/E$	Mg/m ³ ·GPa	0,0377	100	0,0373	99
$\Gamma_{RTV} = 1/E$	GPa ⁻¹	0,0135	100	0,0048	35
$\Gamma_{RTC} = \rho \cdot C_u/E$	kpta/m ³ ·GPa	27,33	100	6,72	25

c) Resistència a la flexió

Magnituds característiques	Unitats	Alumini 2017-T4		Acer 34CrNiMo6	
		valor	Al=100	valor	Al=100
$\Gamma_{TFP} = \rho/R_e^{2/3}$	Mg/m ³ ·MPa ^{2/3}	0,0069	100	0,0078	122
$\Gamma_{TFV} = 1/R_e^{2/3}$	MPa ^{-2/3}	0,0231	100	0,0100	43
$\Gamma_{TEC} = \rho \cdot C_u/R_e^{2/3}$	kpta/m ³ ·MPa ^{2/3}	46,71	100	14,11	30

d) Rigidesa a la flexió

Magnituds característiques	Unitats	Alumini 2017-T4		Acer 34CrNiMo6	
		valor	Al=100	valor	Al=100
$\Gamma_{RFP} = \rho/E^{1/2}$	Mg/m ³ ·GPa ^{1/2}	0,3243	100	0,5417	167
$\Gamma_{RFV} = 1/E^{1/2}$	GPa ^{-1/2}	0,1162	100	0,0690	59
$\Gamma_{RFC} = \rho \cdot C_u/E^{1/2}$	kpta/m ³ ·GPa ^{1/2}	235,14	100	97,38	41

12 Metalls. Acers i foses

12.1 Introducció als metalls

Els materials metàl·lics i, entre ells, els materials fèrrics, constitueixen el grup més important de materials en el disseny i la fabricació de màquines. Les característiques més destacades són: *a)* Excel·lents propietats mecàniques (resistència, rigidesa, enfront dels polímers; i tenacitat, enfront de les ceràmiques); *b)* Bona conductivitat elèctrica i de la calor; *c)* Molt bones característiques per a la conformació (molt particularment per deformació plàstica); *d)* La possibilitat de modificar les propietats mecàniques per mitjà de deformació plàstica en fred (treball en fred) o de tractaments tèrmics. Aquestes dues darreres característiques s'analitzen en els propers apartats.

Els metalls més usats en el disseny de màquines són:

Materials fèrrics (Fe): els acers, de molt bones característiques mecàniques, i les foses, de fàcil emmotllament, tots ells de cost moderat però molt densos i vulnerables a la corrosió; i els acers inoxidable, resistent a la corrosió, de cost molt més elevat.

Aliatges de l'alumini (Al), molt lleugers i resistent a la corrosió, però de característiques mecàniques més moderades i preu més elevat.

Aliatges del coure (Cu) (Cu comercial, bronzes i llautons), excel·lents conductors elèctrics i de la calor, resistent a la corrosió i de característiques mecàniques intermèdies, però molt densos i de cost elevat.

També tenen utilitat en el disseny de màquines, tot i que en proporcions més limitades: els *aliatges del zinc* (Zn), pel baix punt de fusió i fàcil emmotllament; els *aliatges del magnesi* (Mg), per la baixíssima densitat; els *aliatges del titani* (Ti), per la relativa lleugeresa, bones característiques mecàniques i resistència a la corrosió, però de cost molt elevat; i els *aliatges de níquel* (Ni), per la gran resistència a la corrosió combinada amb les bones característiques mecàniques, també de cost molt elevat.

Abans d'analitzar les propietats dels materials metàl·lics, sembla oportú d'estudiar tres aspectes, determinants en moltes aplicacions, en què els metalls presenten un comportament específic diferenciat de les altres famílies de materials: a) *Deformació plàstica en fred*; b) *Tractaments tèrmics*; c) *Corrosió i la seva prevenció*.

Respecte als dos primers punts, el *diagrama de fases* d'un determinat aliatge metàl·lic posa de manifest les diferents fases que, tenint en compte la composició i de la temperatura, poden obtenir-se en condicions d'equilibri. Tanmateix, són altres aspectes mecànics o metal·lúrgics (processos de deformació plàstica en fred, o tractaments tèrmics, realitzats fora de les condicions d'equilibri) els que determinen les microestructures (dimensió, forma, distribució i orientació dels grans de les diferents fases) i que, en definitiva, modulen les propietats mecàniques del material.

Respecte al tercer punt, cal assenyalar que els metalls experimenten un tipus de deteriorament específic, la *corrosió*, relacionada en gran mesura amb la seva qualitat de materials conductors (efectes galvànics), que mereix també una anàlisi específica i un estudi de les formes de prevenció.

Deformació plàstica en fred

La deformació plàstica en fred és probablement l'aspecte que més diferencia el comportament dels metalls respecte a d'altres materials. Té dos efectes importants: permet millorar les característiques mecàniques del material, i facilita diversos processos característics de conformació en fred (laminació, extrusió, estampació, plegament, corbament, embotició).

Mecanisme de deformació plàstica en fred

Quan un metall és sotmès a una tensió superior al seu límit elàstic, es produeix un petit allargament irreversible, o deformació plàstica. Un nou augment de la tensió produeix un nou allargament, i així la deformació plàstica pot continuar el procés fins que el material exhaureix la seva capacitat de deformació i experimenta la ruptura.

L'allargament té lloc a través d'uns petits lliscaments entre plans de màxima densitat atòmica de la retícula cristal·lina del metall. L'estructura cúbica centrada a les cares, f.c.c., té 12 plans de lliscament i proporciona una gran ductilitat (Al, Cu); l'estructura hexagonal, c.p.h., té tan sols 3 plans de lliscament i, per tant, proporciona una baixa ductilitat (Mg, Ti, Co); finalment, l'estructura cúbica centrada en el cos, b.c.c., es troba en una situació intermèdia (Fe α , Mo, W).

Les tensions necessàries per a produir aquests petits lliscaments en un metall, calculades a partir de les forces dels enllaços atòmics, són de 100 a 1000 vegades més altes que les que corresponen al límit elàstic. És per això que el model avui dia acceptat per a explicar la deformació plàstica parteix de l'existència de múltiples *dislocacions* (defectes en la regularitat de la retícula) que poden propagar-se pas a pas (moviment d'eruga) amb una tensió considerablement inferior a la calculada.

La propagació de les dislocacions pot aturar-se per diversos tipus de barrera: límits de gra (on hi ha un canvi d'orientació de la retícula); defectes localitzats (vacants en la retícula, partícules de substitució o intersticials); confluència amb d'altres dislocacions. En cada nova deformació plàstica, la propagació de les dislocacions es produeix segons orientacions i condicions menys favorables, fins que arriba un moment que la tensió necessària per a una nova dislocació és més alta que la de les fissures inestables, i aleshores es produeix la ruptura fràgil.

Treball en fred (acritud)

A mesura que un metall va acumulant deformació plàstica en fred, augmenta la seva resistència i duresa, mentre que disminueix la seva ductilitat i tenacitat. Els productes treballats en fred tenen unes propietats mecàniques millorades i una bona precisió dimensional (si el treball mecànic ha estat excessiu, però, el material pot esdevenir massa fràgil).

Tractaments tèrmics

Conjunt de processos aplicats als aliatges metàl·lics, que es realitzen per mitjà del control de les velocitats d'escalfament, de refredament i del temps de permanència a diferents temperatures (en alguns casos en medis o atmosferes determinades), que tenen per objecte obtenir o controlar la naturalesa, quantitat, dimensió, forma, distribució i orientació de les fases i, en determinades ocasions, controlar o modificar l'estat de tensions internes del material.

Els principals tractaments tèrmics són la *recuita* i l'*enduriment per precipitació*. En els materials fèrrics s'apliquen també la *transformació martensítica* i els tractaments superficials d'*enduriment per difusió*.

Cal dir que els tractaments tèrmics originen un important increment de preu que sovint duplica el cost del material. Per tant, sols és recomanable aplicar-los quan les solucions alternatives no són adequades o comporten unes dimensions excessives de les peces.

Recuita

Tractament tèrmic que permet retornar l'estructura distorsionada d'un metall, causada per una deformació plàstica en fred prèvia, a un estat lliure de tensions i amb la ductilitat original. El procés de recuita presenta tres fases: *reducció de la distorsió*, *recristal·lització* i *creixement del gra*. Segons que el procés avanci més o menys, rep diferents noms i té diferents objectius.

Recuita d'alliberament de tensions. Tractament tèrmic a baixa temperatura que no produeix canvis en la microestructura del metall, però que allibera tensions d'una estructura prèviament distorsionada. Aquesta operació és molt important després de processos tèrmics que hagin pogut originar tensions internes en el material (grans deformacions plàstiques, determinats tractaments tèrmics, soldadura).

Recuita de regeneració. Si la temperatura augmenta fins a la de recristal·lització, en les zones de més gran distorsió es nucleen nous cristalls lliures de tensions, que creixen fins a trobar els grans veïns. Si es controla la temperatura, el temps de permanència i la velocitat de refredament, es pot obtenir una estructura de gra fi i uniforme que presenta molt bones característiques mecàniques. La *normalització* dels acers és, de fet, una recuita de regeneració realitzada amb un refredament en aire quiet.

Recuita total. Si després de la nucleació de nous grans es manté la temperatura de recuita durant un temps prolongat, s'obté una estructura de grans de molta grandària (per absorció dels grans veïns) que proporciona unes resistència i duresa molt baixes, però alhora una gran ductilitat. Els processos de deformació en fred i de recuita total poden realitzar-se successivament tantes vegades com es cregui convenient.

Treball en calent. Consisteix en la deformació plàstica d'un metall per damunt de la temperatura de recristal·lització, de manera que l'acritud es compensa amb la recristal·lització i, per tant, la deformació plàstica pot continuar indefinidament. El treball requerit per a la deformació d'un metall en calent és molt inferior al necessari per a la deformació en fred, alhora que permet obtenir canvis de forma i de dimensions molt més grans, però el material resultant té unes característiques mecàniques més moderades, una precisió dimensional més reduïda i apareix recobert de capes d'òxid.

Enduriment per precipitació

Tractament tèrmic que produeix una segona fase de partícules finament dispersa en la primera, i té per efecte la creació d'un gran nombre de barreres a la propagació de les dislocacions. S'aconsegueix per mitjà d'una primera operació de solubilització d'un element d'aliatge a temperatura elevada, seguida d'un refredament ràpid per a crear una solució sobresaturada (en alguns casos fins a temperatures inferiors a l'ambient) que conserva la ductilitat, per a finalment experimentar una fina precipitació a temperatura ambient (envelliment natural) o a temperatura superior a l'ambient (envelliment artificial), en la qual es produeix l'efecte d'enduriment pel bloqueig del moviment de les dislocacions. Un efecte semblant es pot obtenir per sinterització de pólvores de dues composicions diferents, i aleshores rep el nom d'*enduriment per dispersió*. El tractament de *bonificació* en els acers (*trempe i reveniment*) presenta certes analogies amb l'enduriment per precipitació.

Corrosió i la seva prevenció

La corrosió és el deteriorament o destrucció d'un metall a causa de la reacció amb el medi del seu entorn (aire sec, humit; aigua dolça, salada; atmosfera rural, urbana, marina; sòls; vapor d'aigua; olis i dissolvents; gasolines i gasoils; àcids i bases). En els processos industrials, els medis corrosius sovint s'acompanyen d'elevades temperatures i pressions que agreugen l'atac.

Es pot distingir entre *corrosió humida* (la més freqüent), que normalment es produeix a temperatura ambient en presència d'un líquid (generalment una solució aquosa), on es formen electròlits que causen fenòmens galvànics, i la *corrosió seca* (molt més rara), que es produeix freqüentment a altes temperatures (forns) en absència de líquids (o per sobre del seu punt de rosada), on els vapors i gasos són els agents corrosius.

Les actituds del dissenyador de màquines davant de la corrosió poden ser diverses. En algunes aplicacions és primordial l'aparença del material i, en aquests casos s'usen o bé materials nobles (cuines industrials) o bé s'apliquen pintures o altres recobriments de bona aparença (carrosseria d'auto-mòbil). En altres casos la corrosió pot donar lloc a fallades de funcionament (corrosió de tubs, deteriorament de juntes, ruptura d'elements) i, aleshores, s'utilitzen materials que hi siguin resistents per evitar els importants costos derivats del manteniment i d'eventuals accidents. En alguns casos es lluita contra la corrosió fent els gruixos de les peces més grans.

Les principals manifestacions de la corrosió i les corresponents formes de prevenció són:

Corrosió uniforme

Atac químic o electroquímic que té lloc uniformement en tota la superfície del metall, el gruix del qual esdevé progressivament més prim fins que falla. És la forma més freqüent de corrosió.

Es pot prevenir per mitjà de: *a)* Substitució per un metall no corrosiu en el medi utilitzat (en general és el procediment més car); *b)* Aplicació de recobriments (imprimacions, pintures, recobriments plàstics, cobrejament, niquelatge, cromatge); *c)* Inhibidors; *d)* Proteccions catòdiques (recobriments galvànics de zinc o alumini per a l'acer; càtodes de sacrifici).

Corrosió galvànica

Té lloc quan dos metalls de diferent potencial galvànic estan elèctricament connectats entre ells i exposats a un electròlit. El metall més actiu experimenta corrosió (reacció anòdica), mentre que el metall més noble (o inert) queda protegit (reacció catòdica). La sèrie galvànica de la Taula 12.1 proporciona una predicció de la tendència de diferents metalls i aliatges a formar parelles galvàniques. Exemple: quan en les instal·lacions d'aigua domèstica s'uneixen tubs de coure i d'acer, aquests darrers experimenten una forta corrosió galvànica.

Per a prevenir aquest tipus de corrosió es recomana: *a)* Elegir parelles de metalls pròximes en la sèrie galvànica; *b)* Evitar l'efecte desfavorable d'una superfície anòdica petita i una superfície catòdica gran (és convenient que cargols i perns constitueixin l'ànode); *c)* Aïllar elèctricament els dos metalls susceptibles de formar una parella galvànica; *d)* Aplicar recobriments, inhibidors o ànodes de sacrifici respecte als dos metalls.

Corrosió en escletxes. Corrosió per picat

Són formes de corrosió intenses i localitzades causades per la diferent concentració de ions entre dues parts de la mateixa peça o conjunt, de manera que produeixen una reacció galvànica. La *corrosió en escletxes* es dona en juntes i fissures on queda més retinguda la humitat (reacció anòdica) que en altres parts més airejades de la mateixa peça. La *corrosió per picat* és un fenomen anàleg que s'inicia en un defecte de la superfície del metall i progressa per gravetat vers el seu interior (pot arribar a donar lloc a perforacions en xapes).

En les aplicacions susceptibles de corrosió en escletxes es recomana per a

prevenir-la: *a)* Evitar les escletxes, juntes i fissures (si cal, soldar-les); *b)* Usar soldadura enlloc d'unions cargolades o reblonades (evitar les juntes); *c)* Dissenyar les peces que evitin els racons; *d)* Evitar la dipositació de materials que retinguin humitat, especialment en els períodes d'inactivitat. Les mateixes solucions són adequades per a la prevenció de la corrosió per picat i, en tot cas, la selecció del material exerceix una important influència (de menys a més resistents al picat: acers inoxidable *AISI 304*, *AISI 316*, Hastelloy C, Titani).

Taula 12.1 **Sèrie galvànica per a metalls i aliatges en aigua de mar**⁽¹⁾

↑ noble catòdic	Platí, Pt Or, Au Grafit, C Titani, Ti Plata, Ag Hastelloy C Acer inox. 316 (passiu) ⁽²⁾ Acer inox. 304 (passiu) ⁽²⁾ Acer inox. 430 (passiu) ⁽²⁾ Inconel 600 (passiu) ⁽²⁾ Níquel, Ni (passiu) ⁽²⁾ Monel Cuproníquel Bronzes Coure, Cu Llautons	Hastelloy B Inconel (actiu) ⁽²⁾ Níquel, Ni (actiu) ⁽²⁾ Estany, Sn Plom, Pb Acer inox. 316 (actiu) ⁽²⁾ Acer inox. 304 (actiu) ⁽²⁾ Acer inox. 430 (actiu) ⁽²⁾ Fosa (ferro fos) Acer Alumini 2024 Cadmi, Cd Alumini 1100 Zenc, Zn Magnesi, Mg, i aliatges	actiu o anòdic ↓
-----------------------	---	---	------------------------

(1) Assaigs realitzats per International Nickel Company i resumits a *Corrosion Engineering* de M.G. Fontana (McGraw-Hill, 1986)

(2) Les designacions de *passiu* i *actiu* indiquen si s'ha creat o no una capa protectora d'òxid en la superfície de l'aliatge

(3) Els metalls agrupats per un parèntesi, a efectes pràctics, no donen lloc a corrosió galvànica entre ells

Corrosió intergranular

En determinats aliatges i en determinats medis i condicions, és una forma de corrosió que es localitza en els límits del gra. Es dona en certs aliatges d'Al i Cu, però és especialment greu en acers inoxidable austenífics sotmesos a temperatures de 500÷800°C (per exemple, en les soldadures), ja que, en precipitar el Cr en forma de carburs, fan que les zones adjacents siguin susceptibles d'oxidació. Les formes de prevenir aquesta corrosió en els acers inoxidable és disminuir dràsticament el contingut de C o afegir elements amb major tendència a formar carburs que el Cr.

Corrosió per tensió

Resulta de l'efecte combinat de les tensions (externes o internes) a què està sotmès un material i del medi corrosiu en què treballa (acers inoxidable en presència de clorurs). És causat per la presència de microfissures que, atacades pel medi, progressen fins a produir una fallada.

La mesura més eficaç per evitar aquesta corrosió és disminuir o eliminar els esforços aplicats, o alliberar tensions internes per mitjà d'una recuita.

Corrosió per lixiviació

En determinats medis, es produeix una lixiviació (o dissolució selectiva) d'un dels components d'un aliatge, de forma que el material perd les seves característiques. Un exemple d'aquest fenomen és la *deszincificació* dels llautons en aigua de mar.

Les formes de prevenir la deszincificació dels llautons és utilitzar aliatges de menor contingut de Zn (llautons rojos al 15%) o afegir una petita quantitat de Sn (llautons navals).

Corrosió per erosió

Acció combinada d'un atac químic i l'abrasió produïda per un fluid en moviment, o la fricció repetida entre dues peces (desplaçaments de μm). És un tipus de corrosió especialment important en metalls passivats, ja que l'abrasió erosiona la capa protectora deixant el metall exposat a l'acció corrosiva. La corrosió per erosió fluida es manifesta en forma de clots i de valls (generalment seguint un patró) i es dona en conduccions (especialment en els colzes i els canvis de secció), hèlices, àleps de turbina i paletes de bomba, mentre que la corrosió per fricció es manifesta en unions cargolades o reblonades amb moviment relatiu, o en molles que freguin. Algunes formes de prevenir la corrosió per erosió fluida són: *a*) Modificar el disseny per disminuir les col·lisions i la turbulència del fluid; *b*) Eliminar les partícules (filtratge) o les bombolles del fluid; *c*) Seleccionar un material més resistent a la corrosió per erosió en el medi d'aplicació. Per disminuir la corrosió per fricció cal: *a*) Eliminar el moviment relatiu entre les peces (augmentar el serratge); *b*) Seleccionar un material no passivat resistent a la corrosió en el medi d'aplicació.

Corrosió seca (o oxidació)

Reacció entre el metall i el gas que hi està en contacte, amb la formació d'un compost a la superfície i amb una pèrdua neta de material. El més freqüent és que l'atac del metall sigui degut a l'oxigen de l'aire (*oxidació*), però també a atmosferes sulfuroses oxidants (SO_2), a halògens (Cl, Br i I) o a gasos de combustió (CO , CO_2 , H_2O). Atès que la corrosió seca es dona principalment a altes temperatures, adquireix la màxima importància en l'aplicació d'aliatges refractaris.

Propietats dels metalls

Els apartats anteriors s'han destinat a analitzar tres aspectes del comportament específic dels metalls (la deformació plàstica en fred, els tractaments tèrmics i la corrosió i la seva prevenció), que emmarquen moltes de les seves propietats i alhora són determinants en moltes de les aplicacions que tenen.

Aquest apartat es dedica a descriure les principals propietats físiques, mecàniques i tecnològiques que caracteritzen els materials metàl·lics, moltes de les quals es regeixen per assaigs específics contemplats en les normes UNE, ISO/(EN) o ASTM (Taula 12.2).

Taula 12.2 Normes d'assaig de metalls

	UNE	ISO/(EN)	ASTM
<i>Propietats físiques</i>			
Densitat			
Coeficient de dilatació lineal			B 95
Calor específic			
Conductivitat tèrmica			
Resistència/conductivitat elèctrica		IEC 468	B 193
<i>Propietats mecàniques</i>			
Assaig i propietats de tracció	7.474	EN 10002	E 8
Assaig i propietats de compressió			E 9
Assaig i propietats de cisallament (alumini)			B 565
Assaig d'impacte (Charpy)	7.475	EN 10045	E 23
Assaig de fluència a temp. elevada (acer)	7.322	R 204	E 139
Assaig de relaxació			E 328
Assaig de fatiga (flexió circular)		1143	E 466
Duresa Brinell	7.422	6506/410	E 10
Duresa Vickers	7.423	6507/409	E 92
Duresa Rockwell	7.424	6508	E 18
<i>Propietats tecnològiques</i>			
Corrosió per tensió		7539	
Corrosió en atmosfera artificial		9227	
Resistència al desgast (comparativa)			G 77
Assaig de doblegament simple	7.472	7438	
Assaig de doblegament alternatiu	7.473	7779	
Assaig de trempabilitat de Jominy (acer)	7.279	642	A 255

Propietats físiques

Les propietats físiques que influeixen més en les aplicacions dels metalls en el disseny de màquines són:

Densitat

Els metalls són densos ($1,75 \div 9 \text{ Mg/m}^3$, per als aliatges més usuals en el disseny de màquines), fet que influeix decisivament en moltes aplicacions. L'alleugeriment de les màquines ha impulsat el desenvolupament dels aliatges lleugers (Mg, Ti i molt especialment Al, $2,7 \text{ Mg/m}^3$), mentre que, en d'altres casos, ha donat lloc a la seva substitució per plàstics.

Propietats tèrmiques

Les més destacades són: *a) Temperatures de fusió* entre mitjanes i elevades per als aliatges metàl·lics usuals en el disseny de màquines (des dels $380 \div 420^\circ\text{C}$ dels aliatges de Zn fins als $1150 \div 1550^\circ\text{C}$ dels materials fèr-rics, el Ni i els superaliatges), més altes que les dels polímers, però més baixes que les de les ceràmiques. *b) Conductivitat tèrmica* elevada (comparable amb la dels polímers i les ceràmiques), especialment en el Cu i Al, origen de moltes aplicacions (intercanviadors de calor, dissipadors tèrmics). *c) Capacitat calorífica* mitjana o baixa. *d) Coeficients de dilatació lineal* baixos (bona estabilitat dimensional) en comparació amb els polímers, però menor que les ceràmiques.

Propietats elèctriques i magnètiques

Els metalls es caracteritzen per la seva bona conductivitat elèctrica (especialment els aliatges de Cu i Al), propietat que no comparteixen amb altres famílies de materials (aplicacions com a conductors). Alguns metalls tenen característiques ferromagnètiques (acers, acers inoxidable martensítics, determinats aliatges del Ni) amb aplicacions importants en dispositius electromagnètics (imants, nuclis de transformadors i motors elèctrics).

Propietats mecàniques

Comparativament amb les altres famílies de materials, els metalls tenen molt bones propietats mecàniques, tant les volumètriques (que afecten la resistència i la rigidesa), com les superficials (que afecten el comportament en els enllaços). Però, a més, els materials metàl·lics presenten la possibilitat de millorar i modular aquestes propietats per mitjà de la *deformació plàstica en fred* i dels *tractaments tèrmics* (s'han analitzat en els apartats anteriors).

Propietats mecàniques volumètriques

Resistència mecànica i rigidesa

L'assaig a tracció acostuma a caracteritzar la resistència mecànica dels metalls, mentre que els assaigs de compressió, de flexió, de torsió o de cisallament són menys usats. El *límit elàstic*, R_e (de valors elevats en comparació dels polímers), s'usa de referència de càlcul per als metalls dúctils, mentre que la *resistència a la tracció*, R_m (de valors també elevats en relació dels polímers, 100÷2500 MPa), s'usa de referència de càlcul per als metalls fràgils. La major part dels metalls són dúctils, amb *allargaments a la ruptura*, A , superiors al 5%, tot i que existeixen materials metàl·lics fràgils, com és ara la fosa grisa i determinats acers d'alta resistència). El *mòdul d'elasticitat*, E , generalment és constant en els metalls (a excepció de la fosa grisa), i els seus valors són elevats (40÷240 GPa en els metalls usuals), lleugerament inferiors als de les ceràmiques, però molt superiors als dels polímers.

Resistència a la fatiga

La resistència a la fatiga dels metalls és, en general, molt més elevada que la dels polímers. Alguns metalls (fonamentalment els acers) tenen un *límit de fatiga* definit, mentre que, en d'altres (Al i diversos aliatges no fèrrics), cal adoptar un valor convencional de *resistència a la fatiga* per a un determinat nombre de cicles. Malgrat la importància que aquest fenomen té en el disseny de màquines, lamentablement no sempre es disposa dels valors necessaris de resistència a la fatiga (en proveta), els quals, tanmateix, es poden estimar entre un 30 i 50% de la resistència a la tracció (50% per als acers; 40% per a la fosa grisa; 30÷40% per als aliatges d'Al i Mg). Cal tenir present que la resistència a la fatiga de les peces queda molt disminuïda pels efectes de les formes, les dimensions, el tipus de sol·licitació i l'acabament superficial.

Resiliència

La resiliència per impacte (no directament comparable amb la resiliència obtinguda a través del diagrama de tensió/deformació) és una propietat que presenta interès en aplicacions en les quals un material pot estar sotmès a impactes. Aquesta és una dada rellevant quan es dissenyen sistemes que han de treballar a baixes temperatures, a causa de la fragilitat que adquireixen molts dels metalls. Tot i que hi ha aliatges metàl·lics fràgils (foses grises, determinats acers d'alta resistència), la majoria dels metalls tenen un comportament a resiliència molt superior a les ceràmiques.

Comportament a fluència i temperatures de servei

La resistència a la fluència (molt superior a la dels polímers) junt amb la resistència a la degradació amb la temperatura, permeten ordenar els aliatges metàl·lics usats en el disseny de màquines segons *temperatures de servei* creixents: *a) <100°C*: el Cu i Al purs i els aliatges de Zn treballen bé a temperatures ambient o lleugerament superiors. *b) 100-200°C*: la majoria d'aliatges d'Al i Mg tenen el seu límit entre aquestes temperatures (els aluminis per a pistons arriben fins a 250°C). *c) 200-400°C*: el Cu amb petits percentatges d'Ag pot usar-se fins a 350°C i, els bronzes a l'alumini, fins a 400°C; les famílies de $Ti_{\alpha+\beta}$ i Ti_{β} s'usen fins a uns 350°C, mentre que els acers al C i amb petites addicions d'aliatge (acers no aliats, i microaliats, de calderes i dipòsits a pressió) tenen el seu límit d'ús lleugerament per sobre dels 400°C. *d) 400-600°C*: els aliatges de Ti_{α} s'usen fins a uns 500°C, mentre que els acers ferrítics al Mo, Cr-Mo i Cr-Mo-V (acers aliats de calderes, per a centrals d'energia i plantes petroquímiques) arriben al límit superior d'aquest interval. *e) 600-700°C*: s'usen acers inoxidable austenític i refractaris (turbines de gas). Finalment *f) 700-1150°C*: cal recórrer als superaliatges basats en Fe, Ni o Co.

