

Disseny de màquines IV Selecció de materials 2

Carles Riba Romeva

Temes d'Enginyeria Mecànica

Disseny de màquines IV

Selecció de materials 2

Carles Riba i Romeva

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

Gener de 1997

ÍNDEX

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

13 Metalls no fèrrics

13.1 Alumini i aliatges d'alumini

Introducció

L'alumini (element molt abundant a l'escorça terrestre) i el seus aliatges són materials que destaquen fonamentalment per la seva lleugeresa i resis-tència a la corrosió, així com també per la bona conductivitat tèrmica i elèctrica. Les propietats mecàniques de l'alumini pur són bastant moderades, però, aliat amb altres elements, les millora notablement. Si es pren la resistència o la rigidesa en relació amb la densitat, els aluminis avantatgen els acers en determinades aplicacions (Secció 11.5). Aquestes qualitats, junt amb la gran aptitud per a la conformació (deformació en fred, forja, emmotllament, extrusió, mecanització), han convertit els aliatges d'alumini en el segon grup de materials metàl·lics més utilitzats després dels mate-rials fèrrics, malgrat que la seva obtenció industrial no es va iniciar fins a finals del segle XIX. Els progressos de la indústria de l'alumini han anat molt lligats al desenvolupament de l'aviació (especialment després de la Segona Guerra Mundial), però darrerament ha trobat nous camps d'aplicació propis (automoció, equipament naval, arquitectura, envasament).

Propietats dels aliatges d'alumini

Propietats físiques

Destaquen la densitat molt baixa ($2,7 \text{ Mg/m}^3$, $\sim 1/3$ de la dels acers; vehi-cles, aparells portàtils, peces sotmeses a grans acceleracions), la conductivitat tèrmica elevada ($80\div 230 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; elements conductors o dissipadors de calor: pistons, carcasses), la conductivitat elèctrica elevada (resistivitat elèctrica: $28\div 60 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$; aplicacions elèctriques) i el calor específic també elevat ($865\div 905 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$). La dilatació tèrmica elevada ($20\div 25 \mu\text{m/m}\cdot\text{K}$; \sim doble de la dels acers) fa que les peces d'alumini tinguin variacions dimensionals importants amb la temperatura (menor estabilitat dimensional). L'alumini polit proporciona excel·lents superfícies reflectores.

Propietats mecàniques

A temperatura ambient, la resistència a la tracció (150÷450 MPa), el límit elàstic (100÷300 MPa) i el mòdul d'elasticitat (69÷73 GPa) són moderats, i, les dureses, relativament baixes (Al-comercial: 20 HB; Grup Al-Zn: 150 HB), no adequades a les pressions superficials requerides pels enllaços. La resistència a la fatiga és acceptable (sense un límit de fatiga definit) i la resiliència és normalment elevada excepte en els aluminis més resistents (grups Al-Cu i Al-Zn). El comportament a altes temperatures és moderat: ja a 100÷150°C (segons els aliatges) la fluència es manifesta de forma acusada i disminueixen sensiblement la resistència, el límit elàstic i la duresa i, a partir de 350°C, les propietats mecàniques esdevenen residuals (entre 200÷300°C, el millor comportament mecànic correspon als grups Al-Cu i Al-Mg). En canvi, el comportament mecànic a baixes temperatures és excel·lent, la resistència augmenta i la resiliència, el límit elàstic i l'allargament es mantenen fins a temperatures operatives de -195°C.

Aptituds per a la conformació

Els aliatges d'alumini presenten una gran aptitud per a la conformació. La baixa temperatura de fusió (520÷650 °C) facilita l'emmotllament de peces complicades (motlle de sorra, conquilla; per injecció s'obtenen peces de gran precisió dimensional). L'elevada ductilitat facilita la conformació per deformació plàstica, en fred i en calent, per mitjà de laminació (xapes, barres), forja o extrusió (perfils, eventualment buits, de formes complexes difícils d'obtenir amb altres tipus de materials). La gran maquinabilitat a altes velocitats proporciona una elevada productivitat, un abaratiment de costos i l'estalvi d'energia.

Estats de subministrament i tractaments tèrmics

Les peces i productes en brut (designació *F*) dels aliatges d'alumini es poden millorar mitjançant dos procediments diferents: *a*) per deformació en fred; *b*) per mitjà de tractaments tèrmics.

Enduriment per deformació en fred

Alguns dels grups d'aliatge de l'alumini (Al-comercial, Al-Mn, Al-Mg) només es poden endurir per deformació en fred, seguida o no d'una recuita parcial o d'estabilització. Els estats de deformació en fred s'indiquen per: *H1x*, deformació en fred; *H2x*, deformació en fred seguida d'una recuita parcial; *H3x*, deformació en fred seguida d'una estabilització. El segon dígit, *x*, indica el grau de duresa: 2 (¼ dur), 4 (½ dur), 6 (¾ dur), 8 (dur).

Tractaments tèrmics

Les propietats mecàniques de determinats aliatges de l'alumini poden millorar-se per mitjà del tractament tèrmic de *bonificació* (o d'*envelliment*) que consta de tres fases: *a) Solubilització* dels elements d'aliatge, per escalfament del material durant un cert temps a temperatura adequada; *b) Trepmp* o refredament enèrgic per a produir una solució sobresaturada a temperatura ambient; *c) Maduració*, o *envelliment*, consistent en la precipitació de petites partícules del material d'aliatge, ja sigui a temperatura ambient (maduració natural) o a temperatura controlada (maduració artificial). Els grups d'aliatges que es poden bonificar (a més d'endurir per deformació en fred) són: *Al-Cu*, *Al-Mg-Si* i *Al-Zn*, així com també alguns del grup *Al-Si*. Els principals tractaments tèrmics són (entre parèntesis, designacions ISO): recuita total en peces forjades, *O*, i en peces emmotllades, *T2 (TC)*; refredament ràpid (o tremp) després de la transformació en calent (sense solubilització específica) i maduració natural, *T1 (TA)*, o artificial, *T5 (TE)*, en aquest darrer cas, eventualment seguit d'una deformació en fred, *T10 (TG)*; solubilització, tremp i maduració natural, *T4 (TB)*, o artificial, *T6 (TF)*; solubilització, tremp, deformació en fred i maduració natural, *T3 (TD)*, o artificial, *T8 (TH)*; Solubilització, tremp, maduració artificial i deformació en fred, *T9 (TL)*; i, solubilització, tremp i estabilització, *T7 (TM)*.

Resistència a la corrosió. Anodització

Gràcies a l'extraordinària afinitat amb l'oxigen, l'alumini es recobreix espontàniament d'una capa superficial d'òxid de pocs àtoms de gruix (si es destrueix, es regenera), tupida i impermeable, que protegeix el material d'oxidacions posteriors i de l'atac de la majoria de substàncies orgàniques i inorgàniques cosa que li proporciona innocuïtat sanitària (aliments, estris d'ús personal); en certs medis corrosius, alguns aliatges experimenten corrosions intercrystal·lines. En tot cas, cal ressenyar el mal comportament a la corrosió dels aliatges que contenen Cu, en especial en ambients marins.

Anodització

Tractament superficial dels productes i peces d'alumini que consisteix en situar el material en l'ànode d'una cèl·lula electrolítica on s'allibera oxigen, que reforça la capa protectora d'òxid (normalment de 5÷25 µm de gruix; en l'anodització dura, les capes són més gruixudes i dures, de 25÷150 µm). Els efectes de l'anodització són diversos: acció protectora contra la corrosió, acció decorativa (amb l'addició de colorants, les peces i els productes adquireixen un aspecte atractiu), millora de la resistència al desgast (anodització dura) i aïllament elèctric. En principi tots els grups d'aliatge d'alumini són aptes per a l'anodització, però els que donen millors resultats són l'Al pur i els aliatges d'Al-Mg i Al-Mg-Si.

Grups d'aliatge de l'alumini i aplicacions

Com altres metalls, es fa distinció entre els aliatges de forja (inclouen els d'extrusió i laminació), per un costat, i d'emmotllament, per l'altre. Tot i la gran varietat d'aliatges de forja normalitzats, el mercat n'ofereix una selecció relativament reduïda a partir de la qual, sempre que sigui possible, cal fer la selecció. Hi ha més llibertat en els aliatges d'emmotllament, ja que en cada colada es pot ajustar a la composició desitjada a partir de les proporcions utilitzades de lingots d'*aliatges mare* (lingots per a fondre, de composicions senzilles ben definides). A continuació s'analitzen les principals propietats i aplicacions dels diferents grups d'aliatge d'aluminis de forja i d'emmotllament.

Aliatges d'alumini de forja (laminació, extrusió)

Els productes laminats o extruïts se subministren en una gran diversitat de formes (xapes, planxes, bandes, barres, tubs, fil d'alumini i una gran varietat de perfils), que poden obtenir-se en diferents estats de subministrament (recuita, *O*; deformat en fred, *Hxy*; bonificat, *Tx*). L'elecció s'ha de fer a partir de les propietats del material, del procés de conformació previst per a la peça (mecanització, deformació en fred, forja, extrusió, soldadura) i dels costos totals que se'n deriven. Les denominacions habituals dels aliatges d'alumini de forja són les d'Aluminium Association (AA), subscriïtes, entre altres països, per Espanya (Registre Internacional d'Aliatges), tot i que també existeixen designacions pròpies de la norma UNE. També es donen la designació simbòlica d'ISO i els números de material DIN.

Grups no bonificables

Grup Al

Aquest grup inclou els Al-comercials de diferents nivells de puresa superiors a 99,0%. Cap d'ells és bonificable i s'usen recuits o en diferents graus d'acritud. L'Al-comercial es caracteritza per una bona resistència a la corrosió, soldabilitat, facilitat de conformació i aptitud per a l'anodització, i s'utilitza en la indústria química, alimentària i criogènica. L'aliatge més freqüent és l'*Al99,5* (L 3051 segons UNE o 1050 segons AA), subministrat recuit (*O*), $\frac{1}{4}$ dur (*H12*) i $\frac{1}{2}$ dur (*H14*). Per a usos elèctrics n'hi ha una versió amb continguts severament limitats de Ti, V, Cr i Mn, elements que perjudiquen la conductivitat elèctrica (62% IACS, vegeu els aliatges de Cu, Secció 13.2). Es designa per *Al99,5E* (L 3052 segons UNE, 1350 segons AA) i es troba en el mercat en forma de fil o de barra per a trefilar.

Grup Al-Mn

L'addició d'un petit percentatge de Mn a l'alumini proporciona aliatges no bonificables, de millor resistència mecànica, molt bona resistència a la corrosió, excel·lent soldabilitat i bona conformabilitat. Es presenta en forma de xapes, especialment aptes per a embotició profunda (estris de cuina), barres, fils, tubs i perfils, i s'utilitza en substitució de l'Al-comercial quan es requereixen millors propietats mecàniques (pots de beguda, dipòsits, mobles, teulades, senyals de trànsit). El més usual dels aliatges és *AlMn1Cu* (L 3810 segons UNE, 3003 segons AA), mentre que l'aliatge *AlMn1Mg1* (L 3820, segons UNE, 3004 segons AA), amb l'addició de Mg, adquireix una resistència mecànica superior (recobriments de façanes).

Grup Al-Mg

Aquest grup d'aliatge destaca per oferir la màxima resistència a la corrosió (fins i tot en ambients marins), així com també per la seva soldabilitat i l'aptitud per a l'anodització. Normalment no s'utilitza la bonificació pel poc guany de resistència que reporta. El contingut de Mg influeix positivament en la resistència, alhora que disminueix ràpidament la ductilitat. L'aliatge més usual és l'*AlMg3* (L 3390 segons UNE, 5754 segons AA), que s'utilitza en la fabricació de carrosseries d'automòbil, vagons de ferrocarril, bucs de vaixells, dipòsits, indústria alimentària; l'aliatge *AlMg4,5Mn* (L-3321 segons UNE, 5083 segons AA), més resistent que l'anterior però també més car, a més d'utilitzar-se en aplicacions anàlogues de compromís més alt, ha esdevingut el material estàndard per a la fabricació de dipòsits criogènics; l'aliatge *AlMg1* (L-3350 segons UNE, 5005 segons AA), més barat que els anteriors, s'usa en recobriments de façanes d'edificis; l'aliatge *AlMg2,5* (L-3360 segons UNE, 5052 segons AA) s'utilitza en caldereria i conduccions d'alumini (condensadors, intercanviadors de calor) en la indústria química.

Grups bonificables

Grup Al-Cu

Els aliatges d'aquest grup s'usen, en general, en estat de bonificació i es caracteritzen per la seva elevada resistència mecànica, però també per la baixa resistència a la corrosió, la poca soldabilitat i la baixa aptitud per a l'anodització. Se subministren en forma de barres per a mecanitzar o totxo per a forjar amb premsa, i s'utilitza en peces d'alta resistència. Els aliatges *AlCu6BiPb* (L-3192 segons UNE, 2011 segons AA) i *AlCu4PbMg* (L-3121 segons UNE, 2030 segons AA), que contenen petites addicions de Pb i subministrats en forma de barres, s'utilitzen per a fabricar peces d'alta

resistència que requereixin una excel·lent maquinabilitat, el primer per a dimensions petites (cargolam, barres roscades, brides) i el segon per a peces de dimensions més grans. L'aliatge $AlCu4MgSi$ (L-3120 segons UNE, 2017 segons AA), subministrat en barres i xapes, i els aliatges $AlCu4SiMg$ (L-3130 segons UNE, 2014 segons AA) i $AlCu4MgI$ (L-3140 segons UNE, 2024 segons AA), subministrats en barres, sovint coneguts com a duraluminis, s'utilitzen en peces que requereixin elevades característiques mecàniques, com elements estructurals i fusellatge dels avions, xassís de vehicles pesats o aplicacions anàlogues. El darrer d'ells és utilitzat en la fabricació de sonotrodes (soldadura per ultrasons).

Grup Al-Mg-Si

Aquest grup d'aliatges, amb percentatges de Mg i Si generalment inferiors a 1% i bonificables, té unes propietats de conformabilitat, soldabilitat, resistència mecànica, resistència a la corrosió i aptitud per a l'anodització que, sense ser cap d'elles extraordinària, constitueixen un compromís molt equilibrat. L'aliatge $AlMg0,5gSi$ (L-3441 segons UNE, 6063 segons AA), és el material per excel·lència en perfils extruïts, especialment per a la construcció (marcs de portes, finestres, tancaments metàl·lics), però la seva resistència mecànica és moderada; també és un bon conductor elèctric de qualitats mecàniques superiors a l' $Al99,5E$. L'aliatge $AlMg1SiCu$ (L-3420 segons UNE, 6061 segons AA) i l'aliatge $AlSi1MgMn$ (L-3453 segons UNE, 6082 segons AA), que tendeix a substituir-lo, s'utilitzen per a peces mecanitzades i forjades de compromís més moderat que els duraluminis, però de millor resistència a la corrosió.

Grup Al-Zn

Continguts de Zn superiors al 4% amb elements secundaris (Mg, Cu, Cr, Mn) donen lloc a una família d'aliatges bonificable amb maduració artificial que proporciona les resistències mecàniques més elevades entre els aliatges d'alumini. L'aliatge $AlZn4,5MgI$ (L-3741 segons UNE, 7020 segons AA) és de característiques mecàniques moderades dintre el grup, però de maquinabilitat i soldabilitat molt bones i baixa corrosió. Els aliatges $AlZn8MgCu$ (L 3751 segons UNE, 7049 segons AA) i $AlZn6MgCu$ (L 3710 segons UNE, 7075 segons AA) tenen les característiques mecàniques més elevades entre els aluminis, però amb una resistència a la corrosió i una soldabilitat més baixes. L'aliatge 7049 (de comportament mecànic lleugerament superior) s'utilitza especialment en aviació, armament i en cargolam d'alta resistència, mentre que l'aliatge 7075 troba les seves principals aplicacions en equips esportius (pals d'esquí, canyes de pescar, equip d'alpinisme, bicicletes de competició).

Aliatges d'alumini d'emmotllament

Les qualitats que s'esperen dels aluminis d'emmotllament són una bona colabilitat (aptitud per a omplir correctament la cavitat del motlle), una contracció relativament petita i la no formació de fissures (causa de la fragilitat) en la contracció. Les temperatures de fusió relativament baixes dels aliatges d'alumini permeten utilitzar, a més de motlles de sorra, motlles metàl·lics (conquilles), on el material s'introdueix o bé per gravetat, o bé sota pressió (emmotllament per injecció). Aquest darrer procés, que exigeix un motlle específic per a cada peça i una màquina d'injectar molt cars, això no obstant permet obtenir peces d'una elevada precisió dimensional i d'excel·lents acabats superficials que requereixen poca o nul·la mecanització posterior, per la qual cosa és molt utilitzat en la fabricació de peces complexes en grans sèries (bombes de benzina, carburadors, planxes domèstiques). L'única designació universalment acceptada dels aluminis d'emmotllament és la simbòlica d'ISO. En la Taula 13.1 (pàg. 18-19) es donen també les denominacions d'UNE, d'Aluminium Association (AA) i els números de material DIN.

Grup Al

L'alumini sense aliar és menys usat en peces emmotllades que en productes forjats. L'aliatge *Al99,5* (L-2051 segons UNE), de ductilitat i resistència a la corrosió excel·lents i resistivitat elèctrica molt baixa, s'usa en peces emmotllades en sorra i en conquilla i, més rarament, d'injecció. Té aplicacions en la indústria química i elèctrica, en elements sense compromís mecànic. Els rotors de motors elèctrics asíncrons de baixa resistència es fabriquen amb l'*Al99,5* (57% IACS), mentre que els rotors d'alta resistència ho fan amb aliatges d'altres grups, com l'*AlSi5Mg* (L-2570 segons UNE, ~30÷35% IACS) o l'*AlSi8Cu3* (L-2630 segons UNE, 25÷30% IACS).

Grup Al-Si12

L'addició de Si a l'alumini (punt eutèctic a ~12% Si) dona lloc a un increment de la fluïdesa del material fos, a una disminució de la fissuració i de la contracció en el refredament, fets que permeten dissenyar peces de formes complexes amb canvis importants de secció, amb parets des de molt primes a molt gruixudes. Aquests aliatges tenen també una soldabilitat, una ductilitat i una estanquitat bones. L'aliatge base és l'*AlSi12* (L-2520 segons UNE, de composició eutèctica), no bonificable, que s'utilitza sempre que es busquin unes qualitats d'emmotllament (peces complicades de parets molt primes) i una resistència a la corrosió excel·lents, tot sacrificant la resistència mecànica i la maquinabilitat. Els aliatges restants d'aquest grup intenten pal·liar, a base de petits continguts d'altres elements, la falta de resistència mecànica i de

maquinabilitat de l'aliatge bàsic. L'aliatge *AlSi12Cu* (L-2530 segons UNE) millora la resistència a la fatiga, a costa d'empitjorar la resistència a la corrosió, mentre que l'aliatge *AlSi12Ni2* (L-2550 segons UNE) millora la resistència mecànica en calent i la resistència al desgast, alhora que té un baix coeficient de dilatació, característiques adequades per a pistons d'automòbils. En la fabricació de peces de motors alternatius (bloc motor, culates, pistons), sovint s'utilitzen aliatges d'aquest grup amb composicions especials no normalitzades d'alt contingut de Si o hipereutèctiques (*AlSi17Cu4Mg*, *AlSi21CuNiMg*, *AlSi25CuMgNi*).

Grup Al-Si-Mg

Amb l'addició de petits percentatges de Mg, els aliatges Al-Si es converteixen en bonificables, i aconseguen valors de resistència i duresa considerablement més grans i milloren la maquinabilitat. El tractament tèrmic té lloc a la foneria sobre la peça emmotllada, abans de ser mecanitzada. Un dels principals representants d'aquesta família és l'*AlSi10Mg* (L-2560, segons UNE), utilitzat en motors i màquines (llandes de roda, carcasses i caixes, tambors de fre, tubs centrifugats). L'aliatge *AlSi7Mg* (L-2651) és més resistent i de millor maquinabilitat a costa d'una menor facilitat d'em-motllament (rodes, braços de suspensió, peces del sistema de direcció).

Grup Al-Si-Cu

Els aliatges d'aquesta família tenen multiplicitat d'aplicacions quan les característiques mecàniques exigides són més altes que les dels anteriors grups, fins i tot a temperatures moderadament altes. Es fonen fàcilment (possibilitat de formes complicades), es treballen bé (bona maquinabilitat), però no presenten la mateixa resistència a la corrosió i als agents químics que els aliatges dels grups anteriors (presència de Cu). Continguts més alts de Si augmenten la colabilitat en el motlle, mentre que continguts més alts de Cu milloren la maquinabilitat i les possibilitats de poliment. Els aliatges més usats són l'*AlSi5Cu3* (L-2610, segons UNE), de resistència més elevada i apte per a emmotllar en sorra o en conquilla, i l'*AlSi8Cu3* (L-2630, segons UNE), que pràcticament ha esdevingut un estàndard en l'emmotllament per injecció.

Grup Al-Mg

Els aliatges d'aquest grup es caracteritzen per una gran resistència a la corrosió, fins i tot en aigua de mar i en atmosfera salina. Tenen una bona maquinabilitat, poden polir-se molt bé i admeten l'anodització amb finalitat decorativa. Els seus principals camps d'aplicació són la construcció naval, les indústries química i alimentària, i també objectes decoratius. Atès que, mitjançant l'emmotllament, no cal la conformació per deformació en fred, es pot augmentar el percentatge

de Mg, que fa bonificables aquests aliatges. No tenen, però, un emmotllament fàcil (especialment amb continguts >7% Mg, aspecte que ha de tenir-se en compte en el disseny); petites addicions de Si faciliten la colabilitat, però empitjoren l'aparença en l'anodització. L'aliatge *AlMg10* (L-2310, segons UNE), bonificable, a la seva excel·lent resistència a la corrosió uneix unes elevades característiques mecàniques i una gran resistència al xoc; tanmateix, com ja s'ha comentat, el seu emmotllament requereix cures especials. L'aliatge que ofereix més possibilitats d'aplicació és l'*AlMg3* (L-2341 segons UNE), d'emmotllament més fàcil malgrat que disminueixen les característiques mecàniques (aplicacions navals, indústria de l'alimentació, ferratges resistents a la corrosió).

Grup Al-Cu

Per mitjà del tractament tèrmic (el Cu possibilita la bonificació), els aliatges d'aquest grup aconseguen les característiques mecàniques més elevades entre els aluminis d'emmotllament (resistència a la tracció, límit elàstic, allargament, tenacitat, resistència al desgast), especialment a elevades temperatures. Tanmateix, les característiques generals d'emmotllament (colabilitat, esquarterament en la contracció, compacitat) són més aviat baixes (sobretot per a >5% de Cu) i, a més, oposen dificultats a ser conformats en conquilla a causa del gran interval de solidificació i de l'elevada tendència a formar esquerdes per efectes tèrmics. Per tot això, cal un disseny acurat de les peces que tingui en compte les condicions d'emmotllament. S'utilitzen en peces de vehicles i màquines amb altes sol·licitacions mecàniques, sotmeses a xocs o a desgast (politges de corretja trapezoïdal) i es fan ineludibles en peces que treballen en calent. Els aliatges més usats d'aquest grup són: l'*AlCu4MgTi* (L-2140 segons UNE), aliatge d'alumini estàndard de característiques mecàniques elevades i resistent als xocs, per a una gran varietat de peces, carcasses i elements estructurals (automoció, aviació) emmotllades en sorra o en conquilla; i l'*AlCu4Ni2Mg* (L-2150 segons UNE), utilitzat per a peces emmotllades en motlle de sorra o en conquilla que requereixin una elevada resistència mecànica a temperatures de fins a 300°C, amb un coeficient de dilatació baix (culates, èmbols).

Grup Al-Zn-Mg

La característica més rellevant d'aquest grup és la seva capacitat d'autotrempar-se sense necessitat de solubilització, seguit d'una maduració natural (diverses setmanes) o artificial (diverses hores), fet que facilita la fabricació de peces de grans dimensions amb bones característiques mecàniques, tenacitat, maquinabilitat, estabilitat dimensional i resistència a la corrosió. L'aliatge més freqüent és l'*AlZn5Mg* (L-2710 segons UNE), per a peces emmotllades en sorra o en conquilla.

Taula 13.1 Aliatges d'alumini de forja

| | | Aliatges de forja no bonificables | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|
| | | Grup Al | | | | | | Grup Al-Mn | | | | | |
| Registre Internacional d'Aliatges | | 1050 | | 1080 | | 1200 | | 3003 | | | | | |
| UNE | | L 3051 38.114 | | L 3081 38.118 | | L 3001 38.115 | | L 3810 38.381 | | | | | |
| ISO R209 DIN 17007 | | Al 99,5 3.0255 | | Al 99,8 3.0285 | | Al 99,0 3.0205 | | AlMn1Cu 3.0517 | | | | | |
| Composició química | | | | | | | | | | | | | |
| Coure | Cu | % | - | | - | | - | | 0,12 | | | | |
| Magnesi | Mg | % | - | | - | | - | | - | | | | |
| Manganès | Mn | % | - | | - | | - | | 1,2 | | | | |
| Silici | Si | % | - | | - | | - | | - | | | | |
| Zenc | Zn | % | - | | - | | - | | - | | | | |
| Altres | | % | Al 99,5 | | Al 99,8 | | 99,0 | | - | | | | |
| Propietats físiques | | | | | | | | | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | | 2,70 | | 2,70 | | 2,71 | | 2,73 | | | | |
| Coefficient dilatació | µm/m·K | | 23,3 | | 23,6 | | 23,5 | | 23,0 | | | | |
| Calor específic | J/kg·K | | 900 | | 900 | | 905 | | 890 | | | | |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | | 230 | | 235 | | 220/215 | | 190/160/155 | | | | |
| Resistivitat elèctrica | nΩ·m | | 28 | | 28 | | 29/30 | | 34/42/43 | | | | |
| Propietats mecàniques | | | | | | | | | | | | | |
| Tractament | | | O | H14 | H18 | O | H14 | H18 | O | H14 | H18 | | |
| Resist. tracció | 24°C | MPa | 75 | 120 | 165 | 75 | 120 | 90 | 130 | 175 | 115 | 160 | 220 |
| | 150°C | MPa | - | - | - | - | - | - | - | - | 75 | 125 | 160 |
| | 205°C | MPa | - | - | - | - | - | - | - | - | 60 | 95 | 95 |
| Resistència cisallament | | MPa | 55 | 75 | 95 | - | - | 65 | 80 | 100 | 75 | 100 | 110 |
| | | MPa | 25 | 100 | 140 | 20 | 100 | 25 | 110 | 150 | 40 | 145 | 185 |
| Límit elàstic | | MPa | 45 | 11 | 7 | 45 | 10 | 40 | 10 | 7 | 35 | 12 | 7 |
| Allargament | | % | 20 | 35 | 45 | - | - | - | - | - | 45 | 60 | 70 |
| Límit de fatiga (5·10 ⁸) | | MPa | 20 | 30 | 40 | 17 | 25 | 20 | 35 | 45 | 28 | 40 | 55 |
| Duresa | | HB | 20 | 30 | 40 | 17 | 25 | 20 | 35 | 45 | 28 | 40 | 55 |
| Mòdul d'elasticitat | | GPa | 69,0 | | 69,0 | | 69,0 | | 69,0 | | | | |
| Coefficient de Poisson | | - | 0,33 | | 0,33 | | 0,33 | | 0,33 | | | | |
| Propietats tecnològiques | | | | | | | | | | | | | |
| Cost | pta/kg | | 450 | | 500 | | 400 | | 550 | | | | |
| Temperatura de fusió | °C | | 645÷655 | | 650÷655 | | 645÷655 | | 645÷655 | | | | |
| Resistència corrosió | [1÷5] | | [4] | | [4] | | [3÷4] | | [4] | | | | |
| Conformació en fred | [1÷5] | | [5]/[4] | | [5]/[4] | | [5]/[4] | | [5]/[4] | | | | |
| Maquinabilitat | [1÷5] | | [1]/[2] | | [1] | | [1]/[2] | | [1]/[2] | | | | |
| Soldabilitat | [1÷5] | | [5] | | [4÷5] | | [5] | | [5] | | | | |

| Grup Al-Mg | | | | | |
|--------------------|------------------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 3004 | 5005 | 5052 | 5083 | 5086 | 5754 |
| L 3820 38.382 | L-3350 38.335 | L-3360 38.336 | L-3321 38.340 | L 3322 38.341 | L 3390 38.339 |
| AlMn1Mg1 3.0526 | AlMg1 3.3315 | AlMg2,5 3.3523 | AlMg4,5Mn 3.3547 | AlMg4 3.3545 | AlMg3 3.3535 |

| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1,0 | 0,8 | 2,5 | 4,5 | 4,0 | 3,0 | | | | | | | | | | |
| 1,2 | - | - | 0,7 | 0,4 | 0,5 | | | | | | | | | | |
| - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | |
| - | - | - | - | - | - | | | | | | | | | | |
| - | - | 0,25 Cr | 0,15 Cr | 0,15 Cr | 0,25 Cr | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2,72 | 2,70 | 2,68 | 2,66 | 2,66 | 2,67 | | | | | | | | | | |
| 23,2 | 23,7 | 23,8 | 23,9 | 23,9 | 23,8 | | | | | | | | | | |
| 890 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | | | | | | | | | | |
| 160/-/- | 205 | 135 | 120 | 125 | 130 | | | | | | | | | | |
| 41/-/- | 33 | 49 | 60 | 54 | 53 | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| O | H14 | H18 | O | H14 | H18 | H34 | H38 | O | H32 | H34 | O | H34 | O | H32 | H34 |
| 180 | 240 | 285 | 125 | 160 | 200 | 260 | 290 | 275 | 340 | 375 | 260 | 325 | 210 | 250 | 275 |
| 152 | 190 | 215 | - | - | - | 205 | 235 | 215 | - | - | 200 | - | - | - | - |
| 95 | 145 | 150 | - | - | - | 165 | 170 | 150 | - | - | 150 | - | - | - | - |
| 110 | 125 | 145 | 75 | 95 | 100 | 145 | 165 | 180 | 190 | - | 160 | 185 | 130 | 150 | - |
| 69 | 200 | 250 | 40 | 150 | 190 | 215 | 255 | 125 | 250 | 300 | 115 | 255 | 100 | 140 | 180 |
| 23 | 11 | 5 | 25 | 6 | 4 | 16 | 14 | 18 | 12 | 6 | 22 | 10 | 23 | 10 | 6 |
| 95 | 105 | 110 | - | - | - | 125 | 140 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 45 | 65 | 75 | 28 | 40 | 50 | 65 | 75 | 70 | 80 | 90 | 65 | 80 | 55 | 65 | 70 |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| 69,0 | 68,0 | 69,5 | 71,0 | 71,0 | 70,0 | | | | | | | | | | |
| 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| 600 | 600 | 600 | 700 | 600 | 600 | | | | | | | | | | |
| 630÷655 | 630÷650 | 610÷650 | 580÷640 | 585÷640 | 590÷645 | | | | | | | | | | |
| [4] | [4] | [4÷5] | [5] | [5] | [4÷5] | | | | | | | | | | |
| [5]/[3] | [5]/[3] | [3] | [4]/[2] | [4]/[2] | [4]/[2] | | | | | | | | | | |
| [1]/[2] | [1]/[2] | [2] | [2] | [2] | [2] | | | | | | | | | | |
| [5] | [5] | [4] | [4÷5] | [4÷5] | [4÷5] | | | | | | | | | | |