Propietats mecàniques superficials

Duresa

La duresa superficial dels metalls (especialment en els acers) és molt més elevada que la dels polímers, però menys elevada que la d'algunes ceràmiques. Per a cada família de materials metàl·lics, la mesura de la duresa (generalment fàcil d'obtenir) és un indicador de la resistència a la tracció, ja que acostuma a haver-hi una correlació entre aquests dos paràmetres. En elements de màquines sotmesos a pressions superficials importants (engrenatges, lleves, rodaments, articulacions, arbres estriats) la duresa també és un indicador de la resistència a la fatiga superficial, i usualment s'utilitzen acers trempats, cementats o nitrurats. En les eines de tall s'utilitzen acers de gran duresa, 55÷65 HRC (acers d'eines, acers ràpids), valors menors, però, que la de molts materials ceràmics (òxids, carburs i nitrurs metàl·lics, diamant).

Frec i desgast

En general, el contacte directe metall/metall sense lubricació en les articulacions i transmissions no és recomanable, especialment entre superfícies d'acer, ja que s'exerceixen una acció mútua abrasiva; en canvi, el lliscament entre fosa grisa/acer i bronze/acer presenta uns efectes de frec i desgast molt més moderats, tot i que és recomanable la lubricació. Els emparellaments metall/plàstic (acer/polietilè, acer/poliamida) permeten el lliscament sense lubricació.

Propietats tecnològiques

Els diferents materials metàl·lics exhibeixen un conjunt de propietats tecnològiques que, per un costat, presenten una gran varietat que les fa difícilment englobables en un sol grup i, per l'altre, ofereixen aspectes de gran interès en les aplicacions. En aquest apartat s'analitzen els aspectes de cost i subministrament, l'aptitud per a la conformació (amb una breu descripció dels processos més habituals), les qualitats en relació amb l'usuari i les interaccions amb l'entorn.

Cost i subministrament

Els materials metàl·lics tenen preus molt diferents entre ells (des de 70 pta/kg els acers de construcció fins a més de 5000 pta/kg els superaliatges) i ofereixen una disponibilitat molt desigual en el mercat.

Els materials fèrrics (acers i foses) són els més econòmics (70÷250 pta/kg) i també els més utilitzats en el disseny de màquines, mentre que els aliatges d'alumini, que els segueixen en utilització, compensen el preu superior (450÷1-000 pta/kg) amb la menor densitat. El mercat ofereix una gran diversitat de productes semielaborats d'aquestes dues famílies (fils, barres, tubs, perfils laminats, xapes; també perfils extruïts en l'Al).

Darrere vénen els acers inoxidable, coures, bronzes i llautons. Tant els uns com els altres tenen una bona resistència mecànica i a la corrosió, però són alhora cars i densos. El mercat ha anat ampliant la gamma i disponibilitat de productes semielaborats, especialment d'acers inoxidable.

La resta de materials metàl·lics (aliatges de Zn, Mg, Ti i Ni), molts d'ells de preus superiors, s'utilitzen en aplicacions més especialitzades i la disponibilitat de productes semielaborats en el mercat és més escassa.

Aptitud per a la conformació

L'aptitud per a la conformació és un dels aspectes fonamentals en la selecció del material. Com ja s'ha dit en apartats anteriors, els metalls s'adapten a una gamma molt ampla de processos de conformació, entre els quals destaquen els de deformació en fred (*laminació, extrusió, estampació, tallatge, punxonatge, plegament, corbament, embotició*) i els tractaments tèrmics (*recuita, enduriment per precipitació, bonificació i enduriment per difusió superficial en els acers*). A més d'aquests processos específics, els materials metàl·lics també es poden conformar per deformació en calent (la major part de *laminacions, extrusions i estampacions; operacions de forja*), per emmotllament (*fosa en motlle de sorra; fosa en conquilla per gravetat, per injecció; fosa*

centrifugada; microfusió), per *sinterització*, així com pels nombrosos processos de mecanització (*tornejat; mandrinatge; fresatge; llimada; perforació; roscatge; brotxment; tallatge de rodes dentades; rectificació*) i d'unió permanent (*soldadura per arc; soldadura per punts; soldadura autògena; engrapament, rebordonament*, basats en la deformació en fred; *reblonament* en fred o en calent).

En diversos apartats de la Secció 12.2 es descriu el procés siderúrgic i els productes fèrrics que se n'obtenen, els processos per a l'obtenció de peces amb formes específiques per a acers i foses, així com els tractaments tèrmics per als materials fèrrics. A continuació es donen indicacions sobre els processos més adequats per a d'altres materials metàl·lics.

Laminació i extrusió. És el procés més utilitzat per a l'obtenció de productes semielaborats plans (xapes, planxes) i llargs (barres, perfils) de la major part d'aliatges metàl·lics. L'*extrusió*, també utilitzada en altres metalls, s'adapta especialment bé als aliatges d'Al (gran diversitat de seccions de formes complicades).

Emmotllament. És el principal procés per a obtenir peces de formes específiques (des d'una peça única fins a sèries de milers d'unitats) i s'utilitza en la major part dels aliatges metàl·lics usats en el disseny de màquines. És el procediment habitual per conformar peces en fosa grisa i nodular, però és menys freqüent en els acers al C, acers aliats i acers inoxidable. Determinats aliatges d'Al (Al-Si) es presten molt bé a l'emmotllament i permeten obtenir peces de gran precisió per mitjà de la injecció en conquilla. Els aliatges de Zn també són especialment aptes per a l'emmotllament gràcies al seu baix punt de fusió.

Forja. És un altre dels processos per a obtenir peces amb formes específiques, generalment, de millor comportament mecànic que les peces foses. S'utilitza en acers (en forta competència amb les foses nodulars), els aluminis, el coure, els bronzes, i s'adapta especialment bé per a la conformació de llautons.

Sinterització. Procés que permet obtenir petites peces amb una bona precisió dimensional i la forma i superfícies definitives, però que sols és rendible per a sèries de diversos milers d'unitats a causa de l'elevat cost dels utilitatges. S'adapta a pràcticament tots els materials i pot esdevenir un procés obligat quan el punt de fusió del metall és elevat. Les peces obtingudes per

sinterització són poroses, fet que s'aprofita per a fabricar coixinets de bronze autolubricats.

Construcció soldada. Permet obtenir conjunts a partir de xapes, barres, tubs i perfils tallats i, eventualment, deformats en fred (bancades de màquines, carrosseries d'automòbil, caldereria en general). És una de les conformacions més habituals en acers al C, acers microaliats i acers inoxidable, tot i que també s'utilitza amb aliatges d'Al o de Cu.

Mecanització. Procediment obligat en la majoria de peces, si més no, per donar la forma definitiva de les superfícies crítiques. Els acers en general es mecanitzen bé però, en cas de ser necessari el tremp o l'en-duriment superficial, cal dividir el procés de mecanització en un primer desbast, abans del tractament, i un acabament posterior (sovint per rectificació) per a l'ajust final de dimensions. Els aliatges d'Al i Mg tenen una excel·lent maquinabilitat i es treballen a altes velocitats. Els acers inoxidable ferrítics i martensítics es treballen raonablement bé, però els acers inoxidable austenítics es treballen amb dificultat. El Cu pur té molt baixa maquinabilitat. El mercat ofereix variants d'acers al C, acers inoxidable, coures, llautons i bronzes amb petites addicions (S, Se, Pb) destinats a una mecanització millorada.

Qualitats amb relació a l'usuari

Els metalls no són precisament materials que presentin unes gran qualitats amb relació a l'usuari, fora de determinades funcions (certes pròtesis, eines de tall). Això es deu a diferents aspectes, com són l'elevada densitat, la bona conductivitat de l'elèctricitat (possibles enrampades) i de la calor (cremades o sensació de fred), o a l'excessiva duresa i presència de cantells vius. En aquest sentit, es pot constatar que la major part dels objectes que rodegen a les persones se situen en l'àmbit dels polímers naturals (fibres tèxtils, fustes, paper) o artificials (plàstics i elastòmers, materials com-postos).

Interacció amb l'entorn

La corrosió dels metalls, especialment en els materials fèrrics, constitueix un problema important que ha donat lloc a nombroses tecnologies de reco-briment (imprimacions i pintures, galvanització, cromatge, niquelatge), o al reforçament de la protecció a través de l'anodització (Al i Mg).

Amb relació a l'impacte ambiental, cal tenir en compte aspectes com la contaminació i el consum d'energia en el seu procés de fabricació i transformació, o les conseqüències de la seva eliminació o reciclatge. La majoria dels metalls permeten un reciclatge millor que el dels plàstics.

12.2 Materials fèrrics

Introducció

Les diferents famílies de materials fèrrics (*acers*, amb un contingut $\leq 2\%$ de C; *foses*, amb un contingut de $2\div 6\%$ de C) constitueixen sovint la solució més senzilla, eficaç i barata en moltes de les aplicacions del disseny de màquines. Malgrat que hi ha una gran diferència de característiques entre uns materials fèrrics i altres, tots ells presenten unes *qualitats* que són l'origen de les seves principals aplicacions:

Bona resistència mecànica (a la ruptura, a la fatiga, superficial)

La resistència a la ruptura està compresa entre 150 MPa per a les foses grises més baixes i 2500 MPa per a determinats acers d'alta resistència. Aquests valors són dels més alts entre tots els materials.

Rigidesa elevada

El mòdul d'elasticitat està comprès entre 80 GPa, per a les foses grises més baixes, i 210 GPa, en la major part dels acers. Aquests darrers valors són també dels més elevats entre els materials usuals.

Cost baix

El Fe és abundant a la naturalesa i els seus derivats (foses i acers) són fàcils d'obtenir en el mercat. Les foses i acers més comuns són barats ($70\div 250$ pta/kg), mentre que el cost dels acers inoxidable i dels acers d'eines se situa en valors superiors ($250\div 2500$ pta/kg).

Però també tenen dues característiques que constitueixen les principals *limitacions* a les seves aplicacions:

Densitat elevada

Aquesta característica ($7,8\div 8,0$ Mg/m³ en els acers, $7,0\div 7,3$ Mg/m³ en les foses) dona lloc a estructures i peces de massa elevada, cosa que és un inconvenient per a aplicacions en vehicles (especialment en l'aviació) o en elements sotmesos a grans acceleracions.

Baixa resistència a la corrosió (excepte en els acers inoxidable)

L'oxidació dels materials fèrrics (més alta en els acers que en les foses) no es deté en la superfície i acaba destruint tot el material. Això obliga a adoptar recobriments de protecció que, en determinats casos, poden fer perdre l'avantatge econòmic inicial.

Productes fèrrics i fabricació de peces

El dissenyador de màquines es troba amb el repte continu d'haver d'elegir el material i alhora haver de determinar (o, fins i tot, crear) el procés que li donarà la forma i les característiques que s'adeqüin a la peça o element del conjunt mecànic o construcció que està concebut. Les pàgines següents presenten els principals processos per a la conformació de peces amb materials fèrrics. Atès que són els de difusió més gran i, probablement, també els de més diversitat, aquesta reflexió pot servir de referència per a altres grups de materials metàl·lics i no metàl·lics.

El mercat ofereix una gran diversitat de productes fèrrics semielaborats (denominats també productes acabats, ja que no han d'experimentar canvis metal·lúrgics posteriors) plans (xapes gruixudes, bobines de fleix, xapes recobertes) i llargs (perfils, barres, tubs, fils d'acer, xapes perfilades), dels quals el dissenyador de màquines aprofita la seva forma bàsica i les seves qualitats per obtenir la peça o element desitjat mitjançant tall, deformacions moderades o mecanització. Sempre que les operacions de conformació no siguin excessivament laborioses, les peces i elements basats en productes semielaborats resulten econòmics.

Quan el dissenyador de màquines busca una llibertat de formes més gran, ha d'implicar-se més a fons en la transformació metal·lúrgica del material per obtenir la peça desitjada, com esdevé amb l'*emmotllament*, la *forja*, la *sinterització*, o l'*embotició*. Aquests processos exigeixen la construcció d'utillatges específics per a cada peça (models, motlles, matrius, estampes) de cost elevat, i la creació d'una nova peça exigeix una decisió meditada.

En d'altres peces, quan el dissenyador requereix un comportament mecànic elevat del material en la massa o en la superfície, són necessaris determinats *tractaments tèrmics* posteriors a la seva conformació que exigeixen uns recursos, un temps i unes manipulacions addicionals i, sovint, a causa de les distorsions inherents als tractaments, unes operacions d'acabament, aspectes, tots ells, que redunden en un augment sensible del cost.

Des del punt de vista del disseny i de la fabricació de màquines, tant els processos de conformació amb implicació metal·lúrgica com els tractaments tèrmics s'eviten tant com sigui possible en els projectes de poques unitats. Moltes de les millores metal·lúrgiques recents busquen l'eliminació o la substitució d'alguns d'aquests processos, especialment els tractaments tèrmics (substitució d'acers tractats per acers microaliats).

Procés siderúrgic i productes fèrrics

El mineral de ferro passa per un conjunt de transformacions (anomenat procés siderúrgic) fins a l'obtenció dels productes fèrrics que el mercat ofereix, base de la fabricació de moltes de les peces i elements de les màquines. A continuació es descriuen les principals etapes del procés siderúrgic, tot indicant en cada una d'elles els principals productes fèrrics que se'n deriven, especialment els utilitzats pel dissenyador de màquines.

Instal·lacions de capçalera. Forns alts

Comprenen la preparació de les matèries primeres (mineral de ferro, carbó i fundents), la reducció del material de ferro en el forn alt fins a obtenir la fosa de primera fusió (amb continguts elevats de C, 3÷4,5%, de Si, 2,5% i d'impureses). Una cullera recull el material del forn alt i, o bé el cola en forma de *lingots de ferro* destinats a les *foneries*, o bé el condueix a les *acereries* per transformar-lo en acer (la part més gran).

Acereries

Per a fabricar acer, cal ajustar el contingut de C del material (generalment a valors $\leq 0,8\%$), limitar les impureses i, en els acers aliats, afegir i controlar el contingut dels elements d'aliatge. Atenent la matèria primera utilitzada, l'acer es pot fabricar mitjançant dos processos diferents: *a)* La conversió de la fosa de primera fusió (eventualment amb aportació de ferralla) en un *convertidor* on, per mitjà d'una llança, s'injecta oxigen pur que crema l'excés de C; *b)* La fusió de ferralla de recuperació en un *forn elèctric* (d'arc o d'inducció) i la injecció posterior d'oxigen. Les operacions anomenades *de metal·lúrgia secundària*, realitzades en el forn elèctric o en la cullera de colada, tenen per objecte la desgasificació de l'acer (eliminació d'O i N), les darreres operacions d'afinament (reducció d'impureses) i l'ajust final de la composició per mitjà de ferroaliatges (aliatges de ferro i un o dos altres elements en percentatges elevats).

Colada de l'acer i desoxidació

L'operació de colada transforma l'acer líquid de la cullera en productes útils en estat sòlid, segons els procediments següents: *a)* *Emmotllament*, en què l'acer líquid s'aboca en motlles amb la forma de la peça a conformar; *b)* *Colada en lingots*, en què s'aboca en motlles prismàtics (*lingoteres*) per a transformar-la després en productes laminats o forjats; *c)* *Colada contínua*, procediment relativament recent, de gran productivitat i rendiment energètic, en què l'acer líquid, regulat per una *artesa*, s'aboca en un motlle de coure refrigerat de fons desplaçable, que té la secció del semiproducte fabricat (desbasts rectangulars, quadrats). El material es corba per adquirir la direcció horitzontal mentre es refreda i, després, es talla.

En general, l'oxigen dissolt en els acers colats reacciona amb el carboni, alliberant petites bombolles de gas CO (*acers efervescents*), donant lloc a acers barats i heterogenis (poc C a les capes exteriors i excés en el nucli, segregació que es traspasa als productes laminats), de bona deformabilitat en fred, però de mala soldabilitat. Els acers que, abans o durant la colada, incorporen elements desoxidants (Si, Al o Mn) per a disminuir o eliminar l'efervescència (*acers semicalmats* i *acers calmats*), no presenten segregació del C i són més aptes per a ser soldats. Els acers procedents de colada contínua i els de contingut mitjà o alt de C són sempre calmats.

Laminació en calent

Els desbasts procedents de la colada contínua o els lingots procedents de la colada convencional, després de ser reescalfats en forns adequats fins a temperatures de 1250 a 1350°C, són laminats en calent en un tren de laminació per donar lloc a productes amb les formes i dimensions adequades per a la fabricació d'elements de construcció i peces de màquines. La laminació de productes llargs (perfils, barres) parteix de desbasts quadrats o rectangulars, mentre que la laminació de productes plans parteix de desbasts plans (o *slabs*). Les xapes per ser deformades en fred són sotmeses a un procés de *skin-pass* (més informació a la laminació en fred).

Productes llargs: a) Perfils estructurals (de dimensions ≥ 80 mm) i perfils comercials (de dimensions ≤ 80 mm), de secció massissa, en forma de: *I* (biga en doble T), *H* (o columna), *U*, Angles (costats iguals i desiguals); altres perfils; b) Barres de diverses seccions: rodona, quadrada, hexagonal, rectangular (platina, de gruix < 10 mm; llanda, de gruix ≥ 10 mm); altres seccions; c) Altres productes llargs (perfil de via).

Productes plans: a) Xapa, d'amplada igual o superior a 600 mm (planxa, de gruix ≥ 6 mm, laminada en discontinu; banda, de gruixos menors, laminada en continu, enrotllada o tallada transversalment); b) Fleix, d'amplada inferior a 600 mm i gruix inferior a 6 mm (es presenta en bobines o en tires).

Fabricació de tubs sense soldadura

La necessitat de tubs per pressions altes i temperatures elevades ha obligat a desenvolupar processos de fabricació de tubs sense soldadura (més cars que els tubs soldats), basats en procediments especials anomenats de laminació o d'extrusió.

Productes: tubs sense soldadura

Laminació en fred

Part dels productes laminats en calent s'utilitzen directament, però d'altres són acabats amb una laminació en fred per tal d'obtenir toleràncies més estretes, un acabament superficial més bo i, en determinats casos, millora

la resistència mecànica. Prèviament a la laminació en fred s'acostuma a realitzar un *decapatge* per a eliminar els òxids superficials i, posteriorment, una *recuita* per a regenerar l'estructura i millorar les característiques mecàniques. En les xapes que s'han de deformar en fred (embotició, estam-pació), s'hi aplica un *temperament* (o *skin-pass*), lleugera passada de laminació en fred amb una reducció inferior al 2% per tal d'endurir el material i evitar determinats defectes superficials (línies de Lüder) que poden aparèixer durant la conformació.

Productes: a) Banda i fleix obtinguts per laminació contínua, de gruixos entre 0,1÷3 mm (en els acers inoxidable, fins a 6 mm), enrotllada o tallada transversalment; b) Xapa negra, banda de baix contingut de carboni, laminada en fred fins a un gruix inferior a 0,50 mm, amb la superfície desengreixada, apta per a diversos recobriments.

Recobriments i perfilament de xapes

Les xapes laminades en fred poden donar lloc a diversos tipus de productes transformats de gran interès en aplicacions. Per un costat, poden rebre diversos recobriments metàl·lics o orgànics per a protegir-les contra la corrosió i, per l'altre, les xapes (recobertes o no) poden ser sotmeses a diferents conformacions en fred per a crear determinats perfils.

Productes recoberts: a) Xapa zincada (galvanitzada en calent o electrolíticament); b) Xapa aluminitzada; xapa aluminitzada-zincada; c) Llauna (xapa estanyada en calent o electrolíticament); d) Bandes imprimades i bandes pintades, generalment sobre una base galvanitzada; e) Bandes plastificades.

Productes perfilats: xapa ondulada, xapes perfilades, tubs soldats.

Barres calibrades

Una altra línia important de productes transformats és la fabricació de barres calibrades, en les quals es busca l'obtenció d'unes toleràncies dimensionals precises, l'eliminació de defectes superficials i, eventualment, la millora de determinades característiques mecàniques. Els processos de calibració es poden realitzar per estiratge (mitjançant una filera adequada) o per mecanització (per arrencament de material o per abrasió amb mola).

Productes: barres calibrades.

Trefilatge de fils d'acer

Procés de deformació en fred per estiratge a través de fileres utilitzat en la fabricació de fils d'acer. Per disminuir l'acritud que es produeix en les successives reduccions, el fil d'acer es fa passar per un bany de plom fos (procés anomenat *patenting*), de forma que l'escalfament i refredament del material que es produeix a la velocitat de pas regenera el gra.

Productes: fil d'acer (base de la fabricació, entre d'altres, de molles, malles, cables i elèctrodes de soldadura).

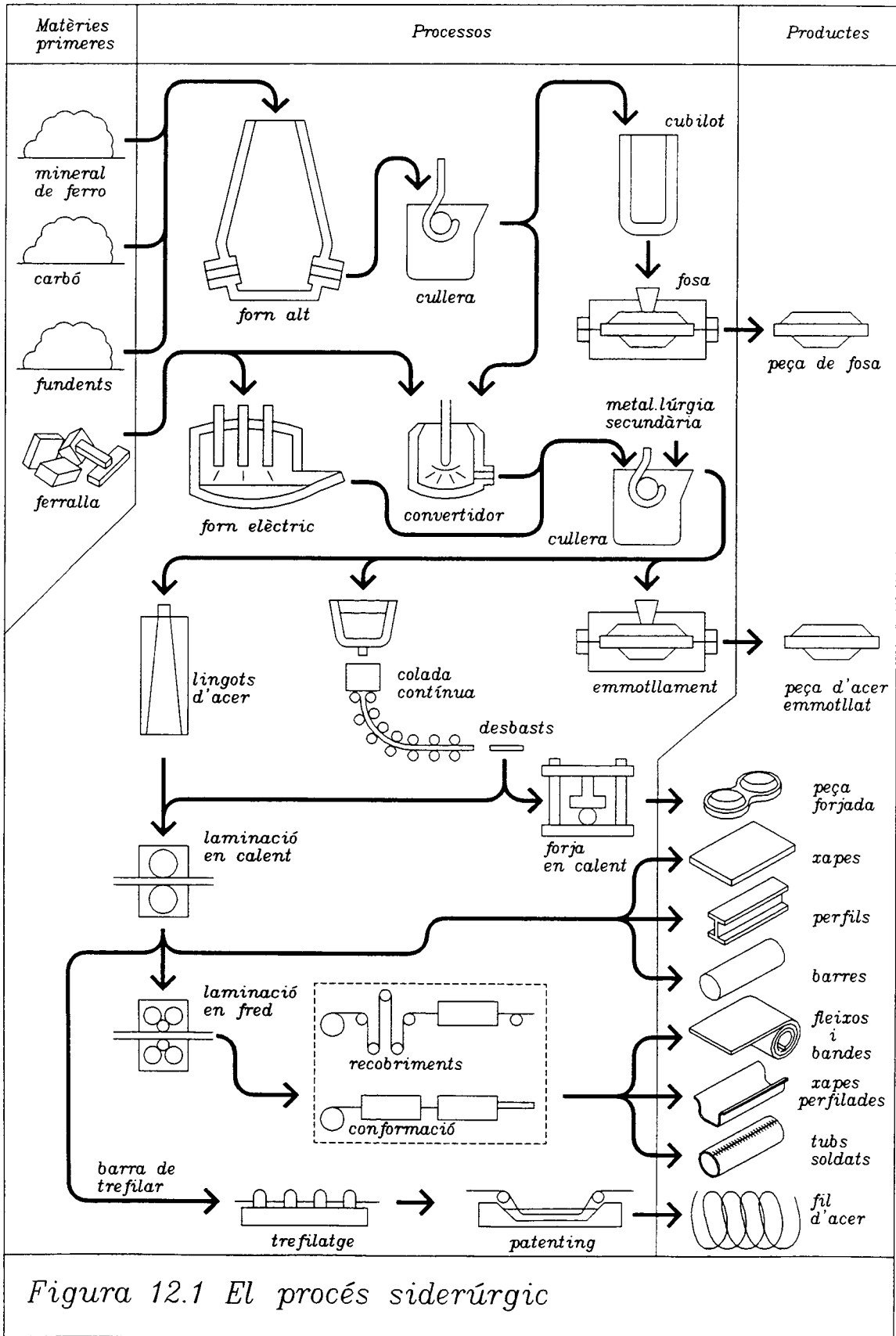


Figura 12.1 El procés siderúrgic

Obtenció de peces amb formes específiques

A continuació es descriuen els principals processos siderúrgics destinats a obtenir peces amb formes específiques, en la concepció de les quals el dissenyador de màquines s'ha d'implicar més.

Foneries

Els lingots de ferro obtinguts dels forns alts es fonen i tracten per mitjà de cubilots o forns elèctrics per a obtenir la *fosa grisa*, la *fosa nodular* o altres foses, les quals, per emmotllament, donen lloc a peces d'aquests materials.

Productes: peces de fosa grisa, de fosa nodular o altres foses.

Acereries

Un dels procediments de colada de l'acer és l'abocament en motlles amb la forma de la peça a conformar (*acer emmotllat*).

Productes: peces d'acer emmotllat.

Forja en calent

Procés que, partint de desbasts de la colada contínua o lingots d'acer escal-fats o reescalfats en un forn a temperatures de $1150\div 1250^{\circ}\text{C}$, produeix la conformació d'una peça mitjançant la deformació plàstica en calent, ja sigui per impacte (martell de forja), ja sigui per pressió (premsa de forja). Els dos principals procediments són: *a) Forja lliure*, en la qual la deformació del material no està limitada (procés manual, sense utilitatges específics, apte per a peces grans fabricades en petites sèries); *b) Forja per estampació*, en la qual la fluència del material queda limitada per la cavitat encerclada per les dues parts de la matriu d'estampació (utiltatge específic de cost elevat, que sols fa rendible el procés per a sèries més grans).

Productes: peces forjades en calent

Metal·lúrgia de pólvores. Sinterització

Procés que parteix del material esmicolat en fines pólvores. Les partícules de l'aliatge, o la mescla adequada, es compacta en *matrius* amb la forma de la peça (material "verd") i, posteriorment, es consolida en un forn de sinteritzar (la sinterització pròpiament dita és la unió entre els grans de pólvores); sovint es fa un segon premsatge per a compactar el material o ajustar les dimensions. A més de possibilitar la conformació de peces de materials de composició, fusió o deformació difícils, aquest procés resulta rendible en grans sèries (desenes de milers, per a amortitzar els utiltatges) per a obtenir peces acabades de formes complexes (limitades per les direccions de premsatge) i toleràncies dimensionals estretes.

Productes: peces sinteritzades.

Tractaments tèrmics dels materials fèrrics

Els materials fèrrics són sotmesos als tractaments tèrmics habituals dels metalls: *Recuita* (la *normalització*, o recuita amb refredament a aire, és molt utilitzada en els acers); *Enduriment per precipitació* (usat de forma molt limitada). Però, a més d'aquests, admeten dos tipus particulars de tractament tèrmic que els proporcionen aptituds per a moltes de les seves aplicacions: a) *Tremp i reveniment*, relacionat amb la transformació martensítica; b) *Tractaments d'enduriment superficial*, que donen lloc a peces amb la superfície dura i el nucli tenaç.

Tremp i reveniment

El tremp és un tractament tèrmic que s'aplica als acers consistent a escal-far durant un temps el material per sobre de la temperatura A_{c3} - A_{cm} , on el material es transforma en austenita (o Fe- γ ; el C es dissol), seguit d'un refredament suficientment ràpid en un medi adequat (aigua, oli) per a evitar la difusió del carboni i la formació de ferrita i perlita. Quan la temperatura baixa fins al valor M_s , s'inicia la transformació de l'austenita a martensita (estructura tetragonal de cos centrat, molt distorsionada, on el C està distri-buït), la qual progressa a mesura que disminueix la temperatura. En l'estat de tremp, la martensita és enormement dura però molt fràgil, aspecte que en limita moltes de les aplicacions (excepte en elements de tall). Per a millorar la ductilitat i la tenacitat del material, la martensita se sotmet a *reveniment* (tractament tèrmic posterior al tremp a temperatura més mode-rada): fins a temperatures de 200°C dóna lloc tan sols a un alliberament de tensions, mentre que si es realitza a temperatures més altes (250÷650°C) la martensita es transforma, per mitjà d'un procés de difusió, en *martensita revinguda* (petites partícules de cementita uniformement disperses en una matriu de ferrita), que conserva la major part de la resistència i la duresa de la martensita però en millora sensiblement la ductilitat i la tenacitat. El procés complet de tremp i reveniment rep el nom de *bonificació* (Figura 12.2d).

Tremp esglaonat (o martempering)

Procediment de tremp que evita en gran mesura les distorsions dimensionals que obliguen a mecanitzacions d'acabament posteriors. Després de la transformació en austenita, l'acer es refreda ràpidament en un bany de sals a temperatura lleugerament superior a M_s . Quan s'ha homogeneïtzat la temperatura entre la superfície i el nucli de la peça, el material es deixa refredar fins a completar la transformació en martensita lliure de distorsions. Posteriorment cal un reveniment (Figura 12.2e).

Tremp bainític (o austempering)

Procediment de tremp que evita el reveniment. La primera part del procés és anàloga a la del tremp esglaonat, però es deixa transcórrer el temps suficient perquè es produeixi la transformació en bainita (estructura de característiques mecàniques pròximes a les de la martensita revinguda). Aquest procés, que s'aplica també a determinades foses, no necessita reveniment posterior (Figura 12.2e).

Trempabilitat. Assaig de Jominy

Per a trempar un acer (o sigui, per transformar l'austenita en martensita) cal un refredament suficientment ràpid per a evitar la difusió del C i la formació de perlita o bainita. Quan les corbes de refredament durant el tremp no interfereixen amb el "nas" del diagrama *T-I* (transformació isotèrmica) d'un acer (Figura 12.2a), s'assegura la transformació martensítica, mentre que per a velocitats de refredament inferiors, es produeix una transformació parcial o total en altres estructures menys dures. Si una peça té gruixos petits (de pocs mil·límetres), el refredament en tota la seva massa és força uniforme, mentre que si els gruixos són grans, la diferència de velocitats de refredament entre la superfície i el nucli pot donar lloc a la transformació martensítica en les capes externes, però no en les més internes.

Es defineix la *trempabilitat* com l'aptitud d'un acer per a la penetració del tremp que es posa de manifest per mitjà de les mesures de duresa des de la superfície fins al centre. L'assaig ideat per Jominy es basa a trempar una proveta cilíndrica refredant-la per un extrem (Figura 12.2b) i en la mesura de les dureses al llarg d'una generatriu; el resultat és la *corba de trempabilitat*. De l'observació de la Figura 12.2a es pot deduir que si el "nas" del diagrama *T-I* està situat molt a l'esquerra (cas dels acers al carboni), la trempabilitat és molt baixa, mentre que si està situat molt a la dreta (cas dels acers aliats), la trempabilitat és elevada.

Tractaments d'enduriment superficial

Conjunt de processos destinats a obtenir peces que combinen unes qualitats mecàniques elevades en determinades superfícies (duresa, resistència al desgast, resistència a la fatiga superficial) amb una bona tenacitat en el nucli (resistència a xocs), condicions que es requereixen en determinats tipus d'elements de guiatge i de transmissió amb enllaços fortament sol·licitats (engranatges, lleves, ròtules, bulons). Hi ha dos mecanismes bàsics per obtenir aquest efecte:

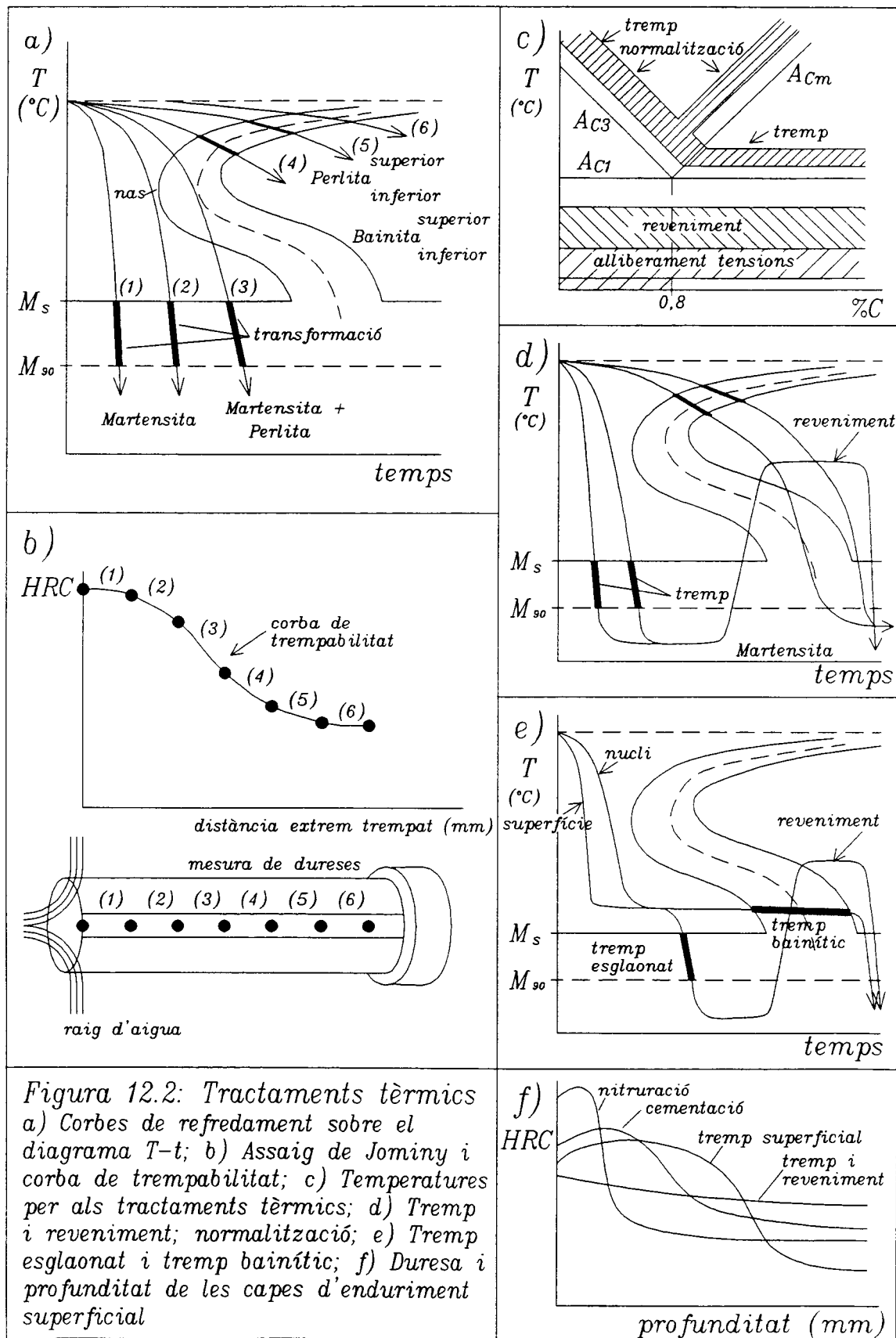


Figura 12.2: Tractaments tèrmics
 a) Corbes de refredament sobre el diagrama T-t; b) Assaig de Jominy i corba de trempabilitat; c) Temperatures per als tractaments tèrmics; d) Tremp i reveniment; normalització; e) Tremp esglaonat i tremp bainític; f) Duresa i profunditat de les capes d'enduriment superficial

Tremp superficial

Escalfament ràpid de determinades zones de la superfície d'acers rics en C, per mitjà de la flama (*tremp a la flama*), d'un bany metàl·lic (*tremp per immersió*) o d'un corrent d'alta freqüència (*tremp per inducció*), seguit d'un refredament ràpid. Només la capa superficial ha arribat a la temperatura d'austenització i, per tant, és susceptible de tremp, per la qual cosa s'obté una capa superficial dura (relativament gruixuda) i un nucli tenaç (malgrat que poc resistent), amb un cost i un temps relativament moderats (Figura 12.2f).

Tractaments termoquímics

Tractaments tèrmics que per mitjà de la difusió de C (*cementació*), N (*nitruració*) o tots dos elements (*carbonitruració*) des de la superfície, modifiquen tant la microestructura com la composició de la capa superficial de l'acer.

Cementació. Enriquiment superficial d'acers pobres en C obtingut per difusió en sotmetre les peces a una temperatura de 800-950°C en medis rics en C (medis sòlids, per a petites produccions; medis gaso-sos per a produccions en sèrie amb gruix de capa controlada; medis líquids per a produir la carbonitruració), amb tremp i reviniment pos-terior. És un procés més car que el tremp superficial i més barat que la nitruració, i el gruix de la capa cementada es pot predir raonablement per mitjà del temps. D'aquesta manera es forma una capa superficial molt dura i resistent al desgast mentre que es conserva un nucli de gran tenacitat. La cementació produeix una distorsió dimensional important i, per tant, les peces han de ser acabades posteriorment. Existeix una àmplia gamma d'acers de cementació (Secció 12.4).

Nitruració. Enriquiment superficial amb N d'un acer per mitjà d'un corrent d'amoníac a 500°C durant un temps molt llarg (10 h per 0,1 mm de gruix). S'obtenen capes superficials molt més dures però més primes que amb la cementació. Atès que la nitruració es realitza a temperatures relativament baixes, sense tremp posterior, les peces pràcticament no experimenten distorsió dimensional. Els acers de nitruració amb una composició adequada proporcionen la màxima duresa superficial (Secció 12.4). Tanmateix, la major part dels acers de màquines (especialment els acers aliats 42CrMo4 i 34CrNiMo6), algunes foses, alguns dels acers inoxidable i diversos dels acers d'eines són susceptibles de ser nitrurats.

Composició dels acers. Elements d'aliatge

Atenent a la composició, els acers es poden classificar en:

Acers no aliats

Són acers al carboni, amb una limitació del contingut màxim dels elements restants segons la Taula 12.3. Els acers de contingut molt baix de C ($\leq 0,1\%$) són adequats per a la deformació en fred (embotició, estampació en fred); els de continguts entre $0,10\div 0,20\%$ de C són soldables i s'usen en les construccions; els de continguts entre $0,20\div 0,50\%$ de C són trempables (amb trempabilitat baixa) i s'usen en peces de màquines; els de continguts superiors esdevenen molt durs a costa de disminuir la tenacitat, i s'utilitzen per a peces resistents al desgast i per a eines.

Taula 12.3 Continguts màxims d'elements en acers no aliats

Elements	%	Elements	%	Elements	%
Alumini Al	0,10	Molibdè Mo	0,08	Titani Ti	0,05
Bismut Bi	0,10	Niobi Nb	0,05	Tungstè W	0,10
Bor B	0,0008	Níquel Ni	0,30	Vanadi V	0,10
Cobalt Co	0,10	Plom Pb	0,40	Zirconi Zc	0,10
Coure Cu	0,40	Seleni Se	0,10	Lantànids	0,05
Crom Cr	0,30	Silici Si	0,50	Altres (excepte C, P, S, N, O)	0,05
Manganès Mn	1,60	Tel·luri Te	0,10		

Acers microaliats (acers HSLA, High-Strength Low-Alloyed steels)

Són acers de contingut moderat de C amb petites incorporacions de determinats elements (Nb, V, Ti, Al) que donen lloc a un enduriment important per la precipitació de carburs, amb la qual cosa adquireixen límits elàstics propis d'acers de baix aliatge sense necessitat de tractar-los tèrmicament. La limitació del contingut de C els fa soldables i el baix contingut d'elements d'aliatge fa que siguin barats.

Acers de baix aliatge

Són aliatges fèrrics de preus moderats que, en cap cas, el contingut dels elements d'aliatge supera individualment el 5%. Busquen millorar alguna de les propietats següents: límit elàstic, trempabilitat, duresa, resistència a la calor. En aquesta categoria entren alguns dels acers de construcció, la major part dels acers de màquines i determinats acers d'eines (els de continguts d'aliatge baixos).

Acers d'alt aliatge

El contingut d'algun dels elements d'aliatge supera el 5%. Busquen millorar determinades propietats, com ara la resistència en calent, la duresa superficial o la resistència a l'oxidació. Comprenen determinades famílies d'acers d'eines, els acers inoxidable i els acers refractaris. Són de preu elevat, tant a causa dels elements d'aliatge costosos com del procés.

Efectes dels elements d'aliatge en els acers

Alumini (Al). Proporciona una desoxidació eficaç i afina el gra. Augmenta la resistència superficial dels acers nitrurats (nitrur d'alumini) i la resistència a la formació d'escames i a l'envelliment.

Bor (B). En petítissims percentatges augmenta fortament la trempabilitat dels acers baixos en C.

Carboni (C). Augmenta la resistència a la ruptura, el límit elàstic i la duresa, però disminueix la tenacitat, la ductilitat, la maquinabilitat, la forjabilitat i la soldabilitat. Amb altres elements d'aliatge i amb tractaments tèrmics adequats es pot millorar la tenacitat.

Cobalt (Co). Disminueix la trempabilitat, però augmenta la resistència a la tracció, el límit elàstic, la resistència a la corrosió i a l'abradió. Millora la persistència del reveniment i la resistència a temperatura (acers ràpids).

Coure (Cu). Augmenta la resistència a la tracció i a la corrosió. Confereix fragilitat en calent.

Crom (Cr). Augmenta la duresa, la resistència al desgast (formació de carburs de crom), a la trempabilitat i temperatures elevades. A partir d'un 11% forma una capa protectora d'òxid de crom contínua i estable que té un paper fonamental en la resistència a la corrosió (acers inoxidable).

Fòsfor (P). Fins a un 0,2%, augmenta el límit elàstic i la resistència a la corrosió, mentre que en proporcions més grans disminueix la tenacitat. Millora la maquinabilitat.

Manganès (Mn). Per a baixos continguts de C, disminueix la temperatura de transició dúctil-fràgil (acers de construcció). Augmenta a baix cost la trempabilitat (acers de màquines) i millora la resistència al desgast. Generalment es troba acompanyat d'altres elements d'aliatge.

Molibdè (Mo). Augmenta la trempabilitat, la resistència en calent i la resistència al desgast (element molt eficaç contra la fragilitat en el reveniment). Millora la resistència a la corrosió en els acers inoxidable.

Niobi (Nb). En els acers de baix contingut de C afina el gra i augmenta la resistència i el límit elàstic (acers microaliats). Millora la resistència a baixa temperatura.

Niquel (Ni). Eleva la resistència i la tenacitat dels acers no trempats i, amb continguts >5%, conserva la tenacitat fins a temperatures molt baixes (aplicacions criogèniques). Afavoreix el tremp en profunditat i facilita la creació d'estructures austenítiques estables. Millora la resistència a la corrosió. Dificulta la nitruració i fragilitza els acers nitrurats.

Nitrogen (N). El seu contingut es controla en acers de construcció. Tendència a formar nitrurs molt durs (utilitzat en la nitruració).

Plom (Pb). Millora la maquinabilitat

Silici (Si). Present en tots els acers, és un bon desoxidador. Millora la trempabilitat i augmenta la fluència sota càrrega (acers per a molles). Disminueix la conformabilitat en fred (es limita en acers d'embotició). Element d'aliatge en xapes elèctriques i magnètiques.

Sofre (S). Augmenta la fragilitat i disminueix la resistència a la fatiga (se'n limita el contingut màxim). Fins a un 0,30%, millora la maquinabilitat.

Titani (Ti). S'utilitza com a desoxidant. Gran tendència a formar carburs (acers microaliats). Afina el gra i millora la capacitat de conformació.

Tungstè (o wolframí) (W). Augmenta la resistència i la duresa en acers de continguts mitjà i alt de C. Gran resistència al desgast, especialment en calent (acers d'eines). Augmenta la trempabilitat.

Vanadi (V). En percentatges molt petits, millora la trempabilitat i la resistència en calent (acers de màquines, acers d'eines). Gran tendència a formar carburs (acers microaliats).

Zirconi (Zr). Element desoxidant. Afina el gra i millora les característiques d'embotició.

Classificació dels materials fèrrics

Com en d'altres famílies de metalls, els materials fèrrics s'agrupen tradicionalment en *acers de laminació*, i *foses* i *acers d'emmotllament*. En aquest text s'ha completat aquesta classificació amb una subdivisió dels acers de laminació segons les principals aplicacions.

Acers de laminació

A partir de productes laminats (en alguns casos forjats), les peces es conformen per mecanització, deformació en fred o soldadura. Els principals grups d'acers de laminació (més del 90% dels materials fèrrics) són:

Acers de construcció

- Acers d'ús general

- Acers de resistència millorada

- Acers de resistència a la corrosió millorada

- Acers de calderes i recipients a pressió

- Acers d'embotició i conformació en fred

- Acers de construcció resistents al desgast

Acers de màquines

- Acers de bonificació (trempe i reveniment)

- Acers d'enduriment superficial

- Acers de límit elàstic elevat (o de molles)

- Acers per a mecanització

Acers d'eines

- Acers d'eines al carboni

- Acers per a motlles de plàstic

- Acers d'eines per a treball en fred

- Acers d'eines per a treball en calent

- Acers ràpids

Acers d'usos especials

- Acers inoxidable

- Acers refractaris

- Acers elèctrics i magnètics

Foses i acers d'emmotllament

Materials conformats per fosa i emmotllament, seguits d'altres processos com són mecanització, soldadura o tractaments tèrmics. S'hi inclouen:

- Foses grises i nodulars

- Acers d'emmotllament de diverses aplicacions

12.3 Acers de construcció

Introducció

Els *acers de construcció* agrupen els acers al carboni, acers microaliats i acers de baix aliatge (normalment usats sense tractament tèrmic posterior, excepte la normalització), destinats a la fabricació de construccions unides per soldadura, reblons o cargols. En general, la seva designació reflecteix el camp d'aplicació i la resistència mecànica, ja que aquesta depèn més del procés d'elaboració que de la composició química del material. Per això, la major part d'ells es dissenyen per mitjà del límit elàstic (en les normes més antigues, per la resistència a la ruptura) i no per la composició.

Les propietats mecàniques més rellevants dels acers de construcció són el límit elàstic (eventualment, també la seva variació amb la temperatura), els valors mínims de resiliència segons la temperatura (en especial la zona de transició dúctil-fràgil) i, en determinades aplicacions (acers de calderes per a temperatures altes), la fluència sota càrrega (o *creep*), mentre que les propietats tecnològiques d'incidència més gran són, ultra el preu, la soldabilitat, la resistència a la corrosió, l'aptitud per a la conformació en fred (tall, doblegament, corbament, embotició) i, en determinats productes, les característiques d'acabament superficial.

Característiques

Composició. Estat de desoxidació

Malgrat que la fabricació dels acers efervescents (no desoxidats) és més econòmica, els acers per a construccions soldades solen ser calmats o semi-calmats (desoxidats), ja que tenen una millor soldabilitat. El fòsfor (P) i el sofre (S) augmenten la fragilitat i disminueixen la soldabilitat, per la qual cosa se'n limiten els continguts. El Mn i el Si s'usen com a elements des-oxidants, i el Mn actua també com a element dessulfurant (millora la ductilitat i disminueix la temperatura de transició dúctil-fràgil).

Límit elàstic. Resiliència a baixes temperatures

La limitació del contingut de C en els acers de construcció convencionals, exigida per la soldabilitat i la tenacitat (propietats importants per a la seva aplicació) fa que sigui difícil ultrapassar un límit elàstic de 360 MPa.

Aquest valor s'ha superat amb el desenvolupament d'*acers microaliats*, els quals, per mitjà de petites addicions de Nb, V, Ti (o elements amb efectes anàlegs) i de processos de laminació amb la temperatura controlada, obtenen una estructura més favorable de gra fi amb la presència de carburs finament dispersos en la matriu. Els principals avantatges dels acers microaliats respecte als convencionals són un augment significatiu del límit elàstic (amb valors acceptables a temperatures relativament elevades) i la millora de la resiliència amb la disminució de la temperatura de transició fràgil-dúctil, tot mantenint un baix contingut de C (bona soldabilitat) i sense la necessitat de tractaments tèrmics posteriors (cost més baix).

Soldadura

És el procediment d'unió més freqüent en els acers de construcció. Mentre es realitza, el material de l'entorn de la unió experimenta un cicle tèrmic complet (escalfament per sobre la temperatura de transformació i refredament posterior), l'acer trempa i s'origina una unió dura però fràgil. La *soldabilitat* es relaciona amb el valor del *carboni equivalent* (CEV, en %):

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Com més elevat és el valor de CEV, més és l'acer trempable, però menys soldable, de manera que, a partir de valors de CEV > 0,45%, comencen a caldre precaucions especials durant la soldadura (preescalfament, control de l'energia proporcionada a la peça, estabilització tèrmica posterior).

Conformació en fred i en calent

Els procediments de conformació més freqüents en aquesta família d'acers es basen en la deformació en fred (tall, doblegament, corbat, embotició), tot i que molts d'ells també són aptes per a la conformació en calent. En la majoria dels acers de construcció hi ha prescripcions sobre l'aptitud per al plegament de xapes (radi mínim de plegament que no produeix fissures). L'embotició presenta exigències tecnològiques més complexes que s'analitzen amb els acers de molt baix contingut de C destinats a aquest tipus de conformació.

Acabament superficial

És un dels factors importants en l'aplicació dels acers de construcció, especialment en les xapes. Les condicions superficials dels acers laminats en calent es contemplen en la norma UNE 36.040-91 (EN 10163), on s'especifiquen els tipus d'anomalies (incrustacions, marques, rascades, esquerdes, plecs) admissibles i les que s'han de reparar. Determinats tipus de xapes laminades en fred presenten condicions específiques més exigents.

Aplicacions i normativa

Els acers de construcció, de costos baixos (més del 80% del consum total d'acers), s'utilitzen en aplicacions com ara: bancades de màquines; estructures i ponts; barres per a formigó armat; carrils; recipients, calderes i conduccions; carrosseries d'automòbils i altres vehicles; o bucs de vaixell. Algunes de les normes més característiques són:

UNE 36.040-92	EN 10163	Condicions de subministrament relatives a l'acabament superficial xapes i perfils laminats en calent.
UNE EN 10025		Productes laminats en calent, d'acer no aliat, per a construccions mecàniques d'ús general.
UNE 36.081-76	EU 113-72	Acers de construcció soldables de qualitat especial.
UNE 36.082-84	EU 155-80	Acers de construcció amb resistència a la corrosió atmosfèrica.
UNE 36.084-79	EU 156-80	Acers per a construcció naval.
UNE 36.086-91	EN 10130-91	Banda laminada en fred, d'acer de baix contingut de carboni per a embotició o conformació en fred.
UNE 36.087-74/I-II	EU 28-85	Xapes i bandes d'acer no aliat per a calderes i aparells de pressió.
UNE 36.087-78/III	EU 129-76	Xapes i bandes d'acer aliat amb níquel per a utilització a baixa temperatura.
UNE 36.093-85	EU 111-77	Banda d'acer no aliat, laminada en calent i no recoberta, per a embotició i conformació en fred.
UNE 36.129-89	EU 120-83	Banda d'acer per a botelles de gas soldades.
UNE 36.130-91	EN 10142	Banda d'acer baix en C, galvanitzades en continu per immersió en calent, per a conformació en fred
UNE 36.134-90	EN 10202	Banda d'acer oxicromada electrolíticament.
UNE 36.135-85	EU 152-80	Productes plans d'acer electrozincat.
UNE 36.137-92	EN 10147	Bandes d'acer de construcció, galvanitzades en continu per immersió en calent.

Acers de construcció d'ús general

(UNE EN 10025-94)

Productes d'acer no aliats presentats en forma de xapes i perfils laminats en calent destinats a construccions soldades, reblonades o cargolades, o en forma de totxos, platines i barres destinats a la fabricació de peces mecàniques, tots ells utilitzats a temperatura ambient sense tractament tèrmic posterior (excepte una recuita d'eliminació de tensions o, en productes normalitzats, operacions de conformació en calent). Aquesta norma com-prèn dos grups de materials: *a)* Acers soldables amb prescripcions sobre resiliència (fruit de limitacions en la composició, especialment en el %C), que solen usar-se en elements estructurals; *b)* Acers dels quals no es pot assegurar la soldabilitat ni valors de resiliència (no presenten limitacions sobre el %C), que solen usar-se en la fabricació de peces de màquines.

El fabricant elegeix normalment el procés de fabricació, i el comprador pot optar per demanar-ne informació (excepte per a l'acer *S 185*) o acordar-lo per als acers de més qualitat (graus *JO, J2G3, J2G4, K2G4, K2G4*). Tots els acers són no efervescents (FN, no efervescent; FF, calmat), excepte el *S 235 J2G2* (FU, efervescent), i els *S 185* i *S 235 JR*, en què l'estat de desoxidació queda a l'elecció del fabricant. Els productes plans dels graus *J2G3* i *K2G3* se subministren en estat de normalització mentre que, en la resta de productes plans i llargs, l'estat de subministrement és opcional o a elecció del fabricant. Finalment, a més dels límits imposats a la composició química de la colada o del producte (la Taula 12.4 dóna els límits per al producte), en fer la demanda es pot acordar un contingut de Cu entre 0,25÷0,40%, un valor màxim de carboni equivalent (*CEV*) o, per als acers *S 355*, informació sobre eventuais percentatges d'elements d'aliatge.

S 185

Denominació d'acer sense exigències de composició química, soldadura, tenacitat ni aptitud per a la conformació en fred, amb una resistència mínima exigida molt baixa. Hi poden entrar acers de colades fallides.

S 235, S 275, S 355

Acers de cost molt baix, destinats a tota classe de construccions metàl·liques i peces mecàniques de responsabilitat moderada. Són soldables per tots els procediments, amb soldabilitat decreixent en augmentar el carboni equivalent *CEV* (del *S 235* al *S 355*; dintre de cada un d'ells, la soldabilitat creix amb els graus *JR, JO, J2* i *K2*). S'assegura un valor mínim de resiliència *KV* en funció dels graus (*JR* a 20°C, *JO* a 0°C, *J2* a -20°C, i *K2* a -40°C). Tenen bona aptitud per a la deformació en fred (plegament, conformació amb corròns, estiratge) i també en calent. L'acer *S 235*, fàcil-ment soldable i conformable per forja, s'utilitza en peces i elements de poca responsabilitat. L'acer *S 275*, usat habitualment en forma de perfils i xapes en les estructures d'edificis i de màquines, també s'usa en peces estampades mitjanament sol·licitades. L'acer *S 355*, el menys soldable i deformable dels tres, s'utilitza per a estructures i peces més sol·licitades; algunes de les seves composicions són pròximes a les d'un acer microaliat.

E 295, E 335, E 360

Acers amb una resistència a la tracció i un límit elàstic mínims assegurats (creixents del primer al tercer), però sense limitacions en la composició (fora del % de P, S i N màxims); per tant, no s'asseguren la soldabilitat, l'aptitud per a la conformació en fred (excepte l'estiratge de barres) ni valors mínims de resiliència. Són aptes per a peces de màquines o elements d'estructures no soldades, de bona resistència i duresa, no sotmeses a tractament tèrmic.

Acers de construcció de resistència millorada

(UNE 36.081-76)

Productes d'acer microaliat (amb addicions d'elements afinadors del gra, com Nb, V i Al), que es presenten en forma de xapes, barres i perfils laminats en calent, destinats a construccions soldades altament sol·licitades (ponts, calderes i tubs a pressió, tancs d'emmagatzemament, elements d'an-coratge), sense tractament tèrmic posterior. Aquests acers, no tan sols milloren les característiques mecàniques respecte als acers de construcció d'ús general, sinó també el seu comportament a altes i baixes temperatures. Tots ells són soldables (gràcies al baix contingut de C), l'estat de desoxi-dació és calmat, se subministren normalitzats (eventualment, amb un reve-niment posterior), tenen bona aptitud per al plegament i es poden conformar en calent. Se'n distingeixen tres graus, segons la temperatura d'utilització: *KG*, per a temperatures ambientals; *KW*, amb especificació del límit elàstic mínim fins a temperatures de 400°C; i *KT*, amb especificació de valors de resiliència mínima fins a temperatures de -20°C. En el mercat són fàcils de trobar els acers *AE 355*, *AE 390* i *AE 460*, dels quals la Taula 12.4 en mostra les característiques dels graus *KW* i *KT*.