Taula 13.1 Aliatges d'alumini de forja (continuació)

| | | Aliatges de forja bonificables | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|---------|
| | | Grup Al-Cu | | | | | | | | | | |
| Registre Internacional d'Aliatges | | 2011 | 2014 | 2017 | 2024 | 2030 | | | | | | |
| UNE | | L-3192 38.322 | L 3130 38.313 | L 3120 38.312 | L 3140 38.314 | L 3121 38.319 | | | | | | |
| ISO R209 DIN 17007 | | AlCu6BiPb 3.1655 | AlCu4SiMg 3.1255 | AlCu4MgSi 3.1325 | AlCu4Mg1 3.1355 | AlCu4PbMg 3.1645 | | | | | | |
| Composició química | | | | | | | | | | | | |
| Coure | Cu | % | 5,5 | 4,4 | 4,0 | 4,4 | 4,0 | | | | | 4,0 |
| Magnesi | Mg | % | - | 0,5 | 0,6 | 1,5 | 0,9 | | | | | 0,9 |
| Manganès | Mn | % | - | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 1,0 | | | | | 1,0 |
| Silici | Si | % | - | 0,8 | 0,5 | - | 0,8 | | | | | 0,8 |
| Zenc | Zn | % | - | - | - | - | 0,5 | | | | | 0,5 |
| Altres | | % | Pb, Bi 0,4 | - | - | - | Pb 1 Bi 0,2 | | | | | |
| Propietats físiques | | | | | | | | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | | 2,83 | 2,80 | 2,79 | 2,78 | 2,82 | | | | | |
| Coefficient dilatació | µm/m·K | | 23,2 | 23,0 | 23,0 | 23,2 | 22,9 | | | | | |
| Calor específic | J/kg·K | | 865 | 875 | 875 | 875 | 860 | | | | | |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | | 150/170 | 135/155 | 190/135 | 120/150 | 135 | | | | | |
| Resistivitat elèctrica | nΩ·m | | 44/38 | 51/43 | 34/51 | 50 | 51 | | | | | |
| Propietats mecàniques | | | | | | | | | | | | |
| Tractament | | | T3 | T8 | T4 | T6 | O | T4 | T3 | T4 | T6 | T61 |
| Resist. tracció | 24°C | MPa | 380 | 405 | 425 | 480 | 180 | 425 | 485 | 470 | 475 | 370 |
| | 150°C | MPa | 195 | - | - | 275 | - | 275 | 380 | 310 | 310 | - |
| | 205°C | MPa | 110 | - | - | 110 | - | 110 | 185 | 180 | 180 | - |
| Resistència cisallament | | MPa | 220 | 240 | 260 | 240 | 125 | 260 | 285 | 285 | - | - |
| Límit elàstic | | MPa | 295 | 310 | 290 | 415 | 70 | 275 | 345 | 325 | 395 | 235 |
| Allargament | | % | 15 | 12 | 20 | 13 | 22 | 22 | 17 | 19 | 10 | 7 |
| Límit de fatiga (5·10 ⁸) | | MPa | 125 | 125 | 140 | 125 | 90 | 125 | 140 | 140 | - | - |
| Duresa | | HB | 95 | 100 | 105 | 135 | 45 | 105 | 120 | 120 | - | 100 |
| Mòdul d'elasticitat | GPa | | 71,0 | 73,0 | 74,0 | 73,0 | 73,0 | | | | | 73,0 |
| Coefficient de Poisson | - | | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | | | | | 0,33 |
| Propietats tecnològiques | | | | | | | | | | | | |
| Cost relatiu | pta/kg | | 700 | 700 | 725 | 700 | 725 | | | | | 725 |
| Temperatura de fusió | °C | | 540÷645 | 510÷635 | 515÷640 | 500÷635 | 510÷635 | | | | | 510÷635 |
| Resistència corrosió | [1÷5] | | [1] | [2] | [1] | [1] | [1] | | | | | [1] |
| Conformació en fred | [1÷5] | | [1] | [1] | [4]/[1] | [1] | [1] | | | | | [1] |
| Maquinabilitat | [1÷5] | | [5] | [4] | [4] | [4] | [4] | | | | | [5] |
| Soldabilitat | [1÷5] | | [1] | [3] | [3] | [3] | [3] | | | | | [1] |

| Grup Al-Mg-Si | | | | | | |
|------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|------------------|---------------------|
| 6005 | 6061 | 6063/(6060) | 6082 | 7020 | 7049 | 7075 |
| L-3454 38.349 | L-3420 38.342 | (L-3441) (38.337) | L-3453 38.348 | L-3741 38.374 | L-3751 38.375 | L-3710 38.371 |
| AlSiMg 3.3210 | AlMg1SiCu 3.3211 | AlMg0,5Si 3.3207 | AlSi1MgMn 3.2315 | AlZn4,5Mg1 3.4335 | AlZn8MgCu - | AlZn6MgCu 3.4365 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-------------|-------------|------|---------|---------|---------|-----|------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|
| - | 0,3 | - | - | - | 1,5 | 1,6 | | | | | | | | | |
| 0,5 | 1,0 | 0,7 | 0,9 | 0,7 | 2,5 | 2,5 | | | | | | | | | |
| - | - | - | 0,6 | - | - | - | | | | | | | | | |
| 0,8 | 0,6 | 0,4 | 1,0 | - | - | - | | | | | | | | | |
| - | - | - | - | 4,5 | 7,7 | 5,6 | | | | | | | | | |
| - | Cr 0,2 | - | - | Cr 0,15 | Cr 0,15 | Cr 0,20 | | | | | | | | | |
| 2,70 | 2,70 | 2,69 | 2,71 | 2,71 | 2,82 | 2,80 | | | | | | | | | |
| 23,4 | 23,6 | 23,4 | 23,4 | 23,5 | 23,4 | 23,4 | | | | | | | | | |
| 900 | 895 | 900 | 875 | 875 | 875 | 875 | | | | | | | | | |
| -/165 | 180/155/165 | 190/210/200 | 175 | 175 | 155 | 130 | | | | | | | | | |
| -/35 | 37/43/40 | 50/55/53 | 38 | 42 | 43 | 52 | | | | | | | | | |
| T1 | T5 | O | T4 | T6 | T1 | T5 | T6 | T4 | T6 | T4 | T6 | T73 | T6 | T73 | T6 |
| 172 | 260 | 125 | 240 | 310 | 150 | 185 | 240 | 205 | 32 | 320 | 350 | 515 | 610 | 500 | 570 |
| - | - | - | - | 235 | 145 | 138 | 145 | - | 0- | - | - | - | - | 215 | 215 |
| - | - | - | - | 130 | 60 | 65 | 60 | - | - | - | - | - | - | 110 | 110 |
| - | - | 85 | 165 | 205 | 95 | 115 | 150 | - | 200 | - | - | 305 | - | - | 330 |
| 105 | 240 | 55 | 145 | 275 | 90 | 145 | 215 | 110 | 280 | 210 | 280 | 450 | 530 | 435 | 505 |
| 16 | 9 | 28 | 23 | 17 | 20 | 12 | 12 | 14 | 10 | 14 | 10 | 12 | 5 | 13 | 11 |
| - | 95 | 60 | 95 | 95 | 60 | 70 | 70 | - | - | - | - | 275 | - | 160 | 160 |
| - | 95 | 30 | 65 | 95 | 40 | 60 | 70 | - | 95 | - | - | 135 | - | - | 150 |
| 69,0 | 69,0 | | | | 68,5 | | | 69,5 | | 69,5 | | 72,0 | | 72,0 | |
| 0,33 | 0,33 | | | | 0,33 | | | 0,33 | | 0,33 | | 0,33 | | 0,33 | |
| 600 | 825 | | | | 700 | | | | | 750 | | 1000 | | 1000 | |
| 610÷655 | 580÷650 | | | | 615÷655 | | | | | 570÷645 | | 475÷625 | | 475÷635 | |
| [3÷4] | [3÷4] | | | | [3÷4] | | | | | [4] | | [2] | | [2] | |
| [1] | [4]/[2] | | | | [2]/[1] | | | | | [2] | | [1] | | [1] | |
| [3] | [2]/[3] | | | | [3] | | | | | [4] | | [4] | | [4] | |
| [4] | [5] | | | | [4] | | | | | [4] | | [1] | | [2] | |

Taula 13.2 Aliatges d'alumini d'emmotllament

| | | Grup Al | Grup Al-Si | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|---------|-----|-----------|-----|---------|-----|-----------|-----|
| UNE | | L-2051 38.125 | L-2520 38.252 | L-2560 38.256 | L-2610 38.261 | | | | | | | | | |
| ISO R/164, 2147, 3522 | | Al 99,5 | AlSi12 | AlSi10Mg | | AlSi5Cu3 | | | | | | | | |
| AA (Aluminum Association) DIN 1725-2 | | 150.1 3.0250 | 413.0 3.3581 | 360.0 3.2381 | | 363.0 3.2151 | | | | | | | | |
| Composició química | | | | | | | | | | | | | | |
| Coure | Cu | % | - | - | - | | - | | - | | - | | | |
| Magnesi | Mg | % | - | - | 0,40 | | 0,40 | | 0,4 | | 0,4 | | | |
| Silici | Si | % | - | 12,0 | 10,0 | | 10,0 | | 7,0 | | 7,0 | | | |
| Zenc | Zn | % | - | - | - | | - | | - | | - | | | |
| Altres | | % | Al 99,5 | - | Mn 0,5 | | Mn 0,5 | | Mn 0,5 | | Mn 0,5 | | | |
| Propietats físiques | | | | | | | | | | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | | 2,70 | 2,66 | 2,68 | | 2,68 | | 2,68 | | 2,68 | | | |
| Coeficient dilatació | µm/m·K | | 24,0 | 20,0 | 20,0 | | 20,0 | | 21,5 | | 21,5 | | | |
| Calor específic | J/g·K | | 900 | 865 | 875 | | 875 | | 875 | | 875 | | | |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | | 215 | 145÷165 | 135÷160 | | 135÷160 | | 125÷150 | | 125÷150 | | | |
| Resistivitat elèctrica | nΩ·m | | 30 | 45÷50 | 45÷50 | | 45÷50 | | 45÷60 | | 45÷60 | | | |
| Propietats mecàniques | | | | | | | | | | | | | | |
| Emmotllament | | | S | C | S | C | Sorra | | Conquilla | | Sorra | | Conquilla | |
| Tractament | | | F | F | F | F | F | T6 | F | T6 | F | T6 | F | T6 |
| Resistència tracció | MPa | | 80 | 80 | 150 | 170 | 160 | 220 | 180 | 250 | 130 | 230 | 150 | 280 |
| Límit elàstic | MPa | | 30 | 35 | 70 | 80 | 80 | 180 | 90 | 200 | 70 | 200 | 80 | 230 |
| Allargament | % | | 35 | 40 | 5 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Límit de fatiga | 5·10 ⁸ MPa | | - | - | 50 | - | - | - | - | - | 70 | 75 | 80 | 85 |
| Duresa | HB | | 20 | 20 | 50 | 55 | 50 | 75 | 50 | 90 | 65 | 90 | 70 | 100 |
| Mòdul d'elasticitat | GPa | | 69,0 | | 75,0 | | 75,0 | | 75,0 | | 73,0 | | 73,0 | |
| Coeficient de Poisson | - | | 0,33 | | 0,33 | | 0,33 | | 0,33 | | 0,33 | | 0,33 | |
| Propietats tecnològiques | | | | | | | | | | | | | | |
| Cost | pta/kg | | | | | | | | | | | | | |
| Temperatura de fusió | °C | | 650 | | 575÷585 | | 555÷590 | | 555÷590 | | 515÷615 | | 515÷615 | |
| Contracció lineal | % | | 1,6 | | 1,1 | | 1,2 | | 1,2 | | 1,3 | | 1,3 | |
| Fragilitat de contracció | [1÷5] | | [5] | | [5] | | [5] | | [5] | | [5] | | [5] | |
| Colabilitat | [1÷5] | | [2] | | [5] | | [5] | | [5] | | [4] | | [4] | |
| Maquinabilitat | [1÷5] | | [2] | | [1] | | [3] | | [3] | | [3] | | [3] | |
| Soldabilitat | [1÷5] | | [5] | | [4] | | [4] | | [4] | | [4] | | [4] | |
| Resistència en calent | [1÷5] | | - | | - | | - | | - | | [3] | | [3] | |
| Resistència corrosió | [1÷5] | | [5] | | [5] | | [4] | | [4] | | [2] | | [2] | |

| Grup Al-Mg | | | Grup Al-Cu | | Grup Al-Zn |
|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| L-2630 38.263 | L-2310 38.231 | L-2341 38.235 | L-2140 38.214 | L-2150 38.215 | L-2710 38.271 |
| AlSi8Cu3 | AlMg10 | AlMg3 | AlCu4MgTi | AlCu4Ni2Mg | AlZn5Mg |
| A380.0 3.2161 | 520.0 (3.3591) | ~512.0 3.3541 | 204.0 3.1371 | 242.0 3.1754 | (712.0) - |

| 3,5 - 8,5 - - | - 10,0 - - - | - 3,0 - - Ti 0,15 | 4,60 0,25 - - Ti 0,20 | 4,0 1,5 - - Ni 2,0 | 0,25 0,60 - 5,20 Cr, Ti 0,2 | | | | | | | | | | |
|--|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--|---|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|--|-----------------------------|
| 2,72 21,0 875 110 63 | 2,57 24,5 910 70÷100 82 (T4) | 2,67 24,0 900 110÷160 60 | 2,75 23,0 860 125÷160 47 | 2,80 22,5 860 167/130 39/52 | 2,81 24,7 865 138 49 | | | | | | | | | | |
| Injecció | S | | | Conquilla | | Sorra | | Conquilla | | Sorra | | Conquilla | | S | C |
| F | T4 | F | T4 | T6 | T6 | T4 | T6 | T4 | T6 | F | T6 | F | T6 | T5 | T5 |
| 190 135 2 - 85 | 275 145 10 95 80 | 220 145 6 - 70 | 310 180 10 - 85 | 210 130 2 - 80 | 20 0- 150 4 - 80 | 295 185 6 75 95 | 305 195 4 - 100 | 325 195 7 - 100 | 335 225 5 - 110 | 150 - - - 70 | 220 180 - - 95 | 170 - - - 80 | 260 220 0,5 65 110 | 210 140 5 60 70 | 220 150 7 60 80 |
| 74,0 0,33 | 69,0 0,33 | | | 69,0 0,33 | | 75,0 0,33 | | | | 71,0 0,33 | | | | 72,0 0,33 | |
| 520÷590 1,2 [5] [5] [3÷4] [1] [3] [1] | 450÷605 1,2 [4] [2] [5] [3] [3] [5] | | | 590÷640 1,4 [2] [3] [3] [3] - [5] | | 530÷635 1,4 [1] [2] [4] [2] [3] [2] | | | | 530÷635 1,4 [1] [2÷3] [4] [2] [5] [2] | | | | 570÷615 1,5 [1] [2] [4] [3] - [4] | |

13.2 Coure i aliatges de coure

Introducció

El coure, en la forma de bronze tradicional (aliatge de Cu-Sn), fa més de 5.000 anys que és conegut per l'home i ha donat nom a una de les etapes de l'evolució de la humanitat (*l'edat del bronze*). Les qualitats més destacades del Cu i els seus aliatges, origen de les seves principals aplicacions, són una conductivitat elèctrica excel·lent (usos elèctrics; resistivitat elèctrica de 16,7 nΩ·m, la millor entre els materials usuals), una conductivitat tèrmica excel·lent (elements de dissipació; intercanviadors de calor) i una bona resistència a la corrosió (usos sanitaris, elements resistents a la corrosió). Alhora combina les qualitats anteriors amb una resistència mecànica acceptable (intermèdia entre la dels acers i els aluminis) i una excel·lent aptitud per a la conformació, especialment gràcies a la seva ductilitat. Els factors que pesen en el cantó negatiu de la balança són una densitat elevada (8,93 Mg/m³, un 15% superior a la dels acers) i un cost elevat influït negativament per la densitat. El coure i els seus aliatges han estat substituïts en moltes de les seves aplicacions tradicionals per altres materials: l'alumini, en els usos elèctrics; els plàstics, en aplicacions que requereixen resistència a la corrosió; o els acers inoxidable, en aplicacions que exigeixen una bona resistència mecànica.

El coure que s'utilitza en estat industrialment pur té aplicacions elèctriques i tèrmiques mentre que, en el disseny de màquines, s'usen molt més els seus aliatges: *llautons*, aliatges de Cu-Zn; *bronzes tradicionals*, aliatges de Cu-Sn. I en menor proporció: *bronzes a l'alumini*, aliatges de Cu-Al; *bronzes al beril·li*, aliatges de Cu-Be; i *cuproníquels*, aliatges de Cu-Ni.

Coures

Segons la forma d'elaboració, es distingeixen diversos tipus de coure industrial: a) *Coure electrolític (Cu-ETP, electrolytic tough pitch)*, coure refinat electrolíticament amb més de 99,90% de Cu i traces d'O (~0,04%) en el qual, fruit de la combinació de l'oxigen amb les impureses, la conductivitat elèctrica resulta excel·lent (100% IACS, International Annealed Copper Standard, corresponent a una resistivitat de 17,24 nΩ·m) i s'usa en aplica-cions

elèctriques (fils conductors, barres, platines, contactors); tanmateix, quan s'escalfa per damunt de 400°C en atmosferes reductores, la presència de l'oxigen en combinació amb l'hidrogen dóna lloc a un fenomen de fragi-lització i, per tant, cal evitar la soldadura o la seva utilització més enllà d'aquesta temperatura. *b) Coure fosforós (Cu-DHP, desoxidated high phosphorus)*, coure amb més d'un 99,85% de Cu, desoxidat per mitjà de P, que esdevé apte per a la soldadura (tubs i xapes per a serveis sanitaris, intercanviadors de calor); tanmateix, un contingut residual elevat de P (~0,04%) disminueix la conductivitat elèctrica. *c) Coure lliure d'oxigen (Cu-FRHC, fire-refined high conductivity)*, coure obtingut per fusió en una atmosfera reductora, amb l'oxigen limitat a 0,003%, apte tant per a conductor elèctric com per a soldadura.

El Cu pur és molt dúctil i es conforma fàcilment en fred i en calent però la maquinabilitat és baixa i és molt més difícil d'emmotllar (fissures superficials, formació de cavitats interiors a causa de la seva gran contractació), per la qual cosa els Cu per a emmotllament incorporen elements d'aliatge. La resistència mecànica dels diferents tipus de Cu pur és sensiblement la mateixa, i depèn del grau de deformació en fred que han experimentat. La temperatura de servei és relativament baixa i és marcada per la recristal·lització (140÷220°C). L'addició de petites quantitats de plata (0,05% Ag), *Cu-Ag*, augmenten aquesta temperatura fins a 350°C sense modificar la conductivitat elèctrica. L'addició de tel·luri (0,50% Te) augmenta molt la maquinabilitat, mentre que altres elements d'aliatge, en proporcions una mica més altes, poden augmentar espectacularment la resistència mecànica i mantenir una alta conductivitat elèctrica: aliatges Cu-Cr-Zr o Cu-Co-Be per a elèctrodes de soldadura.

Llautons

Aliatges de Cu-Zn (eventualment amb altres elements) que combinen un cost relativament baix (el Zn és més barat que el coure) amb una bona resistència a la corrosió, conductivitat elèctrica i tèrmica, resistència mecànica, ductilitat i maquinabilitat. Els llautons no ofereixen les bones qualitats de lliscament ni la tenacitat dels bronzes. En aigua marina, o aigües dolces amb alt contingut d'oxigen, els llautons estan sotmesos a un procés de corrosió anomenat *deszincificació*, per dissolució de l'aliatge i dipositació del Cu en forma porosa; l'addició de petites quantitats de Sn (llautons navals) o d'Al protegeixen els aliatges d'aquest fenomen.

Llautons de deformació en fred

Llautons amb un contingut de 20÷37% de Zn, destinats a la conformació per mitjà de grans deformacions en fred, que obtenen un màxim de resistència mecànica i de ductilitat per a un 30% de Zn; més enllà d'aquest percentatge, es manté la resistència però disminueix lleugerament la ductilitat. Els principals aliatges són: llautó *CuZn30* (L-6130 segons UNE, anomenat també *llautó de cartutxeria*) que s'utilitza especialment per a peces conformades per embutició profunda (beines de bala, rosques de làmpada); Llautons *CuZn35* i *CuZn37* (L-6135 i L-6137 segons UNE), de continguts més elevats de Zn (més barats) que, malgrat ser lleugerament menys dúctils són els més usats (cargolam de llautó, molles de làmina, aixeteria).

Llautó de forja en calent

Els llautons de contingut de Zn de 38÷44% presenten una estructura cristal·lina no adequada per al treball en fred, però, en canvi, obtenen una excel·lent plasticitat en calent. L'aliatge *CuZn40* (L-6140 segons UNE, anomenat també *metall Muntz*), més barat que els llautons de deformació en fred (alt contingut de Zn), és especialment adequat per a peces forjades i estampades en calent a més de tenir una bona maquinabilitat.

Llautons de mecanització fàcil

L'addició de Pb (0,5÷4%) als llautons facilita la fragmentació del material en el tall i disminueix la fricció entre l'eina i la peça, amb la qual cosa augmenta considerablement la maquinabilitat (llautons de mecanització fàcil). El llautó *CuZn36Pb3* (L-6425 segons UNE) obté una millor maquinabilitat en peces que requereixen deformació en fred seguides de mecanització (cargols i femelles, reblons, peces recalcaades), mentre que el *CuZn39Pb3* (L-6440 segons UNE) proporciona una gran millora de la maquinabilitat en peces forjades en calent amb mecanització posterior (maniguets, perns, coixinets).

Llautons d'alta resistència

Llautons amb moderades addicions de Mn, Fe i Al en diverses proporcions que donen lloc a un increment sensible de la resistència mecànica i una millora de la resistència a la corrosió i al desgast. Els representants d'aquesta família són el *CuZn39AlFeMn* (C-6680 segons UNE), per a peces forjades o extruïdes d'excel·lent resistència mecànica (segments de pistó, tiges de bombes, vàlvules, arbres per a aplicacions marines), i l'aliatge *CuZn37Mn3Al2Si* (C-6660 segons UNE), per a productes forjats o extruïts en calent, d'excel·lent resistència mecànica i al desgast (vàlvules, arbres, pinyons i rodes dentades, èmbols, sincronitzadors, contactors).

Llautons navals

Llautons amb petites addicions d'estany, Sn, que milloren la resistència a la corrosió, especialment la marina. El llautó naval *CuZn38Sn1* (C-6840 segons UNE) té una excel·lent resistència a la corrosió i un preu moderat, per a peces estructurals i de forja que treballen en entorns marins. El llautó *CuZn38Sn1P* (L-6820 segons UNE, també anomenat *llautó admiralty*) té una excel·lent resistència a la corrosió, es pot soldar i s'utilitza en tubs i plaques per a condensadors i intercanviadors de calor.

Llautons d'emmotllament

Hi ha diverses variants de llautó adequades per a la conformació per emmotllament. Entre aquestes destaquen el llautó *CuZn33Pb2* (C-2410 segons UNE), de mecanització fàcil, i el llautó *CuZn25Al6Fe3Mn3* (C-2625 segons UNE), d'alta resistència, els quals tenen característiques anàlogues als llautons de forja de les respectives famílies.

Bronzes

En sentit estricte, aquest terme s'aplica als aliatges de Cu-Sn (*bronzes o bronzes a l'estany*), però el seu ús s'ha estès per a designar també altres aliatges del coure (a excepció dels llautons i dels cuproníquels), que es veuran en el proper apartat (altres aliatges del Cu): *bronzes a l'alumini* (aliatges Cu-Al) i *bronzes al beril·li* (aliatges Cu-Be).

Bronzes fosforosos

Aliatges de Cu-Sn, de cost elevat (el Sn és més car que el Cu), desoxidats amb P, que es conformen tant per laminació i forja (continguts de Sn <8%), com per emmotllament (normalment continguts de Sn de 8÷12%; en les campanes arriba al 20%). Es caracteritzen per la bona tenacitat, la duresa elevada, l'alta resistència a la corrosió i el baix coeficient de fricció. Entre els bronzes fosforosos de laminació, que s'endureixen per deformació en fred, el més usual és el *CuSn5P* (C-7130 segons UNE), de gran ductilitat, que se subministra en forma de fils i de làmines (fil de soldar, elements de subjecció, discs d'embragatge, diafragmes). Els bronzes fosforosos d'emmotllament més usuals són: el *CuSn10P* (C-3112 segons UNE), per a coixinets i peces de lliscament en les màquines, i el *CuSn11P* (C-3120 segons UNE), més resistent al desgast, per a la fabricació d'engranatges. L'addició de Ni en els bronzes d'emmotllament, *CuSn10Ni2* (C-3820 segons UNE), millora la resistència i la duresa, mentre petites addicions de Pb augmenten la maquinabilitat. Per sinterització s'obté un bronze porós apte per a coixinets (reté el lubricant).

Bronzes al zenc i bronzes rojos

L'addició de Zn al bronze ($\text{CuSn}_{10}\text{Zn}_2$ o *bronze de canó*, C-3220 segons UNE) millora les qualitats d'emmotllament tot mantenint unes bones propietats mecàniques i resistència a la corrosió; s'utilitza en aplicacions navals, en sistemes de vapor i en anells de lliscament de màquines elèctriques, i és el més usat per a estàtues i objectes decoratius. Altres bronzes al zenc, amb percentatges de Sn moderats i addicions importants de Pb (també coneguts com *bronzes rojos*) presenten alhora una bona colabilitat, maquinabilitat, resistència a la corrosió (no són susceptibles de deszincificació, com els llautons) i un preu moderat. Els aliatges $\text{CuSn}_5\text{Zn}_5\text{Pb}_5$ (C-3520 segons UNE) i $\text{CuSn}_7\text{Zn}_4\text{Pb}_6$ (C-3530 segons UNE), aquest segon lleugerament més resistent, s'utilitzen en peces i valvuleria d'instal·lacions d'aigua, vapor i gas, així com en altres elements anàlegs fabricats en sèrie.

Bronzes al plom per a coixinets

Els aliatges per a coixinets tenen un baix coeficient de fricció i una bona resistència al desgast i es diferencien pel grau de duresa (aliatges plàstics, <40 HB; aliatges tous, 40÷80 HB; aliatges durs, >80 HB). La plasticitat garanteix un repartiment uniforme de la càrrega (compensa desalineacions) i permet absorbir partícules dures que així neutralitzen la seva capacitat abrasiva, mentre que la duresa permet acceptar càrregues específiques més elevades. Els bronzes al plom $\text{CuSn}_{10}\text{Pb}_{10}$ i $\text{CuSn}_5\text{Pb}_{20}$ (C-3340 i C-3320 segons UNE), de plasticitat creixent amb el contingut de Pb, se situen entre els aliatges tous, i són adequats per a coixinets de velocitats i pressions moderades que treballen en ambients corrosius i en condicions de lubricació escassa (mineria, ferrocarril). Entre els materials per a coixinets de major plasticitat (20÷40 HB) hi ha els *babbitts a l'estany* (80÷90% Sn, Sb, Cu i Pb), d'excel·lents qualitats antifricció, i els *babbitts al Pb-Sn* (65÷75% Pb, Sn, Sb, Cu), de qualitats antifricció menors però més econòmics; mentre que entre els aliatges més durs (>80 HB) hi ha els bronzes fosforosos, els bronzes a l'alumini i aliatges d'alumini antifricció.

Altres aliatges del coure

Bronzes a l'alumini

Aliatges de Cu-Al, sovint amb l'addició d'altres elements (Fe, Ni, Mn), que destaquen per l'extraordinària resistència a la corrosió (fins i tot en aigües marines) gràcies a la formació d'una capa molt protectora d'alúmina, alhora que ofereixen unes propietats mecàniques excel·lents que mantenen fins a temperatures moderadament elevades. Es distingeixen dos grups d'aliatges: a) Aliatges fins a ~9% d'Al: són dúctils i es poden endurir moderadament per

treball en fred, millora mecànica que mantenen fins a temperatures de servei de 250°C, mentre que en estat de recuita poden usar-se fins a 400°C; l'aliatge més usual, $CuAl8Fe3$ (C-8210 segons UNE), s'usa en equip per a l'enginyeria química, en la fabricació de monedes i en joieria. *b)* Aliatges amb 9÷14% d'Al, generalment amb Fe i sovint amb Ni o Mn: es poden tractar tèrmicament per a obtenir millors característiques mecàniques (tenacitat, resistència a tracció, al desgast i a la fatiga). Els aliatges més usuals són el $CuAl10Fe3$ (C-8240 per a forja i C-4210 per a emmotllament, segons UNE) i el $CuAl10Fe5Ni5$ (C-8270 i C-4220, respectivament, segons UNE). Aquest darrer combina una excel·lent resistència a tracció a 400°C amb una acceptable resistència a fluència a 250°C. Tenen nombroses aplicacions marines (vàlvules, bombes, hèlices) i en màquines (coixinets, engranatges, rodes de vis sense fi, cargols i femelles, guies de vàlvula, lleves; elements de motlles de plàstic).

Coure (o bronze) al beril·li

Aliatges de Cu amb petits percentatges de Be (1,7÷2%), que es tracten tèrmicament per a obtenir una gran millora de les seves característiques mecàniques (resistència a la tracció extraordinària, fins a 1400 MPa, i límit elàstic, fins a 1300 MPa; bona duresa i resistència al desgast), alhora que es mantenen una bona resistència a la corrosió i una elevada conductivitat elèctrica. L'aliatge $CuBe1,7CoNi$ (C-9415 segons UNE) s'usa per a fabri-car molles no magnètiques, peces elàstiques que han de conduir el corrent elèctric, així com peces sotmeses a fatiga o d'alta resistència mecànica que han de ser resistents a la corrosió. També s'utilitza per a motlles de plàstic.

Cuproníquels i plates alemanyes

Els cuproníquels són aliatges de Cu-Ni, de forja o d'emmotllament, de gran resistència a la corrosió en aigua salada, destinats a usos navals, a plantes de dessalinització d'aigua de mar i a aplicacions anàlogues. Les composicions varien entre 10÷30% de Ni, sovint amb addicions de Fe i Mn. Els aliatges més usats són $CuNi10Mn1Fe$ i $CuNi30Mn1Fe$ (C-9213 i C-9215 segons UNE), el segon més resistent a l'erosió que el primer. Les plates alemanyes són aliatges de Cu-Ni-Zn en proporcions tals que adqui-reixen una aparença de plata. Se subministren com a materials de forja i aleshores presenten unes propietats de deformació en fred excel·lents, o també es poden emmotllar. Alguns aliatges contenen Sn (millora la colabi-litat) o Pb (millora la maquinabilitat). A més d'usar-se en coberteria i amb finalitats decoratives, l'aliatge $CuNi18Zn27$ (C-9233 segons UNE) s'aplica en molles per a contactes elèctrics que siguin estables en totes les condicions climàtiques.

Taula 13.3 Coure i aliatges de coure

| | | Coure electrolític, fosforós | | Llautons de forja | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------------------|---------|--------------------|-----|-------------------|------|-------------------|------|---------------------|---------|----|---------|----|
| | | | | deformació en fred | | | | def.calent | | de mecan. | | | | |
| ISO 1191 UNE 37.103 | | Cu 99,95 | | CuZn30 C-6130 | | CuZn35 C-6135 | | CuZn40 C-6140 | | CuZn39Pb3 C-6440 | | | | |
| Número DIN Número UNS | | Diversos | | 2.0265 C 26000 | | 2.0335 C 27000 | | 2.0360 C 28000 | | 2.0375 C 36000 | | | | |
| Composició química | | | | | | | | | | | | | | |
| Coure | Cu | % | >99,95 | | | | 70 | | 65 | | 60 | | 61 | |
| Zenc | Zn | % | | | | | 30 | | 35 | | 40 | | 36 | |
| Estany | Sn+ | % | | | | | | | | | | | 3 | |
| Plom | Pb | % | | | | | | | | | | | | |
| Alumini | Al | % | | | | | | | | | | | | |
| Níquel | Ni | % | | | | | | | | | | | | |
| Altres | | % | | | | | | | | | | | | |
| Propietats físiques | | | | | | | | | | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | | 8,94 | | | | 8,53 | | 8,47 | | 8,39 | | 8,50 | |
| Coefficient dilatació | µm/m·K | | 17,0 | | | | 19,9 | | 20,3 | | 20,8 | | 20,5 | |
| Calor específic | J/kg·K | | 385 | | | | 375 | | 384 | | 375 | | 380 | |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | | 391 | | | | 120 | | 116 | | 123 | | 123 | |
| Resistivitat elèctrica | nΩ·m | | 17,1 | | | | 62 | | 64 | | 62 | | 66 | |
| Conductivitat elèctrica | %IACS | | 100±101 | | | | 28 | | 27 | | 28 | | 26 | |
| Propietats mecàniques | | | | | | | | | | | | | | |
| Tractament | | | O | H1 | H4 | O | H4 | O | H4 | H8 | O | H2 | O | H4 |
| Resistència tracció | MPa | | 220 | 260 | 345 | 325 | 52 | 32 | 51 | 62 | 370 | 48 | 28 | 45 |
| Resistència cisallament | MPa | | 150 | 170 | 195 | 230 | 5 | 5 | 0 | 5 | 145 | 5 | 0 | 0 |
| Límit elàstic | MPa | | 70 | 205 | 310 | 125 | 43 | 10 | 41 | 42 | 275 | 34 | - | - |
| Allargament ruptura | % | | 45 | 25 | 6 | 62 | 5 | 5 | 5 | 5 | 45 | 5 | - | - |
| Límit de fatiga | 5·10 ⁸ MPa | | 70 | - | 90 | 90 | 30 | 23 | 29 | 32 | - | 30 | 12 | 5 |
| Duresa | HB | | 45 | 95 | 115 | 70 | 5 | 0 | 5 | 5 | - | 5 | - | - |
| | | | | | | | 8 | 62 | 8 | 3 | | 10 | - | 75 |
| | | | | | | | 14 | 85 | 97 | 14 | | - | | |
| | | | | | | | 5 | - | 80 | 0 | | 75 | | |
| | | | | | | | 82 | | | 90 | | | | |
| Mòdul d'elasticitat | GPa | | 115 | | | 110 | | 105 | | | 105 | | 97 | |
| Coefficient de Poisson | - | | - | | | 0,37 | | - | | | 0,34 | | 0,31 | |
| Propietats tecnològiques | | | | | | | | | | | | | | |
| Cost | Pta/kg | | 500÷850 | | | 450 | | - | | | - | | - | |
| Temperatura de fusió | °C | | 1083 | | | 915÷955 | | 905÷930 | | | 900÷905 | | 875÷890 | |
| Conformació en fred | [1÷5] | | [5] | | | [4] | | [4] | | | [2] | | [3] | |
| Conformació en calent | [1÷5] | | [4÷5] | | | [2] | | [1] | | | [4] | | [3] | |
| Maquinabilitat | [1÷5] | | [1] | | | [2] | | [2] | | | [3] | | [4÷5] | |
| Soldabilitat | [1÷5] | | [2÷3] | | | [2÷3] | | [2÷3] | | | [2÷3] | | [1] | |
| Resistència corrosió | [1÷5] | | [4] | | | [4] | | [3] | | | [3] | | [3] | |

| | | | | | Bronzes de forja | | | | | | | |
|---------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|----------------------|------------------|--------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| fàcil | | d'alta resistència | | navals | | a l'estany | a l'alumini | | | | | |
| CuZn39Pb3 C-6440 | CuZn39AlFeMn C-6680 | CuZn25Al5Fe1Mn C-6620 | CuZn38Sn C-6840 | CuZn28Sn1P C-6820 | CuSn5P C-7130 | CuAl8Fe3 C-7150 | | | | | | |
| 2.0401 c 38500 | - - | - - | - C 46400 | ~2.0470 C 44500 | - C 51000 | 2.0932 C 61400 | | | | | | |
| 57 | 58 | 68 | 61 | 71 | 95 | 89 | | | | | | |
| 39 | 39 | 25 | 38 | 28 | - | - | | | | | | |
| - | - | - | 1 | 1 | 5 | - | | | | | | |
| 3 | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| - | 0,8 | 5 | - | - | - | 7,5 | | | | | | |
| - | - | - | - | - | - | - | | | | | | |
| - | Fe 0,8 Mn 1,1 | Fe 1,5 Mn | - | P | P 0,4 | Fe 2,5 | | | | | | |
| 8,47 | 8,28 | 8,95 | 8,41 | 8,53 | 8,86 | 7,89 | | | | | | |
| 20,9 | 21,5 | 20,3 | 21,2 | 20,2 | 17,8 | 16,2 | | | | | | |
| 380 | - | - | 380 | 380 | 380 | 375 | | | | | | |
| 123 | - | - | 116 | 110 | 84 | 56 | | | | | | |
| 62 | 72 | 102 | 66 | 69 | 87 | 123 | | | | | | |
| 28 | 24 | 16 | 26 | 25 | 18 | 14 | | | | | | |
| O | H2 | Extruït | O | H2 | O | H4 | O | H4 | H8 | O | H4 | |
| 370 | 460 | 450 | 650 | 425 | 550 | 365 | 630 | 325 | 540 | 700 | 520 | 615 |
| - | - | - | - | 315 | - | - | - | 250 | 345 | 385 | 275 | 310 |
| 110 | 260 | 220 | 290 | 205 | 365 | 150 | 495 | 130 | 440 | 620 | 230 | 350 |
| 35 | 15 | 20 | 12 | 40 | 20 | 65 | 4 | 64 | 10 | 4 | 40 | 20 |
| - | - | 140 | - | - | - | - | 120 | 170 | 180 | - | 160 | 170 |
| 90 | 160 | 130 | - | 100 | 150 | 75 | 165 | 70 | 170 | 205 | 140 | 190 |
| 97 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 122 | 115 | | | | | |
| - | - | - | - | - | - | - | 0,31 | | | | | |
| 350 | - | 700 | - | - | 850 | 1400 | | | | | | |
| 890 | 860÷880 | - | - | - | 975÷1060 | 1045 | | | | | | |
| [1] | [1] | [1] | [2] | [4] | [4] | [2] | | | | | | |
| [4] | [3] | [3] | [4] | [2] | [1] | [3] | | | | | | |
| [5] | [2] | [2÷3] | [2] | [2] | [1] | [2] | | | | | | |
| [1] | [1] | [2] | [2] | [2] | [3] | [2] | | | | | | |
| [3] | [4] | [3] | [4÷5] | [5] | [4] | [4] | | | | | | |

Taula 13.3 Coure i aliatges de coure (continuació)

| | Altres aliatges de forja | | | Lautons d'emmotllament | |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| | Cu-Ni | plata alem. | Cu-Be | mec. fàcil | alta resistèn. |
| ISO 1191 UNE 37.103 | CuNi30Mn1Fe C-9215 | CuNi18Zn227 C-9233 | CuBe1,7CoNi C-9415 | CuZn33Pb2 C-2415 | CuZn25Al6Fe3Mn3 C-2625 |
| Número DIN Número UNS | 2.0882 C 71700 | 2.0742 C 77000 | - C 17000 | ~2.0290 ~C 85700 | ~2.0598 C 86300 |

| Composició química | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|-------------|------|-----------|------|-------------|------|---------|---------|-------|
| Coure | Cu | % | 68 | 54 | 97 | 65 | 63 | | | | |
| Zenc | Zn | % | - | 27 | - | 33 | 25 | | | | |
| Estany | Sn | % | - | - | - | - | - | | | | |
| Plom | Pb | % | - | - | - | 2 | - | | | | |
| Alumini | Al | % | - | - | - | - | 6 | | | | |
| Níquel | Ni | % | 30 | 18 | 0,4 | - | - | | | | |
| Altres | | % | Mn 1 Fe 0,7 | - | Be 1,7 Co | - | Fe 3 Mn 2,8 | | | | |
| Propietats físiques | | | | | | | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | | 8,94 | 8,70 | 8,26 | 8,43 | 7,90 | | | | |
| Coeficient dilatació | µm/m·K | | 16,2 | 16,7 | 16,7 | 21,0 | 22,0 | | | | |
| Calor específic | J/kg·K | | 380 | 380 | 420 | 375 | 375 | | | | |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | | 21 | 29 | 118 | 86 | 35 | | | | |
| Resistivitat elèctrica | nΩ·m | | 375 | 314 | 75 | 85 | 85 | | | | |
| Conductivitat elèctrica | %IACS | | 4,5 | 6,3 | 22 | 20 | 20 | | | | |
| Propietats mecàniques | | | | | | | | | | | |
| Tractament | | | O | H4 | H4 | H8 | TD4 | TH4 | Sorra | Sorra | Cent. |
| Resistència tracció | MPa | | 380 | 580 | 690 | 795 | 825 | 1340 | 170÷200 | 725 | 820 |
| Resistència cisallament | MPa | | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Límit elàstic | MPa | | 140 | 540 | 585 | - | 760 | 1240 | 80÷110 | 400 | 460 |
| Allargament ruptura | % | | 45 | 15 | 3 | - | 8 | 2 | 10÷30 | 15 | 18 |
| Límit de fatiga 5·10 ⁸ | MPa | | - | - | - | - | 270 | 310 | 45÷65 | - | - |
| Duresa | HB | | 90 | 150 | 90 | 100 | 102 | 350 | 50 | 180 | 225 |
| Mòdul d'elasticitat | GPa | | 150 | | 125 | | 155 | | 100 | 105 | |
| Coeficient de Poisson | - | | - | | - | | 0,30 | | - | - | |
| Propietats tecnològiques | | | | | | | | | | | |
| Cost | Pta/kg | | 3000 | | - | | 3200 | | - | - | |
| Temperatura de fusió | °C | | 1170÷1240 | | 1055 | | 865÷960 | | 915÷930 | 890÷925 | |
| Conf.fred/Contracció | [1÷5]/% | | [3÷4] | | [4] | | [3] | | 1,5÷1,8 | 2,3 | |
| Conf.calent/Colabilitat | [1÷5] | | [3÷4] | | [2] | | - | | [3] | [2÷3] | |
| Soldabilitat | [1÷5] | | [4÷5] | | [3] | | [3] | | - | - | |
| Maquinabilitat | [1÷5] | | [2] | | [2] | | [1] | | [4] | [2] | |
| Resistència corrosió | [1÷5] | | [5] | | - | | [4] | | [2] | [2] | |

| Bronzes d'emmotllament | | | | | | |
|------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| fosforós | al zenc | roig | al plom | | a l'alumini | |
| CuSn11P C-3120 | CuSn10Zn2 C-3220 | CuSn5Zn5Pb5 C-3520 | CuSn10Pb10 C-3320 | CuSn5Zn20 C-3340 | CuAl10Fe3 C-4210 | CuAl10Fe5Ni5 C-4220 |
| - ~C 90700 | - C 90500 | - C 83600 | - C 93700 | - C 94100 | - ~C 95200 | - ~C 95500 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---------|----------|---------|---------|--------|-------------|------|------|-----|-------|-------|-----------|-----------|
| 88 | 86 | 84 | 79 | 73 | 86 | 78 | | | | | | | |
| - | 2 | 5 | <2 | <2 | - | - | | | | | | | |
| 11 | 10 | 5 | 10 | 5 | - | - | | | | | | | |
| - | <1,5 | 5 | 9,5 | 20 | <0,02 | <0,02 | | | | | | | |
| - | - | - | - | - | 10 | 10 | | | | | | | |
| - | - | <2,5 | <2 | <2,5 | <3 | 5 | | | | | | | |
| P 0,8 | Ni<2,0 | - | - | - | Fe 3,5 | Fe 4,5 Mn<3 | | | | | | | |
| 8,77 | 8,70 | 8,83 | 8,95 | 9,40 | 7,45 | 7,53 | | | | | | | |
| 18,0 | 20,0 | 18,0 | 18,5 | 18,5 | 16,2 | 16,2 | | | | | | | |
| 375 | 375 | 380 | 375 | 375 | 420 | 418 | | | | | | | |
| 71 | 74 | 72 | 47 | 52 | 59 | 42 | | | | | | | |
| 178 | 155 | 114 | 170 | 171 | 133 | 203 | | | | | | | |
| 9,6 | 11 | 15 | 10,2 | 10 | 13 | 8,5 | | | | | | | |
| Sor | Con | Sor | Cent | Sor | Cent | Sor | Con | Sor | Con | Sor | Con | Sor | Cent |
| 305 | 380 | 270 | 300 | 200 | 250 | 240 | 260 | 150 | 180 | 520 | 580 | 620 | 760 |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 150 | 205 | 130 | 140 | 100 | 110 | 125 | 150 | 60 | 80 | 180 | 210 | 275 | 310 |
| 20 | 16 | 13 | 8 | 13 | 13 | 20 | - | - | - | 13 | 15 | 18 | 18 |
| - | 170 | - | - | - | 75 | - | 90 | - | 65 | - | 200 | 215 | 225 |
| 80 | 102 | 75 | 75 | 60 | 60 | 60 | 60 | 50 | 50 | 115 | 145 | 160 | 175 |
| 105 | 105 | 85 | 85 | 72 | 110 | 110÷115 | 0,32 | 0,32 | | | | | |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1600 | 1800 | 1025÷1040 | 1040÷1055 |
| 830÷1000 | 860÷880 | 855÷1100 | 760÷930 | 800÷940 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 |
| 1,5÷1,8 | 1,6 | 5,7 | 2,0 | 1,5 | [4] | [5] | [5] | [3] | [3] | [1] | [1] | [1] | [1] |
| [4] | - | [5] | [5] | [3] | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | [2] | [1] | [4] | [4] | [4] | [3] | [3] | [3] | [3] |
| [2] | [2] | [1] | [4] | [4] | - | [3÷4] | [3] | [3] | [3] | [4÷5] | [4÷5] | [4÷5] | [4÷5] |
| [4] | - | [3÷4] | [3] | [3] | | | | | | | | | |

13.3 Altres metalls

A més de les tres famílies de metalls analitzades en els apartats anteriors (aliatges del Fe, Al i Cu), que cobreixen el gruix de les aplicacions en el disseny de màquines, en aquest darrer capítol dels materials metàl·lics es consideren breument unes altres cinc famílies de metalls (aliatges del Zn, Mg, Ti, Ni i superaliatges), amb aplicacions més específiques.

Zenc i aliatges de zenc

El zenc pur es caracteritza per un punt de fusió baix (420°C) i per unes propietats mecàniques molt moderades. En estat pur s'utilitza, en la seva major part (>50%), en la galvanització de l'acer i també en forma de planxes laminades per a teulades d'edificis. Tanmateix, on té més interès en el disseny de màquines és en els aliatges d'emmotllament per a injectar en conquilla, ja que, amb un material de punt de fusió molt baix, s'obtenen peces d'una gran precisió dimensional i una resistència mecànica acceptable. Els principals elements d'aliatge són: l'Al, que augmenta molt la colabilitat del Zn; el Cu, que augmenta la resistència mecànica; i el Mg, que, en petits percentatges, augmenta molt la resistència, malgrat que sigui en detriment de la colabilitat i de la tenacitat. La presència d'altres elements (Pb, Sn o Fe) exerceix un efecte molt negatiu sobre la tenacitat, per la qual cosa cal partir de materials amb impureses molt baixes.

AG40A (aliatge 3); *AC41A* (aliatge 5)

Aquests materials, coneguts també amb el nom comercial de Zamak, d'un contingut d'Al limitat a 4% i presència d'altres elements, són els aliatges estàndard de Zn d'emmotllament en conquilla per injecció en cambra calenta (més eficient que en cambra freda); tant la productivitat com la durada del motlle són més altes que en els materials competidors (aliatges d'alumini, magnesi i coure). En estat fos tenen una gran fluïdesa, i permeten fabricar peces de parets molt primes (compensen la densitat relativament alta del material) i formes complicades d'una gran precisió dimensional i una resistència acceptable, a un cost competitiu (més baix que el bronze, però més alt que la fosa nodular i l'alumini). L'aliatge 3 és el més utilitzat, mentre que l'aliatge 5 ofereix millors propietats mecàniques i millor resistència a la fluència.

ZA-8, ZA-12, ZA-27

Constitueixen una nova generació d'aliatges de Zn amb continguts més alts d'Al (la xifra n'indica aproximadament el contingut), destinats inicialment a l'emmotllament per injecció en cambra freda, però que també es poden emmotllar per gravetat en conquilla o en motlle de sorra. El seu cost superior (10÷15%) i la seva eficiència menor en la fabricació fan que el seu interès radiqui en les seves millors propietats. L'aliatge ZA-8, emmotllat per gravetat, té un excel·lent acabament superficial; l'aliatge ZA-12, que combina una bona resistència mecànica i al desgast amb una bona cola-bilitat i un cost moderat, és el més utilitzat d'aquest grup; finalment, l'aliatge ZA-27, de propietats mecàniques més elevades, té certes restriccions de disseny en seccions gruixudes. Cal destacar les excel·lents qualitats que presenten aquests dos darrers aliatges com a coixinets (coeficient de lliscament, pressions admissibles, resistència al desgast) que, les fa comparables, si no superiors, als bronzes per a coixinets.

Magnesi i aliatges de magnesi

El magnesi i els seus aliatges es caracteritzen per tenir la densitat més baixa entre els metalls estructurals ($1,74 \text{ Mg/m}^3$, 64% de la dels aliatges d'Al i 22% de la dels acers), la qual cosa fa que, malgrat les seves moderades característiques mecàniques, les relacions de resistència/densitat i rigidesa/densitat siguin favorables en moltes aplicacions (aviació, automoció, objectes portàtils, peces sotmeses a grans acceleracions).

Propietats

A més de la baixa densitat, els aliatges de magnesi tenen una bona resistència a la corrosió (formen una capa d'òxid estable, susceptible d'anodització), però en atmosfera salina són molt sensibles a les impureses de Fe, Cu i Ni. La resistència mecànica varia molt segons els elements d'aliatge (Al, Mn, Zn, Zr, Th i terres rares) i, malgrat que les temperatures d'ús estan limitades generalment a 150°C , alguns dels aliatges permeten arribar als 400°C . Destaquen també la bona resistència a la fatiga (tot i que molt sensible a l'entalla) i el gran amortiment intern. Com a factors limitatius cal fer referència a l'alt coeficient de dilatació (baixa estabilitat dimensional) i el cost superior al de l'alumini.

Conformació

Els aliatges de magnesi es poden deformar limitadament en fred, a causa de la gran acritud que adquireixen amb petites deformacions, però es conformen bé

en calent (entre 200÷370°C) per extrusió (barres de diferents seccions, tubs, perfils), laminació (xapes) i forja. Es fonen amb facilitat (temperatures <650°C), i s'emmotllen tant en sorra com en conquilla (per gravetat o a pressió). Admeten l'enduriment per deformació i per tractaments tèrmics, anàlogament als aluminis, i utilitzen les mateixes designacions. Tenen una excel·lent maquinabilitat i són fàcilment soldables.

Aliatges de forja i extrusió

L'aliatge *MgAl3Zn* (L-6110 segons UNE, *AZ31* segons ASTM) és el d'ús més generalitzat per a peces forjades i productes extruïts i laminats de magnesi (una variant, coneguda com *PE*, s'utilitza per a fotogratat). L'aliatge *MgAl8Zn* (L-6130 segons UNE, *AZ80* segons ASTM), tractable tèrmicament, ofereix una resistència més alta però una ductilitat molt limitada. L'aliatge *MgZn6Zr* (L-6221 segons UNE, *ZK60* segons ASTM), tractable tèrmicament, combina una resistència mecànica més elevada amb una bona tenacitat. Els aliatges *MgTh2Mn* (*HM21* segons ASTM), per a productes laminats, i *MgTh3Mn* (*HM31* segons ASTM), per a productes extruïts, el segon de resistència més elevada, ofereixen un comportament mecànic excel·lent (resistència i fluència) a temperatures elevades (fins a 340°C i 420°C, respectivament); s'usen en aviació i en míssils.

Aliatges d'emmotllament

L'aliatge *MgAl6Zn3* (*AZ63* segons ASTM) és adequat per a peces emmotllades en sorra, mentre que l'aliatge *MgAl9Zn1* (*AZ91* segons ASTM) és especialment indicat per a peces emmotllades en conquilla (objectes portàtils, peces de vehicles). Per a evitar els problemes de corrosió tradicionals en les peces emmotllades de magnesi, s'han adoptat aliatges de puresa més alta (*AZ91D* per a injecció i *AZ91E* per a motlles de sorra).

Titani i aliatges de titani

Malgrat la seva abundància a la naturalesa, les dificultats de l'obtenció metal·lúrgica del Ti derivades de la gran reactivitat que té a temperatures elevades (entre 800°C i el punt de fusió, a 1670°C), ha fet que no se n'hagi iniciat la comercialització (i, encara, a escala reduïda) fins als anys 50 i que el cost resulti extremadament elevat (50÷100 vegades el de l'acer).

Propietats i aplicacions

El Ti i els seus aliatges es caracteritzen per l'alta resistència mecànica (útil fins a temperatures de 300÷500°C), la baixa densitat (57% de la dels acers) i la bona resistència a la corrosió (es forma espontàniament una capa protectora

d'òxid). Per tant, les principals aplicacions es relacionen, per un costat, amb components estructurals d'alta resistència en sistemes que exigeixen lleugeresa (aviació, automoció, equip esportiu d'alta competició, elements sotmesos a grans acceleracions, ultracentrifugadores) i, per l'altre, amb equipament sotmès a fortes sol·licitacions mecàniques que exigeixi una alta resistència a la corrosió (processos químics, indústria alimentària i del paper, instruments mèdics, pròtesis quirúrgiques). Altres propietats d'interès del Ti i els seus aliatges són la bona resistència a la fatiga, el baix coeficient de dilatació (bona estabilitat dimensional) i les bones propietats a baixes temperatures (aplicacions criogèniques amb Ti comercialment purs o aliatges de Ti α).

Conformació

La fabricació de peces de Ti i dels seus aliatges és presidida per la gran afinitat d'aquest metall en calent. El mercat ofereix diversos productes semielaborats (barres, perfils, xapes, planxes), que són transformats per deformació en fred (xapes, generalment de Ti comercialment pur) o per forja en calent (aproximació a la forma final de la peça final, estalvi de material de cost elevat). En aquest darrer cas cal tenir cura que el material no es contaminei (atmosfera inerta o lleugerament oxidant). Prenent determinades precaucions (refrigeració abundant, velocitats lentes, passades profundes, suport rígid de l'eina), també s'utilitza la mecanització. És possible la soldadura MIG, TIG i per punts, i determinats recobriments, com la ni-truració. L'emmotllament presenta dificultats a causa de la gran reactivitat ja esmentada però la fusió en el buit i la colada en motlles especials de grafit sembla proporcionar una bona solució.

Titanis comercialment purs i de baix aliatge

Els Ti comercialment purs, de resistència mecànica relativament baixa (equivalent, però, a la dels acers de construcció) no tendeixen a endurir-se per deformació i, per tant, ofereixen unes bones propietats per a la conformació en fred. Hi ha 4 graus de puresa (*Ti99,6* a *Ti99,0*) amb resistències mecàniques creixents i ductilitats decreixents. Presenten una excel·lent resistència a la corrosió en ambients oxidants, però més escassa en ambients reductors. L'addició d'un 0,2% de Pd (*Ti99,4Pd*) millora extraordinàriament la corrosió en aquestes circumstàncies sense afectar la resistència. Tots aquests materials es poden usar fins a 350°C sense perdre les seves característiques mecàniques, i fins a 500°C sense presentar problemes d'oxidació. Les seves principals aplicacions són la indústria química (intercanviadors de calor, condensadors, dessalinització de l'aigua de mar, fabricació de polpa de paper) i aeronàutiques (fusellatges).

Aliatges de Ti

Els aliatges de Ti s'usen quan es requereixen resistències mecàniques més elevades que amb els Ti comercialment purs. Es classifiquen en tres grups en funció de les microestructures presents a temperatura ambient: *a) Aliatges de Ti α* (estructura hexagonal), soldables, de resistències mitjanes que mantenen fins a temperatures relativament elevades, però no tractables tèrmicament i amb la pitjor aptitud per a la conformació en fred; l'aliatge *TiAl5Sn2* s'utilitza en turbines de gas, aplicacions aeroespacials i processos químics que requereixin soldadura i el manteniment de les característiques mecàniques a temperatures de fins a 480°C. *b) Aliatges de Ti $\alpha+\beta$* : combinen l'estructura hexagonal α amb la cúbica β , més fàcilment deformable en fred; són enduribles per envelliment fins a valors de 1200 MPa, però la resistència a la fluència resulta insuficient per sobre dels 300°C; els aliatges *TiAl6V4* (el més usat de tots) i *TiAl6V6Sn2* tenen una gran diversitat d'aplicacions en aeronàutica (tant en el motor com en el fusellatge), processos químics (recipients de pressió), instrumental quirúrgic i elements de màquines sotmesos a grans sol·licitacions dinàmiques; per a endopròtesis s'utilitza l'aliatge *TiAl5Fe2,5*, ja que combina una elasticitat i una resistència mecànica elevades amb una gran compatibilitat amb els teixits humans. *c) Aliatges de Ti β* , menys utilitzats, ofereixen els avantatges sobre el *Ti $\alpha+\beta$* d'una tenacitat més alta per a un mateix nivell de resistència i la possibilitat d'enduriment per envelliment, fins i tot de peces amb seccions gruixudes, però presenten temperatures d'utilització relativament baixes (<350°C); l'aliatge *TiV13Cr11Al3* és usat en components aeronàutics militars sotmesos a sol·licitacions extremes.

Níquel i aliatges de níquel

El Ni i els seus aliatges destaquen per la seva excel·lent resistència a la corrosió, les bones característiques mecàniques (pròximes a les dels acers) i el manteniment d'aquestes propietats a temperatures altes (500÷1150°C) i baixes (-200÷0°C). Les principals limitacions en la seva utilització deriven del seu elevat cost i, en menor grau, de la seva elevada densitat.

A través de les seves extraordinàries propietats, el níquel i, sobretot, els seus aliatges han contribuït de forma destacada en el progrés de la tècnica. Entre els materials basats en el níquel (on intervé de forma destacada) hi ha: acers inoxidable (ja estudiats en la Secció 12.6, vol. 1); superaliatges (analitzats més endavant); aliatges amb propietats especials (baixa dilatació, resistència elèctrica, propietats magnètiques, memòria de forma). I, entre els camps que

ha contribuït i continua contribuint a desenvolupar, hi ha: a) Màquines i motors: turbines de gas (aviació); turbines de vapor (centrals tèrmiques i nuclears); motors alternatius (escapament, turbocompressors). b) Processos químics amb altes exigències tèrmiques i/o de pressió en medis agressius (indústries petroquímica, paperera, alimentària; dessalinització d'aigua de mar; fabricació de productes químicament agressius; equip de control de la pol·lució). c) Mitjans de fabricació (eines i matrius per a treball en calent; forns i equip per a tractaments tèrmics; sistemes de manipulació a altes temperatures).

El mercat ofereix una notable diversitat de productes de laminació de níquel i d'aliatges de níquel, presentats en forma de xapes, barres, perfils, així com també aliatges d'emmotllament, els qual contenen elements addicionals (Si, Mn) per augmentar-ne la colabilitat. Els principals materials sobre la base del Ni s'agrupen en les famílies següents: a) *Níquels de baix aliatge*; b) *Aliatges de Ni-Cu*; c) *Superaliatges sobre la base del Ni*. Les dues primeres es presenten continuació, mentre que la tercera es tracta, juntament amb la resta de superaliatges, en el proper apartat.

Níquels de baix aliatge

El níquel comercialment pur, *Níquel 200* (amb traces de Fe, Cu, Mn, Si i <0,15% C), de resistència mecànica moderada, és especialment resistent a l'atac dels agents químics, però més enllà de 325 °C perd la ductilitat a causa de la precipitació del carboni (el *Níquel 201*, amb un percentatge molt més limitat de C, 0,01%, es pot utilitzar a temperatures més altes); les seves aplicacions són la indústria química i alimentària, la fabricació de productes càustics, de fibres sintètiques i de components electrònics. El *Duraníquel 301*, amb l'addició d'Al i Ti és endurable per precipitació i adquireix característiques mecàniques altes pròpies de les molles tot mantenint la mateixa resistència a la corrosió.

Aliatges de Ni-Cu (Monel)

Aquests aliatges abarateixen el cost del Ni (el Cu és més barat) sense perdre les característiques anticorrosives i obtenen una millor resistència mecànica fins a uns 300 °C. L'aliatge *Monel 400*, amb un 31% de Cu, és resistent, tenaç i dúctil, fàcilment conformable per emmotllament, forja i mecanització i se solda bé; s'utilitza en aplicacions marines, intercanviadors de calor, processos químics i en ambients salins. L'aliatge *Monel K-500*, amb addicions d'Al i Ti, es pot endurir per envelliment, de manera que adquireix una resistència molt més elevada; s'utilitza per a rotors de bomba, hèlices, vàlvules, molles no magnètiques i cargols sotmesos a elevades sol·licitacions en medis semblants al *Monel 400*.

Superaliatges

El comportament a fluència i la degradació superficial a altes temperatures permet establir quatre grups de materials: *a)* Fins a temperatures de 400°C, són adequats els acers al C amb petites addicions d'altres elements (acers no aliats, o microaliats, de calderes i dipòsits a pressió), i alguns bronzes; *b)* Fins a temperatures de 600°C, són adequats acers ferrítics al *Mo*, *Cr-Mo* o *Cr-Mo-V* (acers aliats de calderes, utilitzats en centrals d'energia i plantes petroquímiques) i determinats aliatges del Ti; *c)* Fins a temperatures de 650÷700°C, els acers inoxidable austenítics i refractaris (turbines de gas); *d)* A partir d'aquestes temperatures, s'ha de fer ús dels anomenats *superaliatges*.

Els superaliatges són materials metàl·lics sobre la base del Fe, del Ni i del Co que satisfan dos tipus de requeriments a elevades temperatures (650÷1150°C): *a)* Eviten la degradació per oxidació o per altres agressions del medi (gasos de combustió, productes químics, metalls líquids, sals foses); *b)* Mantenen unes propietats mecàniques acceptables, especialment la resistència a fluència (o *creep*): en el càlcul resistent a elevada temperatura és més útil de conèixer la tensió que produeix la ruptura o una determinada deformació del material després d'un cert temps, obtinguda per un assaig de fluència, que no la resistència instantània, proporcionada per un assaig de tracció. Les principals aplicacions dels superaliatges són: turbines de gas d'aviació (cremadors, cambres de combustió, rotors); mo-tors alternatius (vàlvules d'escapament amb altes sol·licitacions); indústria química, petroquímica i centrals d'energia (reactors, turbines de vapor, que suporten pressions i temperatures elevades); equipament industrial i forns (atmosfera oxidants o reductores, xocs tèrmics).

Superaliatges sobre la base del Fe

Els superaliatges sobre la base del Fe són austenítics i formen combinacions de Fe-Ni-Cr i de Fe-Ni-Co, amb diversos elements d'addició (Mo, Nb, Al i Ti) per a facilitar l'enduriment per solució sòlida o per precipitació. Van sorgir com a extensió dels acers inoxidable austenítics.

Incoloy 800

Aliatge de Fe-Ni-Cr de contingut mitjà de Ni (30÷35%), amb valors moderats de resistència mecànica, però un bon comportament a fluència i una bona resistència a la corrosió fins a temperatures elevades. Addicions d'altres elements d'aliatge (Al, Ti) augmenten les característiques mecàniques (*Incoloy 801*) o milloren la resistència a la corrosió (*Incoloy 825*).