Acers de construcció de resistència a la corrosió millorada

(UNE 36.082-84)

Productes d'acer calmat, en forma de xapes, barres i perfils laminats en calent, destinats a construccions soldades, reblonades o cargolades sotmeses als agents atmosfèrics (estructures metàl·liques, ponts, grues, vagons, tancament d'edificis, canalitzacions superficials) que presenten resistència a la corrosió millor que els acers de construcció convencionals (fins a 4 vegades més durables). Transcorregut un cert temps, a causa de la seva composició química (cert contingut de Cu i altres elements) i les condicions ambientals, es forma una capa d'òxid autoprotectora de color rogenc (utilitzat en el algun cas com a element ornamental) que deté pràcticament l'avanç de la corrosió en medis urbans i industrials. En ambients marins o d'humitat permanent, malgrat que la corrosió s'alenteix, es recomana una protecció convencional de la superfície. Els més usats són *AE355W 1D* i *AE355W 2D* (sovint coneguts amb el nom comercial de *corten*), acers microaliats de gra fi, soldables, se subministren bruts de laminació o normalitzats i tenen bona aptitud per a la conformació en fred i en calent.

Acers de calderes i recipients de pressió

(UNE 36.087, parts I-74, II-76, III-78 i IV-89)

Les calderes, i altres recipients de pressió tenen condicions de funcionament específiques, com són les tensions perllongades en el temps treballant a diferents temperatures: ambientals (dipòsits de pressió), elevades (calde-res) o molt baixes (sistemes criogènics). Aquesta norma, amb les seves parts, recull els acers adequats a aquestes aplicacions.

Acers al C i al C-Mn (part I)

Acers de calderes d'ús habitual (costos baixos), presentats en forma de xapes de gruixos compresos entre 3÷100 mm i designats segons la resistència a la tracció (en MPa/10, ja que la norma és antiga). Tots ells són soldables, l'estat de desoxidació és calmat o semicalmat, se subministren normalitzats i tenen bona aptitud per al plegament. Aquests acers tenen diferents graus d'acord amb les temperatures de servei: *RA*, per a temperatures ambientals (de -20°C a 100°C); *RC*, amb valors mínims del límit elàstic per a temperatures moderadament elevades (>100°C); i *RB*, amb valors de resiliència mínima per a temperatures moderadament baixes (<-20°C). La designació *I* és per als acers de base, mentre que la designació *II* és per als acers de gra fi obtinguts amb addicions d'elements.

Acers aliats (part II)

Acers al Mo i Cr-Mo (es designen per la composició química), presentats en forma de xapes i bandes de gruixos compresos entre 3÷160 mm, que s'utilitzen a temperatures ambientals i altes (350÷600° C). Tots ells són soldables (contingut de C baix), l'estat de desoxidació és calmat, se subministren normalitzats amb un reveniment posterior, tenen bona aptitud per al plegament i es poden conformar en calent. Els acers *16Mo3* (de propietats i cost més moderats) i *16CrMo45* (de propietats i cost més alts), amb un elevat límit elàstic i una bona resistència a la fluència sota càrrega (*creep*) quan treballen a temperatures superiors a 300°C, tenen àmplies aplicacions en les indústries química, petroquímica i cementera.

Acers aliats al Ni (part III)

Acers al Ni, que es presenten en forma de xapes i bandes de gruixos compresos entre 3÷50 mm, destinats a recipients de pressió que treballen a baixes temperatures (<-20°C). Un dels acers més usats és el *12Ni14*, que ofereix uns valors de resiliència acceptables fins a -100°C.

Acers inoxidable (part IV)

Acers inoxidable, en forma de xapes i bandes de gruixos compresos entre 3÷16 mm, destinats a calderes i recipients de pressió amb fluids corrosius. Els més utilitzats són els acers *AISI 304* i *AISI 316*.

Acers d'embotició i conformació en fred

(UNE 36.086-91; EN 10130; laminats en fred)

(UNE 36.093-85; EU 111-77; laminats en calent)

Bandes i fleixos d'acer no recobert, laminats en fred (o en calent), de contingut baix de C i de gruixos compresos entre 0,35÷3,00 mm (o <10 mm), destinats a embotició i conformació en fred, i presentats en formes de xapes tallades o de bobines. Poden soldar-se pels procediments habituals, i se subministren untats amb oli de manera que no mostrin signes de corrosió en un termini de tres mesos. Normalment se'ls aplica un procés de *temperament* (*skin-pass*) per a eliminar, durant la conformació, els allargaments en el punt de cedència que són la causa de l'aparició del defecte superficial anomenat línies de Lüder. Desgraciadament, aquests acers envelleixen i recuperen la discontinuïtat en el punt de cedència, per la qual cosa han de ser conformats abans d'un temps determinat. L'efecte de l'envelliment s'atenua si s'efectua un adreçament de la banda o fleix immediatament abans d'utilitzar-los.

Els productes laminats en fred poden tenir dues qualitats superficials: *Aspecte superficial A*, en què s'admeten determinats defectes (petits porus, lleugeres ratlles o petites marques) que no afectin la conformabilitat o l'adherència de recobriments superficials; *Aspecte superficial B*, en què almenys una de les cares, pràcticament lliure de defectes, possibilita un aspecte uniforme de la pintura o altres recobriments superficials. En els productes laminats en calent l'aspecte superficial és objecte d'acord.

Paràmetres del material que incideixen en la deformació en fred

Límit elàstic i allargament de ruptura

Els valors del límit elàstic superiors a 240 MPa donen lloc a un retorn elàstic excessiu i al perill de ruptura durant la conformació, mentre que els valors inferiors a 140 MPa donen lloc a peces o elements excessivament tous. Els valors elevats de l'allargament a la ruptura indiquen una bona conformabilitat en fred, essent usuals en els materials laminats en fred allargaments entre 30÷40% i, en els laminats en calent, entre 25÷35%.

Coefficient d'acritud i coeficient d'anisotropia plàstica

Tot i que en la conformació d'una xapa es donen simultàniament diversos modes de deformació, se'n poden distingir dos de bàsics: *a) Estiratge biaxial*, transformació d'una xapa plana circular amb el contorn fixat per un trepitjador en una xapa bombada amb valona, per mitjà d'un punxó semiesfèric; les deformacions crítiques en el centre de la peça segons dues direccions perpendiculars, són iguals i del mateix sentit; *b) Embotició profunda*, transformació d'una xapa plana circular amb la vora lliure en una peça en forma d'olla cilíndrica, per mitjà d'un punxó i una matriu; les deformacions crítiques en la transició de la forma plana a la cilíndrica, segons dues direccions perpendiculars, són iguals però de sentits contraris.

Cada un d'aquests dos processos bàsics de deformació demana característiques diferents del material: *a) L'aptitud per a l'estiratge biaxial* es relaciona amb valors elevats de l'allargament total i del *coeficient d'acritud*, n (mesura el grau d'acritud del material adquirit amb la deformació). Els materials amb valors baixos de n ($0,15 \div 0,20$) donen lloc a aprimaments excessius i fractures de la xapa en les zones crítiques, mentre que valors més elevats de n ($0,22 \div 0,23$) proporcionen més resistència en les zones crítiques (més deformades) i transfereixen la deformació a les zones adjacents i s'evita així la ruptura. Els acers laminats en calent tenen valors de n més baixos que els laminats en fred; *b) L'aptitud per a l'embotició profunda* es relaciona amb valors elevats del *coeficient d'anisotropia plàstica*, r (relació entre les deformacions segons l'amplada i segons el gruix d'una proveta quan ha estat deformada longitudinalment). Com més alt és el valor de r del material, més petita és la variació del gruix i , per tant, un estiratge de la xapa en una direcció es tradueix en un enconyiment similar en la direcció perpendicular. Els acers laminats en calent són generalment isòtrops ($r=1$), mentre que els acers laminats en fred presenten anisotropia (acers efervescents, $r=1,2$; acers calmats, $r=1,6$; acers amb composició i procés controlats, $r=1,8 \div 3$).

Acers de fase dual (o acers dual-phase)

La indústria de l'automòbil ha desenvolupat uns nous acers microaliats de fase dual (amb partícules de martensita disperses en una matriu ferrítica) que presenten una gran conformabilitat per estiratge gràcies a un límit elàstic inicial baix i un allargament a la ruptura ($35 \div 40\%$) i un coeficient d'acritud, n , elevats. A causa del gran enduriment d'aquests acers en ser sotmesos al treball en fred, les peces adquireixen amb la conformació un nou límit elàstic més elevat (fins a 550 MPa), comparable al d'altres acers microaliats. A més, la seva corba de tensió-deformació no té discontinuïtats i , per tant, no apareixen defectes superficials (línies de Lüder).

Acers de construcció resistent al desgast

Hi ha diverses construccions que requereixen acers d'una duresa i resistència al desgast elevades, a més d'una resistència mecànica i tenacitat adequades (caixes de camió; formigoneres; tremuges; maquinària d'obres públiques; maquinària de mines). En aquestes aplicacions s'usen diversos tipus d'acers com ara *acers de bonificació* (vegeu les característiques en la secció d'acers de màquines), *acers de bonificació al B* o *acers austenítics al Mn*. Tots ells es tracten tèrmicament a fi d'aprofitar-ne les possibilitats.

Acers de bonificació

Entre els acers de bonificació utilitzats en aquest tipus de construccions hi ha els següents: *28Mn6*; *37Cr4*; *34CrMo4*, de característiques i costos creixents. Es mecanitzen bé, però convé que les operacions de plegament es realitzin en calent i que després de l'oxitall es faci una recuita d'estabilització. Alhora, són difícilment soldables (elevat % de C), i exigeixen prees-calfament i altres precaucions especials durant la soldadura. Després de conformades les peces i els elements adquireixen, amb el tremp i reveniment, una gran resistència i duresa.

Acers de bonificació al B

L'addició de petits percentatges de bor ($\leq 0,005\%$ B) a acers de baix aliatge i reduït contingut de C, dóna lloc a una gran trempabilitat que es tradueix en unes característiques mecàniques elevades (superiors a les dels acers de bonificació). Si se subministren en estat de tremp i reveniment, aquests acers tenen una elevada resistència, tenacitat i duresa, però les operacions de conformació presenten certes limitacions (els radis de plegament en fred són elevats, $>6\cdot g$, i la soldadura i la deformació en calent s'han de realitzar a temperatures inferiors a 150°C); si se subministren sense tractament tèrmic, ofereixen una gran conformabilitat i soldabilitat, però han de ser trempats i revinguts posteriorment.

Acer austenític al Mn (o acer Hadfield al Mn)

L'acer amb un 12% de Mn, d'estructura austenítica estable a temperatura ambient, mostra una resistència al desgast excel·lent, a més d'una bona resistència i tenacitat. Això es deu a la particularitat que, quan se'l sotmet a un treball amb impactes repetits, la superfície s'endureix fins a valors de 500 HB. És soldable, amb certes precaucions, però es mecanitza amb grans dificultats. A causa del seu elevat cost (unes 300 pta/kg) i de la difícil conformació del material laminat (es pot emmotllar, però), avui dia el seu ús es restringeix a peces i elements sotmesos a condicions d'abrasió molt severes (martells, molins, elements d'excavadora, màquines d'esmerilar, agulles ferroviàries, trituradores).

Taula 12.4 Acers de construcció

		Acers d'ús general (amb especificacions de soldabilitat i resiliència)						
UNE EN 10025-94 (antiga denominació UNE 36.080)		S 235 (AE 235)			S 275 (AE 275)			
Designació numèrica: EN 10027-2		JR ⁽¹⁾ 1.0037	JO 1.0114	J2 ⁽²⁾ 1.0116/17	JR 1.0044	JO 1.0143	J2 ⁽²⁾ 1.0144/45	
Composició química⁽³⁾								
Carboni	C	%	≤0,21	≤0,19	≤0,19	≤0,24	≤0,21	≤0,21
Manganès	Mn	%	≤1,50	≤1,50	≤1,50	≤1,60	≤1,60	≤1,60
Silici	Si	%	-	-	-	-	-	-
Fòsfor	P	%	≤0,055	≤0,050	≤0,045	≤0,055	≤0,050	≤0,045
Sofre	S	%	≤0,055	≤0,050	≤0,045	≤0,055	≤0,050	≤0,045
Nitrogen	N	%	≤0,011	≤0,011	-	≤0,011	≤0,011	-
Propietats mecàniques								
Resistència tracció	g≤3	MPa	360÷510	360÷510	360÷510	430÷580	430÷580	430÷580
	3<g≤100	MPa	340÷470	340÷470	340÷470	410÷560	410÷560	410÷560
	100<g≤250	MPa	-	320÷470	320÷470	380÷540	380÷540	380÷540
Límit elàstic	g≤16	MPa	235	235	235	275	275	275
	16<g≤40	MPa	225	225	225	265	265	265
	40<g≤100	MPa	-	215	215	235	235	235
	100<g≤250	MPa	-	175	175	205	205	205
Allargament ruptura	g≤3	%	17	17	17	14	14	14
	3<g≤100	%	24	24	24	20	20	20
Resiliència KV	20°C	J	27/-	(-)	(-)	17/23	(-)	(-)
	0°C	J	-	27/23	(-)	-	17/23	(-)
	-20°C	J	-	-	27/23	-	-	17/23
	-40°C	J	-	-	-	-	-	-
Propietats tecnològiques								
Cost		Pta/kg	65	70	70	75	75	75
Soldabilitat		[1÷5]	[5]	[5]	[5]	[5]	[5]	[5]
Carboni equivalent	g≤40	%	≤0,35	≤0,35	≤0,35	≤0,40	≤0,40	≤0,40
	40<g≤150	%	-	≤0,38	≤0,38	≤0,42	≤0,42	≤0,42
	150<g≤250	%	-	≤0,40	≤0,40	≤0,44	≤0,44	≤0,44
Conf. amb corròns	g≤6	-	1·g	1·g	1·g	1,5·g	1,5·g	1,5·g
	6<g≤8	-	1,5·g	1,5·g	1,5·g	2·g	2·g	2·g
Radi plegament	8<g≤20	-	2·g	2·g	2·g	2,5·g	2,5·g	2,5·g
Resistència corrosió		[1÷5]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]

(1) JR (1.0037), estat de desoxidació a elecció del fabricant; JRG1 (1.0036), acer efervescent (FU), %N≤0,009; JRG2 (1.0038), acer no efervescent (FN), %C≤0,19 si g≤40, %C≤23 si g>40, resiliència=27/23 J

(2) J2G3, K2G3, se subministren normalitzats (productes plans); JRG4, K2G4, el fabricant elegeix la forma de subministrament

				Acers d'ús general (sense esp. de soldabilitat, resiliència)			
S 355 (AE 355)				S 185 (A-310)	E 295 (A 490)	E 335 (A 590)	E 360 (A 690)
JR 1.0045	JO 1.0553	J2 ⁽²⁾ 1.0570/77	K2 ⁽²⁾ 1.0595/96	1.0035	1.0050	1.0060	1.0070

≤0,27	≤0,23	≤0,23	≤0,23	-	-	-	-
≤1,70	≤1,70	≤1,70	≤1,70	-	-	-	-
≤0,60	≤0,60	≤0,60	≤0,60	-	-	-	-
≤0,055	≤0,050	≤0,045	≤0,045	-	≤0,055	≤0,055	≤0,055
≤0,055	≤0,050	≤0,045	≤0,045	-	≤0,055	≤0,055	≤0,055
≤0,011	≤0,011	-	-	-	≤0,011	≤0,011	≤0,011
510÷680 490÷630 450÷630	510÷680 490÷630 450÷630	510÷680 490÷630 450÷630	510÷680 490÷630 450÷630	310÷540 290÷510 -	490÷660 470÷610 440÷610	590÷770 570÷710 540÷710	690÷900 670÷830 640÷830
355	355	355	355	185	295	335	360
345	345	345	345	175	285	325	355
315	315	315	315	-	255	295	325
275	275	275	275	-	225	255	285
14	14	14	14	10	12	8	4
20	20	20	20	18 ⁽⁴⁾	18	14	9
27/23	(-)	(-)	(-)	-	-	-	-
-	27/23	(-)	(-)	-	-	-	-
-	-	27/23	(-)	-	-	-	-
-	-	-	40/33	-	-	-	-
80	80	80	80	-	-	-	-
[4]	[4]	[4]	[4]	[1]	[1]	[1]	[1]
≤0,44	≤0,44	≤0,44	≤0,44	-	-	-	-
≤0,47	≤0,47	≤0,47	≤0,47	-	-	-	-
≤0,49	≤0,49	≤0,49	≤0,49	-	-	-	-
2·g	2·g	2·g	2·g	-	-	-	-
2,5·g	2,5·g	2,5·g	2,5·g	-	-	-	-
3·g	3·g	3·g	3·g	-	-	-	-
[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]

(3) Anàlisi de producte

(4) Gruixos de $3 \leq g \leq 40$ mm(5) Valor per a gruixos $10 \leq g \leq 150$ mm/Valor per a gruixos $150 < g \leq 250$ mm

Taula 12.4 Acers de construcció (continuació)

Acers de característiques mecàniques millorades						
UNE	AE 355 KW/KT		AE 390 KW/KT		AE 460 KW/KT	
	F-6411	F-6412	F-6414	F-6415	F-6419	F-6420
36.081-76						
DIN	1.0562		(1.8900)		1.8905	
ASTM	A-516 Cr 70				A-572 Cr 65	

Composició química								
Carboni	C	%	≤0,18		≤0,20		≤0,20	
Manganès	Mn	%	0,90÷1,20		1,00÷1,60		1,00÷1,70	
Silici	Si	%	≤0,50		≤0,50		≤0,50	
Fòsfor i sofre	P/S	%	≤0,035 / ≤0,030		≤0,035 / ≤0,030		≤0,035 / ≤0,030	
Crom	Cr	%	≤0,25		≤0,30		≤0,50	
Níquel	Ni	%	≤0,30		≤0,70		≤0,80	
Molibdè	Mo	%	≤0,10		≤0,30		≤0,40	
Coure	Cu	%	≤0,35		≤0,50		≤0,70	
Altres		%	Nb, V, Al		Nb, V, Al, Ti		Nb, V, Al, Ti	
Propietats mecàniques								
Resistència tracció		MPa	490÷630	490÷630	510÷690	510÷690	570÷720	570÷720
Límit elàstic	20°C	MPa	≥345	≥345	≥375	≥375	≥440	≥440
(g≤50 mm)	200°C	MPa	≥245	-	≥275	-	≥335	-
	400°C	MPa	≥165	-	≥185	-	≥235	-
	500°C	MPa	-	-	-	-	-	-
Allargament ruptura		%	≥22	≥22	≥20	≥20	≥17	≥17
Resiliència KV	20°C	J	≥56	(-)	≥56	(-)	≥52	(-)
	0°C	J	≥48	≥56	≥48	≥56	≥44	≥48
	-20°C	J	≥40	≥48	≥40	≥48	≥40	≥40
	-50°C	J	-	≥28	-	≥28	-	≥28
	-100°C	J	-	-	-	-	-	-
Res. fluència (10 ³)	550°C	MPa	-	-	-	-	-	-
	600°C	MPa	-	-	-	-	-	-
Propietats tecnològiques								
Cost		Pta/kg	95		105		110	
Soldabilitat		[1÷5]	[4]		[4]		[4]	
Radi de plegament		(1)	2·g		2,5·g		3·g	
Resistència corrosió		[1÷5]	-		-		-	
Temp. normalització		°C	-		-		-	
Temp. reveniment		°C	-		-		-	

(1) Els radis de plegament es donen segons el gruix (g), en mm

A. anticorrosió	Acers de calderes i recipients de pressió					
AE 355 W 1D F-6436	A 42 RC II F-6307	A 42 RB II F-6310	A 52 RB II F-6320	16 Mo 3 F-2601	16 CrMo 45 F-2631	12 Ni 14 F-2643
36.082-84	36.087-74/I			36.087-74/II		36.087-78/III
1.8962 A-242 75	A-515 60	A-516 60	A-516 70	1.5415 A-204	1,7335 A-387 11	~1.5637

≤0,12 ~0,75 ~1,00 ~0,040* 0,30÷1,25 ≤0,65 - 0,25÷0,55 Al,Nb,V,Ti *0,06<P<0,15	≤0,20 0,50÷1,30 ~0,35 ~0,040 - - - N≤0,009 Al o altres	≤0,20 0,50÷1,30 ~0,35 ~0,040 - - - N≤0,009 Al o altres	≤0,22 0,90÷1,60 ~0,50 ~0,040 - - - N≤0,009 Al o altres	0,12÷0,20 0,50÷0,80 0,15÷0,35 ~0,035 ≤0,30 0,25÷0,35 - -	0,10÷0,18 0,50÷0,80 0,15÷0,35 ~0,035 0,80÷1,15 - 0,40÷0,60 - -	≤0,15 ≤0,80 0,15÷0,35 ~0,035 - 3,25÷3,75 - - -
510÷610 ≥345 - - - ≥22 ≥27 ≥27 ≥27 - - - -	410÷530 ≥220 ≥190 ≥135 - ≥22 (-) (-) ≥27 - - -	510÷630 ≥220 - - - ≥22 (-) ≥55 ≥47 ≥27 - - -	510÷630 ≥320 - - - ≥19 (-) ≥55 ≥47 ≥27 - - -	430÷530 ≥275 ≥220 ≥165 ≥150 ≥23 ≥30 - - - 64 -	440÷570 ≥285 ≥245 ≥200 ≥185 ≥21 ≥30 - - - 109 44	450÷600 ≥265 - - - ≥22 (-) ≥59 ≥55 ≥47 ≥27 - -
100 [3] 2,5·g [3] - -	80 [4] 2·g - -	85 [4] 2·g - -	85 [4] 3·g - -	120 [4] 3·g [2] 880÷940 600÷650	210 [4] 3·g [3] 900÷950 630÷710	- [4] 2·g [3] 820÷850 580÷630

Taula 12.5 Acers d'embotició i conformació en fred

Acers (laminats en fred) d'embotició i conformació en fred					
UNE 36.086-91 (EN 10130)	Fe P01	Fe P03	Fe P04	Fe P05	Fe P06
Antiga denominació UNE	AP 00	AP 01	AP 02	AP 03	AP 04
	Comercial	Embotició			
		moderada	normal	profunda	profunda ⁽¹⁾

Composició química							
Carboni	C	%	<0,12	<0,10	<0,08	<0,06	<0,02
Manganès	Mn	%	<0,045	<0,035	<0,030	<0,025	<0,020
Fòsfor i sofre	P/S	%	<0,60	<0,45	<0,40	<0,35	<0,25
Titani (o níquel)	Ti	%	-	-	-	-	<0,30
Propietats mecàniques							
Resistència ruptura	MPa		270÷410	270÷370	270÷350	270÷330	270÷350
Límit elàstic	MPa		140÷280	140÷240	140÷210	140÷180	120÷180
Allargament ruptura	%		>28	>34	>38	>40	>38
Duresa	HRB		45	40	40	40	40
Propietats tecnològiques							
Cost	Pta/kg		-	-	-	-	-
Soldabilitat	[1÷5]		[5]	[5]	[5]	[5]	[5]
Envelliment	mesos		3	6	6	6	il·lim.
Coefficient d'acritud	<i>n</i>	-	-	-	>0,180	>0,200	>0,220
Coef. anisot. plàstica	<i>r</i>	-	~1,0	>1,3	>1,6	1,9÷3,0	1,8÷3,0

⁽¹⁾ No experimenta envelliment

Taula 12.6 Acers no aliats de continguts baixos i mitjans de C

		20°C	200°C	400°C	0÷200°C	0÷400°C
Propietats físiques						
Densitat	Mg/m ³	7,85	-	-	-	-
Coefficient de dilatació	µm/m·K	-	-	-	11,1÷12,2	12,8÷13,9
Calor específic	J/kg·K	430÷450	520÷540	600÷620	-	-
Conductivitat tèrmica	W/m·K	48÷52	46÷50	42÷45	-	-
Resistivitat elèctrica	nΩ·m	140÷160	260÷300	460÷500	-	-
Mòdul d'elasticitat	GPa	205÷210	-	-	-	-
Coefficient de Poisson	-	0,30	-	-	-	-

12.4 Acers de màquines

Introducció

Acers destinats a la fabricació d'elements que exerceixen funcions de responsabilitat en el guiatge o en la transmissió de les parts mòbils de les màquines. Es poden agrupar en quatre categories:

Acers de bonificació

Acers destinats a la fabricació de peces resistents (generalment sotmeses a fatiga) de les transmissions i sistemes de guiatge de les màquines (arbres i eixos, cigonyals, bulons, bieles, palanques). Són materials amb capacitat de tremp i reveniment en tota la massa (tot i que s'usen també per a tremp superficial). S'agrupen sota el nom d'*acers de bonificació*.

Acers d'enduriment superficial

Acers destinats a la fabricació de peces que materialitzen els enllaços de les màquines (coixinets i guies de lliscament; rodaments i guies lineals; rodes dentades; lleves). Combinen unes elevades característiques superficials (duresa elevada, resistència al desgast, resistència a la fatiga superficial) amb una bona tenacitat al nucli per a suportar cops i sotragades. Entre ells hi ha els *acers de cementació* i els *acers de nitruració*.

Acers de límit elàstic elevat

Acers destinats a la fabricació de peces de màquines que durant el seu funcionament experimenten grans deformacions elàstiques, sovint sota sol·licitacions dinàmiques (molles, elements elàstics). Combinen un límit d'elasticitat elevat (possibilitat de grans deformacions), una bona resistència a la fluència (pràcticament no cedeixen amb el temps) i una resistència a la fatiga elevada (suporten càrregues repetides). S'agrupen sota la denominació d'*acers de molles*.

Acers per a mecanització

Acers destinats a la fabricació de peces que requereixen un gran volum de mecanització per a la seva conformació. Molts són derivats d'acers de bonificació o de cementació amb addicions d'elements que els fan més aptes per a la mecanització: *acers de maquinabilitat millorada*. D'altres són acers sense propietats resistents especials concebuts per a adaptar-se a una gran mecanització: *acers de mecanització fàcil*.

Normativa

Algunes de les normes més característiques dels acers de màquines són:

UNE 36.013-79	EU 84-70	Acers de cementació
UNE 36.014-75	EU 85-70	Acers de nitruració
UNE 36.015-77	EU 89-71	Acers de molles conformats en calent i tractats tèrmicament
UNE 36.021-80	EU 87-70	Acers per a mecanització
UNE 36.022-91	EU 90-71	Acers per a vàlvules de motors de combustió interna
UNE 36.051-91/I-II	EN 10083/1-2	Acers de tremp i reveniment

Acers de bonificació (tremp i reveniment)

(UNE 36.051-91, EN 10083-91; substitueixen UNE 36.011 i 36.012)

Productes d'acer aliat o no aliat presentats en forma de barres laminades en calent, xapes o bandes laminades en calent o en fred, i peces forjades, usats normalment en estat de tremp i reveniment (bonificats), tot i que també s'utilitzen freqüentment en estat de normalització, destinats a la fabricació de peces de màquines. Els acers d'aquesta norma constitueixen el nucli bàsic de materials per a les peces de màquines amb responsabilitat mecànica.

Els acers de la norma EN 10083-2 són *acers de qualitat*, mentre que els acers de la norma EN 10083-1 són *acers especials*. La diferència entre els primers (amb continguts de fòsfor i sofre més elevats i sense limitació d'inclusions en forma d'òxid) i els segons és que en aquests darrers s'especifiquen valors mínims de resiliència obtinguts en l'assaig de flexió per xoc, i valors mínims de trempabilitat de l'assaig de Jominy.

La designació habitual dels acers d'aquesta norma (com els de les restants d'aquesta secció) n'indica la composició (que cal ajustar bé per tal que responguin als tractaments tèrmics), mentre que d'altres acers (la major part dels de construcció) es designen per la resistència. Els principals materials d'aquesta norma són:

2 C 25 (F-1120)

Acer suau de resistència moderada i trempabilitat escassa, però de gran tenacitat (peces sotmeses a xocs). Té una bona ductilitat (deformació en fred, plegament, forja) i una bona soldabilitat (pot formar part de conjunts soldats). S'usa, sovint en estat de normalització, per a peces sotmeses a baixes sol·licitacions (cargols poc carregats, separadors, dolles i peces auxiliars).