A 286, Discaloy, V 57; Incoloy 901

Aliatges de Fe-Ni-Cr, els tres primers amb un contingut moderat de Ni (25÷30%) i el darrer amb un contingut més elevat (40÷45%), tots ells amb addicions de Mo, Ti i Al, que provoquen un enduriment per precipitació i aconseguen unes característiques mecàniques elevades. S'apliquen a components de turbines de gas fins a la temperatura de 650°C. L'aliatge A 286 s'usa en les calderes dels reactors nuclears.

Incoloy 903, 907 i 909

Grup de superaliatges, basats en una composició de Fe-Ni-Co endurida per precipitació (l'absència de Cr fa aquests aliatges més susceptibles d'oxidació), que combinen un coeficient de dilatació baix (de gran interès en la millora del rendiment de les turbines, perquè permet disminuir el joc entre rotor i estator) amb unes característiques mecàniques relativament elevades fins a 650°C.

Superaliatges sobre la base del Ni

Els superaliatges d'aquest nombrós grup, amb un interessant comportament mecànic i a la corrosió a elevada temperatura, es basen en les combinacions de Ni-Cr-Fe (*Inconel* i *Hastelloy*) i de Ni-Cr-Co (*Nimonic*). Els aliatges subministrats en xapes (*Hastelloy X*, *Inconel 600*) per a càmeres, conductes i reactors han de ser suficientment dúctils per a ser laminats i posteriorment conformats i, en general, presenten una bona soldabilitat, mentre que els aliatges destinats a barres i productes forjats (*Inconel X750*, *Inconel 718*, *Nimonic 115*) per a àleps de turbines i peces de màquines, requereixen una bona resistència mecànica a elevada temperatura.

Hastelloy X

Aliatge del grup Ni-Cr-Fe, amb un percentatge significatiu de Co (9%) i traces de W, que presenta un bon equilibri entre la seva elevada resistència a l'oxidació (contingut de Cr relativament alt), una resistència mecànica moderada però que es manté a elevada temperatura (enduriment per solució sòlida i precipitació de carburs) i la seva fabricabilitat (és fàcilment soldable). S'utilitza en motors de reacció i en cambres de combustió per sobre dels 1050°C en la indústria petroquímica (gran resistència a la corrosió per tensió).

Inconel 600

Aliatge de composició 76Ni-15Cr-8Fe, amb una excel·lent resistència a l'oxidació a altes temperatures (fins a 1175°C), però una baixa resistència mecànica; s'usa en components de forns, en enginyeria nuclear i en la indústria química i alimentària.

Inconel X750

Aliatge de composició semblant a *Inconel 600*, que esdevé endurable per precipitació gràcies a les addicions d'Al i Ti. Té unes excel·lents característiques mecàniques i de resistència a la corrosió per sota de 700°C. La seva excel·lent resistència a la fluència el fa especialment apte per a molles, pernys i reblons que treballen a altes temperatures, així com per a utilitats d'extrusió i de conformació.

Inconel 718

Aliatge amb continguts significatius de Mo i Nb i menors d'Al i Ti, endurit per precipitació, que ofereix una resistència a la tracció i a la fluència molt bona per sota dels 650°C i una resistència a la corrosió excel·lent fins a 980°C; s'usa en turbines de gas, reactors nuclears, dipòsits a alta pressió i temperatura, així com en determinades peces (vàlvules) o eines (fileres d'extrusió) que treballen en calent.

Nimonic 115

Superaliatge de composició Ni-Cr-Co-Mo, amb percentatges d'Al i Ti, fos en el buit, que facilita l'enduriment per precipitació i proporciona valors útils de la resistència a la fluència fins prop dels 1000°C. També presenta una bona resistència a la fatiga, a l'oxidació i als xocs tèrmics (motors de reacció i altres aplicacions industrials que requereixin resistència i durabilitat a altes temperatures). Altres aliatges (*Nimonic 90*, *Nimonic 105*, *Udimet 500* i *Waspaloy*, fosos a l'aire; *Astraloy*, fos al buit) tenen petites diferències en la composició, que es tradueixen en variacions del seu comportament.

MA 754

Aliatge de composició Ni-Cr-Co, endurit per una dispersió de partícules d'òxid d'itri (Y_2O_3) produïdes per mitjà de metal·lúrgia de pólvores a partir d'una barreja de l'aliatge i de l'òxid. Proporciona unes bones característiques mecàniques que es mantenen fins a temperatures per sobre dels 1000°C; s'ha utilitzat en toveres.

Superaliatges sobre la base del Co

Aquests aliatges s'endureixen per solució sòlida de Cr, Ni i W en la matriu de Co, i ofereixen molt bona resistència a l'atac per corrosió dels gasos d'escapament. La seva resistència mecànica és baixa, però mantenen valors útils de resistència a la fluència fins a temperatures molt elevades (>1000°C), on superen els superaliatges sobre la base del Ni. Els aliatges *Haynes 188* i *L-605* (o *Haynes 25*) s'utilitzen en turbines de gas per a temperatures compreses entre 650÷1150°C.

Taula 13.4 Zenc i aliatges del zenc

| | | | Lamin. | Emmotllament | | | | | |
|---------------------------------|-------------------|-----|----------|------------------|------------------|--------|--------|------|------|
| ASTM (B-86) (B-791) | | | Zn0,08Pb | AG40A Zamak 3 | AC41A Zamak 5 | ZA-12 | ZA-27 | | |
| Composició química | | | | | | | | | |
| Alumini | Al | % | <0,001 | 4 | 4 | 11 | 27 | | |
| Magnesi | Mn | % | - | 0,035 | 0,055 | 0,025 | 0,015 | | |
| Coure | Cu | % | <0,001 | <0,25 | 1 | 1 | 2 | | |
| Plom | Pb | % | 0,10 | <0,004 | <0,004 | <0,005 | <0,005 | | |
| Propietats físiques | | | | | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | | 7,14 | 6,60 | 6,70 | 6,03 | 5,00 | | |
| Coefficient dilatació | µm/m·K | | 32,5/23 | 27,4 | 27,4 | 24,1 | 26,0 | | |
| Calor específic | J/g·K | | 395 | 419 | 419 | 450 | 525 | | |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | | 108 | 113 | 109 | 116 | 125 | | |
| Resistivitat elèctrica | nΩ·m | | 62 | 64 | 65 | 61 | 58 | | |
| Propietats mecàniques | | | | | | | | | |
| Tipus emmotllament | | | (1) | Inj | Inj | S | Inj | S | Inj |
| Resist. tracció | 20°C | MPa | 134/159 | 280 | 325 | 299 | 405 | 230 | 426 |
| | 95°C | MPa | - | 195 | 240 | - | 229 | - | 259 |
| Resistència compressió | | MPa | - | 415 | 600 | - | - | - | - |
| Resistència cisallament | | MPa | - | 215 | 260 | 253 | 296 | 292 | 325 |
| L. elàstic trac. | 0,2% | MPa | - | - | - | - | 320 | - | 371 |
| L. elàstic compr | 0,1% | MPa | - | - | - | 230 | 269 | 330 | 359 |
| Allargament de ruptura | | % | 65/50 | 10 | 7 | 1,5 | 5 | 4,5 | 2,5 |
| Duresa | | HB | 42 | 82 | 91 | 94 | 100 | 90 | 119 |
| Resist. fatiga | 5·10 ⁸ | MPa | 17 | 48 | 56 | 103 | 117 | 172 | 117 |
| Resiliència | | J | - | 58 | 65 | 26 | 29 | 48 | 12 |
| Resist. fluència | (2) | MPa | - | 21 | - | 69 | 69 | 76 | 69 |
| Mòdul d'elasticitat | | GPa | - | - | - | 82,7 | 82,7 | 77,9 | 77,9 |
| Propietats tecnològiques | | | | | | | | | |
| Cost | pta/kg | | - | - | - | - | - | - | - |
| Temperatura de fusió | °C | | 419 | 385 | 385 | 432 | 484 | | |
| Contracció | % | | - | 1,17 | 1,17 | 1,30 | 1,30 | | |

(1) Propietat longitudinal/propietat transversal; (2) Fluència 1%, durant 10⁵ hores, a 20°C

Taula 13.5 Magnesi i aliatges del magnesi

| | Forja | | | Emmotllament | |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|----------|
| | MgAl3Zn L-6110 | MgAl8Zn L-6130 | MgZn6Zr L-6221 | MgAl6Zn3 | MgAl9Zn1 |
| UNE 36.037-80 | | | | | |
| ASTM | AZ31 | AZ80 | ZK60 | AZ63 | AZ91 |
| Número DIN | 3.5312 | 3.5812 | 3.5161 | 3.5632 | 3.5912 |

| Composició química | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------------------|-----|------|-------|-------|---------|---------|------|------|
| Alumini | Al | % | 3 | 8 | 6 | 6 | 9 | | |
| Zenc | Zn | % | 1 | 0,50 | - | 3 | 0,70 | | |
| Magnesi | Mn | % | >0,2 | >0,12 | - | >0,30 | >0,13 | | |
| Zirconi | Zc | % | - | - | >0,45 | - | - | | |
| Propietats físiques | | | | | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | | 1,77 | 1,80 | 1,83 | 1,83 | 1,81 | | |
| Coefficient dilatació | µm/m·K | | 26,0 | 26,0 | 26,0 | 26,1 | 26,0 | | |
| Calor específic | J/g·K | | - | 1050 | - | 1050 | 1050 | | |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | | 96 | 76 | 120 | 77 | 72 | | |
| Resistivitat elèctrica | nΩ·m | | 92 | 145 | - | 115÷130 | 150÷170 | | |
| Propietats mecàniques | | | | | | | | | |
| | Tractament | | H34 | T5 | T5 | F | T6 | F | T6 |
| Resist. tracció | 20°C | MPa | 290 | 335 | 350 | 200 | 275 | 230 | 275 |
| | 200°C | MPa | 103 | 195 | - | 105 | 120 | - | 115 |
| Límit elàstic | 20°C | MPa | 220 | 245 | 285 | 95 | 130 | 150 | 145 |
| | 200°C | MPa | 59 | 120 | - | - | 80 | - | 80 |
| Allargament de ruptura | | % | 15 | 6 | 11 | 4 | 5 | 3 | 6 |
| Duresa | | HB | 73 | 72 | 82 | 50 | 73 | 63 | 70 |
| Límit de fatiga | 5·10 ⁸ | MPa | - | - | - | 75 | 75 | 95 | 95 |
| Resiliència | | J | 4,3 | - | - | 1,4 | 1,5 | 2,7 | 1,4 |
| Mòdul d'elasticitat | | GPa | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Mòdul de rigidesa | | GPa | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| Coefficient de Poisson | | - | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 |
| Propietats tecnològiques | | | | | | | | | |
| Cost | pta/kg | | - | - | - | - | - | - | - |
| Temperatura de fusió | °C | | 630 | 610 | 635 | 610 | 595 | | |

Taula 13.6 Titani i aliatges del titani

| | Pur | Aliat α | Aliat $\alpha+$ | | Aliat |
|--------------------------|------------------|--------------------|-------------------|----------------------|------------------------|
| UNE 38.700-81 | Ti99,2 L-7003 | TiAl5Sn2 L-7101 | TiAl6V6 L-7301 | TiAl6V6Sn2 L-7303 | TiV13Cr11Al3 L-7701 |
| ASTM (UNS) Número DIN | Grau 3 3.7055 | R54520 3.7115 | R56400 3.7165 | R56620 3.7175 | R58010 |

| Composició química | | | | | | | |
|------------------------------|--------|-------------------------------------|----------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Alumini | Al | % | - | 5 | 6 | 5,5 | 3 |
| Estany | Sn | % | - | 2,5 | - | 2 | - |
| Vanadi | V | % | - | - | 4 | 5,5 | 13,5 |
| Crom | Cr | % | - | - | - | - | 11 |
| Altres | | % | Fe<0,25 | - | - | Fe, Cu | - |
| Propietats físiques | | | | | | | |
| Densitat | | Mg/m ³ | 4,50 | 4,48 | 4,43 | 4,54 | 4,82 |
| Coeficient dilatació | | $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ | 9,1 | 9,4 | 9,3 | 9,4 | 9,4 |
| Calor específic | | J/g·K | 520 | - | 560 | - | - |
| Conductivitat tèrmica | | W/m·K | 16,0 | 7,6 | 7,1 | 6,5 | - |
| Resistivitat elèctrica | | n $\Omega\cdot\text{m}$ | 52 | 157 | 171 | 157 | - |
| Propietats mecàniques | | | | | | | |
| Tractament | | | recuit | recuit | rec./env. | rec./env. | envellit |
| Resistència tracció | | MPa | 490÷590 | 789÷860 | 900/1070 | 1000/1200 | 1170÷1220 |
| Límit elàstic | | MPa | 340 | 780 | 830/1000 | 930/1000 | 1100÷1170 |
| Allargament de ruptura | | % | 18/16 ⁽¹⁾ | 16 | 10/8 | 8/6 | 8 |
| Duresa | | HB | 170 | 360 | 360/420 | 380/420 | 400 |
| Resiliència | | J | 34/27 ⁽¹⁾ | 13÷20 | 17/- | 17/- | 11 |
| Res. fluència ⁽²⁾ | 325 °C | MPa | - | - | 480 | - | - |
| Res. fluència ⁽²⁾ | 425 °C | MPa | - | - | 220 | - | - |
| Mòdul d'elasticitat | | GPa | 105 | 110 | 114 | 110 | 102 |
| Mòdul de rigidesa | | GPa | 39 | - | 42 | - | 43 |
| Coeficient de Poisson | | - | 0,34 | - | 0,34 | - | 0,30 |
| Propietats tecnològiques | | | | | | | |
| Cost | | pta/kg | 5800 | - | 8500 | - | - |
| Temperatura de forja | | °C | 700÷900 | 900÷1100 | 900÷980 | 840÷920 | 650÷950 |
| Radi de plegament | | - | 2,5·g | 4,5·g | 5·g | - | 2,7·g |

⁽¹⁾ Longitudinal/transversal; ⁽²⁾ Fluència 1% durant 1000 hores

Taula 13.7 Níquel, aliatges del Ni i superaliatges

| | | | Níquel i aliatges de níquel | | | Superaliatges | |
|---------------------------------|-----------|-------------------|-----------------------------|-----------|-----------|----------------------|-----------|
| | | | | | | sobre la base del Fe | |
| Aliatge | | | 200 | 400 | K-500 | 800 | 903 |
| Nom comercial | | | Níquel | Monel | Monel | Incoloy | Incoloy |
| Número DIN | | | 2.4066 | 2.4360 | 2.4876 | 1.4876 | |
| Composició química | | | | | | | |
| Níquel | Ni | % | 99,0 | 66 | 64 | 32,5 | 38 |
| Ferro | Fe | % | 0,40 | 2,50 | 2,00 | 39,5 | 41,5 |
| Cobalt | Co | % | - | - | - | - | 15 |
| Crom | Cr | % | - | - | - | 21 | - |
| Coure | Cu | % | 0,25 | 31 | 28 | - | - |
| Molibdè | Mo | % | - | - | - | - | - |
| Alumini | Al | % | - | - | 2,70 | 0,40 | 1,40 |
| Titani | Ti | % | - | - | 0,70 | 0,40 | 0,90 |
| Altres | | % | Mn | Mn 1,00 | Mn 1,50 | - | Nb 3, Si |
| Propietats físiques | | | (3) | (3) | (3) | | |
| Densitat | | Mg/m ³ | 8,89 | 8,80 | 8,44 | 7,94 | 8,14 |
| Dilatació tèrmica | (1) | µm/m·K | 13,3 | 13,9 | 13,7 | 14,4/- | 8,6/- |
| Calor específic | (2) | J/kg·K | 456 | 427 | 419 | 460/- | 435/- |
| Conductivitat tèrmica | (2) | W/m·K | 70 | 21,8 | 17,5 | 11,5/- | 16,8/- |
| Resistivitat elèctrica | | nΩ·m | 95 | 545 | 615 | 990 | 610 |
| Propietats mecàniques | | | Unitats | | | | |
| Res. tracció | 20/650°C | MPa | 460/- | 550/- | 1100/- | 595/405 | 1310/1000 |
| | 760/870°C | MPa | - | - | - | 235/- | -/- |
| | 980°C | MPa | - | - | - | - | - |
| Límit elàstic | 20/650°C | MPa | 148/- | 240/- | 780/- | 250/180 | 1105/895 |
| | 760/870°C | MPa | - | - | - | 180/- | -/- |
| | 980°C | MPa | - | - | - | - | - |
| All. ruptura | 20/650°C | % | 47/- | 40/- | 20/- | 54/51 | 14/18 |
| | 760/870°C | % | - | - | - | 83/- | - |
| | 980°C | % | - | - | - | - | - |
| R. fluència ⁽⁴⁾ | 650/760°C | MPa | - | - | - | 165/66 | 510/- |
| | 870/980°C | MPa | - | - | - | 30/13 | -/- |
| | 1090°C | MPa | - | - | - | - | - |
| Mòdul elàstic. | 20/870°C | GPa | 204/- | 180/- | 180/- | 196/138 | 147/- |
| Duresa | 20°C | HB | 140÷230 | 160÷225 | 255÷370 | 180÷300 | - |
| Propietats tecnològiques | | | | | | | |
| Cost | | pta/kg | - | - | - | - | - |
| Temperatura fusió | | °C | 1345÷1445 | 1300÷1350 | 1315÷1350 | 1355÷1385 | 1315÷1390 |

(1) A 540°C/a 970°C; (2) A 21°C/a 870°C; (3) A 20°C; (4) Ruptura a fluència en 1000 hores

| sobre la base del Ni | | | | | | base Co |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|------------------------------------|------------------|
| 600 Inconel 2.4816 | X-750 Inconel 2.4669 | X Hastelloy 2.4665 | 718 Inconel 2.4668 | 115 Nimonic | MA 754 | HA 188 Haynes |
| 76 | 73 | 47 | 52,5 | 57,5 | 55 | 22 |
| 8 | 7 | 18,5 | 18,5 | - | - | 3 |
| - | - | 1,5 | - | 15 | 20 | 39 |
| 15,5 | 15,5 | 22 | 19 | 15 | 20 | 22 |
| - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | 9 | 3 | 3,5 | - | - |
| - | 0,70 | - | 0,50 | 5 | 3 | - |
| - | 2,50 | - | 0,90 | 4 | 0,50 | - |
| - | Nb 1,00 | W 0,60 | Nb 5,10 | B, Zr | Y ₂ O ₃ 0,60 | W 14 |
| 8,41 | 8,25 | 8,21 | 8,22 | 7,85 | - | 9,13 |
| 15,1/16,4 | 14,6/16,8 | 15,1/16,1 | 14,4/- | 13,3/16,4 | - | 14,8/17,0 |
| 445/625 | 430/725 | 485/700 | 430/645 | 460/- | - | 405/565 |
| 14,8/28,8 | 12,0/23,6 | 9,1/26,0 | 11,4/24,9 | 10,7/22,6 | - | -/25,1 |
| 1030 | 1390 | 1180 | 1250 | 1390 | - | 920 |
| 660/450 | 1200/940 | 785/570 | 1435/1228 | 1240/1125 | 965/600 | 960/740 |
| 260/140 | -/- | 435/255 | 950/340 | 1085/830 | 345/250 | 710/635 |
| - | - | - | - | - | - | 420 |
| 285/205 | 815/710 | 360/275 | 1185/1020 | 865/815 | 585/475 | 485/305 |
| 180/40 | -/- | 260/180 | 740/330 | 800/550 | 275/215 | 305/290 |
| - | - | - | - | - | - | 260 |
| 45/49 | 27/10 | 43/37 | 21/19 | 27/23 | 21/25 | 56/70 |
| 70/80 | - | 37/50 | 25/88 | 24/16 | 34/32 | 61/43 |
| - | - | - | - | - | - | 73 |
| (-)/(-) | 470/(-) | 215/100 | 595/195 | (-)/420 | 255/200 | (-)/(-) |
| 30/15 | 45/- | 41/14 | -/- | 185/70 | 160/130 | 70/25 |
| - | - | - | - | - | 125 | - |
| 214/157 | 214/153 | 197/137 | 200/139 | 224/164 | - | 207/(-) |
| 180÷300 | - | - | 390 | - | - | - |
| 5500 | - | - | - | - | - | - |
| 1355÷1415 | 1395÷1425 | 1260÷1355 | 1260÷1335 | - | - | 1300÷1330 |

14 Materials no metà·lics

14.1 Introducció als polímers

Definicions

Els *plàstics* i els *elastòmers* constitueixen un ampli grup de materials (la gran majoria sintètics), basats en macromolècules de tipus orgànic (polímers), a les quals s'hi afegeixen determinades quantitats d'altres substàncies (additius) per a modificar les seves propietats o per a facilitar els processos de conformació. Aquests materials són cada cop més decisius en el disseny de màquines i responen a les descripcions següents:

Plàstics

Materials basats en polímers de consistència rígida en comparació amb els elastòmers (la seva denominació es refereix a l'estat plàstic que la major part d'ells presenten durant el procés de conformació). S'agrupen en dues grans famílies: *plàstics termoplàstics* (els més nombrosos), en general dúctils, de comportament viscoelàstic que, quan s'escalfen, esdevenen tous i es poden deformar plàsticament; *plàstics termostables*, no dúctils de comportament elàstic que, un cop polimeritzats, mantenen fonamentalment la seva consistència i no es deformen plàsticament en calent.

Elastòmers

Materials basats en polímers de comportament elàstic, consistència flexible en comparació amb els plàstics (experimenten grans deformacions amb tensions moderades) i resiliència elevada. S'agrupen també en dues famílies: *elastòmers termoplàstics* que, quan s'escalfen, esdevenen tous i es poden deformar plàsticament; són de desenvolupament relativament nou, però d'importància creixent gràcies a la facilitat de conformació; *elastòmers termostables* (o permanents), que, un cop polimeritzats (o vulcanitzats), mantenen la seva consistència i no es deformen plàsticament en calent.

Camps d'aplicació

Atesa la gran diversitat de composicions químiques i d'estructures dels polímers de base, i gràcies a les grans possibilitats de modificació per mitjà d'additius, els diferents *plàstics* i *elastòmers* tenen una gradació de propie-tats quasi contínua que els fan molt atractius per a nombroses aplicacions relacionades amb el disseny de màquines.

Les característiques més destacades dels plàstics i dels elastòmers, origen de les principals aplicacions, són: *a) Baixa densitat*: ha permès alleugerir molts objectes, màquines i aparells d'ús quotidià, entre ells els vehicles, on el pes és determinant; *b) Baix cost i fàcil conformació*: tot i la gran diversitat de preus, els materials plàstics són relativament barats, en bona part a causa de la baixa densitat; la fàcil conformació (especialment en els termoplàstics), juntament amb el baix cost, han contribuït de manera destacada en la seva difusió; *c) Resistència a l'atac químic*: els plàstics i els elastòmers presenten una bona resistència a l'atac químic i, en general, no necessiten proteccions superficials; són, però, atacats per substàncies de naturalesa anàloga a la del propi material (olis, dissolvents); *d) Relació amigable amb l'usuari*: ofereixen possibilitats molt interessants, com ara una gran llibertat per a obtenir formes atractives, excel·lents acabaments superficials (gran varietat de colors i textures), sensació de lleugeresa, sensació de temperament tèrmic (ni fred ni calor) a causa de la baixa conductivitat tèrmica i seguretat contra les descàrregues elèctriques.

Però també tenen algunes limitacions que cal tenir presents: *e) Propietats mecàniques moderades*: els plàstics (i, encara més, els elastòmers) tenen una resistència mecànica, una rigidesa i una duresa molt baixes en comparació amb les dels metalls; tanmateix, quan s'estableixen les magnituds característiques d'aquestes propietats amb relació a la massa, la comparació ja no resulta tan desfavorable. *f) Temperatures de servei màximes molt baixes*: aquesta és una important limitació dels plàstics i dels elastòmers amb relació als metalls.

Els *plàstics* cada dia tenen més aplicacions (com a alternativa als metalls o per mèrits propis) en una gran varietat d'elements i peces de les màquines amb funcions de suport (carcasses, marcs), de guiatge i transmissió (coixinets, guies, lleves, engranatges), o en funcions complementàries (tapes, revestiments). Els *elastòmers* tenen aplicació en determinades peces elàstiques, sovint d'alt contingut tècnic, que exerceixen funcions decisives en les màquines (juntes, retenidors, articulacions elàstiques, elements de suspensió, rodes, proteccions flexibles, conduccions de fluids), per a les quals no tenen alternativa.

Estructura molecular

Els *polímers*, materials de base dels *plàstics* i els *elastòmers*, són compostos orgànics basats en cadenes d'àtoms de carboni, C, en combinació amb altres determinats elements: hidrogen, H; oxigen, O; nitrogen, N; clor, Cl; fluor, F; brom, Br; i sofre, S. Alguns polímers es basen en cadenes que alternen àtoms de silici, Si, i d'oxigen, i aleshores reben el nom de silico-nes. Tots ells es formen a partir d'una o més unitats químiques simples (o *monòmers*), amb enllaços actius (dobles o triples), que, en trencar-se, reaccionen unes amb altres (*polimerització*) tot originant una cadena que creix (*polímer*) fins que troba un agent aturador o s'exhaureix el monòmer. Si no es forma cap altre compost que el *polímer*, la reacció rep el nom de *polimerització d'addició*, mentre que si se segreguen altres molècules (per exemple, aigua), la reacció s'anomena de *polimerització de condensació*. En funció de la naturalesa de les macromolècules i de les unions entre elles, es poden establir les distincions següents entre materials basats en polímers:

Polímers termoplàstics / Polímers termostables

Els *polímers termoplàstics* es formen a partir de monòmers amb un sol enllaç actiu, que polimeritzen en macromolècules d'estructura lineal o ramificada, amb unions entre elles de naturalesa feble (forces de Van der Waals, forces polars, entrellaçament de cadenes), sensibles a la temperatura; mentre que els *polímers termostables* es formen a partir de monòmers amb més d'un enllaç actiu, que polimeritzen en una estructura tridimensional per mitjà d'enllaços químics de naturalesa forta.

Plàstics / Elastòmers

En els *plàstics*, la densitat d'unions entre les molècules (dèbils en els *termoplàstics* i fortes en els *termostables*) és molt densa, fet que limita la deformació del material (consistència rígida); mentre que en els *elastòmers*, les molècules estan enrotllades o plegades i la retícula d'unions entre elles (dèbils en els *elastòmers termoplàstics* i fortes en els *elastòmers permanents*) és poc tupida, fet que permet grans deformacions elàstiques.

Termoplàstics amorfs / Termoplàstics semicristal·lins

En els primers (*PS*, *PMMA*), les molècules s'entrellacen sense cap ordre, mentre que en els segons (*PE*, *PA*), hi ha zones amb un determinat paral·lelisme entre les molècules, anàleg a l'ordenació dels àtoms en els cristalls. El grau de cristal·linitat dels materials influeix en les propietats físiques (densitat més alta) i òptiques (els amorfs són transparents, i els semicristal·lins opacs), mecàniques (rigidesa, duresa i resistència a la fluència més grans) i superficials (baixa fricció i elevada resistència al desgast).

Caracterització termomecànica dels polímers

Les propietats mecàniques dels polímers (rigidesa, duresa, tenacitat) varien amb la temperatura i, per mitjà de tres valors característics (*temperatura de transició vítria*, T_g ; *temperatura de fusió*, T_m , per als termoplàstics semicristal·lins; i *temperatura de descomposició*, T_d), s'estableixen tres o quatre zones característiques, segons el polímer: *a)* Per sota de T_g , tots els polímers tenen una consistència rígida, dura i fràgil, anàloga a la del vidre. *b)* Per sobre de T_g , els polímers perden la fragilitat i esdevenen menys rígids. *c)* A la temperatura de fusió, T_m , els termoplàstics semicristal·lins perden la cristal·linitat i s'estoven; *d)* A la temperatura T_d , tots els polímers experimenten alteracions químiques i es degraden. A continuació es descriuen (i la Figura 14.1 ho il·lustra) les caracteritzacions dels diferents tipus de polímers segons la variació del mòdul d'elasticitat E amb la temperatura, T ($E \approx 3 \cdot G$, amb G obtingut en un assaig de vibració a torsió):

Plàstics termoplàstics amorfs

Mostren una disminució del mòdul d'elasticitat molt marcada en la zona de la temperatura de transició vítria, T_g . La zona de servei (o d'ús) es troba per sota d'aquesta temperatura, i la de transformació, entre T_g i T_d .

Plàstics termoplàstics semicristal·lins

Mostren una disminució del mòdul d'elasticitat poc pronunciada a la temperatura de transició vítria, T_g , ja que es conserven zones cristal·lines fins a la temperatura de fusió, T_m . La zona de servei es troba per sota de la temperatura de fusió, T_m , i la zona de transformació, entre T_m i T_d .

Plàstics termostables

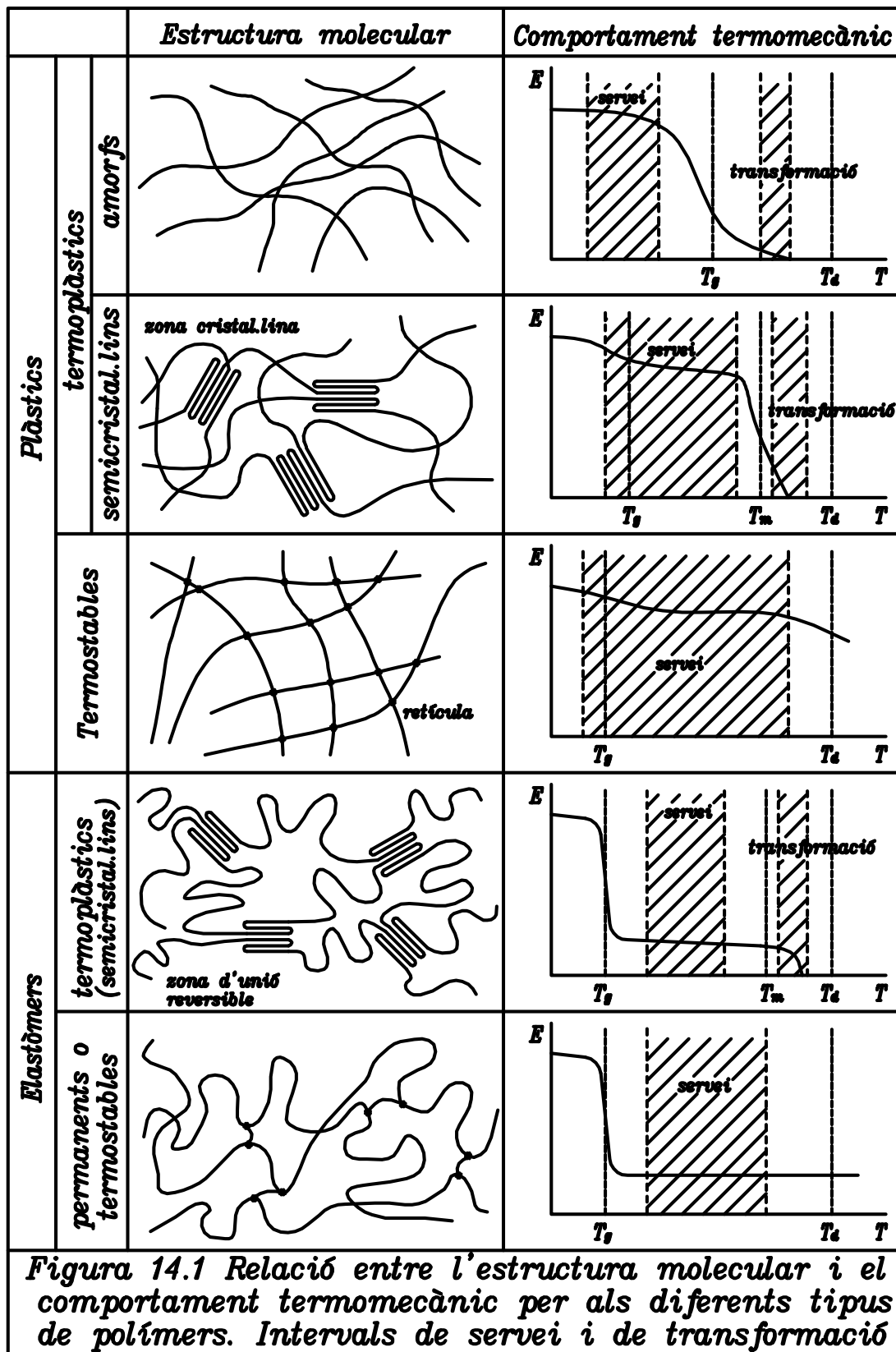
Són rígids i fràgils durant tot l'interval de temperatures fins a la degradació, T_d , amb una petita pèrdua de rigidesa poc abans d'aquesta temperatura. La zona de servei s'ha de distanciar de la temperatura de degradació.

Elastòmers termoplàstics

La rigidesa disminueix de forma molt pronunciada a la temperatura de transició vítria, T_g , per després mantenir-se pràcticament constant fins a la temperatura de fusió, T_m . La zona de servei es troba entre aquestes dues temperatures (mòdul de rigidesa baix), i la de transformació, entre T_m i T_d .

Elastòmers termostables (o permanents)

Presenten també una disminució molt pronunciada de la rigidesa en la zona de la temperatura de transició vítria, T_g , que després es manté pràcticament constant fins a la temperatura de degradació, T_d . La zona de servei es troba entre aquestes dues temperatures.



Modificacions de les propietats dels polímers

Cada camp d'aplicació exigeix requeriments específics que no sempre es corresponen amb les característiques dels polímers de base dels plàstics i dels elastòmers. Tanmateix, gràcies a les enormes possibilitats de modificació d'aquests materials, els fabricants i transformadors de plàstics i elastòmers han estat capaços d'adaptar les propietats dels polímers a les necessitats de cada aplicació, per mitjà de: *a)* Modificacions químiques; *b)* Modificacions físiques; *c)* Modificacions amb additius.

Modificacions químiques

Incidència en els paràmetres de les macromolècules

El control de les reaccions de síntesi durant el procés de polimerització permet incidir en alguns dels paràmetres més significatius de les macromolècules: *longitud mitjana de les cadenes* (o pes molecular mitjà), *dispersió de les longituds de les cadenes* (o desviació tipus dels pesos moleculars), *grau de ramificació* (nombre i longitud de les cadenes laterals que entronquen amb la cadena principal) i *grau de cristal·linitat* (en gran mesura conseqüència dels paràmetres anteriors), els quals influeixen tant en les propietats del material com en les condicions de transformació.

L'increment de la longitud mitjana de les cadenes (associat a una menor cristal·linitat del material) millora la resistència a l'impacte (fins i tot a baixes temperatures) i disminueix la deformació per calor (amplia, per tant, l'interval de temperatures de servei). També augmenta la viscositat del material fos, fet que incideix en els processos de transformació (la injecció, l'extrusió, l'emmotllament per bufatge i el calandratge requereixen viscositats creixents). Com més petita és la dispersió de les longituds de la cadena d'un polímer, més uniformes esdevenen les seves propietats.

L'increment de la ramificació (també associat a una menor cristal·linitat) disminueix la densitat, la resistència, la rigidesa i les temperatures de servei i de transformació, però augmenta l'allargament, la resistència a l'impacte, la dilatació tèrmica i la contracció.

Copolimerització

Un polímer pot ser el resultat de la polimerització d'un sol monòmer (*homopolímer*) o fruit de la polimerització de dos o més monòmers diferents (*copolímer*, de dos monòmers; *terpolímer*, de tres monòmers). Les propietats dels copolímers depenen de les característiques dels monòmers i dels percentatges i del tipus de seqüència en la cadena que els formen: *a)* Copolímer alternant: -A-B-A-B-A-; *b)* Copolímer aleatori: -A-B-A-A-B-B-B-A-A-B-B-A-; *c)* Copolímer de blocs: -A-A-A-B-B-A-A-A-B-B-; *d)* Copolímer d'empelt (lateral): -A-A-A(-B-B-B)-A-A(-B-B)-A-.

Modificacions físiques

Mescla (o aliatge) de polímers

Un aliatge plàstic (*blend* en anglès) és una mescla de polímers diferents (percentatges superiors al 25%) que millora algunes de les propietats dels seus components (resistència a l'impacte, temperatura de termodeflectió, retardament de la flama). Els aliatges plàstics es designen per mitjà de les sigles dels components separades per un signe +, amb tot el conjunt tancat entre parèntesis. Alguns dels més freqüents són: (*PVC+ABS*), el primer que es va introduir; (*PC+ABS*); (*PBT+PC*); (*PPE+S/B*).

Estiratge

Alguns processos de transformació (laminació, emmotllament per bufatge) produeixen un estiratge que millora les propietats mecàniques.

Modificacions amb additius

Els additius són substàncies que s'afegeixen polímers per modificar determinades propietats dels materials plàstics o facilitar la seva fabricació. La Taula 14.1 ressenya alguns dels principals additius i els seus efectes.

Taula 14.1 Additius i els efectes en els polímers

| Additius | Efectes |
|---|---|
| <i>Càrregues</i> (amiant, mica, guix, serradures, fibra curta) | Abarateixen. Milloren les propietats |
| <i>Reforços</i> (fibra de vidre, de carboni; fibra llarga) | Milloren les propietats mecàniques (resistència, rigidesa, impacte) |
| <i>Ignífugants</i> (hidròxid d'alumini, productes bromats) | Redueixen la combustibilitat |
| <i>Plastificants</i> (ftalat de dioctil, èsters) | Augmenten la plasticitat |
| <i>Estabilitzants</i> (polièster) | Retarden l'envelliment |
| <i>Additius conductors</i> (negre de fum, microfibras d'acer, de carboni) | Eviten la càrrega estàtica |
| <i>Colorants</i> | Proporcionen un color definit |
| <i>Lubrificants</i> | Faciliten l'emmotllament |
| <i>Acceleradors/Inhibidors</i> (estearat) | Activen o retarden la polimerització |
| <i>Agents escumants</i> | Proporcionen polímers escumats |

Comportament mecànic de llarga durada

Naturalesa viscoelàstica dels polímers termoplàstics

Els polímers termoplàstics tenen al mateix temps un comportament viscos i un comportament elàstic. Quan el material se sotmet a una tensió, experimenta una deformació elàstica (i emmagatzema una energia potencial), però simultàniament inicia una lenta deformació viscosa que va augmentant amb el temps. Quan cessa la tensió, es recupera la deformació i l'energia elàstica, mentre que s'inicia una lenta recuperació de la deformació viscosa que mai aconsegueix retornar a la forma inicial: resta, doncs, una deformació plàstica. Altres tipus de materials (metalls i ceràmiques) presenten el fenomen de deformació sota càrrega en el temps quan treballen a temperatures relativament elevades, conegut pel nom de *fluència* o *creep* (limitacions de l'alumini per a cables d'alta tensió; o dels superaliatges per als rotors de turbina) (Secció 11.3). Tanmateix, el que caracteritza els polímers termoplàstics és que aquest fenomen es manifesti a temperatures ambient i tingui un lent retorn viscos, fets que constitueixen una de les principals limitacions en les seves aplicacions.

Fluència i relaxació

En analitzar més a fons el comportament viscoelàstic dels polímers termoplàstics, no tan sols apareix el fenomen de la *fluència* del material sotmès a càrrega, sinó també el fenomen dual de la *relaxació* de tensions en peces a les quals s'ha imposat una deformació inicial (manegament de politges sobre eixos, ecliquetatges a pressió, molles amb deformació constant).

Fluència (o creep)

Anteriorment s'ha descrit (i la Figura 14.2a representa gràficament) el fenomen de la fluència en un procés de càrrega i descàrrega de tensions en un material termoplàstic. Si es manté la tensió permanentment, s'obtenen les *corbes de fluència* (Figura 14.2c), que mostren la deformació creixent del material fins que, per a un temps suficientment prolongat, aquest acaba trencant-se (*corba de ruptura*). Les corbes de fluència són més altes per a tensions creixents.

Relaxació

Atenuació progressiva de les tensions en el temps en un material al qual s'ha imposat una deformació inicial. La representació de les tensions en el temps proporciona les *corbes de relaxació* (Figura 14.2d) sense un límit anàleg al de les corbes de ruptura. Les corbes de relaxació (el límit elàstic imposa els valors superiors) són més altes per a deformacions creixents.

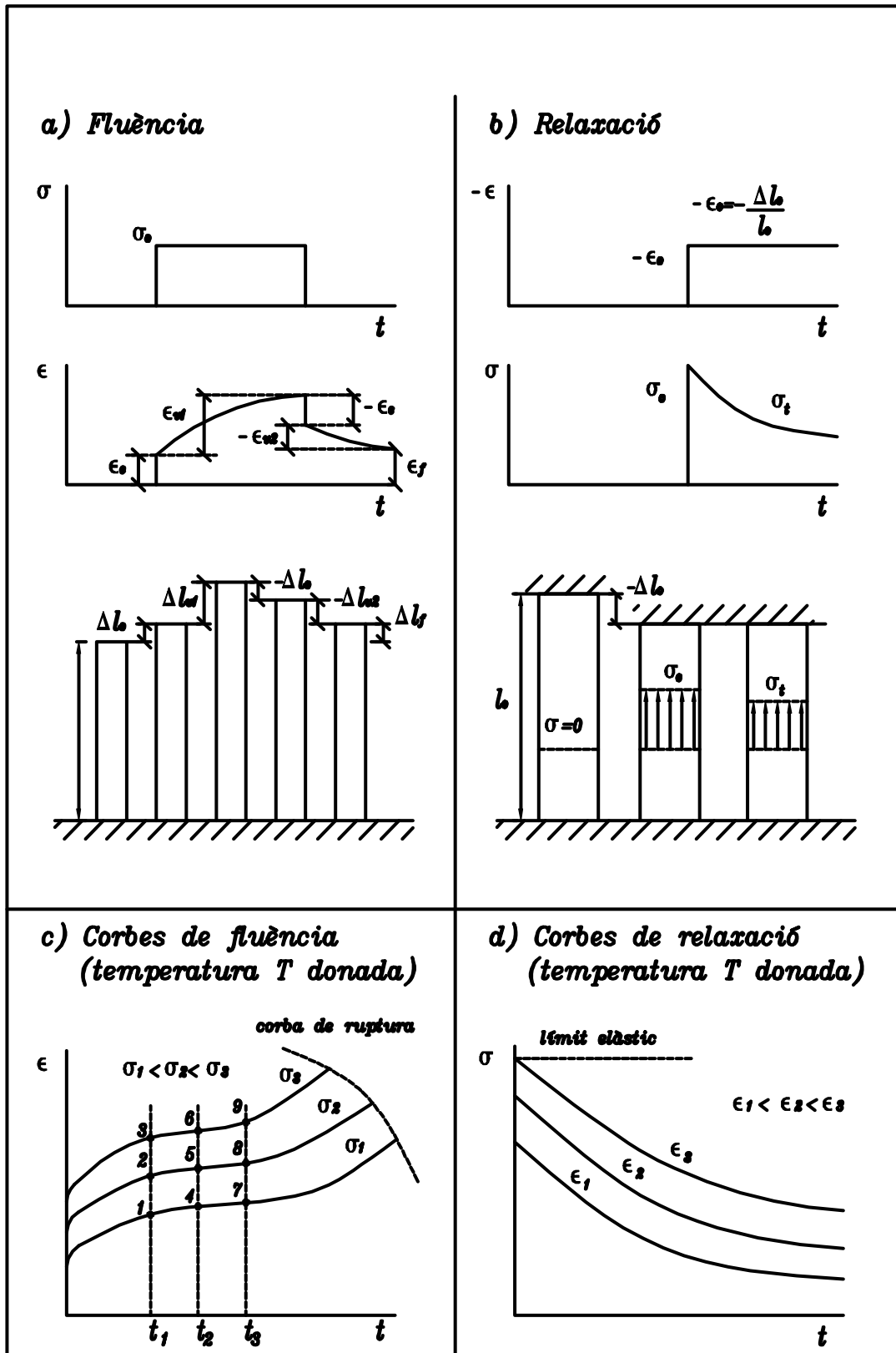


Figura 14.2 Fenòmens de fluència i relaxació en els termoplàstics

Aquests dos fenòmens (la fluència i la relaxació) comporten relacions entre quatre paràmetres: la *tensió*, σ , la *deformació*, ϵ , el *temps*, t , i la *temperatura*, T ; les corbes de relaxació es poden deduir de les de fluència i vice-versa. Es poden establir altres presentacions d'aquests paràmetres, o de combinacions d'ells, que s'adeqüin a determinats requeriments del disseny de peces. Els bons catàlegs comercials de termoplàstics tècnics acostumen a incloure les gràfiques següents: *a) Corbes del mòdul de fluència; b) Corbes del mòdul de relaxació; c) Corbes isòcronas; d) Corbes de resistència a tensió permanent.*

Corbes del mòdul de fluència

El mòdul de fluència es defineix com el quocient entre la tensió constant aplicada sobre el material i la deformació creixent que experimenta al llarg del temps. La representació d'aquesta funció dóna lloc a les corbes del mòdul de fluència (Figura 14.3a), les quals depenen de dos altres paràmetres: la tensió aplicada, σ , i la temperatura, T (les corbes són més baixes tant per a tensions com per a temperatures creixents). La literatura proporciona corbes del mòdul de fluència per a tensions de tracció o de flexió (cal indicar-ho). Algunes taules de propietats donen el mòdul de fluència $E_{c/t/\sigma}$ (a tracció o a flexió), per a un temps i una tensió fixades (Secció 11.3, vol. 1), però aquesta informació (indicativa del comportament del material per a unes condicions donades) és molt escassa per a avaluar un fenomen tan complex com la fluència.

Corbes del mòdul de relaxació

El mòdul de relaxació es defineix com el quocient entre la tensió decreixent en el temps i la deformació inicial imposada sobre el material. La representació d'aquesta funció dóna lloc a les corbes del mòdul de relaxació (Figura 14.3a), les quals depenen de dos altres paràmetres: la deformació inicial imposada, ϵ , i la temperatura, T (les corbes són més baixes tant per a deformacions inicials, com per a temperatures creixents). En general, el mòdul de relaxació es dóna a compressió.

Corbes isòcronas

Per a peces sotmeses a tensions prolongades en el temps en les quals cal limitar la deformació, és útil el càlcul anomenat *pseudoestàtic*, basat en les corbes isòcronas (Figura 14.3c) o relacions entre tensió i deformació per a un temps donat (i una temperatura donada). Es poden construir a partir de les corbes de fluència (vegeu la correspondència de punts entre les Figures 14.2c, pàg. 55, i 14.3c). Sovint, es pren com a *mòdul de fluència* (per a un temps determinat) el pendent de les corbes isòcronas en la primera zona aproximadament lineal.

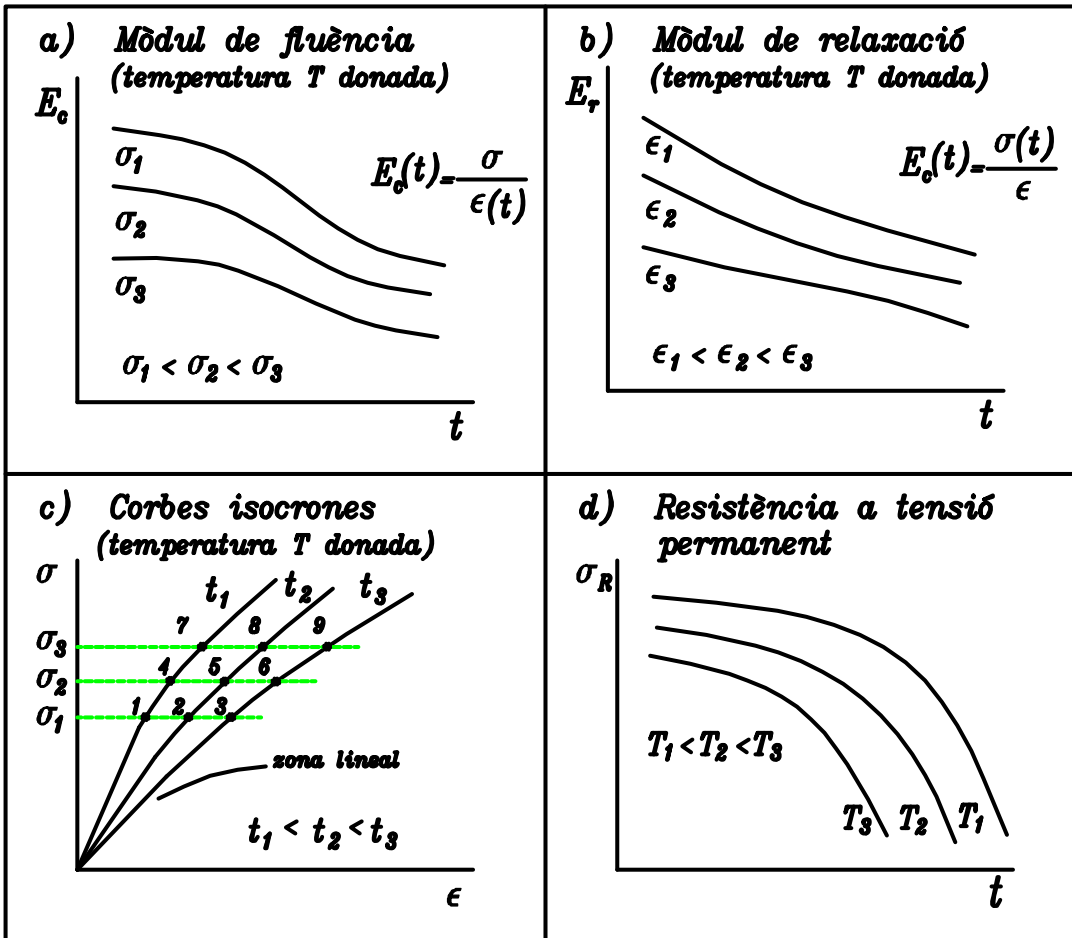


Figura 14.3 Característiques de disseny dels termoplàstics

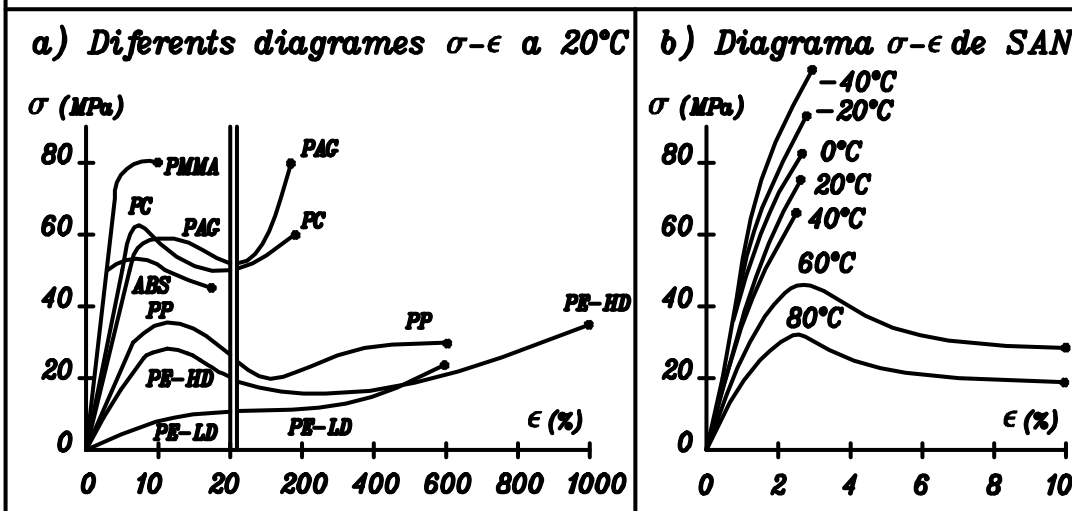


Figura 14.4 Diagrames de tensió-deformació de diferents termoplàstics. Variació amb la temperatura

Corbes de resistència a tensió permanent

Per a peces que, sotmeses a una tensió prolongada en el temps, cal que no es trenquin (per exemple, canalitzacions sotmeses a pressió interior o exterior), les corbes de resistència a tensió permanent (derivades de les corbes de ruptura, Figura 14.2c, pàg.55) proporcionen valors per al càlcul.

Comportament de curta durada

Diagrama de tensió-deformació

El diagrama de tensió-deformació que tanta importància té en els metalls per a determinar les propietats per al càlcul, en els polímers té alhora una complexitat més gran (és usat per a caracteritzar els materials), però una incidència pràctica menor, ja que només permet fer avaluacions per a càrregues de poca durada (per a càrregues de llarga durada es recorre a les característiques de fluència).

Es poden distingir cinc tipus de polímers (Figura 14.4a, pàg. 57):

a) *Plàstics fràgils*. Per exemple, el *PMMA*. Segueixen la llei de Hooke, tenen rigideses elevades i el límit elàstic tendeix a confondre's amb la ruptura; es caracteritzen per la resistència a la tracció, l'allargament a ruptura i el mòdul d'elasticitat. La major part de plàstics termostables entren dintre d'aquesta categoria.

b) *Plàstics deformables*. Per exemple, l'*ABS*, les *PA*, el *PC* (la majoria de plàstics tècnics de bona tenacitat). Compleixen raonablement bé la llei de Hooke, tenen un límit elàstic definit i experimenten una gran deformació plàstica abans de trencar-se. Es caracteritzen pel límit elàstic, l'allargament al límit elàstic, l'allargament a la ruptura i el mòdul d'elasticitat.

c) *Plàstics estirables*. Per exemple, el *PE-HD*, el *PP*. Presenten un límit elàstic definit però no segueixen bé la llei de Hooke. Després del límit elàstic experimenten un gran estiratge fins a la ruptura. Es caracteritzen pel límit elàstic, l'allargament al límit elàstic i l'allargament a la ruptura. La rigidesa es mesura pel mòdul d'elasticitat secant en la zona inicial del diagrama (0,05 i 0,25% de deformació).

d) *Plàstics flexibles*. Per exemple, el *PE-LD* i el *PVC-P*. No compleixen la llei de Hooke, no mostren un límit elàstic ben definit i experimenten grans deformacions abans de la ruptura. Es caracteritzen per la tensió a una determinada deformació i també pel mòdul d'elasticitat secant en la zona inicial del diagrama.

e) *Elastòmers*. Aparentment, el diagrama és semblant als dels plàstics flexibles, però se'n diferencien en el fet que pràcticament tota la deformació és elàstica (es recupera immediatament), mentre que en els primers, malgrat un cert retorn viscoelàstic (lent en el temps), la major part de la deformació resta com a allargament plàstic.

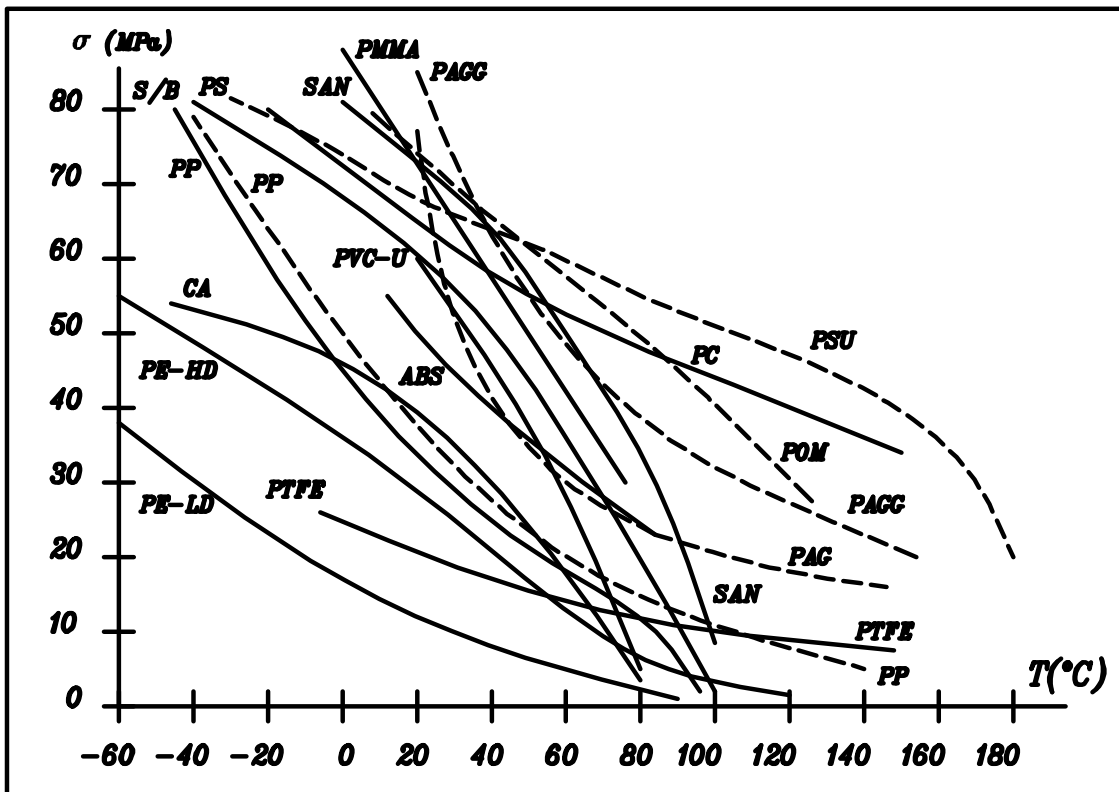


Figura 14.5 Variació de la resistència a la tracció amb la temperatura per a diferents termoplàstics

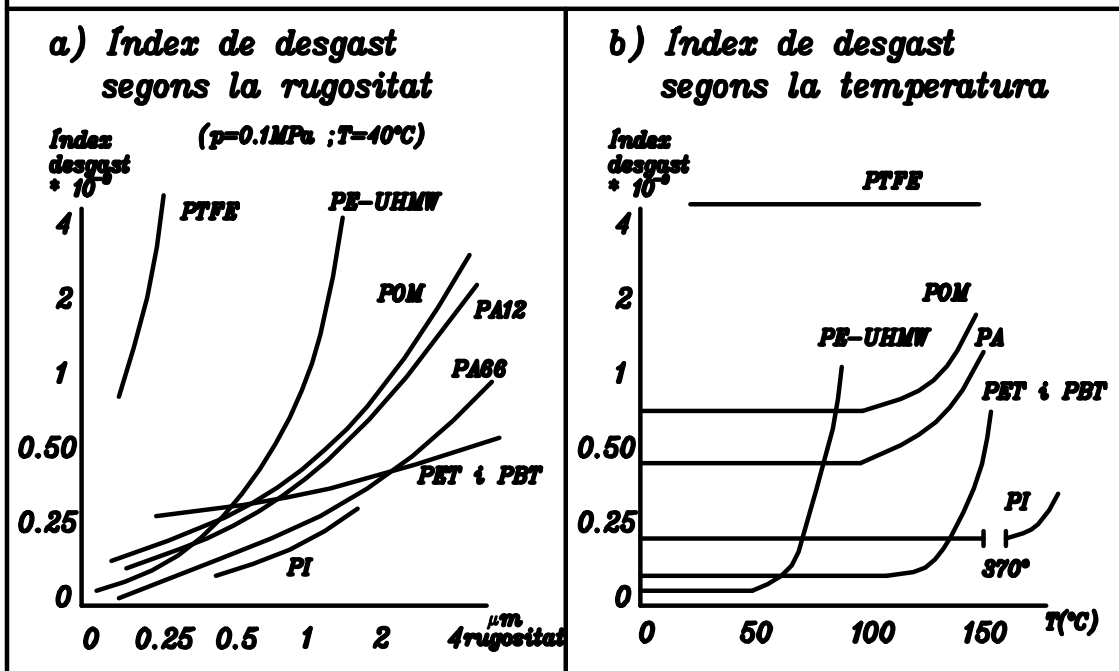


Figura 14.6 Variació de l'índex de desgast segons la rugositat i la temperatura

Els polímers poden mostrar un comportament diferent a tracció que a compressió (més baix en polímers reforçats) o a flexió (generalment més elevat) o, fins i tot, a cisallament. Per tant, és freqüent proporcionar també paràmetres extrets dels diagrames de tensió-deformació per a aquests tipus de sol·licitació.

Comportament a fatiga

Els polímers solen tenir un comportament a fatiga no excessivament diferenciat del comportament dels metalls. Alguns mostren un límit de fatiga definit (per sota d'aquest valor no es produeix ruptura) i altres no. En aquest darrer cas se sol donar la resistència a la fatiga per a un valor convencional de cicles (habitualment 10^7). En la majoria de plàstics, la resistència a la fatiga per a 10^7 cicles acostuma a trobar-se entre 20÷30% de la resistència a la ruptura. Cal tenir en compte la incidència de la freqüència de la vibració en l'escalfament a causa de la histèresi (generalment en els assaigs no se sobrepassa 10 Hz) i les modificacions que introdueix en el comportament del material.

Resistència a l'impacte

Els polímers mostren resistències a l'impacte molt diferents. Mentre que els elastòmers tenen una gran tenacitat (ni tan sols s'acostuma a mesurar), els plàstics poden ser des de molt tenaços (*PE*, *PP*, *POM*, *PA*, *PC*) fins a molt fràgils (*PS*, *PMMA*, alguns plàstics termostables). El principi utilitzat per a mesurar la resistència a l'impacte dels plàstics és anàleg als dels metalls (diferència d'energia d'un pèndol abans i després de trencar una proveta), però s'han establert normes específiques: ISO 179, per a l'assaig segons Charpy (proveta trencada a flexió, suportada pels dos extrems); ISO 180, per a l'assaig segons Izod (proveta trencada per flexió, suportada per un extrem). La proveta pot ser o no entallada, amb entalla en forma de U o de V. Les provetes no entallades dels plàstics tenaços no es trenquen.

Duresa

En els elastòmers, la duresa és la propietat més usual per a caracteritzar les seves propietats mecàniques, mentre que en els plàstics és una propietat complementària. Els assaig de duresa dels polímers es basen en la mesura de la profunditat de la deformació del material quan s'hi aplica una bola amb una determinada força. La *duresa a la bola*, que fa intervenir tant la penetració i com el temps (a causa del caràcter viscoelàstic dels polímers), és apropiada per als plàstics (termoplàstics i termostables), mentre que el *grau de duresa*

internacional del cautxú (IRHD) s'utilitza específicament per als elastòmers. La *duresa Shore* (A i D), basada en un duròmetre de butxaca, menys precisa però fàcil d'utilitzar, s'aplica als termoplàstics tous i als elastòmers.

Influència de la temperatura

En general, tots els polímers (i de manera més destacada els termoplàstics) presenten fortes variacions del seu comportament mecànic amb la temperatura. A temperatures elevades disminueixen la resistència a la tracció, el límit elàstic, el mòdul d'elasticitat i la duresa, mentre que augmenten sensiblement l'allargament a la ruptura i la tenacitat (la Figura 14.5, pàg. 59, mostra la variació de la resistència a la tracció amb la temperatura per als principals termoplàstics). És més, en augmentar la temperatura, determinats polímers (per exemple, SAN, Figura 14.4b, pàg. 57) poden passar de ser fàgils a ser dúctils. A temperatures baixes, tots els polímers tendeixen a transformar-se en rígids i fràgils (fins i tot els elastòmers). Moltes de les altres propietats físiques, mecàniques o tecnològiques també són funció de la temperatura. Per aquest motiu és tan important la fixació de les temperatures màxima i mínima de servei dels plàstics i els elastòmers, alhora que en constitueix un dels principals factors de selecció.