2 C 35 (F-1130)

Acer semisuaui de resistència mitjana, de trempabilitat baixa i de bona tenacitat. Es pot trempar en aigua i s'usa per a peces de petites i mitjanes dimensions moderadament sol·licitades (arbres, bieles, forquilles de canvi, bulons, cargols, cremalleres).

2 C 45 (F-1140)

Acer semidur de bona resistència mecànica i resistència al desgast que manté una tenacitat raonable. És difícilment soldable. En general es trempa en aigua (trempabilitat baixa, i perill de distorsions) però per a petites seccions ($d < 10\text{mm}$) també es trempa en oli. En el tremp superficial per inducció dóna bons resultats. S'aplica a peces de petites dimensions fortament sol·licitades (arbres i eixos, palanques, bieles, cargols, maniguets, engranatges). És un dels acers més usats en el mercat.

2 C 55 (F-1150)

Acer dur d'elevada resistència mecànica en el qual destaca més la duresa i la resistència al desgast que la tenacitat. No és soldable. Es trempa en aigua i en oli (petites peces) i és molt recomanable per al tremp per inducció. S'aplica a peces sotmeses a un fort desgast i a xocs moderats (eixos, tensors, eines agrícoles, frens de tambor).

28 Mn 6 (~F-1203)

Acer de trempabilitat mitjana i bona resistència al desgast. Utilitzacions anàlogues a la de l'acer 2C35.

46 Cr 2

Acer de trempabilitat lleugerament més elevada que els anteriors. S'utilitza per a cargols d'alta resistència i altres petites peces sol·licitades.

37 Cr 4 (F-1201)

Acer de resistència i trempabilitat mitjana. Utilització habitual en la mecànica i en l'automòbil (arbres, bulons, engranatges, balancins, palanques de direcció).

34 CrMo 4 (F-1250)

Acer de bona resistència i tenacitat. Gràcies a la seva bona trempabilitat, és molt utilitzat per a peces bonificades (tremp en oli i reveniment) de seccions mitjanes i grans, sotmeses a fortes sol·licitacions (arbres, cigonyals, rodes dentades i cremalleres, bieles, cargols d'alta resistència). Entre els acers de característiques elevades és el més usat i es troba fàcilment en el mercat.

42 CrMo 4 (F-1252)

Acer de característiques i aplicacions anàlogues a l'anterior, però amb una resistència més gran. En estat de normalització té bona duresa i tenacitat, i en estat bonificat es mecanitza bé. És adequat per a tremp superficial.

34 CrNiMo 6 (~F-1270)

Acer d'una gran trempabilitat (més elevada que els anteriors) i una bona tenacitat. Es comporta bé als xocs i als esforços de torsió. S'utilitza en peces de grans dimensions fortament sol·licitades (arbres i cigonyals, grans rodes dentades amb tremp total, peces sotmeses a gran fatiga).

36 NiCrMo 16 (~F-1260)

Acer de trempabilitat excel·lent (s'autotrempa per refredament a l'aire). És adequat per a grans peces mecàniques sotmeses a grans esforços de fatiga. Ofereix la màxima seguretat en peces de la indústria aeroespacial.

Acers d'enduriment superficial

(UNE 36.013 i 36.014)

Acers que per mitjà de diversos procediments (tremp superficial, cementació, nitruració) aconseguen una capa superficial de duresa elevada, tot mantenint un nucli tenaç. Són adequats, doncs, per a la fabricació de peces sotmeses a grans pressions superficials (engranatges, lleves, rodaments, rodes de fricció) o a un desgast superficial important (coixinets de fricció, guies, maniguets de frec per a retenidors).

La pràctica del disseny de màquines tendeix a resoldre els enllaços més crítics de les màquines per mitjà de la selecció de components especialitzats que incorporen els materials (i geometries) més adequats (rodaments, guies lineals, junts universals, reductors d'engranatges). Tanmateix, resten altres aplicacions que exigeixen peces específiques (no subministrades pel mercat) amb superfícies fortament sol·licitades i, aleshores, es fa necessari determinar l'acer i el tractament. Les solucions convencionals són:

Enduriment per tremp superficial

Enduriment superficial d'una peça d'acer en les zones més fortament sol·licitades per contactes concentrats amb altres peces que s'obté per mitjà s'un escalfament ràpid seguit de tremp. Aquest procés s'aplica a acers de bonificació amb un contingut mitjà de C (0,3÷0,7%; en especial, als acers 2C45, 42CrMo4

i $34CrNiMo6$, UNE 36.051-91; anteriors denominacions F-1140, ~F-1252 i ~F-1270 de la norma UNE 36.012-75) i presenta les variants següents: a) *Enduriment a la flama*. Escalfament localitzat de l'acer per mitjà d'una flama oxiacetilènica i tremp posterior, generalment seguit d'una recuita d'alliberament de tensions. És un procediment molt versàtil i adaptable que proporciona una capa gruixuda (3÷6 mm; difícil-ment inferior a 1,5 mm); b) *Enduriment per inducció*. Escalfament superficial produït per corrents induïdes d'alta freqüència (10÷500 kHz) que circulen per la perifèria del metall (efecte *skin*), i tremp posterior. El temps d'escalfament és molt breu (5÷15 s), i s'obté una capa endurida (amb tensions residuals de compressió), de gruix més petit (0,25÷4 mm) i inversament proporcional a la freqüència. És adequat per a peces de formes senzilles fabricades en grans sèries per processos automatitzats. El cost de l'equipament és elevat.

Enduriment per difusió

Enduriment superficial d'un acer obtingut per mitjà de la difusió en les capes superficials del material d'elements com ara el C (*cementació*, Secció 12.2), el N (*nitruració*, Secció 12.2) o simultàniament el C i el N (*carbonitruració*, procés intermedi entre els dos anteriors realitzat a una temperatura entre 700÷900°C). Els *acers de cementació* (norma UNE 36.013-76), de contingut baix de C ($\geq 0,20\%$), proporcionen capes superficials dures (fins a 900 HV) i gruixudes (fins a 4 mm), però les peces experimenten una distorsió important que requereix un acabament posterior al tractament, normalment per rectificació. Els *acers de nitruració* (norma UNE 36.014-75), que requereixen un temps de procés molt més prolongat, proporcionen capes superficials més dures (fins a 1000 HV) però més primes i, en canvi, la distorsió resultant en les peces és molt més petita, ja que la temperatura del tractament és molt més baixa i, en general, no és necessària una operació d'acabament posterior.

Acers de cementació

(UNE 36.013-76)

C 10 k (F-1510)

Acer al C de baixa resistència mecànica però de gran tenacitat. Pot ser fàcilment conformat per deformació en fred i presenta una soldabilitat excel·lent. És adequat per a peces resistents al desgast que no requereixin duresa en el nucli, ja que només trempa la capa cementada. S'utilitza per a petits eixos, lleves i pinyons de poca responsabilitat. El seu preu és econòmic i es troba fàcilment en el mercat (pot substituir l'antic acer F-1110 de la norma UNE 36.011)

16 MnCr 5 (F-1516)

Acer amb una duresa superficial, una trempabilitat en el nucli i una resis-tència a la fatiga mitjanes. S'utilitza amplament en automoció (pinyons de diferencial, arbres acanalats).

18 CrMo 4 (F-1550)

Acer de trempabilitat mitjana, bona resistència al desgast i bona tenacitat en el nucli. S'utilitza per a peces cementades de gruixos no molt grans (bulons, pinyons, arbres de lleves).

15 NiCr 11 (F-1540)

Acer d'una excel·lent tenacitat (suporta bé els xocs), bona resistència mecànica en el nucli i bona resiliència a baixes temperatures (fins a -100°). S'utilitza en peces de maquinària de seccions mitjanes i petites que exerceixen funcions d'una certa responsabilitat (rodes dentades i lleves).

20 NiCrMo 2 (F-1522)

Acer de trempabilitat mitjana amb una gran regularitat de característiques, bona tenacitat i resistència en el nucli. S'usa en peces cementades de seccions mitjanes en maquinària agrícola i transmissions de vehicles industrials.

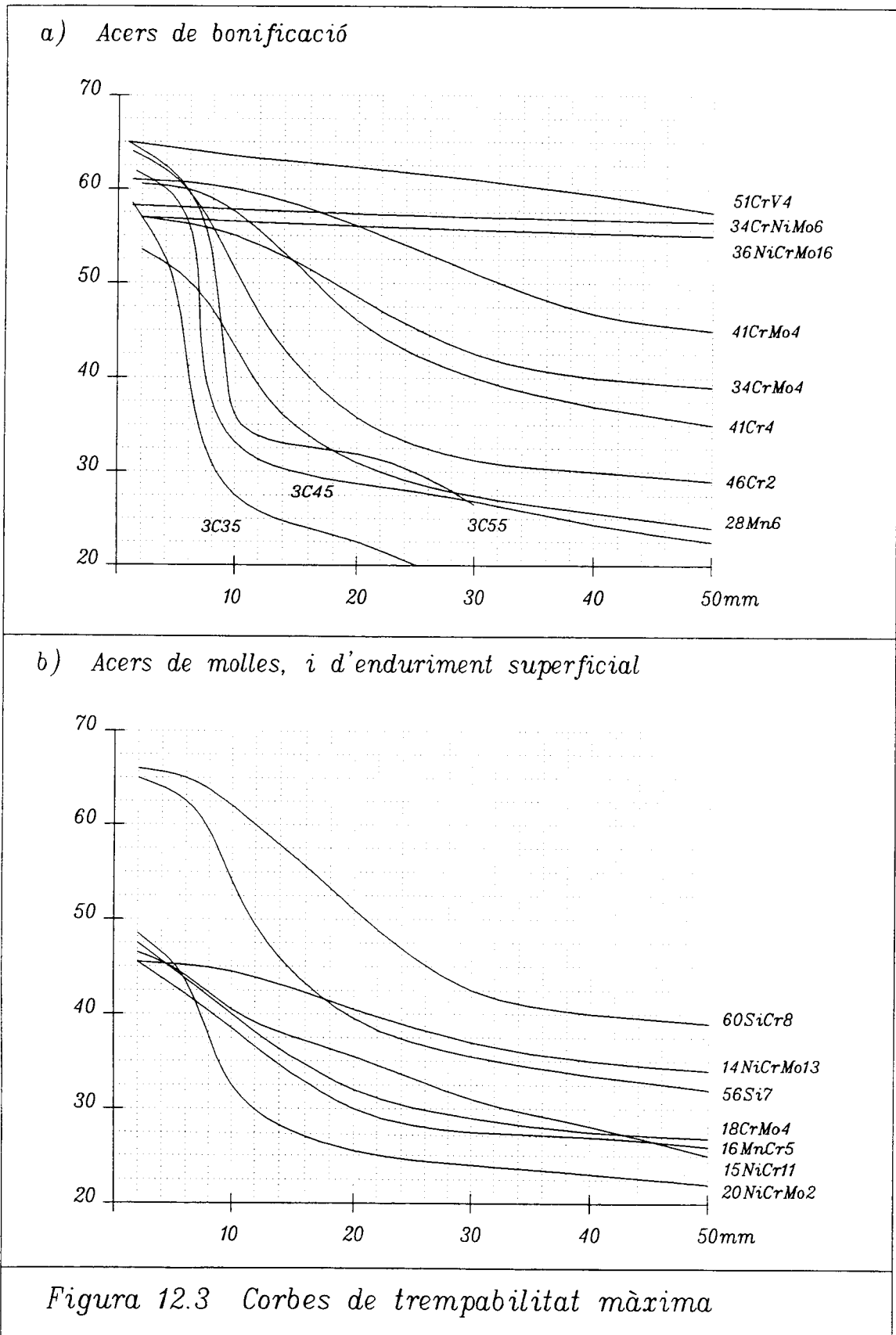
14 NiCrMo 13 (F-1560)

Acer de gran trempabilitat que combina una elevada duresa a la superfície amb unes característiques mecàniques molt elevades al nucli. Gran tenacitat (bona resistència als xocs) i gran resistència a la fatiga (fins i tot a baixes temperatures). S'usa en peces de grans dimensions fortament sol·licitades i de gran responsabilitat (grans rodaments, grans rodes dentades i corones).

Acers de nitruració

(UNE 36.014-75)

Els acers de nitruració acostumen a contenir elements amb forta tendència a formar nitrurs. L'Al assegura la duresa de la superfície, mentre que el Cr assegura la duresa del nucli. La capa nitrurada no es forma tan ràpidament com la capa cementada, i els cicles de temps són més llargs. En general, les peces nitrurades són mecanitzades prèviament, després bonificades, posteriorment acabades de mecanitzar i finalment nitrurades, ja que l'enduriment es produeix amb una mínima distorsió.



31 CrMoV 10 (F-1721)

Acer de nitruració que ofereix la màxima resistència mecànica en el nucli ($R_m=1080\div 1270$ MPa) amb una duresa superficial elevada.

41 CrAlMo 7 (F-1740)

Acer de nitruració que ofereix una resistència en el nucli una mica inferior ($R_m=930\div 1130$ MPa), però amb la màxima duresa superficial. Tanmateix, la capa nitrurada tendeix a ser fràgil.

Acers de límit elàstic elevat (o acers de molles)

Acers destinats a la fabricació de molles i altres elements elàstics que, durant el seu funcionament en el si de la màquina, poden experimentar grans deformacions elàstiques (límit elàstic molt elevat) sense arribar a la ruptura o a la deformació plàstica i que, en cas d'estar sotmesos a tensions estàtiques prolongades, no presenten una fluència (o *creep*) significativa amb el temps.

En funció de la forma del material de què es parteix, hi ha dos grups d'acers de molles: *fil d'acer de molles*; *bandes d'acer de molles*.

Fil d'acer de molles

Fil d'acer sotmès a patenting, per a conformar en fred

La major part de molles helicoidals de compressió, tracció, torsió i altres formes de dimensions petites i mitjanes són conformades en fred a partir de fils d'acer al carboni (0,50÷1,00 %C) de diferents graus (el de més qualitat rep el nom de *corda de piano*) sotmesos a *patenting* (vegeu Secció 12.2). Les molles d'acer conformades en fred resulten de cost baix, ja que es presten a la fabricació en grans sèries.

Aquests fils d'acer se subministren amb una elevada resistència a la ruptura (superior a la que s'obtidria per tremp i reveniment), un límit elàstic baix que proporciona bona deformabilitat (mesurada pel nombre de torsions, sobre una longitud de $100\cdot d$, que suporta el fil abans de trencar-se) i un bon acabament superficial per a assegurar una bona resistència a la fatiga. Un cop conformada la molla, el material se sotmet a un tractament d'eliminació de tensions a $200\div 300^\circ\text{C}$ (en realitat és un envelliment accelerat) que eleva el límit elàstic fins a valors pròxims al límit de ruptura.

La norma alemanya DIN 17223 estableix, per a fils d'acer de fins a $d=20$ mm, 4 graus de qualitats creixents destinats a (vegeu Taula 12.2): *Fil d'acer A*: molles helicoïdals de tracció i compressió (el material treballa a torsió), i de torsió i altres formes (el material treballa, en general, a flexió) amb sol·licitacions estàtiques petites i sol·licitacions dinàmiques ocasionals; *Fil d'acer B*: els mateixos tipus de molla amb sol·licitacions estàtiques mitjanes i sol·licitacions dinàmiques baixes; *Fil d'acer C*: els mateixos tipus de molla amb sol·licitacions estàtiques altes i sol·licitacions dinàmiques baixes; *Fil d'acer D*: molles de tracció i compressió amb sol·licitacions estàtiques altes i sol·licitacions dinàmiques mitjanes, o molles helicoïdals de torsió, o amb d'altres formes, sotmeses a sol·licitacions estàtiques i dinàmiques altes.

Fil d'acer bonificat, per a conformar en fred

Acers no aliats i aliats, subministrats en estat de bonificació i destinats a la conformació de molles en fred, amb una tenacitat i una resistència a la fatiga més altes, tot i que també més propensos a les deformacions plàstiques. Entre aquests, destaquen els fils d'acer per a molles de vàlvula (*VD* de la norma DIN 17223) aptes per a sol·licitacions de torsió molt altes i, en el cas d'acers aliats, una temperatura de servei elevada (240°C per als acers al *Si-Cr*).

Fil d'acer per a conformar en calent i bonificar

La conformació en calent s'utilitza, o bé en molles helicoïdals de grans dimensions ($d=18\div 60$ mm) que requereixen acers aliats per a assegurar una bona trempabilitat, o bé en molles que requereixen una gran deformació del fil d'acer durant la seva fabricació. El material es conforma en estat tou (laminació, recuita) i posteriorment es bonifica per tremp i reveniment.

Els acers aliats més utilitzats en fil d'acer per a conformar en calent són (normes UNE 36.015-76 i DIN 17221): *51CrV4* (també inclòs en la norma UNE 36.051-91), destinat a molles helicoïdals i barres de torsió fortament sol·licitades (vehicles), a una temperatura màxima de servei de 220°C ; *60SiCr7*, especialment apte per a aplicacions amb xocs, a una temperatura de servei més elevada (240°C).

Cal tenir present que, si no es controla correctament el procés, la fabricació de molles conformades en calent i bonificades dona lloc a variacions dimensionals i de duresa molt grans. Aquest fet, sumat a l'increment del cost que pot arribar a ser del 100%, fa que el seu ús sigui justificable tan sols quan els requeriments ho demanin.

Banda d'acer de molles

Bandes d'acer per a conformar en fred

Acers presentats en forma de bandes laminades en fred destinades a la conformació de tota classe de molles i peces elàstiques per mitjà de tall, plegament, corbament, estampació o embotició (DIN 17222). Si la conformació comporta deformacions moderades, pot utilitzar-se un material bonificat de subministrament, però si les deformacions són més severes, és recomanable usar un material de laminació i bonificar-lo posteriorment.

Els acers més utilitzats són (UNE 36.015-76): *C79*, per a molles i peces elàstiques altament sol·licitades fabricades amb xapa prima; *55Si7*, d'ús general per a molles sotmeses a fatiga amb bona resistència al desgast, de trempabilitat mitjana (ballestes de poc gruix: ≤ 7 mm); *51CrV4*, per a ballestes altament sol·licitades.

Bandes d'acer per a conformar en calent i bonificar

A fi d'assegurar una suficient trempabilitat del material, les molles de làmines de grans seccions (gruixos entre $g=12\div 35$ mm), com ara ballestes o volanderes Belleville, s'han de fabricar amb els mateixos acers aliats que els fils d'acer de grans diàmetres (*51CrV4*, *60SiCr7*).

Acers de molles amb requeriments especials

Acers inoxidable de molles

Els principals acers inoxidable destinats a la fabricació de molles són: *X12CrNi17-7 (AISI 301)*, presentat en fil d'acer o en bandes, és el més utilitzat per la seva bona resistència mecànica (fins a temperatures moderadament altes) i el seu cost relativament moderat; *X5CrNiMo17-12-2 (AISI 316)*, de resistència a la corrosió més elevada, però de propietats elàstiques més reduïdes i de cost més elevat; *17-7 PH (Tipus 631)*, endurit per precipitació després de la conformació, té una alta resistència mecànica però el seu cost és elevat.

Acers de molles resistents a la temperatura

Algunes aplicacions de molles requereixen temperatures de servei relativament altes, que donen lloc a diversos fenòmens perjudicials: la disminució del límit elàstic; l'augment de la fluència; i condicions menys favorables respecte a la corrosió.

Els acers ressenyats en aquest apartat cobreixen moltes de les aplicacions a temperatures moderades (Taula 12.7), però existeixen aplicacions que demanen acers o aliatges refractaris.

Taula 12.7 **Temperatures de servei i costos relatius d'acers de molles**

Material	T. servei	Cost	Material	T. servei	Cost
Acer sotmès a <i>patenting</i>	≤120°C	1,0	Acer inoxidable 301	≤290°C	4,7
Corda de piano	≤120°C	1,4	Acer inoxidable 316	≤290°C	-
Acer de molles bonificat	≤120°C	1,3	Acer inoxidable 17-7 PH	≤340°C	8,7
Acer conformat en calent	≤120°C	-	Aliatge A-286	≤510°C	-
Acer al <i>Cr-V</i>	≤220°C	-	Inconel 718	≤590°C	-
Acer al <i>Si-Cr</i>	≤240°C	3,9			

Acers per a mecanització

(UNE 36.021-91)

Un dels processos més importants per a conformar i, sobretot, per acabar les peces d'acer és la mecanització i, en aquest sentit, hi ha tres famílies d'acers orientades a facilitar-ne la realització:

Acers amb el sofre controlat

Les normes dels acers de bonificació (UNE 36.051) i dels de cementació (UNE 36.013) inclouen variants amb el S controlat a valors compresos entre 0,020÷0,040%. Aquests acers, sense que es puguin considerar de maquinabilitat millorada, ofereixen tanmateix una resposta molt més homogènia a la mecanització que els acers amb S no controlat.

Acers de maquinabilitat millorada

Són materials que, partint de les composicions bàsiques de determinats acers de bonificació (norma UNE 36.051) o de cementació (norma UNE 36.013), incrementen el percentatge de S (entre 0,09÷0,40%) i, eventualment, addicionen petites quantitats d'altres elements (fonamentalment de Pb), a fi de millorar la maquinabilitat. En general, algunes de les característiques mecàniques, com ara la resistència a la fatiga, en surten lleugerament perjudicades.

Acers de mecanització fàcil

L'objectiu fonamental que es persegueix en aquests acers, destinats fonamentalment a decoletatge, és una aptitud excel·lent a la mecanització per arrancament de material i velocitats de tall molt elevades. Aquestes característiques s'aconsegueixen amb addicions de S, Pb, Se, Bi o Te (la norma tan sols contempla els acers que contenen S o S-Pb).

Taula 12.8 Acers de màquines

		Acers no aliats					
EN 10083-2 (UNE 36.051-2/91) EN 10083-1 (UNE 36.051-1/91)		1 C 25 ⁽¹⁾ 2 C 25 3 C 25 ⁽²⁾	1 C 35 ⁽¹⁾ 2 C 35 3 C 35 ⁽²⁾	1 C 45 ⁽¹⁾ 2 C 45 3 C 45 ⁽³⁾	1 C 55 ⁽¹⁾ 2 C 55 3 C 55 ⁽²⁾	28 Mn 6	
Anteriors UNE 36.011/36.012		F-1120/25	F-1130/35	F-1140/45	F-1150/55	(F-1203)	
DIN AISI/SAE		1.1158/63 1025	1.1181/80 1035	1.1191/201 1045	1.1203/09 1055	1.1170 (1527)	
Composició química							
Carboni	C	%	0,22÷0,29	0,32÷0,39	0,42÷0,50	0,52÷0,60	0,25÷0,32
Crom	Cr	%	-	-	-	-	-
Manganès	Mn	%	0,40÷0,70	0,50÷0,80	0,50÷0,80	0,60÷0,90	1,30÷1,65
Molibdè	Mo	%	-	-	-	-	-
Níquel	Ni	%	-	-	-	-	-
Vanadi	V	%	-	-	-	-	-
Propietats mecàniques							
<i>Estat de normalització TN</i>							
Resist. tracció		MPa	≥470÷440	≥550÷500	≥620÷560	≥680÷620	≥630÷590
Límit elàstic		MPa	≥260÷230	≥300÷245	≥340÷275	≥370÷300	≥345÷290
Allargament		%	≥22÷23	≥19÷18	≥14÷16	≥11÷12	≥17÷18
<i>Estat tremp i revenim. TQ</i>							
Resistència	d≤16mm	MPa	550÷700	630÷780	700÷850	800÷950	800÷950
	16≤d≤40	MPa	500÷650	600÷750	650÷800	750÷900	700÷850
	40≤d≤100	MPa	-	550÷700	630÷780	700÷850	650÷800
	100≤d≤160	MPa	-	-	-	-	-
	160≤d≤250	MPa	-	-	-	-	-
Límit elàstic	d≤16mm	MPa	≥370	≥430	≥490	≥550	≥590
	16≤d≤40	MPa	≥320	≥380	≥430	≥490	≥490
	40≤d≤100	MPa	-	≥320	≥370	≥420	≥440
	100≤d≤160	MPa	-	-	-	-	-
	160≤d≤250	MPa	-	-	-	-	-
Allargament (A)		%	≥19÷21	≥17÷20	≥14÷17	≥12÷15	≥13÷16
Resiliència (KV)		J	≥45	≥35	≥25	-	≥35÷40
<i>Estat d'ablaniment TA</i>							
Duresa		HB	-	-	207	229	223
Propietats tecnològiques							
Cost		pta/kg	100	100	100	100	100
Maquinabilitat		°C	70	65	55	50	58
Temp. normalització		°C	880-920	860-900	840-880	825-865	850-890
Temp. de tremp		°C	860÷900	840÷880	820÷860	805÷845	830÷870
Medi de tremp		°C	aigua	aigua/oli	aigua/oli	oli/aigua	aigua/oli
Temp. reveniment		°C	550÷660	550÷660	550÷660	550÷660	540÷680

⁽¹⁾ Acers de qualitat (amb continguts de fòsfor i sofre més elevats i amb el contingut d'inclusions en forma d'òxid limitat) per als quals no s'especificuen ni la resiliència ni la trempabilitat

⁽²⁾ Acers amb un contingut controlat de sofre (0,020÷0,040 %), amb una resposta a la mecanització més homogènia

⁽³⁾ Evolució dels valors mínims de la resistència i el límit elàstic (disminueixen) i de l'allargament (augmenta) segons

Acers aliats						
46 Cr 2 46 CrS 2 ⁽²⁾	37 Cr 4 37 CrS 4 ⁽²⁾	34 CrMo 4 34 CrMoS 4 ⁽²⁾	42 CrMo 4 42 CrMoS 4 ⁽²⁾	34 CrNiMo 6	36 NiCrMo 16	51 CrV 4
	F-1201/06	F-1250/55	F-1252/57	((F-1270))	(F-1260)	F-1430
1.7006/25 5046	1.7034/38 5135	1.7220/26 4135	1.7225/27 4140	(1.6582)	-	1.8159 6150

0,42÷0,50 0,40÷0,60 0,50÷0,80 - - -	0,34÷0,41 0,90÷1,20 0,60÷0,90 - - -	0,30÷0,37 0,90÷1,20 0,60÷0,90 0,15÷0,30 - -	0,38÷0,45 0,90÷1,20 0,60÷0,90 0,15÷0,30 - -	0,30÷0,38 1,30÷1,70 0,50÷0,80 0,15÷0,30 1,30÷1,70 -	0,32÷0,39 1,60÷2,00 0,30÷0,60 0,25÷0,45 3,60÷4,10 -	0,47÷0,55 0,90÷1,20 0,70÷1,10 - - 0,10÷0,25
- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
900÷1100 800÷950 650÷800 - - ≥600 ≥550 ≥400 - - ≥12÷15 ≥30÷35 223	950÷1150 850÷1000 750÷900 - - ≥750 ≥630 ≥510 - - ≥11÷14 ≥30÷35 235	1100÷1200 900÷1100 800÷950 750÷900 700÷850 ≥800 ≥650 ≥550 ≥500 ≥450 ≥11÷15 ≥35÷45 223	1100÷1300 1000÷1200 900÷1100 800÷950 750÷900 ≥900 ≥750 ≥650 ≥550 ≥500 ≥10÷14 ≥30÷35 241	1200÷1400 1100÷1300 1000÷1200 900÷1100 800÷950 ≥1000 ≥900 ≥800 ≥700 ≥600 ≥9÷13 ≥35÷45 248	1250÷1450 1250÷1450 1100÷1300 1000÷1200 1000÷1200 ≥1050 ≥1050 ≥900 ≥800 ≥800 ≥9÷13 ≥30÷45 269	1100÷1300 1000÷1200 900÷1100 850÷1000 800÷950 ≥900 ≥800 ≥700 ≥650 ≥600 ≥9÷13 ≥30÷30 248
140 - - 820÷860 oli/aigua 540÷680	145 68 - 825÷865 oli/aigua 540÷680	150 68 - 830÷870 oli/aigua 540÷680	160 65 - 820÷860 oli/aigua 540÷680	200 50 - 830÷860 oli 540÷660	200 - - 865÷885 aire/oli 550÷650	180 - - 820÷860 oli 540÷680

els diferents grups de dimensions: $d \leq 16$; $16 < d \leq 100$; $100 < d \leq 250$