Deteriorament dels polímers

Les formes de deteriorament dels polímers són diferents de les dels metalls (la corrosió galvànica no és possible ja, que no són conductors). Però, en canvi, presenten diverses formes de degradació que cal tenir en compte i, si és possible, evitar.

a) *Absorció de líquids*, fonamentalment d'aigua (freda, calenta, humitat, vapor) en els plàstics, i d'olis i greixos en els elastòmers. Els efectes són un inflament del material i la pèrdua de propietats.

b) *Atac químic*. Malgrat la bona estabilitat química dels polímers, hi ha productes (generalment els més afins) que ataquen determinats materials. En alguns plàstics pot donar-se un tipus de degradació (la *tensofissuració*) per l'acció combinada de l'atac químic i les tensions mecàniques, mentre que en els elastòmers es produeix la fissuració per atac de l'ozó.

c) *Envelliment*. Consisteix en la pèrdua de propietats dels polímers (generalment s'endureixen i fragilitzen) per efecte combinat de l'oxigen de l'aire, les radiacions UV i l'exposició prolongada a temperatura.

d) *Comportament a la flama* (propagació o no de la flama, gasos tòxics). És un dels factors més limitatius en la utilització dels polímers. Molts d'ells admeten additius ignífugs.

Processos de transformació

La fabricació de peces amb plàstics i elastòmers ofereix una gran diversitat de procediments que permeten obtenir des de productes semielaborats de forma molt senzilla (extrusió, calandratge) fins a productes de gran complexitat (emmotllament per injecció), i des de fabricacions unitàries o de sèries curtes (laminació manual de materials compostos) fins a produccions en grans sèries altament automatitzades (emmotllament per bufatge).

En la breu presentació dels sistemes de fabricació que es fa a continuació, s'estableixen tres nivells de processos: *a)* Preparació dels materials; *b)* Fabricació de productes semielaborats; *c)* Fabricació de peces.

Els processos específics per a la fabricació de plàstics reforçats es des-criuen en la Secció 14.4 (pàg. 122).

Preparació dels materials

En general, cal preparar els materials subministrats pels fabricants (termo-plàstics, termostables o elastòmers) per a adequar-los als requeriments de cada aplicació per mitjà de la incorporació d'additius (càrregues, fibres de reforç, lubricants, ignifugants, colorants) o la formació d'aliatges.

La preparació dels termoplàstics es realitza en extrusores especials, amb diverses entrades dossificades, d'on en surten uns filaments que són trossejats en forma granular (o gransa).

La preparació dels termostables es realitza de dues maneres: *a)* *Masses d'emmotllament*, que inclouen a més de la resina i diversos additius, les càrregues o les fibres de reforç (després d'emmotllades, reticulen per mitjà de la calor); *b)* Barrejant dos components reactius que reticulen ràpidament; a partir de la barreja, el temps per a efectuar la conformació és molt breu. Una modalitat d'aquest darrer sistema és el RIM.

Els cautxús es preparen a través de la malaxació (o ablaniment mecànic) del material, normalment en mescladors interns, fase en la qual es realitza la incorporació d'additius.

Fabricació de productes semielaborats

S'entén per productes semielaborats aquells materials amb una composició adequada i formes senzilles (pel·lícules, làmines, barres, tubs, perfils) que permeten la seva posterior elaboració o transformació en peces o components amb la forma definitiva. Els principals processos per a fabricar productes semielaborats són:

Extrusió (Ex)

Procés que es basa a plastificar el material entrant (generalment granulat) en una cavitat cilíndrica calefactada, per mitjà d'un o dos cargols giratoris, i fer-lo fluir, per l'acció combinada de la temperatura i la pressió (origi-nada per fricció o per efecte volumètric), a través d'una filera amb la forma de la secció del producte semielaborat (pel·lícula, làmina, barra, tub, perfil, revestiment de fils, de làmines; Figura 14.7a, pàg. 68)). L'extrusió és el procediment més utilitzat en la primera transformació dels termoplàstics (prop del 75% dels de consum i 50% del total), però també s'utilitza per a la transformació d'alguns termostables (*PF*, *UF*; reticulen en passar per la filera i així creen la contrapressió) i elastòmers (abans de la vulcanització). Sovint, l'extrusió és seguida d'altres processos que proporcionen al material la configuració final (formació de bosses, emmotllament per bufatge, termoconformació de làmines, mecanització de barres, en els termoplàstics; tubs compostos, juntes de finestres, i vulcanització posterior, en els elastòmers).

Bufatge de làmines (BL)

Procés que permet dilatar un tub a la sortida d'una extrusora per donar lloc a una pel·lícula circular molt prima i de gran diàmetre de la qual es fan bosses (especialment de *PE-LD*). Figura 14.7b (pàg. 68).

Coextrusió

Procés que combina dues o més unitats extrusores en sèrie o en paral·lel per a la fabricació de tubs o làmines multicapa, eventualment, amb la incorporació de teixits de reforç. Aquest sistema és freqüent en la fabricació de conduccions i mànegues d'elastòmers. Figura 14.7c (pàg. 68).

Calandratge (Cal)

Procés que consisteix a fer passar un plàstic o un elastòmer entre dos (o més) corròns calefactats, de manera que a la sortida s'obtenen làmines de toleràncies de gruix molt estretes (cintes magnètiques de polièster). El calandratge és adequat per a crear mesclades de plàstics, fabricar làmines multicapa, processar materials sensibles a la temperatura (especialment *PVC-U*, *PVC-P*), recobrir teixits o obtenir làmines d'elastòmer. Figura 14.7d (pàg. 68).

Fabricació de peces

La transformació dels plàstics i dels elastòmers en peces de formes no simples requereix un motlle per a cadascuna i, segons el seu cost, les sèries econòmiques de fabricació són més o menys elevades. Els principals processos de fabricació de peces són:

Emmotllament per injecció (o simplement *injecció*) (Ij)

Procés que s'inicia en una unitat anàloga a la d'una extrusora d'un sol cargol. Durant la plastificació i amb la sotida obturada, el cargol es desplaça enrere impulsat pel moviment de gir i, en el moment de la injecció, un èmbol empeny el cargol endavant, el qual introdueix el material a pressió molt alta en el motlle (generalment refrigerat), on se solidifica ràpidament. Finalment, s'obre el motlle i se n'extreu la peça (Figura 14.8a i b, pàg. 69). Aquest procés és barat i de gran productivitat (normalment diverses operacions per minut), es presta a un alt grau d'automatització i permet obtenir una gran varietat de formes. Tanmateix, cada peça requereix un motlle específic d'alta complexitat que té un cost sols justificable per a sèries elevades. La injecció és el procés més utilitzat en la fabricació de peces de termoplàstic (*PE-HD*, *PP*, *PS* i els plàstics tècnics).

La injecció de termoplàstics reforçats amb fibra curta (0,2÷0,4 mm) presenta algunes diferències: la viscositat més elevada del material obliga a pressions més altes i la rigidesa superior dificulta l'extracció de la peça, però alhora permet un temps de cicle inferior en desemmotllar-la a més temperatura. Cal tenir en compte l'efecte abrasiu de les fibres tant en la unitat d'injecció com en el motlle.

La injecció de termoplastics és cada dia més important (a causa de la gran productivitat del procés), però cal fer adaptacions a les diferents necessitats de flux i de reticulació. En efecte, el cilindre de plastificació treballa per sota de la temperatura de reticulació (en els termoplàstics s'escalfa per ablanir el material), mentre que el motlle està calefaccionat per a assegurar la reticulació (en els termoplàstics es refrigera per a solidificar el material). També es fabriquen peces de plàstics reforçats a partir de masses d'emmotllament (SMC o BMC).

Emmotllament per injecció-reacció (RIM)

En el RIM (*reaction injection moulding*), els líquids reactants que formaran la resina termoplastica són barrejats just abans de ser injectats, de manera que la reticulació es produeix en el motlle (Figura 14.9, pàg. 69). Si s'incorporen fibres curtes en un dels reactants, s'obté el RIM reforçat (o R-RIM) mentre que, si s'introdueixen fibres llargues en el motlle, s'obté el RIM estructural (o S-RIM). Aquest procés resulta econòmic gràcies al capçal mesclador i a la recuperació i recirculació del sobrant de material. Tot i que el RIM s'aplica especialment als poliuretans (*PUR*), altres termoplastics (*UP*, *EP*) s'adapten bé a la ràpida polimerització que requereix. Ateses les baixes pressions d'injecció (els reactants són molt fluids), es poden utilitzar motlles d'Al (menys resistents però més lleugers) i l'àrea projectada de la peça pot ser fins a 10 vegades superior a la injecció convencional (peces de grans dimensions: paraxocs, taulers de comandament).

Emmotllament per bufatge (EB)

Procés pel qual un tub obtingut en una extrusora és transformat en ampolles, envasos o dipòsits buits. Un cop situada la part extrema del tub en la cavitat del motlle, s'injecta aire a pressió en el seu interior que projecta el material contra les parets, on adquireix la forma i se solidifica. Posteriorment, es talla el coll d'entrada, s'obre el motlle i s'extreu la peça (Figura 14.7a, pàg. 68). És un procés de gran productivitat, molt utilitzat en la indústria de l'envasament per a transformar termoplàstics (*PE-HD*, *PET*, *PVC*), però en resulten peces de gruixos molt diferents.

Emmotllament per injecció-bufatge (IB)

Procediment semblant a l'emmotllament per bufatge, però que se'n diferencia pel fet que, inicialment, s'injecta una preforma en un primer motlle i, després, per mitjà d'aire a pressió s'impulsa el material contra un segon motlle amb la forma definitiva (Figura 14.10a, pàg. 70). Permet obtenir envasos i dipòsits de millor qualitat (gruixos més uniformes i les fibres orientades).

Emmotllament per injecció-sandvitx (IS)

Variant de l'emmotllament per injecció que permet fabricar peces amb dos components, un material d'altres característiques situat a la capa exterior i un altre material més barat (pot ser una escuma o de reciclatge) en el nucli. Primer s'injecta el material perifèric omplint parcialment el motlle i, després, s'injecta el material del nucli que flueix per l'interior del primer empenyent-lo vers les parets. Finalment, una petita injecció del primer, material tanca la capa exterior i prepara el nou cicle (Figura 14.10b, pàg. 70). Aquest procediment permet disminuir el pes o abaratir el cost de les peces.

Emmotllament per injecció-escumeig (IE)

Procés d'injecció d'un termoplàstic amb agents escumants en un motlle, on es produeix la seva expansió. En injectar el material, la menor pressió en el motlle permet l'expansió del gas escumant que empeny el material vers les parets, de manera que s'obtenen peces amb una capa exterior compacte i una gradació de densitats decreixents vers el nucli (són les anomenades *escumes estructurals* o *integrals*). S'obtenen densitats compreses entre el 30÷70% de les del material de base i relacions de resistència/massa i rigidesa/massa molt més elevades. Tot i que es poden fabricar amb màquines injectores convencionals, la baixa pressió del procés (10÷20 bars) i les grans dimensions de moltes de les peces fan que s'hagin desenvolupat màquines injectores especialitzades.

Emmotllament per rotació (ER)

Procés que, per efecte de les forces centrífugues creades pel gir simultani del motlle sobre dos eixos perpendiculars, permet fabricar des de petites peces buides de gruixos homogenis (nines, pilotes) fins a peces de grans dimensions i parets gruixudes de 10 mm i més (planxes de surf, pales de rotor, petites embarcacions). El material s'introdueix en forma de pólvores o de massa d'emmotllament i el conjunt de motlles en rotació s'escalfen en un forn o per aire calent (els termoplàstics fonen i els termostables reti-culen); després cal refredar el motlle en els termoplàstics per a solidificar el material i, finalment, s'extreu la peça lliure de tensions internes (Figura 14.11, pàg. 70). A causa de les baixes pressions, els motlles són relativament barats (alumini fos, xapa d'acer). El material més utilitzat és el *PE*, però també s'emmotllen altres termoplàstics (*PP*, *PS*, *ABS*, *PA*, *PC*) amb fibres de reforç o sense. El procediment també és apte per a fabricar peces de termostables i de materials compostos amb fibra llarga.

Emmotllament per premsatge (EP)

Procés típic de transformació de termostables i elastòmers que consisteix a introduir una quantitat mesurada de material en pols, granulat o com a preforma en un motlle obert calefactat (generalment a 130÷200°C) i, per mitjà d'una premsa, aplicar un contramotlle que imprimeix la forma a la peça (Figura 14.12a, pàg. 71). Aquest procés de baixa productivitat (temps de reticulació llarg) sols permet obtenir formes senzilles i dona toleràncies poc precises (difícil dosificació), però el cost de l'utilatge és baix. L'emmotllament per premsatge és apte per a conformar materials SMC (*sheet moulding compounds*), per a peces en forma de làmines i materials BMC (*bulk moulding compounds*) per a peces de forma volumètrica.

Emmotllament per transferència (RTM)

En el RTM (*resin transfer moulding*), procés similar a l'anterior, el material introduït en un cilindre calefactat es transfereix sota pressió a la cavitat del motlle (també calefactat). Després de la reticulació o la vulcanització, s'extreu la peça (Figura 14.12b, pàg. 71). Aquest sistema permet formes més intrincades, millora la distribució de temperatures, escurça el temps de cicle i disminueix les distorsions del material. És adequat per a materials termostables o elastòmers que flueixin amb relativa facilitat i permet la fabricació de peces en material compost si, prèviament, s'han introduït les fibres llargues en el motlle (plàstics reforçats) o els inserts metàl·lics (articulacions elàstiques i components de goma-metall).

Emmotllament per colada (Col)

Procés que consisteix a abocar els components reactius d'una resina a l'interior d'un motlle, on polimeritza sense pressió en fred o en calent.

Termoconformació (Tc)

Procediment per a transformar una làmina de material termoplàstic en una peça amb relleu (joguines, mapes amb relleu, grans peces de recobriment). Després d'escalfar la làmina del termoplàstic, se l'empeny vers el motlle o bé per succió mitjançant el buit, o bé per bufatge. Un cop la peça està solidificada, s'extreu (Figura 14.13, pàg. 71). És un procés adequat per a sèries curtes o mitjanes, ja que el motlle és relativament poc costós.

Altres processos

Finalment, cal no oblidar altres processos que també tenen la seva importància en la fabricació de peces i components amb polímers.

Mecanització (Mec)

Molts dels termoplàstics, especialment els termoplàstics tècnics i els termostables, es poden mecanitzar amb certa facilitat per a obtenir la forma desitjada (engranatges, politges, coixinets), sobretot en sèries curtes. Les operacions més freqüents són el tornejat, el fresatge i la perforació.

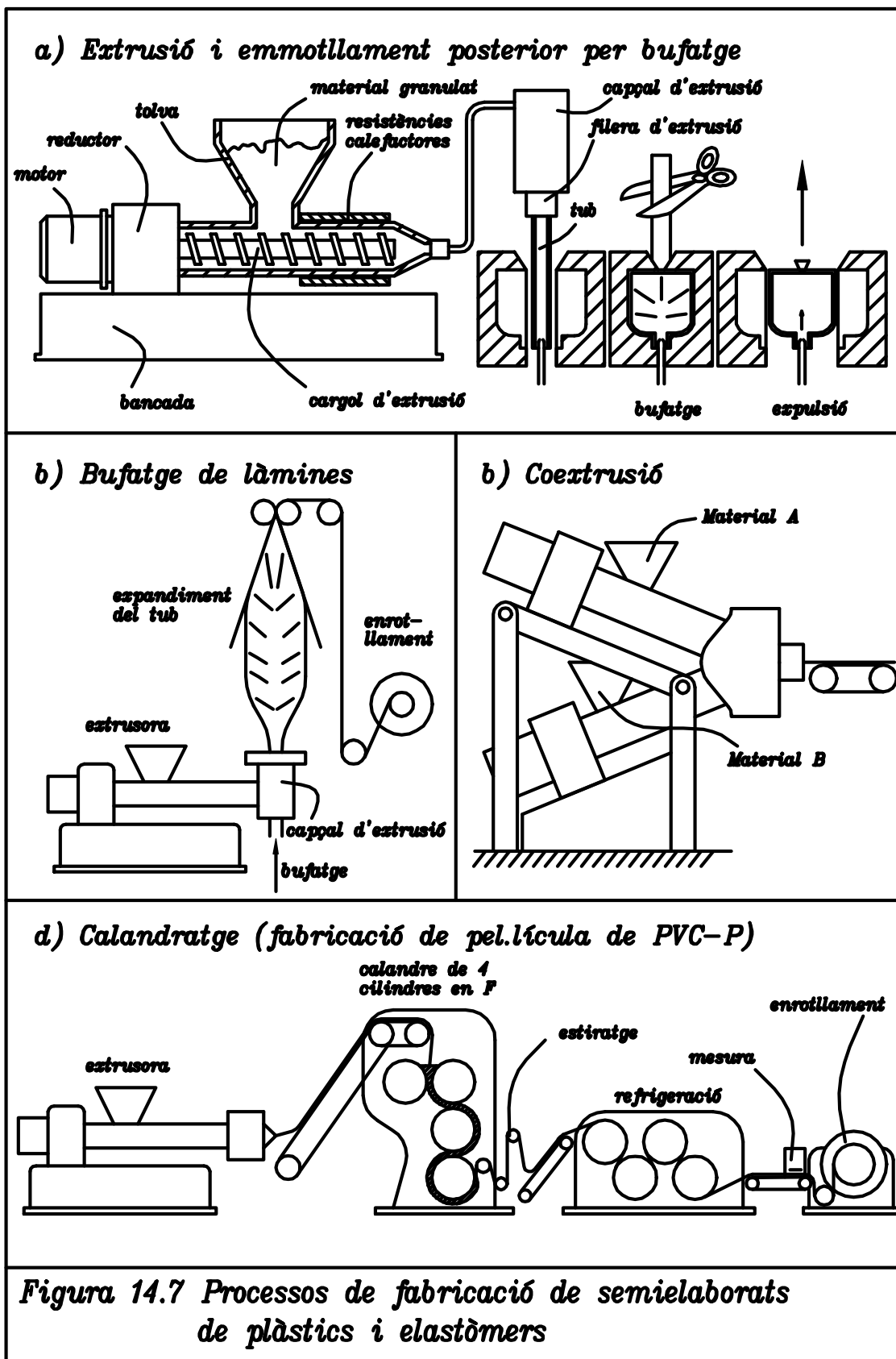
Soldadura (Sol)

Dues peces del mateix termoplàstic (i en alguns casos de plàstics compatibles) es poden unir per soldadura (el material s'escalfa fins que esdevé viscos i després es pressiona, una peça contra l'altra). Les principals formes de generar la calor són: *a) Escalfament per contacte*, amb un element calefactor; *b) Soldadura per ultrasons*, amb vibracions sonores de freqüències molt elevades (20÷40 kHz), que escalfen les parts en un temps molt breu (0,2÷2 segons). *c) Soldadura per fricció*, amb la calor originada per freg entre les dues parts que s'han de soldar; *d) Soldadura per efecte dielèctric*, on la calor s'origina per pèrdues dielèctriques provocades per un camp elèctric d'alta freqüència (RF o HF).

Reblonament, unió per adhesius

Una de les formes d'unió més interessants que permeten els termoplàstics és el reblonament de parts sortints (per mitjà de la calor), deformades directament sobre altres elements, especialment forats realitzats en planxes de metall.

També són de gran interès en els plàstics les possibilitats d'unió de diferents elements (plàstic/plàstic o plàstic/metall) per mitjà d'adhesius. La major part dels plàstics es poden unir per mitjà d'adhesius epoxi (excepte *PE* i *PTFE*, que utilitzen adhesius fenòlics i de silicona) i adhesius de la mateixa naturalesa que els materials que s'uneixen.



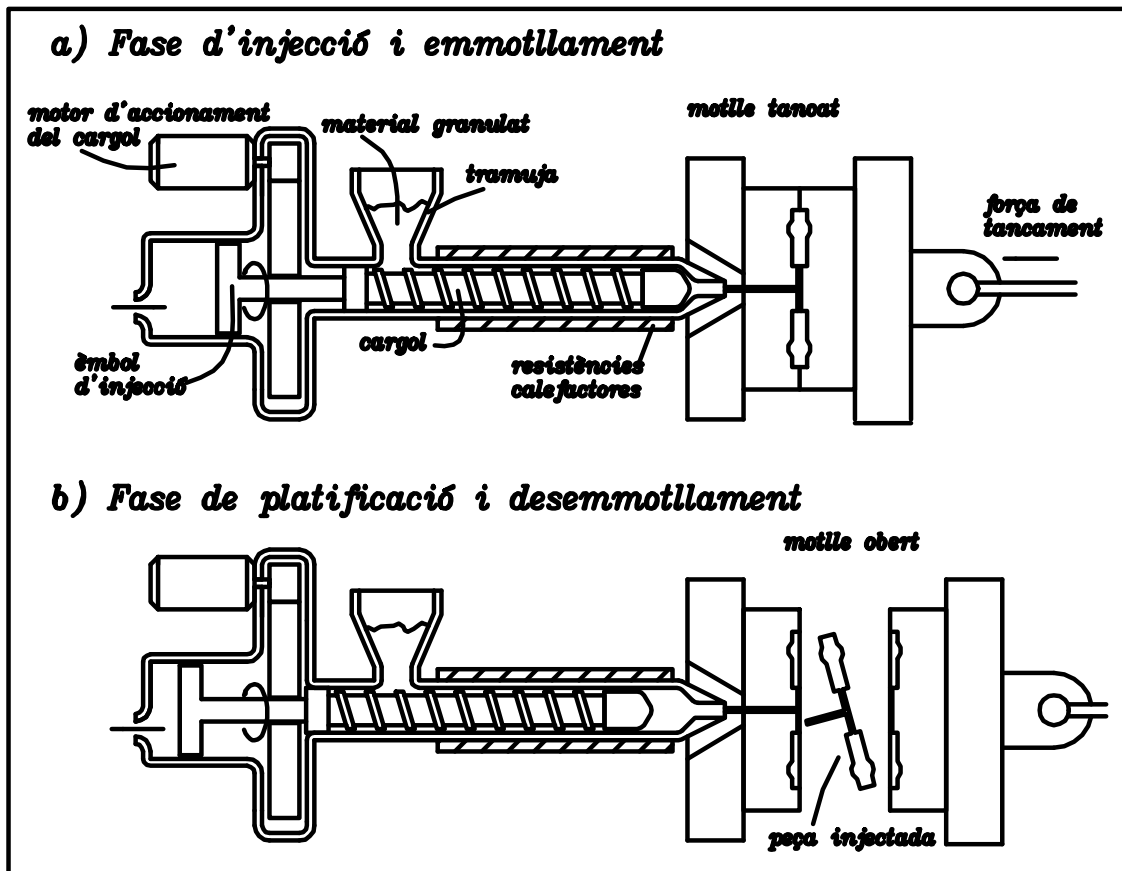


Figura 14.8 Emmotllament per injecció

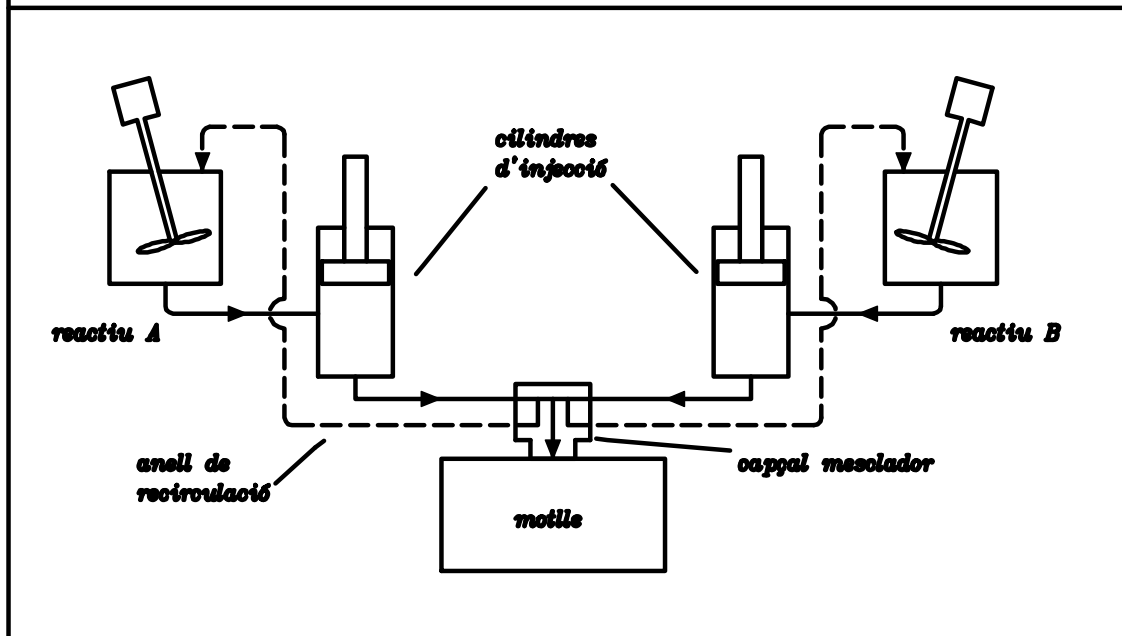
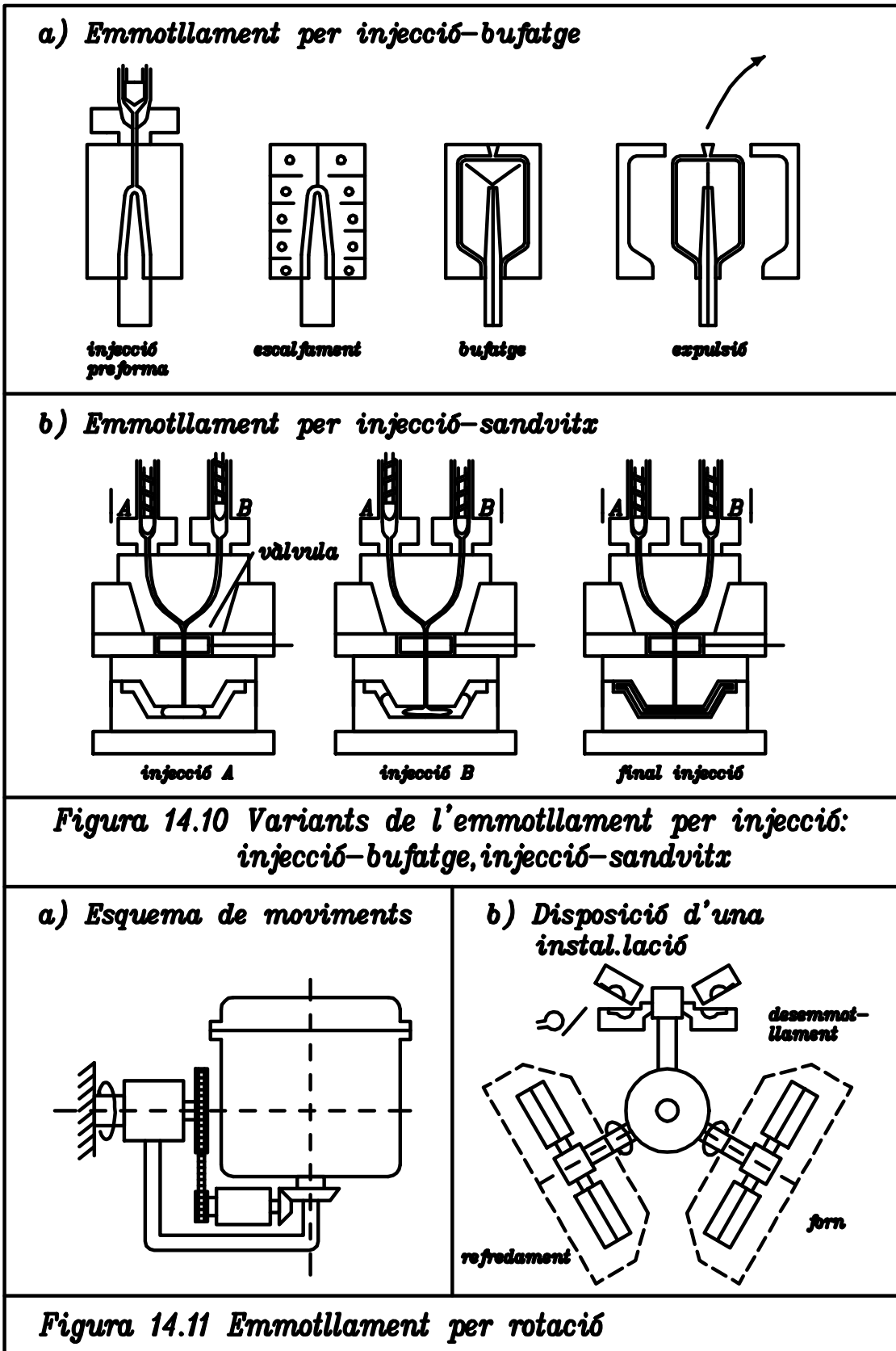


Figura 14.9 Emmotllament per injecció-reacció (RIM)



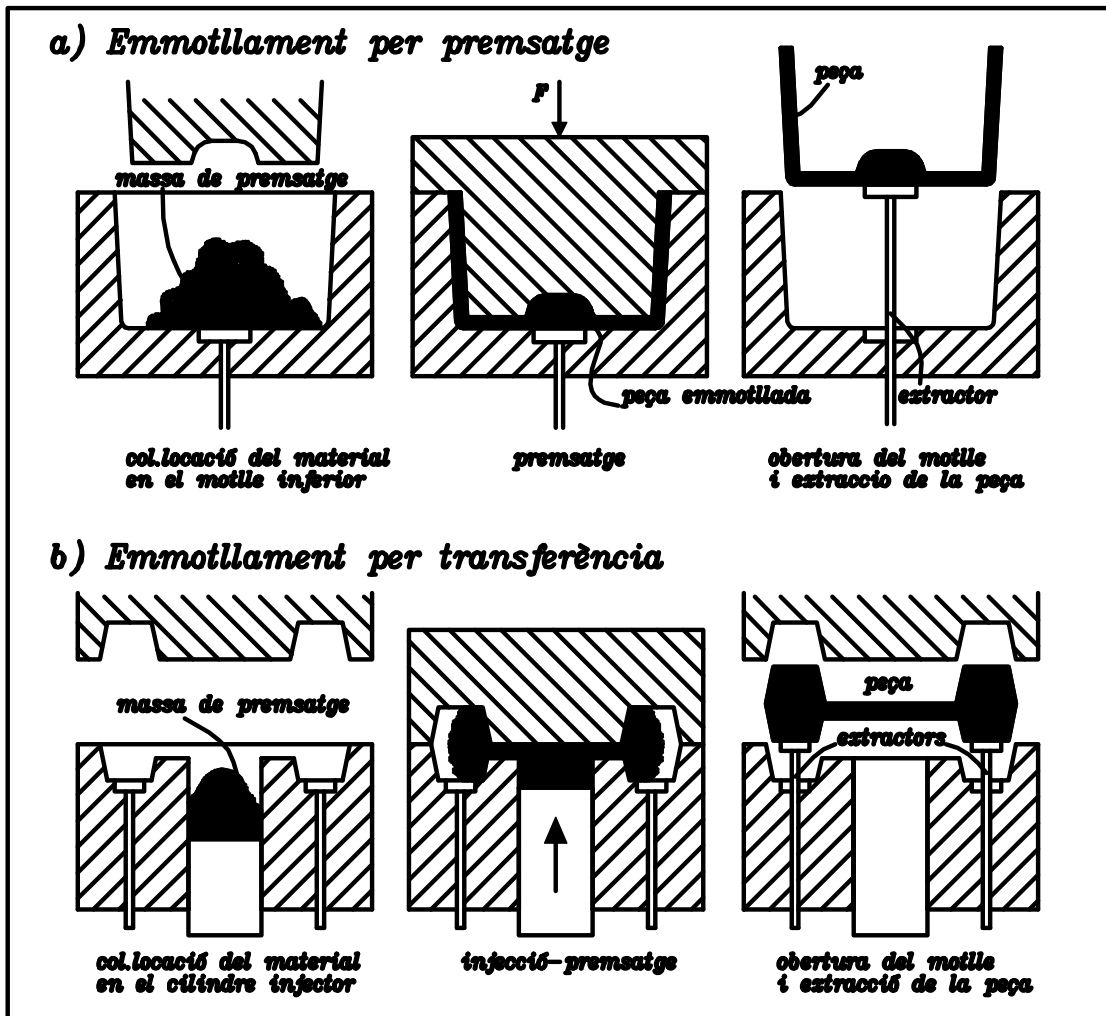


Figura 14.12 Emmotllament per premsatge i emmotllament per transferència

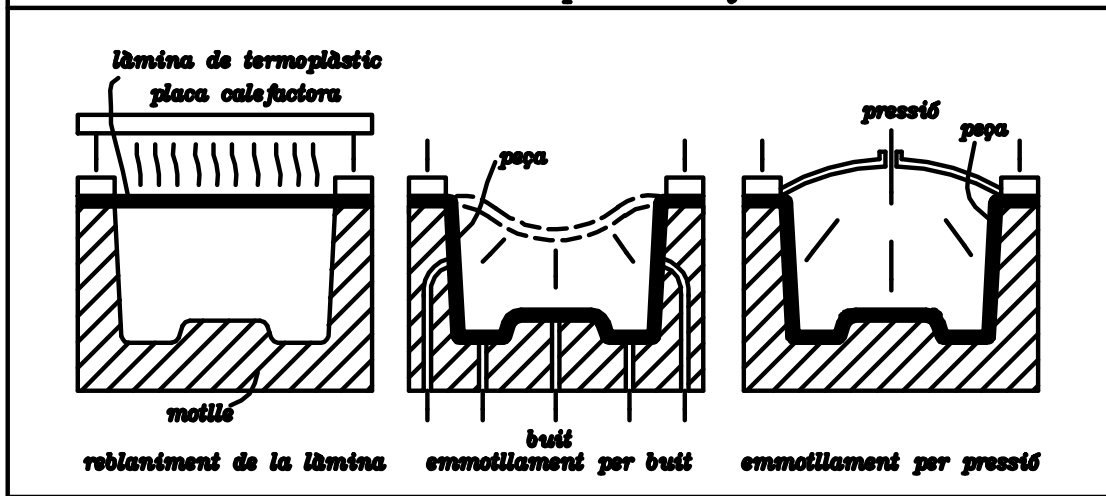


Figura 14.13 Termoconformació

14.2 Plàstics

Introducció

Els plàstics són materials basats en polímers de consistència rígida (en comparació amb els elastòmers) que, normalment, en algun moment de la seva conformació adquireixen una consistència plàstica.