⁽⁴⁾ Evolució dels valors mínims de l'allargament i la resiliència (augmenten) segons els grups de dimensions: $d \leq 16$; $16 < d \leq 40$; $40 < d \leq 100$; $100 < d \leq 160$ i $160 < d \leq 250$

⁽⁵⁾ L'acer 2C45 (anterior F-1140) té una maquinabilitat de 55, i l'acer 11SMnPb28 (F-2112) té una maquinabilitat 160

Taula 12.8 Acers de màquines (continuació)

UNE	Acers de cementació				
	C 10 k F-1510	16 MnCr 5 F-1516	18 CrMo 4 F-1550	15 NiCr 11 F-1540	20 NiCrMo 2 F-1522
	36.013-76				
DIN AISI/SAE	1.1121 1010	1.7131 (5115)	1.7262 (4118)	1.5732 (3316)	1.6523 8620

Composició química							
Carboni	C	%	0,07÷0,13	0,13÷0,19	0,15÷0,21	0,10÷0,16	0,17÷0,22
Manganès	Mn	%	0,30÷0,60	1,00÷1,30	0,60÷0,90	0,35÷0,65	0,60÷0,90
Silici	Si	%	0,15÷0,40	0,15÷0,40	0,15÷0,40	0,15÷0,40	0,15÷0,40
Crom	Cr	%	-	0,80÷1,10	0,85÷1,15	0,60÷0,90	0,35÷0,65
Níquel	Ni	%	-	-	-	2,75÷3,25	0,40÷0,70
Molibdè	Mo	%	-	-	0,15÷0,25	-	0,15÷0,40
Altres		%	-	-	-	-	-
Propietats mecàniques							
Resist. tracció	d≤10mm	MPa	540÷830	930÷1220	1030÷1370	1030÷1420	1030÷1420
	10≤d≤30	MPa	440÷740	830÷1130	880÷1180	930÷1220	830÷1130
	30≤d≤65	MPa	-	690÷980	740÷1030	780÷1080	690÷980
	65≤d≤160	MPa	-	-	-	-	-
Límit elàstic	d≤10mm	MPa	>345	>885	>785	>785	>785
	10≤d≤30	MPa	>295	>585	>635	>685	>590
	30≤d≤65	MPa	-	>490	>590	>635	>540
	65≤d≤160	MPa	-	-	-	-	-
Allargament ruptura		%	>15	>12	>11	>10	>11
Resiliència	d≤65mm	J	34	>20	>24	>34	>29
	65≤d≤160	J	-	-	-	-	-
Duresa per a mecanitzar		HB	<130	<205	<205	<215	<210
Duresa després tractament		HRC	-	38÷46	39÷47	38÷47	40÷48
Propietats tecnològiques							
Cost		pta/kg ⁽¹⁾	120	150	165	180	-
Maquinabilitat			55	-	-	-	65
Temp. conformació calent		°C	-	-	-	-	-
Temp. cement./nitruració		°C	880÷950	880÷950	880÷950	880÷950	880÷950
Temp. tremp nucli		°C	880÷920	860÷900	860÷900	830÷870	860÷900
Temp. tremp capa		°C	770÷810	860÷900	800÷840	760÷800	800÷840
Medi de tremp		()	aigua	oli	oli	oli	oli
Temp. reveniment		°C	150÷200	150÷200	150÷200	150÷200	150÷200

⁽¹⁾ L'acer 2C45 (anterior F-1140) té una maquinabilitat de 55, i l'acer 11SMnPb28 (F-2112) té una maquinabilitat 160

Acers de nitruració			Acers de molles (conformació en calent)			A. rodaments
14 NiCrMo 13 F-1560	31 CrMoV 10 F-1721	41 CrAlMo 7 F-1740	C 79 F-1410	56 Si 7 F-1440	60 SiCr 8 F-1442	100 Cr 6 F-1310
UNE 36.014-75			36.015-76			UNE 36.027
1.6657 9315	- -	1.8509 Nitr alloy 135	1.0605 1080	1.0904 9255	1.7103 9262	1.2067/3505 52100

0,11÷0,17	0,28÷0,35	0,38÷0,45	0,72÷0,85	0,52÷0,60	0,57÷0,64	0,95÷1,10
0,30÷0,60	0,40÷0,70	0,50÷0,80	0,50÷0,80	0,60÷0,90	0,70÷1,00	0,25÷0,45
0,15÷0,40	0,15÷0,40	0,20÷0,50	0,15÷0,40	1,50÷2,00	1,70÷2,20	0,15÷0,35
0,80÷1,10	2,30÷2,80	1,50÷1,80	-	-	0,25÷0,40	1,35÷1,65
3,00÷3,50	-	-	-	-	-	-
0,20÷0,30	0,30÷0,50	0,25÷0,40	-	-	-	-
-	V=0,2÷0,3	Al=0,8÷1,2	-	-	-	-
1130÷1520	-	-	>1180	>1320	>1370	-
1130÷1420	-	-	-	-	-	-
980÷1270	1030÷1220	930÷1130	-	-	-	-
-	-	830÷1030	-	-	-	-
>880	-	-	>880	>1130	>1180	-
>880	-	-	-	-	-	-
>835	>830	>740	-	-	-	-
-	-	>690	-	-	-	-
>11	>10	>12	>6	>6	>5	-
>29	30	20	-	-	-	-
-	-	25	-	-	-	-
<240	-	-	<275	<290	<330	<205
38÷46	>64	>68	-	57÷65	59÷66	65
-	240	220	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	40
-	-	-	900÷840	900÷830	920÷830	-
880÷950	490÷510	500÷520	-	-	-	-
830÷870	870÷910	880÷920	820÷850	840÷870	830÷860	880÷920
760÷800	-	-	-	-	-	770÷810
oli	oli	oli	oli	oli	oli	aigua
150÷200	570÷650	570÷650	400÷550	400÷550	400÷550	150÷200

Taula 12.9 Fils d'acer per a molles

		Fils d'acer de molles			
DIN 17.223		A	B	C	D
Diàmetres fils d'acer	mm	1÷10	0,3÷20	2÷20	0,07÷20
Resist. tracció	d=1 mm	1720÷1970	1980÷2220		2230÷2470
	d=2 mm			1980÷2200	
	d=10 mm	1060÷1230	1240÷1400	1410÷1570	1410÷1570
Mòdul d'elasticitat	E	210			
Mòdul de rigidesa	G	81,5			

Taula 12.10 Propietats físiques dels acers de màquines

Acers no aliats

		20°C	200°C	400°C	0÷200°C	0÷400°C
Propietats físiques ⁽¹⁾						
Densitat	Mg/m ³	7,85				
Coefficient de dilatació	µm/m·K				11,1÷12,2	12,8÷13,9
Calor específic	J/kg·K	430÷450	520÷540	600÷620		
Conductivitat tèrmica	W/m·K	48÷52	46÷50	42÷45		
Resistivitat elèctrica	nΩ·m	140÷160	260÷300	460÷500		
Mòdul d'elasticitat	GPa	205÷210				
Coefficient de Poisson	-	0,30				

Acers aliats

		20°C	200°C	400°C	0÷200°C	0÷400°C
Propietats físiques ⁽¹⁾						
Densitat	Mg/m ³	7,85				
Coefficient de dilatació	µm/m·K				11,6÷13,0	13,2÷13,8
Calor específic	J/kg·K	460÷480	500÷520	520÷600		
Conductivitat tèrmica	W/m·K	38÷48	24÷44	32÷38		
Resistivitat elèctrica	nΩ·m	220÷240	290÷350	480÷530		
Mòdul d'elasticitat	GPa	205÷210				
Coefficient de Poisson	-	0,30				

Taula 12.11 Acers per a mecanització

	Sense tractament		Cementa- ció	Bonificació	
UNE 36.021-80	11 SMn 28 F-2111	11SMnPb28 F-2112	10 S 20 F-2121	35 MnS 6 F-2131	45 MnS 6 F-2133
DIN	1.0715	1.0718	1.0721	(1.0726)	(1.0727)
AISI/SAE	(1213)	(12L14)	(1108)	1137	1144

Composició química							
Carboni	C	%	<0,14	<0,14	0,07÷0,13	0,33÷0,39	0,41÷0,48
Manganès	Mn	%	0,90÷1,30	0,90÷1,30	0,50÷0,90	1,30÷1,70	1,30÷1,70
Silici	Si	%	<0,05	<0,05	0,15÷0,40	0,10÷0,40	0,10÷0,40
Fòsfor	P	%	<0,11	<0,11	<0,06	<0,04	<0,04
Sofre	S	%	0,24÷0,32	0,24÷0,32	0,15÷0,25	0,09÷0,13	0,24÷0,32
Plom	Pb	%	-	0,15÷0,35	-	-	-
Propietats mecàniques							
<i>Estat brut laminació</i>			-	-	-	-	-
Duresa	d≤100mm	HB	156	156	146	217	230
<i>Estat brut laminació</i>			-	-	-	-	-
Res. tracció	d≤40mm	MPa	460÷750	460÷750	440÷740	-	-
	40≤d≤100	MPa	380÷630	380÷630	-	-	-
Límit elàstic	d≤40mm	MPa	370	370	350	-	-
	40≤d≤100	MPa	240	240	-	-	-
Allargament	d≤100mm	%	>10	>10	>9	-	-
<i>Estat normalització</i>			-	-	-	-	-
Resistència tracció		MPa	380÷510	380÷510	-	-	-
Límit elàstic		MPa	215	215	-	-	-
Allargament ruptura		%	>20	>20	-	-	-
Duresa		HB	152	152	-	-	-
<i>Estat tremp i reveniment</i>			-	-	-	-	-
Res. tracció	d≤40mm	MPa	-	-	540÷880	670÷860	720÷910
	40≤d≤100	MPa	-	-	440÷720	620÷810	650÷860
Límit elàstic	d≤40mm	MPa	-	-	320	470	510
	40≤d≤100	MPa	-	-	260	440	490
Allargament	d≤100mm	%	-	-	>14	>15	>15
Propietats tecnològiques							
Cost	pta/kg ₍₁₎		95	100	-	-	125
Maquinabilitat			136	160	-	70	80
Temp. normalització	°C		890÷920	890÷920	-	850÷875	840÷870
Temp. de tremp	°C		-	-	880÷950	-	-
Temp. cementació	°C		-	-	870÷910	840÷870	830÷860
Temp. reveniment	°C		-	-	150-200	540-680	540-680

(1) L'acer 2C45 (anterior F-1140) té una maquinabilitat de 55, i l'acer 11SMnPb28 (F-2112) té una maquinabilitat de 160

Materials per a elements de màquines

En el darrer apartat d'aquesta secció s'ha volgut fer, en forma de resum, una exposició a la inversa entre els elements de màquines i els materials. Així doncs, per a cada un dels tipus d'element de màquina més freqüents, s'enumeren els principals materials que s'usen, anant més enllà dels acers de màquines, si és necessari.

Eixos i arbres

Els arbres de petites dimensions i baixa responsabilitat es poden realitzar amb pràcticament qualsevol tipus d'acer sense tractar. Tanmateix, els eixos i arbres de més responsabilitat es fabriquen amb acers de bonificació, els no aliats, sovint en estat de normalització, i els aliats, després de tractats. Els acers més utilitzats són els següents: acer 2C25 UNE 36.051 (anteriorment F-1120 de la norma UNE 36.011), per a arbres sotmesos a baixes sol·licitacions (és fàcilment soldable); acer 2C45 UNE 36.051 (anteriorment F-1140), amb una penetració del tremp suficient per a arbres de diàmetres petits (fins a 40 mm); 34CrMo4 UNE 36.051 (anteriorment F-1250) per a arbres fortament sol·licitats fins a diàmetres de 250 mm; acer 34CrNiMo6 EN 10083 (aproximadament F-1270), per a arbres de gran responsabilitat i de gran dimensió.

Alguns eixos i arbres estriats, o amb superfícies sotmeses a fregament (retenidors, juntes d'estanqueïtat) es poden realitzar amb acers de cementació o amb acers amb un recobriment de crom dur. Si està sotmès a corrosió, també es fan amb en acer inoxidable. Rarament els arbres es fabriquen amb altres materials.

Elements resistents diversos

En les màquines intervenen una gran quantitat de peces i elements que fan importants funcions en les transmissions i els sistemes de guiatge. D'acord amb el tipus de sol·licitació a què estan sotmesos, es realitzen amb un tipus d'acer o altre.

Per a fabricar passadors, clavetes, topalls i elements anàlegs, poden usar-se des d'acers d'ús general (E295, E335, E360 de la norma EN 10025) fins a acers al C normalitzats o bonificats (2C25, 2C45 de la norma UNE 36.051), depenent de les dimensions i sol·licitacions de les peces.

Altres peces fortament sol·licitades i amb formes complexes (bieles, palanques, suports, ganxos, cigonyals) han estat fabricades tradicionalment per forja i després tractades tèrmicament, normalment a partir d'acers de bonificació (2C25, 2C45, 37Cr4 i 34CrMo4 de la norma UNE 36.051, amb trempabilitats creixents). Tanmateix, aquest estat de coses s'ha modificat darrerament per la competència d'altres materials i processos. Per un costat, les foses nodulars (de resistència i tenacitat molt millorades respecte a les foses grises) han substituït satisfactòriament en moltes aplicacions a les peces forjades. I, per altre costat,

els acers perlítics microaliats (entre ells l'acer *49MnVS3*, de número DIN 1.1199) poden obtenir característiques de resistència i tenacitat suficients a partir del control de la velocitat de refredament del material des de la forja, evitant el tractament de bonificació posterior.

Hi ha peces de subjecció en les màquines (passadors, anells) que requereixen grans característiques elàstiques, les quals es realitzen a partir d'acer al C per a molles.

Cargols i elements roscats

Els acers per a cargols (al C, microaliats, i de baix aliatge) es classifiquen segons la resistència mecànica que cal assegurar (denominació X.Y: $R_m=100\cdot X$, en MPa; R_e en MPa= $10\cdot X\cdot Y$, segons la norma UNE 17.721), mentre que la seva composició pot variar depenent dels diàmetres de les mètriques (la Taula 12.8 dóna una orientació sobre els acers utilitzats per a cada qualitat i dimensió). Cada dia, però, és més freqüents l'ús de cargols d'acer inoxidable (el material més habitual és *AISI 304*), de resistència mecànica més baixa (com a màxim, equivalents a la classe 5.6), per la qual cosa cal comprovar-ne la resistència.

Taula 12.12 **Classes de cargols i materials usuals**

Classe	R_m (MPa)	R_e (MPa)	Conformats en fred			Conformats en calent		
			<M8	<M18	<M36	<M8	<M18	<M36
5.6	500	300			3C25			
6.8	600	480			35B2 ⁽¹⁾ 3C35			3C45 42Cr2
8.8	800	640	22B2 ⁽¹⁾ 28B2 ⁽¹⁾	35B2 ⁽¹⁾ 3C35	34Cr4 37Cr4	22B2 ⁽¹⁾ 28B2 ⁽¹⁾	3C45	46Cr2
10.9	1000	900	22B2 ⁽¹⁾ 28B2 ⁽¹⁾	34Cr4	41Cr4 34CrMo4 41CrMo4	35B2 ⁽¹⁾ 3C35	41Cr4	41Cr4 34CrMo4 41CrMo4
12.9	1200	1080		34Cr4 41Cr4 41CrMo4	30CrNiMo8 34CrNiMo6		34Cr4 41Cr4 41CrMo4	30CrNi-Mo8 34CrNi-Mo6

⁽¹⁾ Els materials 22B2, 28B2 i 35B2 són acers amb traces de B (les dues primeres xifres indiquen el contingut de C)

Engranatges i lleves

Els engranatges i les lleves transmeten forces dinàmiques elevades entre superfícies amb un lliscament cinemàtic, a través d'àrees molt reduïdes. De forma general, doncs, els materials per a fabricar aquests elements han de tenir una gran duresa i resistència a la fatiga superficial, unes bones condicions de

lliscament (especialment si les condicions de lubricació no són òptimes) i alhora mantenir un nucli suficientment tenaç per a suportar eventuais cops i sotragades. Per a engranatges i lleves de petites dimensions i poc sol·licitats es poden utilitzar acers al C normalitzats (2C25, 2C45 de la norma UNE 36.051). Quan les sol·licitacions són més grans, s'acostuma a donar un tremp superficial a l'acer (2C45, 34CrMo4 de la norma UNE 36.051, per a trempabilitats creixents) mentre que, per a sol·licitacions superiors, els procediments usuals són la cementació (C10k, 16MnCr5, 20NiCrMo2, 14NiCrMo13 de la norma UNE 36.013, segons trempabilitats creixents) i més rarament la nitruració (31CrMoV10, 41CrAlMo7, de la norma UNE 36.014).

En les reduccions amb grans corones, el pinyó sol ser d'acer cementat, mentre que la corona es realitza d'acer normalitzat i, quan les condicions de lubricació són precàries, la corona també es realitza de fosa grisa o de fosa nodular (ofereixen un lliscament millor quan falla el lubricant).

En els engranatges de vis sense fi, on es produeix un gran lliscament entre les dents, el vis s'acostuma a realitzar d'acer trempat o cementat i la roda de bronze fosforós (velocitats mitjanes), bronze al plom (velocitats elevades) o bronzes a l'alumini (grans càrregues a baixes velocitats).

En transmissions de baixa càrrega i cost moderat són cada dia més freqüents els engranatges de material plàstic, entre els quals els més usats són les poliamides i els poliacetals.

Rodaments i components amb rodolament

Els materials dels rodaments (pistes de rodolament i elements rodolants), així com els d'altres components assimilables (guies lineals, cargols de boles, rodes de fricció), suporten grans pressions superficials (1000÷2000 MPa), per la qual cosa han de tenir una gran duresa, un límit elàstic elevat i una gran resistència al desgast, combinades amb una bona tenacitat per a suportar vibracions i xocs. Els acers per a rodaments (contemplats en la norma UNE 36.027) es divideixen en quatre grups: *a*) Acers especials de bonificació (coneguts com *acers de rodaments*), de contingut alt de C (1%); *b*) Acers de cementació, de contingut baix de C (0,2%); *c*) Acers per a elevades temperatures; *d*) Acers resistents a la corrosió.

Els acers de rodaments, tractats per mitjà d'un procés de bonificació (o tremp superficial) més simple que la cementació, poden suportar càrregues superiors (gràcies a la presència de carburs finament distribuïts en l'estructura martensítica que proporcionen dureses en tota la secció de fins a 58 HRC) i ofereixen una millor estabilitat dimensional. L'acer bàsic és el 100Cr6 (F-1310 de la norma UNE 36.027; Taula 12.6), de trempabilitat mitjana (peces de gruixos petits), bona resistència al desgast, però sensible als xocs. Altres variants d'aquest acer, amb addicions de Mn (100CrMn4, F-1311) i de Mn-Mo (100CrMnMo7, F-1314), de trempabilitat més elevada, s'usen per a seccions més gruixudes.

Els acers de cementació, de bona maquinabilitat abans del tractament, tenen una millor resistència a la fatiga superficial (a causa de les tensions residuals de compressió a la superfície) i una tenacitat del nucli més elevada. El més utilitzat és el *16MnCr5* (F-1516 d'UNE 36.013; o F-1517 d'UNE 36.027, o la seva variant *20MnCr5*), però també s'utilitzen altres acers de cementació (*18CrMo4*, *20NiCrMo2*).

Quan els rodaments han de treballar entre $150\div 350^{\circ}\text{C}$, cal adoptar acers especials amb els carburs estabilitzats per mitjà d'elements d'aliatge com ara Cr, Mo, V i Si per a millorar la seva resistència en calent. En les aplicacions en què es requereix una gran resistència a la corrosió, cal adoptar acers inoxidable martensítics com ara el *AISI 440C* (la cementació no és aplicable en aquest tipus d'acers).

Coixinets i elements de fricció

Uns dels punts més crítics de les màquines són aquells on dues peces tenen moviment relatiu. Molts d'ells es resolen per mitjà de rodaments i altres components de rodolament però, en molts altres, el moviment mutu es confia al lliscament entre elements de fricció. Entre aquests darrers, els més freqüents són els coixinets de fricció, però cal no oblidar les ròtules, les pollegueres, les guies de fricció o els cargols de potència.

En general, els elements de fricció aparien una part dura, normalment la interior (o eix) que és d'acer, amb una part més tova, generalment l'exterior (o allotjament), que pot ser d'una gran diversitat de materials, combinació que ha de complir certs requisits com són un baix coeficient de fricció, una bona capacitat d'absorbir càrregues superficials i una bona resistència al desgast. El primer que cal dir és que l'apariament acer/acer és inadequat per al lliscament sense lubricació, ja que produeix una acció abrasiva mútua molt acusada. Els principals materials que configuren la part tova (generalment l'allotjament) són: *a*) Foses grises o nodulars (elevades càrregues superficials i acceptable lliscament en condicions límit); *b*) Bronzes fosforosos (elevades càrregues superficials i bones condicions de lliscament; el bronze sinteritzat és porós i absorbeix lubricant); *c*) Bronzes al plom (bon coeficient de fricció i resistència al desgast, baixa duresa que permet compensar les desalineacions); *d*) Bronzes a l'alumini (gran capacitat de càrrega però pitjor coeficient de fricció); *e*) Materials tous per a coixinets (*babbits*); *f*) Altres materials metàl·lics (plata, aliatges d'alumini antifricció); *g*) Materials ceràmics; *h*) Materials plàstics (*PTFE*; o materials que l'incorporen, de coeficient de fricció extraordinàriament baix; *PE-UHMW*, per a guies, d'una resistència a l'abració extraordinàriament elevada; *PA* i *POM*, de bona consistència mecànica i adequades propietats lliscants).

12.5 Acers d'eines

Introducció

Acers que requereixen unes característiques mecàniques i tèrmiques especials, com ara una gran duresa, una bona resistència al desgast i una elevada tenacitat, mantenint en molts casos aquestes característiques a temperatures elevades o una gran estabilitat dimensional durant el tractament tèrmic, destinats fonamentalment a la fabricació d'eines manuals, de tall, de mecanització, motlles, matrius, corrons de laminació, fileres d'extrusió o d'estiratge i altres eines o utilitatges anàlegs, però que cada cop troben més aplicacions en peces de màquines altament sol·licitades que requereixen característiques similars.

La major part dels acers d'eines s'obtenen per laminació, d'altres es conformen per fosa o per forja i, determinats materials s'han de transformar per mitjà de la metal·lúrgia de pólvores (Powder-Metallurgy P/M), però tots ells, per a desenvolupar les seves propietats mecàniques, s'han de tractar tèrmicament. A causa de la distorsió dimensional que experimenten durant el tremp, les peces es deixen a unes dimensions aproximades abans del tractament i s'acaben posteriorment. Tanmateix, elements d'aliatge de determinats acers d'eines proporcionen les propietats requerides amb un tremp poc sever, que dóna lloc a una baixa distorsió. A continuació es descriuen les principals famílies d'acers d'eines.

Acers d'eines per a treball en fred

Acers d'eines que es caracteritzen per l'elevada duresa a temperatures baixes (generalment $<200^{\circ}\text{C}$) la qual, tanmateix, no retenen (o la dismi-nueixen sensiblement) quan treballen a temperatures més elevades. No tots ells tenen les mateixes propietats i els grups més significatius són:

Acers d'eines al carboni

Acers al C (0,50÷1,20%) de baix cost, però de trempabilitat baixa i defor-mabilitat molt elevada (es trenpen en aigua). En resulta una estructura amb un nucli tenaç i una superfície de duresa elevada que, tanmateix, no reté en calent (adequats tan sols per al treball en fred). La resistència al desgast és baixa i, per tant, la vida de l'eina és curta. Presenten la millor maquinabilitat entre els acers d'eines (tanmateix, relativament reduïda en el context dels restants tipus

d'acer) i són fàcilment forjables a partir d'un material normalitzat o quan el contingut de C supera l'1,1%, després d'una recuita d'esferoïdització per a evitar la fragilitat. Eventualment s'usen acers al C amb petites addicions de V per a millorar la trempabilitat i la resistència al desgast. En destaquen els següents:

C 51 U (UNE F-5131, ~DIN 1.1730)

Els acers de contingut més baix de C (0,50÷0,70%) s'usen en aplicacions on predomina la tenacitat (martells, eines percussores, eines manuals i d'agricultura).

C 70 U (UNE F-5103, DIN 1.1620)

Els acers de contingut mitjà de C (0,70÷0,90%) s'usen en aplicacions on la tenacitat i la duresa són igualment importants (punxons, eines per a la pedra, cisalles).

C 102 U (UNE F-5117, DIN 1.1545), **102 V 2** (UNE F-5118)

Els acers de continguts més alts de C (0,90÷1,20%) s'usen en aplicacions on predomina la resistència al desgast i el manteniment del fil de tall (galgues, broques, escariadors, mascles i fileres de roscar, eines de torn, fileres d'extrusió en fred).

Acers d'eines aliats per a treball en fred

Acers aliats, generalment amb un contingut elevat de C (0,50÷2,10%), trempats en oli o aire (eventualment també en sals), que obtenen una gran trempabilitat (gran profunditat de tremp) amb una distorsió dimensional molt baixa. També adquireixen una gran duresa superficial que, tanmateix, no mantenen a temperatures elevades (per sobre dels 150°C). Els més freqüents són:

90 MnCrV 8 (UNE F-5229, DIN 1.2842, AISI O2)

Acer de baix aliatge (cost moderat), de trempabilitat alta (es trempa en oli), que manté una bona estabilitat dimensional durant el tractament tèrmic. Adquireix una elevada resistència al desgast a temperatura ambient, que no reté a temperatures més elevades. Gran maquinabilitat, però tenacitat mitjana. S'usa per a eines de tall i d'estampació (xapes de fins a 6 mm), eines de roscar, broques i escariadors, calibres i eines de mesura, motlles d'injecció de plàstics, elements de guia.

X100 CrMoV 5 (UNE F-5227, DIN 1.2363, AISI A2)

Acer aliat al Cr-Mo (cost mitjà), amb alt contingut de C (1,00%), de trempabilitat molt elevada (pot trempar en aire), que experimenta una deformabilitat molt baixa durant el tractament tèrmic (menor que la de l'acer 90MnCrV8). Obté una resistència al desgast mitjana-alta i mostra un lleuger enduriment secundari en el reveniment a 500°C. La tenacitat és bona, però la maquinabilitat és baixa. S'usa en eines de tall i de conformació, motlles per a plàstics abrasius, calibres i eines de mesura de gran precisió.

X160 CrMoV 12 (UNE F-5211, DIN 1.2379, AISI D2)

Acer d'alt aliatge al Cr-Mo-V (material de cost elevat), amb un contingut molt alt de C (1,60%), de trempabilitat molt elevada (pot trempar en aire), que experimenta una deformabilitat extraordinàriament petita. Tanmateix la seva baixa conductivitat tèrmica dóna lloc a tensions residuals i a problemes de distorsió (es recomana el preescalfament abans de la forja i del tremp). Bona tenacitat i resistència al desgast molt alta que permet arestes molt afilades. Manté alts valors de duresa secundària i, per tant, és apte per a nitruració, recobriments ceràmics i també per a tall per electro-erosió. S'usa per a grans matrius de tallar, matrius d'embotir, de sinteritzar, fileres per a extruir en fred, motlles de plàstic sotmeses a gran desgast, corrons de laminar rosques.

Acers d'eines resistents als xocs

Acers aliats, amb un contingut mitjà de C, de tenacitat elevada i bona resistència mecànica (especialment a compressió), destinats al treball en fred sota l'efecte d'impactes repetits. La resta de propietats són moderades: trempabilitat, deformabilitat en el tremp, resistència al desgast, retenció de la duresa amb la temperatura, maquinabilitat. El més freqüent és:

60 WCrSi 8 (UNE F-5242, DIN 1.2550, AISI S1)

Acer aliat al W-Cr-Si, d'especial tenacitat. S'usa per a punxons i matrius de tall fortament sol·licitades, ganivetes per a xapes gruixudes (fins a 12 mm), matrius d'estampació, eines pneumàtiques.