Els plàstics tenen múltiples aplicacions com a materials estructurals, ja que compensen la seva poca resistència i rigidesa amb la seva baixa densitat. Presenten també un conjunt de propietats que els fan molt adequats en la relació amb l'usuari: sensació de lleugeresa, sensació de temperament tèrmic (ni fred ni calor, a causa de la baixa conductivitat tèrmica), sensació de no agressivitat (flexibilitat, cantells no tallants), protecció elèctrica (són aïllants), bona presència visual (gran llibertat de formes, bons acabaments superficials, fàcil acoloriment), són barats (afavorit per la baixa densitat) i de fàcil conformació, i són resistents a molts dels agents químics. En el costat negatiu de la balança trobem una temperatura de servei màxima molt limitada (en comparació amb els metalls), una estabilitat dimensional petita i el perill de degradació per envelliment.

Es divideixen clàssicament en *termoplàstics* i *termostables*, segons l'aptitud o no per deformar-se plàsticament en ser escalfats després de la polimerització; també es poden dividir d'acord amb l'estructura química dels polímers de base. Tanmateix, en aquest text s'ha donat prioritat a l'agrupació segons criteris orientats a les aplicacions.

Grups de plàstics

Plàstics de consum

Plàstics de baix cost, de propietats mecàniques i tèrmiques molt moderades i amb temperatures de servei limitades a 100°C; les seves propietats i característiques els fan adequats per a objectes d'ús quotidià. Entre els plàstics de consum hi ha les poliolefines (*PE-LD*, *PE-HD*, *PP*), els poliestirens (*PS*, *SAN*, *S/B*) i determinats plàstics clorats (*PVC-U*, *PVC-P*). Tots ells són termoplàstics i els sistemes de conformació més utilitzats (extrusió, emmotllament per injecció, emmotllament per bufatge, calandratge) permeten grans produccions amb uns costos de transformació molt econòmics. Totalitzen més del 80% del consum global de plàstics.

Plàstics tècnics

Són plàstics de cost més elevat, amb propietats mecàniques (resistència, rigidesa, impacte) i tèrmiques més elevades i unes temperatures de servei màximes que es troben entre 80÷150°C. Aquestes propietats van unides, en moltes ocasions, a un bon comportament a l'abradió i al lliscament, a una bona exactitud i estabilitat dimensional, fruit de l'escassa contracció i a una relativament baixa dilatació. Entre els plàstics tècnics hi ha diversos termoplàstics com ara l'ABS, els polièsters saturats (*PET* i *PBT*), els poliacetals (*POM*), les poliamides (*PA6*, *PA66*, *PA11*, *PA12*), el policarbonat (*PC*) i el poli(èter de fenilè) (*PPE*), així com també la majoria dels plàstics termostables com ara els fenoplasts (*PF*), els aminoplasts (*UF* i *MF*), els polièsters insaturats (*UP*), els epoxis (*EP*) i els poliuretans termostables (*PUR*).

Plàstics d'altres prestacions

Són plàstics de cost molt elevat (molts d'ells encara en fase experimental), que sovint requereixen tècniques i maquinària especials per a la transformació. Mantenen unes bones propietats mecàniques més enllà dels 150°C, característica fins fa poc no possible en un plàstic. Entre els plàstics tècnics hi ha les polisulfones (*PSU*, *PES*), el poli(sulfur de fenilè) (*PPS*), les polietercetones (*PEK* i *PEEK*), les poliimides (*PI*) i els polímers de cristall líquid (*LCP*).

Plàstics especials

Són plàstics de cost entre moderat i molt elevat que posseeixen alguna propietat remarcable sense que la resta de les propietats (especialment les mecàniques o tèrmiques) siguin destacables. Entre aquests plàstics hi ha el poli(metacrilat de metil) (*PMMA*), amb una transparència i una estabilitat a la llum excel·lents; el polietilè d'ultra elevat pes molecular (*PE-UHMW*), amb unes propietats de lliscament i de resistència a l'abradió molt bones; els polímers de la cel·lulosa (*CA*, *CAB*) per la resistència a l'impacte, la transparència i l'adequació per a peces amb injeccions; el poli(clorur de vinidilè) (*PVDC*) per la permeabilitat molt baixa; o els plàstics fluorats (*PTFE*, *FEP*, *PFA*, *E/TFE*), per les propietats lliscants i antiadherents, i les temperatures de servei molt altes i molt baixes.

Aquestes agrupacions responen fonamentalment a tendències en l'aplicació i pretenen ser una ajuda per a una millor comprensió dels plàstics des d'aquest punt de vista. Per tant, poden variar amb el transcurs del temps a causa de factors com l'abaratiment dels preus d'alguns d'ells (com ara el polièster saturat *PET amorf*, que avui dia és un veritable plàstic de consum) o el desenvolupament de noves variants amb prestacions més altes (com és el cas del *PP*, que se situa a la mateixa frontera dels plàstics tècnics).

Taula 14.2 Llista dels plàstics

| Plàstics (ISO 1043-1:1987) | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----|-----------|---------------|
| Símbols | Denominació química | (1) | (2) | (3) |
| ABS | Acrilonitril/butadiè/estirè | C/B | Tp/Am | - / No |
| CA | Acetat de cel·lulosa | N | Tp/Am | - / No |
| CAB | Acetobutirat de cel·lulosa | N | Tp/Am | - / No |
| EP | Resines epoxi | H/C | Te/Am | - / No |
| E/TFE | Etilè/tetrafluoroetilè | C | Tp/Scr | - / 270 |
| FEP | Etilè/propilè perfluorat | C | Tp/Scr | - / 285÷295 |
| MF | Melamina-formaldehid | H | Te/Am | - / No |
| PA 6 | Poliamida 6 | H | Tp/Scr | - / 217÷221 |
| PA 66 | Poliamida 66 | H | Tp/Scr | 90 / 250÷265 |
| PA 11 | Poliamida 11 | H | Tp/Scr | - / 180÷190 |
| PA 12 | Poliamida 12 | H | Tp/Scr | - / 170÷180 |
| PB | Polibutè-1 | H | Tp/Scr | - / 125÷130 |
| PBT | Poli(tereftalat de butilè) | H | Tp/Scr | - / 220÷225 |
| PC | Policarbonat | H | Tp/Am | 150 / No |
| PE-HD | Polietilè d'alta densitat | H | Tp/Scr | -10 / 105÷115 |
| PE-LD | Polietilè de baixa densitat | H | Tp/Scr | -10 / 125÷140 |
| PEEK | Polieteretercetona | C | Tp/Scr | 143 / 334 |
| PES | Polietersulfona | H | Tp/Am | - / No |
| PET | Poli(tereftalat d'etilè) | H | Tp/Scr-Am | 65 / 255÷258 |
| PF | Fenol-formaldehid | H/C | Te/Am | - / No |
| PFA | Copol. de perfluoroalcoxi | C | Tp/Scr | - / 300÷310 |
| PI | Poliimida | H/C | Tp-Te/Am | - / No |
| PMMA | Poli(metacrilat de metil) | H | Tp/Am | 106 / No |
| POM | Polioximetilè (poliacetal) | H/C | Tp/Scr | -13 / 164÷167 |
| PP | Polipropilè | H | Tp/Scr | - / 158÷168 |
| PPE | Poli(èter de fenilè) | B | Tp/Am | 210 / No |
| PPS | Poli(sulfur de fenilè) | H | Tp/Scr | - / 280÷288 |
| PS | Poliestirè | H | Tp/Am | 95 / No |
| PSU | Polisulfona | H | Tp/Am | - / No |
| PTFE | Politetrafluoroetilè | H | Tp/Scr | - / 327 |
| PUR | Poliuretà | C | Tp-Te/Am | - / No |
| PVC-U | Poli(clorur de vinil) (rígid) | H | Tp/Am | - / No |
| PVC-P | Poli(clorur de vinil) (plast.) | H | Tp/Am | 85 / No |
| PVDC | Poli(clorur de vinilidè) | C | Tp/Am | - / No |
| SAN | Estirè/acrilonitril | C | Tp/Am | - / No |
| S/B | Estirè/butadiè | C/B | Tp/Am | - / No |
| UF | Urea-formaldehid | H/C | Te/Am | - / No |
| UP | Polièster insaturat | C | Te/Am | - / No |

(1) B=mescla de polímers; C=copolímer; H=homopolímer; N=natural. (2) am=amorfi; sc=semicristal·lí; te=termostable; tp=termoplàstic. (3) Temperatura de transició vítria (T_g) / Temperatura de fusió de les cristal·lites (T_m) (en °C)

Propietats dels plàstics

Les propietats dels plàstics presenten algunes particularitats respecte a les d'altres materials, especialment pel que fa al seu comportament viscoelàstic i a les limitades temperatures de servei. Això ha fet que es desenvolupessin mètodes d'assaig i normes específics (Taula 14.3, pàg. 80). Les propietats més significatives són les que es descriuen a continuació.

Propietats físiques

Els plàstics, com tots els polímers, tenen una baixa densitat ($0,9 \div 2,2 \text{ Mg/m}^3$) i són mals conductors de la calor i de l'electricitat (bons aïllants tèrmics i elèctrics). Els coeficients de dilatació són elevats (normalment entre $50 \div 250 \mu\text{m/m}\cdot\text{K}$, valors entre 5÷10 vegades superiors als dels me-talls), així com també els calors específics ($850 \div 2700 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, fins a 5 vegades els dels metalls), mentre que la conductivitat tèrmica és molt baixa ($0,15 \div 0,60 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, valors més de 100 vegades inferiors als dels metalls). Les propietats òptiques, elèctriques i de resistència a la deformació per calor es comenten en els apartats següents.

Propietats òptiques

Molts dels plàstics amorfs són transparents, origen d'interessants aplicacions òptiques (lents, làmines o objectes transparents). En aquests casos és interessant de conèixer algunes propietats òptiques (Secció 11.2, vol. 1) com ara la transmissivitat ($E/\text{TFE} \leq 95\%$; $\text{PMMA} \leq 92\%$; $\text{PS} \leq 90\%$; $\text{PC} 80 \div 90\%$; CA , $\text{CAB} \leq 85\%$) i l'índex de refracció.

Propietats elèctriques

La resistivitat (o *resistivitat volumètrica*, ja que en els plàstics també és interessant mesurar la *resistivitat superficial* o conducció entre dos punts d'una mateixa superfície a una certa distància) és molt elevada ($10^9 \div 10^{16} \Omega\cdot\text{m}$, de l'ordre de 10^{20} vegades superior a la dels metalls). Però els plàstics també es caracteritzen per les propietats dielèctriques (Secció 11.2, vol. 1): a) *Constant dielèctrica* (valors compresos entre 2,1÷7); b) *Factor de pèrdues dielèctriques* (els valors més baixos, $<0,001$, per a aplicacions a HF, corresponen als termoplàstics *PTFE/FEP*, *PE-HD/PE-LD*, *PS*, *PP*, *PPE* i *PSU*; els valors intermedis, $0,01 \div 0,001$, als restants polímers de l'estirè, als polièsters saturats, *PC*, *POM*, *PSU*, *PI* i *EP*; finalment, els valors més alts, $>0,01$, poc aptes per a HF, als plàstics de cel·lulosa, *PMMA*, les poliamides, els *PVC* i la resta de termostables); *Rigidesa dielèctrica* (valors compresos entre $10 \div 80 \text{ MV/m}$). Totes aquestes propietats tenen normes d'assaig específiques (Taula 14.3, pàg. 80).

Resistència a la deformació per calor

Diversos assaigs amb les mesures corresponents permeten avaluar les capacitats dels plàstics per a resistir la deformació amb la temperatura, entre ells: a) *Temperatura de termodeflectió* (HDT=*heat deflection tem-perature*): temperatura en què una proveta sotmesa a flexió sota una càrrega especificada (HDT/A a 1,86 MPa; HDT/B a 0,45 MPa; també HDT/C, a 5 MPa, per a plàstics d'altres prestacions), experimenta una deformació superior a un determinat valor. b) *Temperatura d'ablaniment Vicat*; temperatura a la qual un punxó carregat amb una força determinada penetra en el plàstic. Els valors obtinguts en aquests assaigs es relacionen amb les temperatures màximes de servei i són una referència a efectes de control de producció de les peces injectades.

Propietats mecàniques

En la Secció 14.1 («Introducció als polímers») s'ha analitzat el comportament mecànic dels plàstics i elastòmers, així com la naturalesa viscoelàstica dels polímers termoplàstics. En aquest apartat tan sols s'estableixen algunes comparacions entre les característiques mecàniques dels plàstics i les dels metalls. Cal ressenyar que la resistència mecànica dels plàstics és unes 10 vegades inferior a la dels metalls (resistència a la tracció, o límit elàstic, compresa entre 8÷100 MPa), però la seva rigidesa se situa entre 20÷100 vegades per sota (mòdul d'elasticitat a tracció comprès entre 0,20÷4,00 GPa). També cal fer esment que la duresa dels plàstics és molt inferior a la dels metalls, malgrat que en aquest cas és difícil d'establir comparacions a causa dels diferents mètodes d'assaig.

En general, les propietats de l'assaig de tensió-deformació tenen un interès tan sols per al càlcul a sol·licitacions de curta durada. Per al càlcul de sol·licitacions de llarga durada o permanents, cal referir-se als paràmetres de fluència i relaxació (Secció 14.1) i, per als càlculs amb sol·licitacions repetides, als valors de resistència a la fatiga.

El coeficient de fricció dels plàstics (generalment referit al frec amb acer polit) és un paràmetre de gran importància en moltes aplicacions (coixinets, guies, engranatges, lleves) i, en general, cal avaluar-lo conjuntament amb la resistència al desgast. Els plàstics que presenten un coeficient de fricció més baix són: *PTFE* (0,05÷0,25), *PE-UHMW* (0,021), *POM*, *PPS*, poli-amides, polièsters saturats i *PI* (tots ells entre 0,20÷0,30). Quan aquests valors es correlacionen amb la resistència al desgast (Figura 14.6), apareixen com a millor situats el *PE-UHMW* (per a temperatures limitades i rugositats baixes), els polièsters saturats (el desgast millora amb el reforç de fibra sense augmentar el coeficient de fricció), les poliamides i *POM*. Ja amb costos molt més elevats, trobem *PPS* i *PI*, mentre que el *PTFE* s'ha d'acompanyar d'altres materials per a disminuir el desgast.

Propietats tecnològiques

Cost i subministrament

El preu dels plàstics és un dels elements determinants en les seves aplicacions. Fonamentalment, es poden agrupar en tres nivells: *a)* Costos baixos (95÷150 pta/kg: plàstics de consum i aminoplasts); per a productes de fabricació massiva, on influeix positivament la baixa densitat dels materials. *b)* Costos mitjans (150÷500 pta/kg: plàstics tècnics, tant els termoplàstics com els termostables, a excepció dels aminoplasts, més barats; plàstics especials, a excepció dels fluorats), per a fabricació d'elements tècnics o especialitzats. *c)* Costos elevats (>500 pta/kg, plàstics d'altres prestacions i plàstics fluorats), per a peces amb requeriments molt especials.

La major part dels plàstics per a injectar se subministren en forma de granulat (gransa), sovint com a resultat d'un procés de preparació prèvia (incorporació d'additius). Molts dels termostables se subministren també en formes semielaborades (planxa, barres, tubs, perfils) que són transformades en la seva forma definitiva a través de termoconformació o mecanització (alguns termoplàstics de pes molecular molt alt, com el *PE-UHMW* o el *PTFE*, només es presenten en forma de productes semielaborats, ja que s'obtenen per sinterització). Els plàstics termostables s'acostumen a subministrar en forma de masses d'emmotllament o en reactius separats.

Transformació

Els processos de transformació més habituals en els termoplàstics són la injecció i l'extrusió, però també són freqüents la termoconformació, l'emmotllament per bufatge o per injecció-bufate, l'emmotllament rotacional i el calandratge (especialment els *PVC*). La contracció dels plàstics en l'emmotllament per injecció repercuteix negativament en l'exactitud dimensional i en la tendència a l'arqueig de les peces, i la diferent contracció per a diferents materials fa que, en general, un motlle destinat a l'emmotllament d'una peça amb un determinat termoplàstic no sigui adequat per a emmotllar-la amb un altre. Els termoplàstics amorfs (*poliestirens*, *PC*, *PPE*, *cel·lulòsics*, *PMMA*) tenen un percentatge de contracció (<1%) sensiblement inferior al dels termoplàstics semicristal·lins (*PE*, *PP*, *PA*, *POM*, *PET*, *PBT*, *plàstics fluorats*). Alguns termostables de difícil fusió o de molt alta viscositat (*PE-UHMW*, *PTFE*, *PI*) es transformen per processos basats en la sinterització.

Els plàstics termostables presenten una situació diferent. Les resines anomenades d'*alta pressió* (fenoplasts, *PF* i aminoplasts, *UF*, *MF*) reticulen per policondensació tot alliberant vapor d'aigua a elevada temperatura (140÷180 °C); per a evitar la destrucció del material, els processos de transformació (generalment emmotllament per premsatge, emmotllament per

transferència i, en alguns casos, injecció; Secció 14.1) es realitzen a pressions elevades. Altres resines termoplàstiques anomenades *reactives* o de *baixa pressió* (polièsters no saturats, *UP*, epoxis, *EP*, poliuretans, *PUR*) reticulen per poliaddició a partir d'un o més components (reactius) amb iniciadors i altres additius sense donar lloc a productes volàtils; per tant, es poden transformar a baixa (o sense) pressió per mitjà dels processos de colada, de laminació, per premsatge de preimpregnats (o *prepregs*) o per emmotllament d'injecció-reacció o RIM (especialment els *PUR*), alguns dels quals es presten a la fabricació de materials compostos (Secció 14.4).

Temperatures de servei

Les temperatures de servei mínima, màxima contínua i màxima de punta (o de curta durada) són de gran importància tecnològica en l'aplicació dels plàstics, malgrat que no responen a un assaig determinat. S'avaluen a partir de factors com ara la retenció de certes propietats (resistència a la fluència, rigidesa, tenacitat, duresa), el comportament químic o a l'envelliment.

La temperatura de servei màxima contínua permet ordenar els plàstics en cinc nivells: *a*) Temperatures de servei <80°C (*PE*, *PVC*, *PS*, *S/B*, *UF*, *MF*, *PUR*, *CA*, *PMMA*, fonamentalment els plàstics de consum i alguns ter-mostables i altres d'especials); *b*) Temperatures de servei entre 80÷120°C (*PP*, *SAN*, *ABS*, *PET*, *PBT*, *POM*, *PA*, *PPE*, *PF*, *PE-UHMW*, fonamentalment els plàstics tècnics i algunes poliolefines); *c*) Temperatures de servei entre 120÷150°C (*PC*, *UP* i *EP*: el policarbonat i les resines utilitzades en els plàstics reforçats); *d*) Temperatures de servei entre 150÷200°C (*PSU*, *E/TFE*, en el límit inferior de l'interval i les polisulfones *PAS*, *PES*, en el límit superior); *e*) Temperatures de servei superiors a 200°C (*PPS*, *PEEK*, *PI*, *LPC*, *PTFE*, *FEP*, *PFA*: els plàstics d'altres prestacions i els plàstics fluorats, tots ells d'elevat cost). Respecte a les temperatures màximes de curta durada, cal ressenyar els valors relativament alts de les *PA*, i els absoluts de les *PI*.

Les temperatures de servei mínimes, permeten establir tres nivells per als plàstics: *a*) Temperatures de servei mínimes superiors a -20°C (*PP*, en de-terminats casos, *PVC*, *PS*, *SAN*, *S/B*, tots ells plàstics de consum, i *PET*); *b*) Temperatures de servei mínimes entre -20÷-100°C (els *PE*, els plàstics tècnics excepte el *PET*, els èsters de cel·lulosa i el *PMMA*); *c*) Temperatures de servei mínimes inferiors a -100°C (els plàstics d'altres prestacions, el *PE-UHMW* i els plàstics fluorats).

Absorció d'aigua

Els polímers d'estructura polar (*PA*, *PUR*, *CA*, *CAB*) i, en molt menys els d'estructura no polar (*PE*, *PP*, *PS*, *PTFE*), per contacte o per l'acció de la humitat ambient, absorbeixen una determinada quantitat d'aigua (certs additius poden augmentar aquest efecte) fenomen que influeix sobre diver-ses de les

propietats del material, fonamentalment: *a)* Disminueix la resis-tència i la duresa, i augmenta la tenacitat. *b)* Infla les peces i altera les dimensions; *c)* Empitjora les propietats elèctriques; *d)* Pot deteriorar l'aspecte superficial. És important controlar el contingut d'aigua dels plàstics, i la norma ISO 62 estableix la forma de mesurar el percentatge d'absorció d'aigua en 24 hores i fins a la saturació. En les poliamides, per mitjà d'un procés anomenat *condicionament*, es força un determinat contingut d'aigua per a modular determinades propietats.

Comportament a la flama

El comportament dels plàstics a la flama, de gran importància per a avaluar el risc d'incendi en determinades aplicacions (construcció, transports, electrònica), es pot ordenar en cinc nivells: 1) Plàstics fàcilment combustibles (*PS, PMMA, CA*); 2) Plàstics combustibles (*PE, PP, SAN, ABS, PET, PBT, POM, PA, PUR*); 3) Plàstics difícilment combustibles (*EP*); 4) Plàstics autoextingibles (*PVC, PC, PPE, MF, PSU, PI*); 5) Plàstics no combustibles (*PEEK, LPC, PTFE* i fluorats). Una de les normes més freqüents per a l'avaluació del comportament a la flama és l'americana UL94 (Underwriters Laboratories Inc.), relacionada amb la norma IEC 707, que preveu els graus següents: *a)* HB, si després de 30 segons d'acció de la flama sobre una proveta horitzontal, no ha cremat més de 25,4 mm. *b)* V-2, si després d'aplicar 10 segons la flama a l'extrem inferior d'una proveta vertical, la combustió dura menys de 30 segons i la proveta no es crema per complet, però gotegen partícules en flames que encenen el cotó sec. *c)* V-1: igual que l'anterior, però no gotegen partícules en flames. *d)* Grau V-0, les mateixes condicions del cas anterior, però la combustió dura menys de 10 segons. El comportament a la flama de molts plàstics es pot modificar per mitjà d'*additius ignifugants* (retard, inhibició, extinció de la flama).

Resistència química i tensofissuració

La major part de plàstics tenen un comportament químic acceptable, però hi ha productes, entre ells l'aigua o el vapor d'aigua, que ataquen químicament a determinats plàstics (norma ISO 175). En general, la cristal·linitat i l'augment del pes molecular milloren la resistència química, mentre que els additius (plastificants, càrregues) acostumen a empitjorar-la. Molt sovint el pitjor dels efectes es produeix per la combinació de l'atac químic i les tensions internes del material (*tensofissuració*, norma ISO 4600), especialment en determinats plàstics amorfs (*PS, PMMA, SAN, PC*).

Envelliment

Un altre deteriorament prové de diversos factors atmosfèrics (*oxigen de l'aire, humitat*) i ambientals (*radiació solar, temperatura*), que desencadenen una acció combinada que repercuteix en una pèrdua de propietats amb el temps (*envelliment*), aspectes que té en compte la norma ISO 4607.

Taula 14.3 Normes d'assaig dels plàstics

| | ISO | ASTM | DIN |
|---|---------|---------|----------------------|
| <i>Propietats físiques</i> | | | |
| Densitat | 1183 | D 792 | 53479 |
| Índex de refracció | 489 | D 542 | 53491 |
| Transmitància òptica | | D 1003 | 53791 |
| Coefficient de dilatació lineal | | D 696 | 53752 |
| Calor específic | | D 351 | |
| Conductivitat tèrmica | | C 177 | 52612 |
| Temperatura de fusió cristal·lina | 3146 | D 2117 | 53736 |
| Temperatura de termodeflectió | 75 | D 648 | 53461 |
| Temperatura d'ablaniment Vicat | 306 | D 1525 | 53460 |
| Resistència elèctrica (volumètrica/superf.) | IEC 93 | D 257 | 53482 |
| Constant dielèctrica / factor de dissipació | IEC 250 | D 150 | 53481/3 |
| Rigidesa dielèctrica | IEC 249 | D 149 | 53483 |
| Resistència a l'arc | IEC 112 | D 495 | 53484 |
| <i>Propietats mecàniques</i> | | | |
| Propietats de tracció | 527 | D 638 | 53455 ⁽¹⁾ |
| Propietats de compressió | 604 | D 695 | 53454 ⁽¹⁾ |
| Propietats de flexió | 178 | D 790 | 53452 ⁽¹⁾ |
| Mòdul E (tracció, compressió, flexió) | - | - | 53457 |
| Assaig amb el pèndol torsional | 537 | D 2236 | 53445 |
| Duresa a la bola (o Brinell) | 2039-1 | | 53456 |
| Duresa Rockwell | 2039-2 | D 785 | |
| Duresa Shore (A i D) | 868 | D 2240 | 53505 |
| Resistència a l'impacte Charpy | 179 | D 256 | 53453 |
| Resistència a l'impacte Izod | 180 | D 256 | |
| Comportament a fluència | 899 | D 2990 | 53444 |
| Comportament a relaxació | | D 2991 | 53441 |
| Assaig de fatiga | | D 671 | 53442 |
| <i>Propietats tecnològiques</i> | | | |
| Contracció en la transformació | | | 53464 |
| Comportament a temperatura | | D 794 | 53446 |
| Absorció d'aigua | 62 | D 570 | 53495 |
| Comportament a la flama | 1210 | (UL 94) | VDE 0304 |
| Envelliment a la intempèrie | 4607 | C 581 | 53756 |
| Resistència química en líquids | 175 | D 1435 | 53386 |
| Resistència a la fissuració per tensió | 4600 | D 1693 | 53449 |

⁽¹⁾ No hi figura la determinació del mòdul d'elasticitat

Descripció i aplicacions dels plàstics

Plàstics de consum

Polietilens: PE-LD, PE-LLD, PE-HD

Família de termoplàstics semicristal·lins que resulten de la polimerització de l'etilè: *PE-LD* (*low-density*), de cadena molt ramificada, baixa crist·linitat i baixa densitat; *PE-LLD* (*linear low-density*), amb ramificació curta; *PE-HD* (*high-density*), de cadena poc ramificada, alta crist·linitat i alta densitat. El *PE-UHMW* (*ultra-high molecular weight*), de massa molecular superior a $6 \cdot 10^6$, es tracta amb els plàstics especials.

Són els plàstics més barats i alhora els més utilitzats (36% del consum total). Les densitats són baixes ($0,92 \div 0,96 \text{ Mg/m}^3$, menor que la de l'aigua) i ofereixen una gran facilitat de transformació (extrusió, injecció, bufatge, soldadura, termoconformació). Tenen una bona resistència química (àcids i àlcalis, acetones, èsters, lleixius, detergents), que disminueix amb la temperatura, i una baixa absorció d'aigua; tanmateix, són susceptibles de fissuració per tensió (especialment el *PE-LD*) en determinats medis químics (alcohols, àcids orgànics, àlcalis) en presència de detergents. Destaquen també per l'elevada resistència a l'impacte, les excel·lents propietats com a aïllants i dielèctrics (aplicacions per a altes freqüències, HF) i el bon comportament a fricció. Les principals limitacions provenen de la baixa estabilitat dimensional, la poca resistència a la calor (temperatures de servei màximes: *PE-LD*, 70°C ; *PE-HD*, 80°C), la resistència mecànica moderada (a la tracció, a la fluència, més baixes en el *PE-LD* que en el *PE-HD*) i el mòdul d'elasticitat molt baix (consistència flexible en el *PE-LD* i moderadament rígida en el *PE-HD*).

La principal aplicació del *PE-LD* i el *PE-LLD* són pel·lícules (si són primes són transparents), bosses (les de la compra) i sacs destinats a envasos i embalatges (13,5% del consum en pes del total de plàstics); el segueix en importància l'ús per a hivernacles en agricultura, ja que deixa passar molt bé els raigs ultravioletats (3,5% del consum total de plàstics); en proporció molt menor s'utilitza també com a aïllant elèctric i en objectes de poc compromís (joguines, objectes de la llar), fins a totalitzar més del 20% del consum total de plàstics.

La principal aplicació del *PE-HD* és també en envasos i embalatges, però en forma de caixes, cistelles, ampolles i bidons (13% del consum de plàstics). Altres aplicacions significatives són en conduccions (aigua, gas), dipòsits (líquids de fre, gasolina) i objectes de la llar, fins a totalitzar més del 16% del consum de plàstics.