Acers d'eines per a motlles de plàstic

Les principals exigències dels acers d'eines per a motlles de plàstic són: bona maquinabilitat i aptitud per al poliment, estabilitat dimensional en el tremp, gran resistència a la compressió, resistència al desgast elevada, bona tenacitat, possibilitat de tractaments superficials (nitruració, cromat dur) i, en determinats casos, una resistència a la corrosió adequada.

En aquestes aplicacions poden usar-se acers de cementació: *14 NiCrMo13*

(UNE F-1560, DIN 1.6657); acers de nitruració: *31CrMoV10* (UNE F-1721, DIN 1.8519), *41CrAlMo7* (F-1740, DIN 1.8509); acers inoxidable: *X40Cr13* (UNE F-3404, DIN 1.2083, AISI 420); o altres acers d'eines: *X40CrMoSiV5* (UNE F-5318, DIN 1.2344, AISI H13), *X160CrMoV12* (UNE F-2379, DIN 1.2379, AISI D2); però cada cop és més freqüent l'ús d'acers subministrats en estat de bonificació sense necessitat de tractament tèrmic posterior. Entre aquests destaquen:

40 CrMnMo 7 (UNE F-5302, DIN 1.2311, AISI P20)

Acer per a motlles de plàstic, de cost baix, que es subministra bonificat a una duresa de 280÷325 HB amb una bona maquinabilitat, una excel·lent aptitud per al poliment i la possibilitat de texturització. Malgrat que l'acer *40CrMnMoS·8·6* (DIN 1.2312) se subministra a una duresa superior que l'anterior (300÷345 HB), ofereix una maquinabilitat més bona però una aptitud per al poliment menor.

X38 CrMo 16 (UNE F-5267, DIN 1.2316)

Acer per a motlles de plàstic, que se subministra normalment bonificat a una duresa de 280÷300 HB, amb una gran aptitud per al poliment. Presenta una resistència a la corrosió excel·lent, millor que la de l'acer inoxidable *X42Cr13* (UNE F-5263, DIN 1.2083, ~AISI 420), i s'usa per a motlles, cargols d'extrusió i components en contacte amb plàstics corrosius.

Acers d'eines per a treball en calent

Acers d'eines per a treballar a temperatures compreses entre 200÷600° C que tenen com a característiques més destacades les següents: bona resistència i duresa, elevada tenacitat i resistència al desgast en calent, elevada trempabilitat i petita deformabilitat durant el tractament tèrmic, bona maquinabilitat en estat no tractat i resistència a la fatiga tèrmica. Cal prendre precaucions respecte als gradients de temperatura durant la seva utilització a fi d'evitar l'aparició de fissures (preescalfament i refredament lent després de la utilització). Els acers més freqüents són:

55 NiCrMoV 7 (UNE F-5307, DIN 1.2714, AISI 6F3)

Acer per a treball en calent relativament barat, de gran tenacitat en peces de grans dimensions i de bona resistència al reveniment (admet la nitruració fins a 580° C), però poc adequat per a la fatiga tèrmica. Pot ser subministrat en estat de recuita o bonificat a la resistència de treball. Acer estàndard per a estampes i matrius de forja, punxons d'extrusió, cisalles i plaques de subjecció per al treball en calent.

Taula 12.13 Acers d'eines

	No aliats, treball en fred		Aliats, treball en fred		
	C 70 U F-5103	102 V 2 F-5118	90MnCrV8 F-5229	X100CrMoV5 F-5227	X160CrMoV12 F-5211
UNE 36.018-94 (1/2/3/4)					
DIN AISI	1.1620 W1	1.2833 W2	1.2842 O2	1.2363 A2	1.2379 D2

Composició química							
Carboni	C	%	0,65÷0,74	0,95÷1,09	0,85÷0,95	0,90÷1,05	1,45÷1,75
Manganès	Mn	%	≤0,35	≤0,35	1,90÷2,20	0,35÷0,65	0,15÷0,45
Silici	Si	%	≤0,35	≤0,35	0,10÷0,40	0,10÷0,40	0,10÷0,40
Crom	Cr	%	-	-	0,20÷0,50	4,50÷5,50	11,00÷13,00
Níquel	Ni	%	-	-	-	-	-
Molibdè	Mo	%	-	-	-	0,90÷1,40	0,70÷1,00
Cobalt	Co	%	-	-	-	-	-
Wolfram	W	%	-	-	-	-	-
Vanadi	V	%	-	0,10÷0,35	0,05÷0,10	0,25÷0,45	0,50÷0,80
Propietats físiques							
Densitat		Mg/m ³	7,84	7,85	7,66	7,86	7,70
Dilatació tèrmica	(1)	µm/m·K	12,9	14,2	14,3	12,6	11,8
Calor específic		J/kg·K	-	-	-	-	460
Conductivitat tèrmica	(2)	W/m·K	48,1	-	33,0	-	16,7
Propietats mecàniques							
Resistència tracció	(3)	MPa					(2250)
Duresa	recuita	HB	190	210	220	230	250
	(4)/reveniment 200°C	HRC	52÷60/-	60÷64/-	64/60	63/60	63/61
	reveniment 400/500°C	HRC	-	-	50/42	57/58	58/62
	reveniment 600/700°C	HRC	-	-	38/-	52/-	50/-
Mòdul d'elasticitat		GPa	210	210	210	-	193
Propietats tecnològiques							
Cost		pta/kg	180	200	300	-	700
Temperatura	recuita	°C	740÷780	740÷780	680÷720	800÷840	830÷860
	trepmp	°C	795÷825	775÷805	790÷820	930÷970	1000÷1050
	reveniment	°C	150÷250	150÷250	180÷220	150÷550	500÷550
Medi de tremp	(5)	W,O,A,S	W	W	O	O,A,S	O,A,S
Trempabilitat		[1÷5]	[1]	[1]	[4]	[5]	[5]
Indeformabilitat tremp		[1÷5]	[1]	[1]	[4]	[5]	[5]
Maquinabilitat		[1÷5]	[5]	[5]	[4]	[2]	[1÷2]
Tenacitat		[1÷5]	[3]	[3]	[3]	[3]	[2]
Resistència ablaniment		[1÷5]	[1]	[1]	[1]	[3]	[3]
Resistència desgast		[1÷5]	[1÷2]	[1÷2]	[3]	[3]	[3÷4]

(1) entre 20÷400°C. (2) a 100°C. (3) (entre parèntesis) = resistència després de tremp i reveniment; sense parèntesi = resistència en enduriment secundari

Resist. xocs	Motlles de plàstic		Treball en calent		Acers ràpids	
60WCrSiV8 F-5242	40CrMnMo7 F-5302	X38CrMo16 F-5267	55NiCrMoV7 F-5307	X40CrMoSiV5 F-5318	HS 6-5-2 F-5604	HS 10-4-3-10 F-5553
1.2550 S1	1.2311 P20	1.2316 -	1.2714 6F3	1.2344 H13	1.3343 M2	1.3207 M48

0,55÷0,65	0,35÷0,45	0,33÷0,43	0,50÷0,60	0,35÷0,45	0,82÷0,92	1,20÷1,35
0,15÷0,45	1,30÷1,60	≤1,00	0,65÷0,95	0,25÷0,55	≤0,40	≤0,40
0,80÷1,10	0,20÷0,40	≤1,00	0,10÷0,40	0,90÷1,20	≤0,40	≤0,40
0,90÷1,20	1,80÷2,10	15,00÷17,00	0,95÷1,25	4,50÷5,50	3,50÷4,50	3,50÷4,50
-	-	≤1,00	1,50÷2,00	-	-	-
-	0,15÷0,25	1,00÷1,50	0,30÷0,50	1,20÷1,70	4,60÷5,30	3,20÷3,90
-	-	-	-	-	-	9,50÷10,50
1,70÷2,30	-	-	-	-	5,70÷6,70	9,00÷10,50
0,10÷0,30	-	-	0,05÷0,25	0,85÷1,15	1,70÷2,20	3,00÷3,50
7,88	7,85	7,70	7,86	7,76	8,16	8,20
13,6	13,8	12,0	12,6	12,7	11,8	-
-	-	460	430	420	460	-
-	35,7	29,0	36,5	24,5	21,4	-
1790	(1730)	-	(2120)	2050	-	-
225	235	230	250	230	240÷300	240÷300
60/58	51/50	49/47	58/54	54/52	64÷66/62	65÷67/-
52/48	46/47	46/47	49/46	54/56	62/62	-
43/-	36/28	32/-	38/34 (650°C)	50/32	62/46 (800°C)	-
-	-	220	213	216	217	-
450	300	750	350	700	1200	2500
710÷750	710÷740	760÷800	650÷700	750÷800	770÷860	770÷840
870÷900	840÷870	1020÷1050	830÷870	1020÷1050	1090÷1230	1200÷1240
180÷220	180÷220	500÷550	400÷600	500÷550	530÷560	540÷570
O,S	O,S	O,S	O,A	A,O,S	S	S
[3]	[3]	-	[3]	[5]	[5]	[5]
[2]	[3]	-	[3]	[4]	[2÷3]	[2÷3]
[2]	[2÷3]	-	[2]	[2÷3]	[2]	[1÷2]
[4]	[3]	-	[4]	[4]	[1÷3]	[2÷3]
[2]	[1]	-	[3]	[3]	[4]	[5]
[1÷2]	[1÷2]	-	[2]	[2]	[4]	[5]

⁽⁴⁾ duresa després de temp. ⁽⁵⁾ W=aigua, O=oli, A=aire, S=bany de sal

X40 CrMoSiV 5 (UNE F-5318, DIN 1.2344, AISI H13)

Acer que, en calent, manté una elevada tenacitat, resistència mecànica i resistència al desgast (valors màxims per al reveniment a 500°C), amb una baixa sensibilitat al xoc tèrmic. Té una alta conductivitat tèrmica que facilita la refrigeració de les eines. Acer d'utilització universal per a treball en calent: eines d'injecció i d'extrusió de metalls lleugers, matrius d'estampació, unitat injectora de plàstics, ganivetes de tall en calent. La variant *X37CrMoSiV5* (UNE F-5317, DIN 1.2343, AISI H11) és l'acer de la família que presenta les millors característiques de fatiga (s'utilitza en peces estructurals molt sol·licitades, especialment en aviació), mentre que l'acer *X32CrMoV12* (UNE F-5313, DIN 1.2365, AISI H10), amb un contingut superior de Mo, s'utilitza per a matrius, estampes i fileres d'extrusió de metalls pesats.

Acers ràpids

Són acers d'eines fortament aliats al W-Mo-V-Co (en la seva designació apareixen els percentatges corresponents) destinats a eines de mecanització per a arrencament de material, tot i que també s'usen en matrius de tall, d'estampació i fileres d'extruir. Les propietats més rellevants són: una trempabilitat molt alta i un marcat enduriment secundari durant el reveniment entre 550÷600°C; una duresa i una resistència al desgast elevades que retenen a alta temperatura (≥ 58 HC a 550°C, o *duresa al roig*), aspecte que permet l'aplicació de tractaments superficials com la nitruració, molt beneficiós en aquestes aplicacions; una bona tenacitat per al manteniment de l'aresta de tall (en general cal trobar el compromís entre duresa i tenacitat). Alguns dels acers ràpids més característics són:

HS 6-5-2 (UNE F-5603, DIN 1.3343, AISI M2)

Presenta un bon equilibri entre duresa i tenacitat. Acer per a tota classe d'eines de mecanització (broques i escariadors, mascles i fileres de roscar, freses, brotxes), serres, punxons i contrapunxons, eines per a la fusta. També s'utilitzen en operacions de conformació en fred (fileres d'extrusió, matrius). L'acer *HS 6-5-2-5* (UNE F-5613, DIN 1.3243, AISI M-35), amb la incorporació de Co, i un cost incrementat en un 50%, ofereix unes característiques excel·lents per al tall ininterromput.

10-4-3-10 (UNE F-5553, DIN 1.3207, AISI M48)

Acer ràpid amb elevats continguts de W i Mo, que reuneix les màximes prestacions de constància de tall, resistència a la calor i tenacitat. S'usa en els treballs de desbast o d'acabament quan cal la màxima duració de l'eina.

12.6 Acers inoxidable

Introducció als acers inoxidable

UNE 36.016-89 (1/2)

Aliatges de Fe (element principal), de Cr (mínim, 11%) i de C, que aconseguen una especial resistència a la corrosió gràcies a la formació espontània d'una capa superficial protectora i adherent (passivació) d'òxid de crom, que es reconstrueix en cas de deteriorament. També poden incorporar altres elements d'aliatge, com ara Ni, Mo, Mn, Si, Ti i Nb, per a millorar determinades característiques.

Els acers inoxidable més utilitzats són els de laminació (designats habitualment en el mercat segons la norma AISI) i els productes semielaborats més freqüents són: *xapa i fleix laminat en fred* (gruixos: 0,2÷5 mm); *xapa i fleix laminat en calent* (gruixos: 4÷70 mm de gruix); *barres* (rodona $d=1\div400$ mm, quadrada, hexagonal) i *perfils* (en L, C, U), *tubs soldats* (rodó, quadrat, rectangular), *tubs extruïts*, *cargols*. Hi ha acers inoxidable de composició específica destinats a ser emmotllats (vegeu Acers d'emmotllament, Secció 12.7), Atenent a la composició i estructura, les principals famílies d'acers inoxidable són:

Acers inoxidable martensítics

Acers inoxidable de contingut de Cr moderat (11÷18%), contingut de C relativament alt (0,1÷0,5%; excepcionalment fins a 1,2%) i, ocasionalment, petits percentatges d'altres elements. Són magnètics. En estat de recuita, la maquinabilitat és satisfactòria, i es treballen bé en fred i en calent. Per mitjà de tremp (bona trempabilitat, en oli o en aire), s'obté una resistència i una duresa elevades però una tenacitat moderada. La resistència a la corrosió és més moderada que la dels acers ferrítics i austenítics. S'utilitzen en aplicacions que requereixen resistència o duresa en un medi corrosiu: rodaments, ganiveteria, instruments quirúrgics, motlles, turbines.

AISI 420 (UNE F 3402, F 3403, F 3404, segons %C)

Contingut mitjà de C (0,17÷0,45%). Combina una resistència i una duresa elevades amb una tenacitat bona quan s'ha revingut per sobre dels 650°C. Les variants *AISI 416* (UNE F-3412), amb un %C més baix, i *AISI 420 F*, amb S i Mo, milloren sensiblement la maquinabilitat, però empitjoren les característiques mecàniques i la conformació en fred i en calent. Aplicacions estàndard entre els acers inoxidable martensítics: ganiveteria, engranatges,

lleves, eines, eixos, vàlvules, motlles d'injecció de plàstic.

AISI 431 (UNE F-2437)

Contingut elevat de Cr, moderat de C i petit de Ni. Combina unes bones característiques mecàniques amb la millor resistència a la corrosió d'entre els acers martensítics. S'aplica a hèlixs de vaixell, turbines, maquinària paperera.

AISI 440 A, B, C (segons %C)

Continguts elevats de Cr i de C. Amb el tremp i un reveniment lleuger s'obté una estructura dura i resistent al desgast, formada per martensita i carburs. La tenacitat (sempre baixa) disminueix i la duresa augmenta amb el percentatge de C (0,60÷1,20%, des del grau A al C). Té una resistència a la corrosió notable. S'aplica a rodaments, instruments quirúrgics i ganiveteria especial.

Acers inoxidable ferrítics

Contingut de Cr relativament alt (13÷27%) i de C molt baix ($\leq 0,10\%$, ocasionalment fins a 0,20% per a valors elevats de Cr). Són magnètics. No s'endureixen per tremp i ho fan moderadament per deformació en fred. Tenen característiques mecàniques moderades i tenacitat baixa. La resistència a la corrosió se situa entre la dels acers martensítics i la dels acers austenítics. La maquinabilitat és bona, es treballen bé en fred i en calent, però la soldabilitat és regular. En la seves aplicacions influeixen el baix cost i l'aptitud a ser deformats en fred, especialment en estampacions profundes.

AISI 409 (F-3112, anomenat *muffler grade*).

Contingut baix de Cr i presència de Ti. Cost baix. És fàcilment conformable per deformació en fred i dóna lloc a soldadures força tenaces. S'aplica a la fabricació de tubs d'escapament i silenciadors d'automòbil.

AISI 430 (UNE F-3113)

Acer ferrític més estàndard amb un contingut mitjà de Cr (17%). Es conforma fàcilment en fred i té una acritud més baixa que la dels acers austenítics (aptitud per a l'embotició profunda). Bona resistència a la corrosió (medis oxidants, àcid nítric), fins i tot a temperatures elevades. La variant *AISI 430 F* (UNE F-3114), amb S i Mo, millora la maquinabilitat, i la variant *AISI 434* (~UNE F-3116), amb 1% Mo, augmenta la resistència a la corrosió, fins i tot la salina. La família de l'acer *AISI 430* s'utilitza en aplicacions químiques, en elements ornamentals de l'automòbil (especialment *AISI 434*), en electrodomèstics i en bateries de cuina de baix cost.

Acers inoxidable austenítics

Família de Cr-Ni: continguts moderats de Cr (16÷20%) i de Ni (6÷12%), i contingut baix de C (0,03÷0,15%); *família de Cr-Ni-Mo*: contingut moderat de Cr (16÷20%), més elevat de Ni (11÷15%), presència de Mo (2÷4%) i contingut molt baix de C (0,03÷0,08%); *família de refractaris*: continguts alts de Cr (22÷26%), de Ni (12÷22%) i de C (0,08÷0,25%).

Tots ells mantenen l'estructura austenítica a temperatura ambient i, per tant, no poden endurir-se per tremp. No són magnètics, però, amb la deformació en fred, adquireixen un cert magnetisme. Es poden treballar en fred (augmenta molt la resistència mecànica per acritud), i en calent. Maquinabilitat baixa. Tenacitat molt alta i resistència a la fatiga moderadament bona. La millor resistència a la corrosió i a alta temperatura entre els acers inoxidable. Bona soldabilitat, especialment en aquells acers preparats per evitar la precipitació de carburs. Són els acers inoxidable d'ús més difós, malgrat el seu cost relativament alt, i s'usen en aquelles aplicacions en què és determinant la resistència a la corrosió o el treball a altes temperatures.

AISI 301 (UNE F-3504)

Acer austenític al Cr-Ni amb continguts baixos d'aquests metalls i contingut mitjà de C. Obté l'enduriment més gran per deformació en fred, i s'utilitza en forma de fleix dur i fil per a molles d'acer inoxidable.

AISI 304 (UNE F-3504)

Acer estàndard de la família del Cr-Ni, amb un contingut baix de C ($\leq 0,07\%$) a fi de reduir la precipitació de carburs de Cr en les zones de soldadura (oxidació per manca de Cr). Hi ha variants que, sense disminuir la resistència a la corrosió, eviten la precipitació de carburs de Cr durant la soldadura, ja sigui amb una dràstica reducció del %C ($\leq 0,03\%$, *AISI 304 L*, UNE F-3503), ja sigui per estabilització amb Ti (*AISI*

més propensos a formar carburs que el Cr (els dos darrers també eviten la corrosió intergranular a temperatures elevades). La maquinabilitat moderada de l'acer *AISI 304* es millora sensiblement amb la variant modificada amb S (*AISI 303*, UNE F-3508). Els acers de la família *AISI 304* tenen una amplíssima utilització en indústries com ara l'alimentària, la farmacèutica, la química, la del transport i la d'electrodomèstics, així com en aplicacions criogèniques.

AISI 316 (UNE F-3534)

Acer estàndard de la família del Cr-Ni-Mo. Respecte als acers de la família *AISI 304*, la presència de Mo proporciona un comportament millor davant la corrosió, especialment sota tensió, i n'augmenta les característiques

Taula 12.14 Acers inoxidable

			Martensítics			Ferrítics	
UNE 36.016-89			X20Cr13 F-3402	X19CrNi17-2 F-3427	(X105CrMo17)	(X5CrTi12) F-3112	X6Cr17 F-3113
DIN			1.4021	1.4057	1.4125	1.4512	1.4016
AISI			420	431	440 C	409	430
Composició química							
Carboni	C	%	0,17÷0,23	0,14÷0,23	0,95÷1,20	≤ 0,08	≤ 0,08
Crom	Cr	%	12,0÷14,0	15,5÷17,5	16,0÷18,0	10,5÷11,8	16,0÷18,0
Molibdè	Mo	%	-	-	≤ 0,75	-	-
Níquel	Ni	%	≤ 1,0	1,5÷2,5	-	-	≤ 1,0
Altres		%	-	-	-	6-C≤Ti≤0,8	-
Propietats físiques							
Densitat		Mg/m ³	7,78	7,78	7,78	7,70	7,70
Dilatació tèrmica	(1)	µm/m·K	10,3	10,2	10,2	10,5	10,4
Calor específic		J/kg·K	460	460	460	460	460
Conductivitat tèrmica	(2)	W/m·K	24,9	20,2	24,2	25,0	26,1
Resistivitat elèctrica		nΩ·m	550	720	600	590	600
Propietats mecàniques							
Resistència tracció	(3)	MPa	≤740	≤950	≤760	460	630
Límit elàstic (0,2%)	(4)	MPa	650÷850	800÷1080	1100÷1970	-	610÷900
	(3)	MPa	430	630	450	240	250
	(4)	Mpa	430	630	450	240	250
	(5)	MPa	500÷550	680÷900	650÷1920	-	400÷850
Allargament ruptura	(6)	MPa	400	505	-	210	245
	(7)	MPa	400	505	-	210	245
Límit de fatiga		MPa	305/-	375/-	- / -	175/-	215/-
Duresa	(7)	%	25/13	15/11	14/2	30/-	25/2
Duresa		MPa	300	-	280	-	280
Resiliència KV		HB	≤225/275	≤285/425	≤275/550	≤150/-	≤190/230
Mòdul d'elasticitat		J	-	-	-	-	-
Coefficient de Poisson		GPa	220	216	216	220	220
		-	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Propietats tecnològiques							
Cost		pta/kg	250	450	750	300	300
Temperatura recuit ⁽⁸⁾		°C	750÷780	650÷750	730÷790	750÷850	750÷850
	trep	°C	980÷1040	980÷1070	1010÷1070	-	-
Temperatura reveniment ⁽⁹⁾ de servei ⁽¹⁰⁾		°C	650÷750	600÷700	150÷300	-	-
		°C	735/620	- / -	815/760	- / -	870/815
Soldabilitat		[1÷5]	[2]	[-]	[-]	[2]	[3]
Maquinabilitat		[1÷5]	[2]	[2]	[1]	[-]	[3]
Aptitud al tall		[1÷5]	[3÷4]	[2]	[-]	[5]	[5]
Aptitud a l'embotició		[1÷5]	[2]	[2]	[-]	[4÷5]	[4÷5]

(1) 20÷100°C. (2) 100°C. (3) recuit a 20°C. (4) acritud ≥¼ dur; o tremp + reveniment, 20°C.

(5) recuit, o tremp + reveniment a 200°C. (6) recuit, o tr+rev a 400°C / 550°C;

Austenític Cr-Ni			Austenític Cr-Ni-Mo		Refractaris	Inox. PH
X12CrNi17-7 F-3517	X5CrNi18-10 F-3504	X6CrNiTi18-10 F-3523	X5CrNiMo17-12-2 F-3534	X5CrNiMoTi17-12-2 F-3535	(X6CrNi25-20)	(17-7 PH)
1.4310	1.4301	1.4541	1.4401	1.4571	1.4845	
301	304	321	316	316 Ti	310	631

≤ 0,15 16,0÷18,0 - 6,0÷8,0 -	≤ 0,07 17,0÷19,0 - 8,0÷11,0 -	≤ 0,08 17,0÷19,0 - 9,0÷12,0 5xC≤Ti≤0,8	≤ 0,07 16,5÷18,5 2,0÷2,5 10,5÷13,5 -	≤ 0,08 16,5÷18,5 2,0÷2,5 10,5÷13,5 5xC≤Ti≤0,8	≤ 0,25 24,0÷26,0 - 19,0÷22,0 -	0,09 16,0÷18,0 - 6,5÷7,8 0,75≤Al≤1,5
7,98 17,0 500 16,2 720	7,98 17,2 500 16,2 720	7,98 16,6 500 16,1 720	7,98 15,9 500 16,2 750	7,76 16,5 500 16,2 750	8,00 15,9 500 14,2 780	7,80 10,3 460 16,4 830
≤800 860÷1560 215 515÷965 - - / - 55/8 240÷420 ≤210/380 ≥85 200 0,29	≤700 690÷1030 195 380÷760 125 98/90 50/10 240 ≤185/320 ≥85 200 0,29	≤730 610≤1400 200 - 155 125/118 50/- 260 ≤185/- ≥85 200 0,29	≤710 610÷1350 205 - 145 115/108 50/- 270 ≤185/- ≥85 200 0,30	≤730 - 210 - 165 135/125 50/- - ≤190/- ≥85 200 0,30	≤740 750÷1350 230 - 180 145/135 45/- 215 ≤210/- - 200 0,31	910 1400÷1850 280 1300÷1800 - - / - 35 ⁽⁹⁾ / 2 ⁽¹⁰⁾ 570÷770 165 ⁽⁹⁾ /460 ⁽¹⁰⁾ - 216 0,3
400 - - - 840/900 [5] [2] [4] [4]	400 - - - 870/925 [5] [3] [4] [5]	450 - - - 870/925 [4] [2] [4] [4]	500 - - - 870/925 [5] [3] [4] [4]	550 - - - 870/925 [4] [-] [-] [4]	800 - - - 1035/1150 [4] [2] [4] [4]	- 960÷1060 ⁽⁹⁾ - 450÷560 ⁽¹⁰⁾ - [3] [2] [-] [-]

⁽⁷⁾ (recuit a 20°C)/(acritud; o tremp + reveniment a 20°C). ⁽⁸⁾ (intermitent)/(en continu). ⁽⁹⁾ solubilitzat.

⁽¹⁰⁾ endurit per precipitació

mecàniques a temperatures moderadament elevades. L'acer *AISI 317*, amb els continguts més elevats de Cr-Ni-Mo de la família, presenta també una resistència a la corrosió més elevada. Existeixen variants anàlogues a les de la família Cr-Ni, amb la soldabilitat millorada amb una reducció de C més gran ($\leq 0,03\%$, *AISI 316 L*, UNE F-3533), o per estabilització amb Ti (*AISI 316 Ti*, UNE F-3535) o Nb (*AISI 316 Nb*, UNE F-3536), així com també amb la maquinabilitat millorada (major %S, *AISI 316 F*). Els acers de la família *AISI 316* troben aplicació en la indústria química i en la indústria alimentària en ambients de corrosió severa (entre elles la marina).

AISI 319, 310 (acers refractaris)

Tenen els continguts de Cr, Ni i C més elevats de la família i una resistència a la corrosió excel·lent fins a 1.100°C . No resisteixen, però, la presència de gasos sulfurosos i una exposició prolongada a $750\div 900^{\circ}\text{C}$ dona lloc a una fragilització (formació de la fase sigma). Bona resistència mecànica i bon comportament a fluència fins a temperatures de 800°C . L'acer *AISI 310* té característiques lleugerament superiors a l'acer *AISI 309*. Les variants amb baix contingut de C ($\leq 0,08\%$, *AISI 309 S* i *AISI 310 S*) són adequades per a ambients humits a temperatura mitjana. Són soldables, però amb perill de corrosió intergranular. S'usen en aplicacions que exigeixen altes temperatures (forns, cremadors), especialment en la indústria química i petroquímica.

Acers inoxidable d'enduriment per precipitació (PH)

Acers al Cr-Ni amb determinats elements d'addició (Al, N, Mo, Cu, Nb) que possibiliten l'enduriment per precipitació (envelliment). Un primer tractament de solubilització seguit d'un refredament ràpid forma una solució sòlida sobresaturada fàcilment mecanitzable (estat de subministrament). Després de conformar, el material és sotmès a un curt enduriment per precipitació ($\sim 1\text{h}$) a temperatura relativament baixa ($450\div 750^{\circ}\text{C}$, escasses variacions dimensionals). Malgrat el cost molt elevat, aquests acers tenen utilitat quan cal combinar una alta resistència mecànica (fins a uns 500°C), una elevada resistència a la corrosió i una bona maquinabilitat (components d'aviació, bombes d'alta pressió, intercanviadors de calor, elements de màquines altament sol·licitats).

AISI 631 (PH 17-7)

Conté $1,15\%$ d'Al com a element d'enduriment per precipitació i aconsegueix una resistència molt important. Es conforma en estat de recuita i la maquinabilitat és acceptable. Entre altres aplicacions, s'utilitza per a la fabricació de molles i elements elàstics.

12.7 Foses i acers d'emmotllament

Conformació per emmotllament

Un dels processos més interessants de què disposa el dissenyador de màquines per a la conformació de peces és la fosa d'un metall i el seu emmotllament posterior. Malgrat que cal tenir presents certes limitacions (direcció de desemmotllament, pla de partició, disseny de noies per a parts interiors buides), l'emmotllament permet una llibertat de formes que difícilment pot aconseguir-se per altres procediments.

L'emmotllament proporciona la forma definitiva a moltes de les superfícies de les peces i, normalment, estalvia processos posteriors com ara el tall, la deformació, la soldadura o gran part de la mecanització. Aquests avantatges són especialment interessants en el disseny i fabricació de bancades i carcasses. Així, doncs, en el moment d'emprendre el disseny d'una nova peça complexa és pertinent de preguntar-se si convé conformar-la o no per emmotllament.

El dissenyador de màquines disposa de dos grans grups de materials fèrrics que es conformen per emmotllament: les *foses* (>2% de C) i els *acers d'emmotllament* ($\leq 2\%$ de C). A grans trets, les primeres mostren una millor adequació a aquest procés (el nom de *foses* ho indica), mentre que els segons proporcionen característiques mecàniques més elevades; tanmateix, les *foses nodulars* estan competint amb alguns dels *acers d'emmotllament* (i també amb acers forjats) en reunir la facilitat d'emmotllament de les foses amb característiques mecàniques pròximes a les dels acers. Les principals normes que regulen els materials fèrrics d'emmotllament són:

UNE 36.111-73	Foses grises
UNE 36.118-73	Foses amb grafit esferoidal (o foses nodulars)
UNE 36.252-71	Acers emmotllats no aliats d'usos generals
UNE 36.253-71	Acers emmotllats resistent a l'abració i als xocs
UNE 36.254-79	Acers emmotllats de baix aliatge resistent a l'abració
UNE 36.255-79	Acers emmotllats de baix aliatge per a usos generals
UNE 36.256-73	Acers emmotllats ferrítics per a baixes temperatures de servei
UNE 36.257-74	Acers emmotllats inoxidable
UNE 36.258-74	Acers emmotllats refractaris
UNE 36.259-74	Acers emmotllats amb resistència mecànica a temperatura elevada

Foses

Els materials fèrrics d'emmotllament més usuals són les *foses grises*, amb el grafit laminar (molt barates i de propietats excel·lents per a l'emmotllament), i les *foses nodulars*, amb el grafit esferoïdal (lleugerament més cares, però amb unes propietats mecàniques sensiblement millors, especialment la tenacitat). Les foses *mal·leables* s'han anat substituïnt per les foses nodulars i, avui dia, han quedat relegades a aplicacions molt particulars (peces de petites dimensions de parets molt primes fabricades en grans sèries). En canvi, comença a ser freqüent l'ús de *foses nodulars amb tremp bainític* (o foses ADI, "Austempering Ductile Iron"), que ofereixen unes característiques mecàniques pròpies d'acers d'alta resistència.

Foses grises (o de grafit laminar)

Aliatges de Fe-C-Si, amb continguts relativament alts de C (2,80÷4,00%) i Si (0,50÷3,00%) i menors d'altres elements (Mn, S, P). La major part del C es precipita com a grafit lliure en forma de làmines (grafit laminar) que interrompen la matriu metàl·lica (efecte d'entalla) i debiliten notablement la secció resistent, especialment als esforços de tracció. La classificació de les foses grises es basa en la resistència a la tracció. També es fabriquen foses grises aliades (amb l'addició d'altres elements).

Les foses grises presenten una sèrie de qualitats que donen base a un bon nombre d'aplicacions. En la fabricació destaquen la temperatura de fusió relativament baixa (1175÷1275 °C, més que la de l'acer), que facilita el procés d'emmotllament i comporta un estalvi energètic; la bona colabilitat (més facilitat en l'ompliment del motlle que l'acer), que permet la fabricació de peces de formes complicades; la baixa contracció en el refredament, amb la poca tendència a formar rebeguts (un dels problemes dels acers emmotllats); i la bona maquinabilitat (millor que la dels acers al C d'igual duresa). En la utilització cal ressenyar un amortiment intern molt elevat, característica adequada per a bancades i càrters, ja que absorbeix les vibracions; les bones propietats de lliscament (les làmines de grafit actuen com a lubricant), aplicables a sistemes en què la lubricació pot esdevenir precària (guies de bancades de màquines eina, rodes i corones dentades de grans dimensions, camises de cilindres, anells d'èmbol, coixinets); la millor resistència a la corrosió que els acers al C; i el fet que poden treballar fins a uns 400 °C (per damunt d'aquesta temperatura es recomanen addicions d'aliatge, Cu, Mo, Cr, Mn, per a millorar l'estabilitat dimensional i el comportament a fluència).

Però també les foses grises tenen limitacions importants pel que fa a les característiques mecàniques: una baixa resistència a la tracció (100÷400 MPa), malgrat que la de compressió és de 3 a 5 vegades superior, una duresa relativament baixa (135÷275 HB), una resistència a la fatiga mode-rada (compensada per una baixa sensibilitat a l'entalla, ja que les làmines de grafit creen un efecte d'entalla a l'interior del material), una baixa rigidesa junt amb un comportament elàstic no lineal (es defineix un mòdul d'elasticitat secant, que adquireix valors molt diferents segons la fosa grisa, 80÷140 GPa), i una tenacitat molt baixa (no és aconsellable per a fabricar peces sotmeses a sotragades). En general, es pot establir que les característiques mecàniques (inclosa la resistència a temperatures elevades), el mòdul d'elasticitat i la resistència al desgast augmenten amb la resistència a la tracció de la fosa grisa; mentre que la maquinabilitat, la resistència al xoc tèrmic, l'amortiment intern i la facilitat per a fabricar peces amb parets fines disminueixen amb aquest paràmetre.

FG 15 (UNE 36.111; GG-15 DIN 1691)

Fosa grisa de resistència mecànica baixa que s'utilitza per a peces de parets primes de poca responsabilitat: tubs, radiadors, petites peces de màquines.

FG 20 (UNE 36.111; GG-20 DIN 1691)

Fosa grisa de resistència mecànica moderada, molt utilitzada per a peces de mitjana responsabilitat: carcasses de motors elèctrics, bancades de màquines.

FG 25 (UNE 36.111; GG-25 DIN 1691)

Fosa grisa de bona resistència mecànica, una de les més usades en la construcció de màquines. Entre les seves aplicacions hi ha: bancades de màquina eina, càrters de turbines, cossos de bombes, caixes d'engranatges, blocs de motor, tambors i discs de frens i embragatges.

FG 30 (UNE 36.111; GG-30 DIN 1691)

Fosa grisa d'elevada resistència mecànica destinada a peces de gran responsabilitat, com ara blocs de motor diesel, tambors de frens i discs d'embragatge altament sol·licitats

FG 35, FG 40 (UNE 36.111; GG-35, GG-40 DIN 1691)

S'utilitzen poc ja que les foses de més resistència esdevenen més difícils d'emmotllar (formes senzilles de gruixos constants) i de mecanitzar. Es reserven per a la fabricació de peces extraordinàriament sol·licitades.

Foses nodulars (o de grafit esferoïdal)

Aliatges de Fe-C-Si, amb percentatges de C i Si lleugerament superiors als de les foses grises (3,00÷4,00% i 1,00÷3,50%, respectivament), contin-guts menors d'altres elements (Mn, S severament controlat, P) i una petita addició de Mg (0,02÷0,06%), principal responsable de l'agrupació de grafit en forma de nòduls esferoïdals. Així, doncs, la matriu de les foses nodulars, en no perdre la continuïtat, proporciona una resistència mecànica i una tenacitat molt millors, fins a valors pròxims als dels acers. La classificació de les foses nodulars es basa en la resistència a la tracció i l'allargament a ruptura. Admeten diferents tipus de tractament tèrmic (entre altres, el tremp bainític o *austempering*) i algunes incorporen elements d'aliatge (Ni, Mo, Cr o Cu) per millorar la resistència i la trempabilitat.

De forma anàloga a les foses grises, la fabricació de peces en fosa nodular ofereix aspectes de gran interès com ara una temperatura de fusió baixa (1120÷1160°C), una petita contracció en el refredament (<0,7%, menor que en la fosa grisa), una bona colabilitat (semblant a la de les foses grises i millor que la dels acers d'emmotllament, tot i que cal evitar les parets de secció excessivament prima pels problemes en el refredament superficial i formació de carburs) i una bona maquinabilitat. En la utilització de peces fabricades en fosa nodular cal ressenyar la bona resistència mecànica (netament superior a la de les foses grises, semblant a les dels acers al C), el mòdul d'elasticitat més elevat (peces més rígides), la bona tenacitat (peces resistents a cops o sotragades, especialment amb foses nodulars de resistència inferior), un millor comportament al desgast, un bon amorti-ment intern (intermedi entre el de les foses grises i el dels acers) i una resistència a la corrosió acceptable (millor que la de les foses grises). Les principals foses nodulars són:

FGE 38-17, FGE 42-12 (UNE 36.118; *GGG-38, GGG-42* DIN 1693)

Foses nodulars de resistència moderada i resiliència elevada (la *FGE 38-17* té garantida una resiliència mínima per norma), utilitzades en una gran diversitat de peces on la resistència als xocs és determinant: palanques de comandament, elements de suport, turbines, blocs de motor, càrters de diferencial, muntants de premses.

FGE 50-7 (UNE 36.118; *GGG-50* DIN 1693)

Fosa nodular per a peces de màquines i vehicles que exigeixen una alta resistència mecànica i al desgast, alhora que una certa resiliència: cigonyals i bieles (peces tradicionalment fabricades en acer forjat), rodes i corones dentades, elements d'embragatges i de frens, plats i contrapunts de torn, cilindres hidràulics, embuts de colada, artesans de ferralla.

FGE 60-2, FGE 70-2 (UNE 36.118; GGG-60, GGG-70 DIN 1693)

Foses nodulars per a peces de màquines i vehicles altament sol·licitades en què els requeriments de resistència mecànica i resistència al desgast prevalen sobre la resiliència: arbres de lleves, rodes dentades, rotors de bomba, rodes de cadena, eines agrícoles, peces per a excavadores i dagues.

Foses nodulars amb tremp bainític (ADI)

Aquestes foses (també conegudes amb les sigles ADI, *Austempered Ductile Iron*) són el resultat d'aplicar un tremp bainític (*austempering*) a una fosa nodular, a la composició de la qual s'han afegit elements d'aliatge (Ni, Cu, Mo) per augmentar la seva trempabilitat i retardar la formació de perlita. El material resultant exhibeix un extraordinari conjunt de propietats (resistència mecànica, al desgast, i tenacitat, fonamentalment) que es controlen per mitjà de la temperatura del bany de sals del tremp bainític. En disminuir aquesta temperatura (400 a 230 °C), decreixen la ductilitat ($A=10$ a 1%), la resiliència (100 a 40 J) i la maquinabilitat, però augmenten la resistència a la tracció (850 a 1600 MPa), el límit elàstic (550 a 1250 MPa) i la duresa (270÷320 a 440÷550 HB). Les foses nodulars amb tremp bainític (ADI) són uns materials amb unes prometedores possibilitats que troben una aplicació creixent en una gran varietat de peces de maquinària i d'automoció (engranatges, lleves, cigonyals, rodes i baules de cadena, barres de direcció, junts universals) que, tradicionalment, s'havien realitzat en acer bonificat o acer endurit superficialment.

Foses blanques i foses mal·leables

En la fosa blanca (amb baix contingut de Si, grafititzant), el C no es transforma en grafit, sinó que resta combinat amb el Fe formant la cementita. D'aquesta manera s'obté un material de gran duresa i resistència al desgast, però molt fràgil, que presenta aplicacions molt particulars (boles i corrons de molí, trituradores).

Les foses mal·leables s'obtenen a partir de la fosa blanca per mitjà d'un tractament tèrmic de mal·leabilització (recuita especial) que descomposa la cementita en nòduls de carboni i una matriu. Les propietats de les foses mal·leables se situen entre les de la fosa grisa i les de l'acer emmotllat, molt pròximes a les de les foses nodulars. Presenten l'avantatge, respecte a aquestes darreres, de tenir un mòdul d'elasticitat lleugerament superior (172÷193 GPa) i la facilitat d'emmotllar petites peces amb seccions molt primes, però és inadequada per a peces de grans seccions (a causa dels gruixos limitats que es poden obtenir amb la fosa blanca).

Taula 12.15 Foses grises, nodulars i ADI

		Foses grises (grafit laminar)				
UNE		FG 15	FG 20	FG 25	FG 30	FG 35
		UNE 36.011-73 (ISO 185)				
DIN		0.6015	0.6020	0.6025	0.6030	0.6035
ASTM		~25	~30	~35	~45	~50

Composició química							
Carboni	C	%	3,60÷3,80	3,40÷3,60	3,20÷3,40	3,00÷3,20	2,80÷3,080
Manganès	Mn	%	0,50÷0,90	0,50÷0,90	0,50÷0,90	0,50÷0,90	0,50÷0,90
Silici	Si	%	1,80÷2,20	1,70÷2,00	1,60÷1,90	1,50÷1,80	1,50÷1,75
Sofre	S	%					
Fòsfor	P	%					
Altres		%					
Propietats físiques							
Densitat	Mg/m ³		7,00	7,08	7,15	7,22	7,30
Coefficient dilatació	µm/m·K		11,7	11,7	11,7	11,7	11,7
Calor específic	J/kg·K		530	530	530	530	530
Conductivitat tèrmica	W/m·K		65	56	51	48	45
Resistivitat elèctrica	µΩ·m		0,80	0,77	0,74	0,70	0,67
Propietats mecàniques							
Resistència tracció	Mpa		150÷200	200÷250	250÷300	300÷350	350÷400
Resistència flexió	MPa		250÷390	290÷440	340÷490	390÷540	490÷640
Resistència compressió	MPa		540÷690	590÷830	690÷980	780÷1180	930÷1370
Resistència cisallament	MPa		160÷240	220÷290	260÷350	320÷410	370÷470
Límit elàstic (0,2%)	MPa		-	-	-	-	-
Allargament ruptura	%		-	-	-	-	-
L. fatiga (amb entalla)	MPa		70	90	110	135	145
(sense entalla)	MPa		70	85	105	115	125
Duresa superficial	HB		135÷165	160÷195	180÷220	200÷245	225÷275
Resiliència	J		-	-	-	-	-
Mòdul d'elasticitat <i>E</i>	GPa		80÷100	90÷115	120÷120	110÷135	120÷140
Mòdul de rigidesa <i>G</i>	GPa		40	46	50	54	56
Coefficient de Poisson	-		0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Propietats tecnològiques							
Cost (peça)	pta/kg		140÷180	150÷190	160÷200	170÷210	180÷220
Contracció	%		~1	~1	~1	~1	~1
Temperatura fusió	°C		1175	1200	1225	1225	1275
Temp. tremp bainític	°C		-	-	-	-	≥18
Gruix mínim	mm		≥4	≥8	≥10	≥14	

Foses nodulars (grafit esferoïdal)					Foses nodulars ADI	
FGE 38-17	FGE 43-12	FGE 50-7	FGE 60-2	FGE 70-2		
UNE 36.118-73						
0.7038	0.7042 ~60-42-10	0.7050 ~70-50-05	0.7060 ~80-60-03	0.7070 ~100-70-02	GGG-100 B DIS 2	GGG-120 B DIS 3

3,70÷3,80 <0,60 2,70÷2,80 - - Mg	3,70÷3,80 <0,60 2,60÷2,80 - - Mg	3,60÷3,70 <0,60 2,40÷2,70 - - Mg	3,60÷3,70 <0,60 2,20÷2,60 - - Mg	3,60÷3,70 <0,60 2,00÷2,20 - - Mg	3,60÷3,70 <0,50 2,40÷2,60 - - Ni, Cu, Mo	3,60÷3,70 <0,60 2,40÷2,60 - - Ni, Cu, Mo
7,10 12,2 460 37 0,50	7,12 12,2 460 35 0,51	7,14 12,0 460 34 0,52	7,17 11,9 460 32 0,53	7,20 11,7 460 30 0,54	- - - - -	- - - - -
380÷450 - - - 235÷300 17÷20 180÷200 115÷120 140÷1800 >15 172 63 0,275	420÷540 - - - 280÷320 12÷16 190÷210 120÷125 150÷200 >12 171 63 0,275	500÷650 - - - 320÷370 7÷12 210÷240 125÷145 170÷240 - 170 63 0,275	600÷750 - - - 370÷420 2÷8 240÷280 145÷165 210÷280 - 169 63 0,275	700÷850 - - - 415÷470 2÷5 280÷300 165÷180 230÷300 - 168 63 0,275	1000÷1200 - - - 700÷900 >6 - - 280÷340 >80 175 - 0,275	1200÷1400 - - - 950÷1150 >3 - - 330÷400 >60 175 - 0,275
180÷240 <0,7 1120 - -	180÷240 <0,7 1120 - -	190÷250 <0,7 1130 - -	200÷260 <0,7 1140 - -	210÷270 <0,7 1150 - -	- - - - -	- - - - -

Acers d'emmotllament

La major parts dels acers, tant els aliats com els no aliats, poden conformar-se per emmotllament i, per a composicions equivalents, responen de forma anàloga als tractaments tèrmics, tenen les mateixes propietats físiques i mecàniques, i tenen una soldabilitat i una maquinabilitat similar a la dels acers de laminació. Les peces emmotllades, però, no presenten la direccionalitat de les propietats mecàniques que exhibeixen els acers de laminació, fet que pot ser útil en determinades aplicacions.

Tal com assenyalen les normes ressenyades al principi d'aquesta secció, la selecció d'acers emmotllats en lloc de foses es dirigeix a obtenir o millorar algunes propietats particulars dels materials: determinades característiques mecàniques a temperatura ambient (tenacitat, resistència al desgast, en alguns casos resistència a la tracció), un millor comportament mecànic a elevades temperatures (resistència a fluència o *creep*) o a baixes temperatures (bona tenacitat), una millor resistència a la corrosió (acers inoxidable d'emmotllament) o una millor estabilitat a altes temperatures (acers refractaris d'emmotllament).

Els acers, però, no s'emmotllen amb la mateixa facilitat que les foses, ja que fonen a temperatures sensiblement més altes ($1500\div 1600^{\circ}\text{C}$), tenen una pitjor colabilitat (exigència de seccions més grans), una contracció més elevada ($1,5\div 3\%$) i, després de colats, són fràgils i de baixa maquinabilitat, per la qual cosa són habituals tractaments tèrmics posteriors de normalització o de bonificació. Tot això obliga a dissenyar peces de formes més senzilles, que alhora resulten de cost més elevat.

A continuació es presenten els grups d'acer d'emmotllament més utilitzats amb les seves principals aplicacions, alhora que s'indiquen els acers de laminació anàlegs per a poder-ne extrapolar algunes de les propietats.

Acers d'emmotllament no aliats

AM 38, AM 45, AM 52, AM 60 (UNE 36.252-71; DIN 1681)

Formen el grup d'acers d'emmotllament més utilitzats (més de la meitat del consum) i s'utilitzen per a peces sotmeses a sol·licitacions dinàmiques i a xocs de valors mitjans a temperatures compreses entre $-10\div 300^{\circ}\text{C}$. No se n'especifica la composició (fora de la limitació de S i P) ni el tractament tèrmic, però s'especifiquen valors mínims per a algunes de les seves carac-

terístiques mecàniques (la denominació *AM xx* inclou: *AM*="acero moldeado"; $R_m \geq xx \cdot 10$ MPa). Els dos primers se solden fàcilment (%C limitat), mentre que els dos darrers exigeixen precaucions especials. Les característiques d'aquests acers estan compreses entre les dels acers de construcció de la norma EN 10025 i els acers de màquines no aliats de la norma UNE 36.051 (EN 10083).

Acers d'emmotllament de bonificació

AM 30 Mn 5 (UNE 36.255-79); compos. ≈ 28 *Mn 6* (EN 10083)

AM 35 Cr 4 (UNE 36.255-79); compos. ≈ 37 *Cr 4* (EN 10083)

AM 34 CrMo 4 (UNE 36.255-79); compos. ≈ 34 *CrMo 4* (EN 10083)

AM 30 NiCrMo 7 (UNE 36.255-79); compos. ≈ 34 *CrNiMo 6* (EN 10083)

Acers d'emmotllament que s'utilitzen o bé en estat de normalització, o bé en estat de bonificació (trepmp i reveniment), fins a una temperatura de 300°C en peces sotmeses a sol·licitacions estàtiques i dinàmiques importants. Aquests acers mantenen una correspondència força estreta amb els acers aliats de la norma europea EN 10083, tot i que les propietats mecàniques presenten algunes variacions (Taula 12.8).

Acers inoxidable d'emmotllament

AM X12 Cr 13 (UNE 36.257); *CA-15* (ASTM; compos. \approx *AISI 420*)

AM X7 CrNi 20·10 (UNE 36.257); *CF-8* (ASTM; compos. \approx *AISI 304*)

AM X7 CrNiMo 20·10 (UNE 36.257); *CF-8M* (ASTM; comp. \approx *AISI 316*)

AM X40 CrNi 25·20 (UNE 36.258); *HK* (ASTM; compos. \approx *AISI 310*)

Els acers inoxidable d'emmotllament (*resistents a la corrosió*, UNE 36.257-74; *refractaris*, UNE 36.258-74) tenen composicions no molt diferents de les dels acers inoxidable de laminació (normalitzats per AISI) però internacionalment es designen per mitjà de la classificació establerta per l'Alloy Casting Institute (ASTM A-743). Anàlogament als acers inoxidable de laminació, hi ha variants amb continguts baixos de C ($\leq 0,03\%$) que limiten la precipitació de carburs durant la soldadura (*AM X2CrNi19·10* segons UNE, *CF-3* segons ASTM; *AM X2CrNiMo19·11* segons UNE, *CF-3M* segons ASTM) o variants amb addicions de Ti i Nb per a estabilitzar el Cr. Els acers inoxidable d'emmotllament presenten determinades característiques d'interès, com són una llibertat més gran en les formes i en l'elecció de la composició, ja que, en general, no són necessàries la deformació plàstica en fred ni la soldadura (possibilitat de continguts de C més elevats). El cost dels acers inoxidable d'emmotllament és més elevat que el dels acers inoxidable de laminació anàlegs.

Taula 12.16 Acers no aliats d'emmotllament

UNE 36.252-71 (b/c, R_e mínim; c, KU mínim) DIN 1681 (GS-xx.1, R_e mínim)			AM 38 a/b/c F-8101 /2/3 GS-38/38.1 1.0416	AM 45 b/c F-8104/5 GS-45.1 1.0443	AM 52 b/c F-8106/7 GS-52.1 1.0551	AM 60 a/b/c F-8108/09/10 GS-60/60.1 1.0553
Composició química						
Carboni	C	%	(<0,23)	(<0,23)	-	-
Fósfor	P	%	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06
Sofre	S	%	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Propietats mecàniques						
Resistència tracció	MPa		>370	>440	>510	>590
Límit elàstic (b/c)	MPa		>185	>225	>255	>295
Allargament ruptura	%		25	22	18	15
Duresa	HB		105÷165	125÷185	145÷200	165÷220
Resiliència KU (c)	J		19,5	14,5	12,0	7,5
Propietats tecnològiques						
Cost (peça)	pta/kg		-	-	-	-

Taula 12.17 Acers bonificats d'emmotllament

UNE 36.255-79			AM 30 Mn 5 F-8311 1.1165	AM 35 Cr 4 F-8321 ~1.7034	AM 34 CrMo 4 F-8331 1.7220	AM 30 NiCrMo 7 F-8351 ~1.6582
Número DIN						
Composició química						
Carboni	C	%	0,25÷0,34	0,30÷0,40	0,30÷0,38	0,27÷0,34
Manganès	Mn	%	1,20÷1,60	0,50÷0,80	0,50÷0,80	0,50÷0,80
Crom	Cr	%	-	0,80÷1,20	0,80÷1,20	0,60÷0,90
Níquel	Ni	%	-	-	-	1,40÷2,00
Molibdè	Mo	%	-	-	0,15÷0,30	0,20÷0,40
Propietats mecàniques						
<i>Normalització</i>						
Resistència tracció	Mpa		>550	>640	>685	>735
Límit elàstic	MPa		>345	>390	>440	>540
Allargament ruptura	%		>14	>12	>13	>14
<i>Tremp i reveniment</i>						
Resistència tracció	MPa		640÷785	735÷880	785÷930	930÷1030
Límit elàstic	MPa		>390	>440	>590	>735
Allargament ruptura	%		>12	>10	>9	>9
Resiliència KU	J		>19,5	>14,5	>14,5	>19,5
Propietats tecnològiques						
Cost (peça)	pta/kg		-	-	-	-

Taula 12.18 Acers inoxidables d'emmotllament

			Resistents a la corrosió			Refractaris
UNE 36.257-73; 36.258-74			AM X12Cr13	AM X7CrNi20-10	AM X7CrNiMo20-10	AM X40CrNi20-25
ACI (Alloy Casting Institute)			F-8401	F-8411	F-8414	F-8451
Número DIN			~CA-15	CF-8	CF-8M	HK
			1.4027	1.4308	1.4408	1.4848
Composició química						
Ferro	Fe	%	≤0,15	≤0,08	≤0,08	0,20÷0,60
Crom	Cr	%	12÷14	18,0÷21,0	18,0÷21,0	24,0÷28,0
Níquel	Ni	%	≤1,00	8,0÷11,0	9,0÷12,0	18,0÷22,0
Molibdè	Mo	%	≤0,50	-	2,0÷3,0	≤0,50
Propietats mecàniques			tr + rev	hipertremp	hipertremp	brut fusió
Resistència tracció	MPa		590÷785	440÷660	440÷660	≥480
Límit elàstic	MPa		≥390	≥175	≥185	≥240
Allargament ruptura	%		≤15	≤29	≤20	≤10
Duresa	HB		170÷240	130÷200	130÷200	-
Resiliència (entalla)	J		≥27,5	≥55	≥69	-
Propietats tecnològiques						
Cost	pta/kg		900	1150	1300	-
Temperatura recuita	°C		~750	-	-	-
trep (o hipertremp)	°C		≥950	≤1050	≥1050	-
reveniment	°C		600÷750	-	-	-

Altres acers d'emmotllament

Acers d'emmotllament resistents a l'abradió

La norma UNE 36.254-79 abasta els acers d'emmotllament de baix aliatge resistents a l'abradió, on, a més de diversos acers de bonificació al Mn i Cr-Mo (UNE 36.255-79), inclou els acers *90Cr4* (F-8222) i *80CrMo8* (F-8233), amb dureses superiors a 300 HB. La norma 36.253-71 regula l'acer austenític al Mn d'emmotllament, *AM X120Mn12* (F-8251), de gran resistència i tenacitat, material ja ressenyat entre els acers de construcció (Secció 12.3).

Acers d'emmotllament resistents a altes i baixes temperatures

La norma UNE 36.259-74 inclou els acers al C, al Mo i al Cr-Mo, destinats a la fabricació de peces emmotllades que han de treballar a temperatures compreses entre 300÷600°C, mentre que la norma 36.256-73 comprèn els acers al Ni destinats a treballar a temperatures entre -10 i -90°C. Els materials de laminació corresponents han estat ressenyats entre els acers de calderes (Secció 12.3).