Polipropilè, *PP*

Termoplàstic que resulta de la polimerització del propilè. Se subministra en una gran varietat de graus, en alguns casos reforçat amb fibra de vidre i, en d'altres, com a copolímer d'etilè-propilè.

És un material extraordinàriament versàtil que en algunes aplicacions és a la frontera dels plàstics tècnics. Destaca per ser el plàstic més lleuger ($0,90 \text{ Mg/m}^3$), per tenir el cost més baix després del *PE* i, també, per oferir un bon equilibri entre les propietats tèrmiques (fins a 100°C en continu i 140° en punta) i les mecàniques (lleugerament millors que les del *PE-HD*), amb una bona resistència a l'impacte per sobre de 0°C . També ofereix una excel·lent resistència química (àcids i àlcalis diluïts, acetones, èsters, aigua calenta; però no als carburants ni als hidrocarburs aromàtics). És inodor, insípid i fisiològicament innocu. Resisteix poc la intempèrie (a causa dels raigs UV) i l'envelliment (oxidació a temperatura), i es crema desprenent fums i gotejant. Es transforma fàcilment per injecció, extrusió, bufatge i termoconformació, però, a causa de la seva alta cristal·linitat, té una gran contracció ($1\div 2,5\%$, més acusada com més lent és el refredament), que dóna lloc a peces amb grans deformacions i poca estabilitat dimensional (amb fibra de vidre s'obtenen peces més estables).

Té aplicacions anàlogues a les del *PE-HD* i és especialment adequat quan es requereixen temperatures d'ús més elevades (fins a 100°C o aigua bullent). Una altra característica interessant és que pot resistir un nombre elevat de flexions repetides (caixes amb *efecte frontissa*). En el sector de l'automòbil s'ha imposat el seu ús, ja sigui sense reforçar-lo (paraxocs, passa-rodes, ventilador, dipòsits d'aigua de refrigeració, de líquid de fre, caixa de bateria), ja sigui reforçat (revestiments interiors, calefacció i conduccions d'aire), gràcies a les propietats mecàniques, la resistència química i al baix cost.

Plàstics clorats: *PVC-U*, *PVC-P*

Els poli(clorur de vinil), *PVC*, constitueixen una variada família de termoplàstics amorfs (poden ser transparents), que abasten el 18% del total de consum de plàstics. El poli(clorur de vinil) rígid, *PVC-U*, incorpora, a més d'altres additius, estabilitzants a la calor per a evitar la degradació durant la transformació, i el poli(clorur de vinil) plastificat, *PVC-P*, també incorpora el plastificant. Altres variants de plàstics clorats són el poli(clorur de vinil) d'alt impacte, *PVC-HI*, i el poli(clorur de vinilidè), *PVDC*, utilitzat per a recobriments de gran impermeabilitat.

El *PVC-U* mostra una bona resistència, rigidesa i duresa, però una tenacitat moderada, sobretot per sota de 20°C . El comportament a temperatura és limitat i les propietats elèctriques són moderades. Té una bona resistència química als àcids, bases, hidrocarburs alifàtics, olis minerals i alcohols, però no als

hidrocarburs aromàtics ni clorats, els èsters ni cetones. Amb estabilitzants adequats, resisteix bé els agents atmosfèrics i les radiacions. Sotmès a la flama, és autoextingible, però desprèn gasos nocius. Un factor positiu és el cost baix. El *PVC-P* pot obtenir una ampla gamma de flexibilitats (cal evitar l'emigració posterior del plastificant, que causa fragilitat). La compatibilitat fisiològica (envasos, joguines, vestuari) sols és admissible amb determinats plastificants. És extraordinàriament tenaç i resistent a l'abració, però té poca resistència a l'esquinçament.

PVC-U s'usa en la construcció (canalitzacions d'aigua, perfils de portes i finestres, cobertes) i en altres aplicacions (embalatges, envasos tipus làmina o *blisters*, cintes adhesives, cintes magnètiques, cintes per a gravar amb *empremta blanca*, caixes d'acumuladors). El *PVC-P* ofereix un gran ventall d'aplicacions en la construcció (juntes de portes i finestres, terra sintètic, recobriments de piscines), en la indústria elèctrica (recobriments de cables flexibles, cinta aïllant), del moble (entapissat en pell artificial), del vestit i calçat (soles de sabata, botes d'aigua, guants, bosses de mà i maletes, gabardines, teles recobertes) i en d'altres indústries (mànegues, nines, pilotes). També permet obtenir *PVC* escumat.

Polímers de l'estirè: PS, SAN, S/B, ABS

Les diferents combinacions de copolímers entre l'estirè, el butadiè i l'acrilonitril donen lloc a un conjunt de termoplàstics amorfs que abasten més del 10% del consum total de plàstics: poliestirè, *PS*, homopolímer de l'estirè; *SAN*, copolímer d'estirè i acrilonitril; poliestirè antixoc, *S/B*, copolímer (de vegades mescla) d'estirè i butadiè; *ABS*, copolímer d'acrilonitril, estirè i butadiè (els dos primers són fràgils i transparents, mentre que els dos darrers són opacs i tenaços).

Tots els polímers de l'estirè destaquen per l'elevada resistència i rigidesa, per la baixa absorció d'aigua i la bona estabilitat dimensional, i perquè són innocus als aliments (excepte el *S/B*), però també per unes temperatures de servei màximes molt baixes (sempre per sota dels 85°C), una resistència a l'atac químic moderada (són atacats per dissolvents orgànics, olis i greixos), un mal comportament a la intempèrie (són molt sensibles als raigs UV, a excepció de l'*ABS*) i pel seu mal comportament al foc (cremen fàcilment desprenent fums densos). El poliestirè, *PS*, és un termoplàstic rígid i fràgil, d'una gran transparència (transmissivitat >90%), amb una superfície brillant, que permet un excel·lent acabament superficial. Les propietats com a aïllant elèctric i com a dielèctric són excel·lents (apte per a HF). Es transforma fàcilment per injecció, extrusió i bufatge (la termoconformació és poc utilitzada perquè genera fissures per tensió) i el seu cost és baix. El *SAN*, d'aspecte semblant al *PS* (també transparent), mostra unes propietats mecàniques (resistència, rigidesa, duresa

i resistència al ratllat) i tèrmiques superiors al *PS*, així com un millor comportament químic (resisteix els hidrocarburs alifàtics), però les propietats elèctriques són pitjors (no apte per a HF) i el cost és sensiblement més elevat; abans de la injecció o l'extrusió es recomana assecat el material, i la termoconformació és possible (fissuració per tensió menor). El *poliestirè antixoc*, *S/B*, de propietats elèctriques semblants al *PS*, millora molt la tenacitat sense una disminució important de la resistència i la rigidesa, però en canvi perd la transparència i la brillantor; a més de la injecció i l'extrusió, és molt usada la termoconformació. L'*ABS* mostra una gran resistència a l'impacte (de les més altes entre els plàstics, associada a una atenuació acústica), a més d'una bona resistència, rigidesa, duresa i resistència a l'abradió; les propietats elèctriques i químiques són semblants a les del *SAN*; es transforma sense problemes per injecció, extrusió, bufatge i termoconformació (en aquest darrer cas, cal l'assecat previ del material).

Tots els polímers de l'estirè s'apliquen en objectes que requereixen una bona estabilitat dimensional a temperatura ambient, uns bons acabaments i una bona presència. El *PS* s'utilitza en envasos d'un sol ús (alimentació, farmàcia, cosmètica), en peces emmotllades per a electrodomèstics (botons, polsadors, marcs de televisió, cassets, carcasses d'electrodomèstics), joguines i instruments de dibuix, entre d'altres. El *SAN* té aplicacions anàlogues al *PS* en peces més tècniques. El *S/B* s'aplica sobretot a carcasses i peces termoconformades. L'*ABS* s'aplica a la indústria de l'automoció (tauler de control, guanteres, peces cromades, cascs de motorista), en objectes domèstics (carcasses, cadires, làmpades, joguines de qualitat). L'*ABS* cromat ha substituït en molts casos els metalls fosos en fontaneria i elements decoratius.

Plàstics tècnics (termoplàstics)

Acrilonitril/butadiè/estirè, *ABS*

És el termoplàstic tècnic més utilitzat (més del 2,5% del total de plàstics) després dels polièsters insaturats. S'ha descrit entre els polímers de l'estirè, ja que pertany a aquella família.

Poliamides: PA 6, PA 66, PA 11, PA 12, PA 6-3-T

Formen una nombrosa família de termoplàstics tècnics (també coneguts per l'antic nom comercial *Nylon*, de Du Pont), els més difosos (1,5% dels total de plàstics) després dels polièsters saturats i de l'*ABS*. Hi ha diverses poliamides cristal·lines (per tant, opaques): *PA 6*, ϵ -caprolactama; *PA 66*, hexametildiamina+àcid adípic; *PA 11*, àcid 11-aminoundecanoic; *PA 12*, ω -lauro lactama; i d'altres amorfes (transparent): *PA 6-3-T*, trimetilhexametilè+àcid tereftàlic.

Les poliamides destaquen per l'excel·lent tenacitat i resistència a la fatiga (la

resistència a la ruptura i la rigidesa, més moderades, milloren sensiblement amb fibra de vidre o de carboni), les bones propietats de lliscament (fins i tot en absència de lubricant), la resistència al desgast, el bon comportament químic (dissolvents, carburants, lubricants, aigua bullent) i les excel·lents aptituds per a l'emmotllament (reprodueix de forma precisa el motlle). Les principals limitacions provenen del seu caràcter fortament higroscòpic, que comporta modificacions en les dimensions (estampiment o bloqueig de les peces) i en les propietats mecàniques (baixen la resistència i rigidesa i augmenta la tenacitat), així com del cost relativament alt. Les temperatures de servei són moderades (tanmateix amb puntes molt elevades) i les propietats dielèctriques no permeten la utilització a HF. La poliamida *PA 66* és la de rigidesa, duresa i resistència a l'abradió més elevada i també la de temperatura de servei més alta, mentre que la poliamida *PA 6* és més tenaç, fins i tot a baixes temperatures. Aquestes dues poliamides són fortament higroscòpiques (prop d'un 10% d'absorció d'aigua a la saturació) i, en general, es *condicionen* (absorció accelerada i controlada del grau d'humitat requerit per l'aplicació; les propietats indicades a la Taula 14.4, pàg. 100, corresponen a aquest estat). La poliamida *PA 11* té el millor comportament a impacte de totes les poliamides, mentre que la *PA 12* té la millor resistència a la corrosió per tensió. Les poliamides *PA 11* i *PA 12* tenen un grau d'absorció d'humitat molt menor i, per tant, una estabilitat dimensional més alta, però els costos són més elevats. La poliamida *PA 6-3-T* és amorfa i transparent, alhora que d'una gran duresa, rigidesa, tenacitat i estabilitat dimensional.

Són termoplàstics de gran versatilitat que s'utilitzen en la fabricació de nombroses peces tècniques, especialment aquelles que estan sotmeses a lliscament i abradió: coixinets de fricció, gàbies de rodament, engranatges, lleves, vàlvules, hèlices marines i turbines, carcasses i cascs. La més utilitzada és la *PA 66*, sovint amb càrregues per a millorar les propietats termomecàniques (mica, talc, carbonat de calci), les propietats de lliscament (*PTFE*, *PE-HD*, *MoS₂*, grafit) o fibra per a millorar la resistència i la rigidesa.

Poliacetals, POM

Família de termoplàstics tècnics (també coneguts pel nom comercial *Delrin*, de Du Pont) de la qual existeixen dues versions fonamentals: poli(òxid de metilè), *POM* (homopolímer); copolímer de poli(òxid de metilè) amb altres monòmers, *POM* (copolímer).

Són plàstics que destaquen per un excel·lent conjunt de propietats mecàniques: alt mòdul d'elasticitat, gran duresa superficial, elevada resistència a la fatiga, baix coeficient de fricció i bona resistència al desgast, bona recuperació en fred (efecte molla) i resistència a la fluència. També cal ressenyar les bones propietats elèctriques, la baixa absorció d'humitat i la bona estabilitat

dimensional, la facilitat de transformació (fonamentalment per injecció; es mecanitza bé), els acabaments de gran qualitat que s'aconsegueixen i unes temperatures de servei mitjanes. La resistència a l'atac químic és moderat, però sobretot les limitacions vénen del mal comportament a les radiacions i a la flama i d'un preu moderadament elevat. L'homopolímer *POM* presenta unes propietats mecàniques lleugerament superiors, mentre que el copolímer de *POM* ofereix una millora de l'estabilitat tèrmica i de la resistència química. S'utilitza en peces tècniques d'elevada precisió sotmeses a tensions. Les aplicacions són similars a les de les poliamides (elements lliscants, engranatges, lleves, corrons i pistes de rodaments de plàstic, parts de bomba), però és insubstituïble en peces sotmeses a importants deformacions elàstiques (molles, ecliquetatges).

Policarbonats, PC, PEC

Polièsters de l'àcid carbònic, obtinguts per policondensació a partir del bisfenol-A: policarbonat, *PC*; poliestercarbonat, *PEC*. Són termoplàstics tècnics d'estructura amorfa i transparents. El *PC* sovint es reforça amb fibres curtes. També s'usa en forma de mescles entre les quals la més utilitzada és *PC+ABS*.

El *PC* combina unes característiques mecàniques destacades (excel·lent tenacitat, gran resistència, rígidesa, duresa, baixa fluència) útils en un ample interval de temperatures ($-100\div 130^{\circ}\text{C}$), amb unes elevades propietats òptiques (transmissivitat de la llum entre $85\div 89\%$; amb absorció de part de les radiacions infraroges i ultraviolades; possibilitat d'acoloriment en qualitat de transparent, translúcid o opac). També destaquen les bones propietats elèctriques, l'estabilitat a la intempèrie (és resistent a l'envelliment i a les radiacions UV), la resistència a la flama (és autoextingible) i la innocuïtat respecte als aliments. En el costat negatiu, hi ha la poca resistència química a determinats productes (àlcalis, dissolvents orgànics, aigua i vapor d'aigua per sobre dels 60°C), les precaucions que cal prendre durant la seva transformació (un mal asseccament previ de la gransa pot donar lloc a una baixa tenacitat o a defectes superficials), la tendència a la fissuració per tensió a causa de determinats agents químics (dissolvents aromàtics), la sensibilitat a l'entalla i el cost elevat. Es pot transformar per injecció, extrusió i termoconformació, i també es pot soldar. El *PEC* ofereix una bona resistència mecànica a temperatures relativament elevades ($140\div 180^{\circ}\text{C}$). La mescla *PC+ABS* obté un comportament tèrmic intermediari entre els dos components amb una reducció de cost important. Les qualitats del *PC* li proporcionen nombroses aplicacions: en forma de làmines transparents extruïdes o de peces injectades s'aplica a elements òptics o transparents exposats a impactes (vidres de seguretat, hivernacles, plaques solars, fanals, semàfors, llums d'automòbil, parabrises, ulleres protectores). Altres camps d'aplicacions són: emmagatzemament d'informació (discs compactes,

disquets); indústria elèctrica (aïllants, connectors, interruptors); indústria de l'automòbil (tauler d'instruments, altres elements interiors, deflectors aerodinàmics, cascs de seguretat); electrodomèstics, material d'oficina i peces de màquines (carcasses, xassís, vàlvules, lleves, polsadors, espieres); ampolles i envasos (emmotllament per bufatge) i conduccions, pel seu caràcter innocu.

Polièsters saturats: PET, PBT

Família de polièsters saturats lineals de naturalesa termoplàstica, entre els quals els més utilitzats són: poli(tereftalat d'etilè), *PET*, transparent en estat amorf i opac en estat semicristal·lí; poli(tereftalat de butilè), *PBT*, normalment opac per la seva cristal·linitat més alta. Molt freqüentment es subministren amb reforç de fibra de vidre curta.

El *PET semicristal·lí* ofereix una estabilitat dimensional excel·lent, una duresa, rigidesa i resistència a la fluència elevades, un baix lliscament i una gran resistència a l'abradió, però una resistència mecànica mitjana, una tenacitat baixa i una elevada sensibilitat a l'entalla. Les propietats elèctriques són moderades. El comportament químic i a l'intempèrie són acceptables, però no resisteix l'aigua calenta (> 80°C) ni el vapor d'aigua. Bona estabilitat a la calor fins a temperatures en continu de 100°C (amb puntes que poden arribar a 200°C). Tot i que el cost és molt favorable, una de les principals limitacions és la baixa fluïdesa, que dificulta l'emmotllament per injecció (cal controlar la temperatura per a evitar la degradació del material, i és convenient de preescalfar el motlle). El *PET amorf* té una rigidesa i duresa més baixes, una tenacitat més elevada i una temperatura màxima d'ús més limitada (<60°C): Les formes de transformació més habituals (a més de la injecció) són l'extrusió de làmines, la coextrusió i la injecció-bufatge amb estiratge, seguit d'un tractament tèrmic. El *PBT* té una resistència més baixa, una tenacitat més alta i una temperatura de servei superior (120°C), però sobretot, ofereix unes condicions de transformació molt millors (injecció, extrusió, termoconformació), malgrat el cost sensiblement superior.

El *PET amorf* s'utilitza massivament en la fabricació d'ampolles i envasos d'un sol ús (per aquesta raó, sovint se'l considera un plàstic de consum). El *PET cristal·lí* i el *PBT* (el primer molt més barat que el segon, però més difícil de transformar) s'utilitzen quan són interessants bones propietats al lliscament, resistència a l'abradió i resistència a la temperatura (engranatges, lleves, elements i pistes de rodolament), l'estabilitat dimensional (carcasses, tapes, components d'automòbil) o la resistència a la fluència (nombroses peces en substitució de metalls o materials termostables).

Poli(èters de fenilè), PPE (PPO)

Termoplàstics amorfs, obtinguts per polimerització del 2,6-dimetilfenol, que generalment es comercialitzen formant mesclades (*PPE* modificats) amb altres

termoplàstics (normalment *PPE+PS*, conegut també pel nom comercial *Noryl*, de General Electric Plastics, però també *S/B*, *PA*, *PBT* o *SAN*). Sovint es reforcen amb fibra de vidre o de carboni.

Les bones propietats mecàniques del material pur (rigidesa i duresa elevades, resistència mitjana, bona resistència a l'impacte a baixa temperatura, resistència a la fluència a elevada temperatura i bones propietats per al lliscament i l'abrasió), així com la bona estabilitat dimensional i les excel·lents propietats elèctriques, no es poden aprofitar a causa de les dificultats de transformació, de la gran tendència a l'oxidació (sobretot per damunt de 100°C) i de la gran sensibilitat a la llum. Els *PPE* modificats milloren aquests defectes alhora que s'augmenta la facilitat de transformació (injecció, extrusió, emmotllament per bufatge, soldadura, també metal·lització), tot i que disminueixen en certa mesura les propietats mecàniques. El *PPE+PS* resisteix els àcids diluïts i àlcalis concentrats, alcohol, detergents, olis i greixos (depenent dels additius), l'aigua freda i calenta, però no els àcids concentrats ni els hidrocarburs aromàtics o clorats. El *PPE+PA* té un millor comportament químic. Són innocus (excepte quan duen colorants amb pigments tòxics) i autoextingibles a la flama.

S'apliquen a peces que requereixen una bona estabilitat dimensional i una bona rigidesa a temperatures elevades, especialment en peces de grans superfícies. Els principals camps d'aplicació són els electrodomèstics (carcasses i altres peces per a ràdio, TV, ordinadors, aspiradores, rentadores, rentaplats), l'electrotècnica (endolls, contactors, safates portacables) i l'automoció (calefacció i aire condicionat, tauler de comandament, retrovisors, alerons, proteccions laterals, de rodes).

Plàstics tècnics (termostables)

Resines fenòliques (o fenoplasts), FP

Plàstics termostables que resulten de la policondensació de fenol i formaldehid amb una retícula tridimensional molt compacta (coneguts sovint pel nom comercial *Bakelita*), que s'enfosqueixen per efecte de la llum. Es comercialitzen com a masses d'emmotllament que incorporen la resina, additius i càrregues (serradures, cotó o polpa de paper, per a millorar la resistència a l'impacte; amiant, per a millorar la resistència a la calor; mica, per millorar la resistència elèctrica; grafit, per a millorar el coeficient de fricció), destinades normalment a peces emmotllades que reticulen amb aportació de calor i també en forma de plaques estratificades, fabricades a partir de paper, teixit de cotó o fibra de vidre impregnats.

Destaquen per la rigidesa i la duresa però també per la seva fragilitat (la resistència mecànica i la tenacitat depenen en gran mesura de les càrregues o fibres de reforç, així com també del tipus de mescla que s'hagi realitzat). També cal destacar la

bona resistència a la deformació per calor, amb temperatures de servei sempre superiors a 100°C, que, amb determinades càrregues, poden arribar a puntes de 300°C i que difícilment s'inflamen. Són bons aïllants elèctrics, però les propietats dielèctriques són baixes. Bon comportament químic (dissolvents orgànics, olis, greixos, carburants, benzè i aigua, però no resisteixen els àcids i els àlcalis forts). No són aptes per al contacte amb els aliments.

Les peces emmotllades s'usen en electricitat (endolls, carcasses, tapes, regletes), en peces de màquines (suports, carcasses, peces de bombes) i en electrodomèstics (mànecs i nanses, cendrers); els laminats s'usen en plaques per a circuits impresos, engranatges i coixinets lubricats per aigua.

Resines amíniques (o aminoplasts), UF, MF

Plàstics termostables que resulten de la policondensació d'urea i formal-dehid (*UF*) o de melamina i formaldehid (*MF*), amb una retícula tridimensional molt compacte. Poden acolorir-se amb colors clars, ja que no s'enfosqueixen amb la llum. Es comercialitzen com a masses d'emmotllament de *MF*, *UF*, *MF+UF*, que incorporen la resina, additius i determinades càrregues (sobretot cel·lulosa i serradures) destinades normalment a peces injectades o premsades que reticulen amb aportació de calor i, també, en forma d'estratificats a partir de paper o teixits impregnats.

Les resines amíniques són rígides, dures i fràgils, i les seves característiques mecàniques depenen en gran mesura dels materials de les càrregues (l'addició de termoplàstics millora la tenacitat). La resina *MF* és apta per al contacte amb aliments i té millor resistència a la temperatura, mentre que la resina *UF* no és recomanable per a usos alimentaris ni adequada per al contacte amb aigua bullent. Resisteixen els dissolvents orgànics, els olis i la gasolina, però no els àcids ni els àlcalis concentrats.

S'utilitzen per a material elèctric de colors clars (endolls, làmpedes) i la resina *UF* també s'utilitza per a objectes de cuina (vaixelles, nanses).

Polièsters insaturats, UP

Resines termostables obtingudes per copolimerització d'àcids dicarboxílics insaturats amb dialcohols, que donen lloc a una reticulació tridimensional molt tupida. Normalment s'utilitzen amb diferents tipus de càrrega o reforç (fibra curta o llarga).

Les propietats de les resines *UP* depenen en gran mesura de la composició i de les condicions de transformació. Les resines de colada (sense reforçar) són moderadament resistents, rígides i tenaces, però amb reforç de fibra de vidre (és important l'adherència entre fibra i matriu) s'obtenen augments substancials d'aquestes característiques (semblants a les dels metalls lleugers), alhora que es redueixen la contracció i la fluència. Les resines *UP* resisteixen els àcids, els

hidrocarburs alifàtics, els carburants, els olis i els greixos, l'aigua i les solucions salines, però no una llarga immersió en aigua calenta, ni els àlcalis, els alcohols o altres dissolvents orgànics. Mantenen la tenacitat a baixa temperatura i les temperatures de servei en continu se situen entre 100÷140°C, amb puntes que en alguns casos arri-ben als 220°C. Sotmeses a la flama, cremen, però es poden ignifugar. Les resines *UP* poden reticular en fred (temperatura ambient) o en calent (80÷120°C); també hi ha resines que reticulen amb la radiació UV (calen làmpades especials) i, aleshores, el temps de permanència abans de l'emmotllament pot ser pràcticament il·limitat.

Les resines *UP* es comercialitzen en forma de resines de colada, masses d'emmotllament o preimpregnats. Com a resines de colada es fabriquen blocs transparents amb inclusions d'objectes o petits animals, encapsulats de components electrònics, aïlladors, botons. Com a masses d'emmotllament (resina d'*UP* amb fibra curta) s'utilitzen en peces de bones característiques mecàniques i també de bones propietats elèctriques (regletes de borns, portalàmpades, nuclis de bobina). Com a laminats (resina d'*UP* amb fibra llarga en forma de *mat* o de teixits) es realitzen grans elements amb funcions estructurals com ara dipòsits i contenidors, embarcacions, carrosseries d'automòbil, peces de recobriment de camions i ferrocarril.

Resines epoxi, EP

Resines termostables que resulten de la poliaddició de dos reactius: un polihidro-xilat (normalment bisfenol A) amb la epiclorhidrina. Normalment reticulen sense temperatura ni pressió (es poden establir formulacions per a modificar la fluïdesa dels reactius i la temperatura de reticulació).

Tenen unes característiques mecàniques notables (gran resistència, rigidesa i tenacitat notables, bona duresa i resistència a l'abrasió), que poden augmentar substancialment amb reforç de fibres, fins a acostar-se a les dels acers. També són destacables la seva adherència i la bona estabilitat dimensional. Les temperatures de servei són mitjanes (100÷130°C) i difícilment s'inflamen. Tenen excel·lents propietats elèctriques. La resistència química és mitjana (no resisteixen els àcids ni els àlcalis concentrats), la resistència a la intempèrie és bona però, la resistència a l'aigua bullent és limitada.

Es transformen per procediments semblants als polièsters insaturats, *UP*, i s'usen fonamentalment com a plàstics amb reforç estructural (components d'aviació: parts del fusellatge d'avions, pales de rotors d'helicòpter; equip esportiu d'alta competició: esquís, raquetes de tennis, canyes de pescar, pèrtigues); com a resines de colada (sense fibra de reforç: encapsulats i peces elèctriques; amb fibra de reforç: peces tècniques, bases de circuits impresos). També s'usa com a adhesiu per a metalls i plàstics (*Araldit* és un epoxi de la casa Ciba) i és la base de pintures i recobriments.

Poliuretans (termostables), PUR

Els poliuretans formen una àmplia família de polímers que van des de les resines termostables, passant per elastòmers termoplàstics fins a elastòmers termostables. Les resines termostables són el resultat de la reticulació de diisocianats amb poliols (*Vulkollan* és un nom comercial de Bayer).

Les principals característiques són: bona resistència i rigidesa mecànica, una reticulació ràpida i, a baixa temperatura (per sota de 0°C), una con-tracció baixa (amb petits efectes sobre els inserts), moderada resistència química (àcids i bases dèbils, olis i greixos, hidrocarburs alifàtics, però no als àcids i bases fortes ni als hidrocarburs aromàtics), una bona resistència a l'envelliment, però mal comportament a la flama.

En forma de resina s'utilitza per a alguns elements electrotècnics sotmesos a un treball dur, però la major part d'aplicacions es relacionen amb la fabricació d'escumes mitjançant emmotllament per injecció-reacció (RIM).

Plàstics d'altres prestacions

Polisulfones: PSU, PES, PAS

Família de termoplàstics amorfs (transparents o opacs), obtinguts per policondensació de clorosulfones aromàtiques amb difenols, que presenta les variants següents: polisulfona, *PSU* (la més utilitzada); polietersulfona, *PES*; poliarilsulfona, *PAS*. Sovint es reforcen amb fibres.

Mostren una elevada resistència, rigidesa, duresa i una baixa tendència a la fluència sota càrrega (fins i tot a temperatures elevades), però la resistència a l'impacte amb entalla és moderada. La dilatació tèrmica és petita i tenen una bona estabilitat dimensional. Són bons aïllants elèctrics (*PSU* millor que els altres) i ofereixen bones propietats dielèctriques, que es mantenen amb la temperatura. Es comporten bé davant dels àcids, àlcalis, alcohols, olis i greixos (el *PES* i el *PAS*, també amb els hidrocarburs alifàtics i carburants) i són innocus, però no resisteixen els hidrocarburs aromàtics i halogenats, els èsters i les cetones, ni el contacte continu amb aigua calenta. Tenen un bon comportament a la intempèrie, mostren una gran resistència al foc i generen pocs fums. Es transformen per injecció, extrusió i termoconformació, a més de mecanització i soldadura per ultra-sons. Les principals diferències entre ells són les temperatures màximes de servei i els costos creixents: *PSU*, entre 150÷180°C (la menys cara); *PES*, entre 180÷200°C; *PAS*, entre 175÷250°C (la més cara).

S'utilitzen per a peces tècniques en els camps de l'electricitat i l'electrònica (connectors, nuclis de bobina, suports de làmpades, caixes d'instruments, aïllants, condensadors, circuits impresos) i, també, en peces per a l'auto-mòbil (fins i tot en el motor i caixes de canvis) o l'aviació sotmeses a importants esforços, en les quals es requereix una gran estabilitat a temperatures elevades. També s'utilitza en aplicacions òptiques i mèdiques.

Poli(sulfur de fenilè), PPS

Termoplàstic semicristal·lí, obtingut a partir de la policondensació del p-diclorbenzè, que pràcticament sempre se subministra amb càrregues minerals, reforç de fibra o amb addicions d'altres plàstics per a evitar el despreniment de gasos sulfurosos a elevades temperatures.

Té una resistència, rigidesa, duresa i comportament a fluència elevats, fins i tot a temperatures elevades, però la seva resistència a l'impacte amb entalla és baixa (si no porta un reforç de fibra). El ventall de temperatures de servei és molt ample (des de $-170\div-200^{\circ}\text{C}$ fins a $200\div230^{\circ}\text{C}$ en continu, amb puntes de 300°C) i té molt bones propietats de lliscament. També cal destacar l'estabilitat dimensional, la bona resistència química (àcids i àlcalis, hidrocarburs alifàtics, aromàtics i halogenats, alcohols, greixos i aigua, però no els olis i determinats àcids), la resistència a l'envelliment, a les radiacions i el bon comportament al foc (autoextingible i, en tot cas, genera pocs fums). Es transforma per injecció amb motlle calent, per premsatge de masses d'emmotllament SMC, per sinterització o per projecció (per a formar revestiments), i també es pot mecanitzar, polir i soldar per ultrasons.

Les principals aplicacions són en els camps de l'electricitat i l'electrònica (carcasses, xips, làmines de condensadors, plaques de circuits impresos; suporta la soldadura d'onada d'estany fins a 260°C), aparells de fluids (bombes, vàlvules, hèlices, elements d'estanqueïtat) i automoció (peces sol·licitades mecànicament del compartiment motor).

Poliariletercetones, PEK, PEEK

Família de termoplàstics d'altres prestacions, que resulten de la combinació d'èters (E), cetones (K) i grups fenil o difenil (P). Les més conegudes són: polietercetona, *PEK*; polieteretercetona, *PEEK* (es comercialitza normalment reforçada amb fibra de vidre o carboni).

Tenen unes bones propietats mecàniques (resistència a la tracció i flexió, a la fatiga, rigidesa, duresa i tenacitat) que mantenen valors acceptables fins a temperatures de $240\div250^{\circ}\text{C}$. Mostren una gran resistència a l'impacte a baixes temperatures i una bona resistència a la fluència a altes temperatures. Bones propietats lliscants i al desgast. Resisteixen els àcids, àlcalis, la major part dels dissolvents orgànics i el vapor d'aigua fins als 180°C , però el seu comportament als oxidants i a les radiacions UV és baix. Són molt difícilment inflamables i pràcticament no produeixen fums. Es transformen per injecció en un motlle calent i el cost és elevat.

Tenen un ampli espectre d'aplicacions, sempre especialitzades: peces tècniques de màquines (rodes dentades, gàbies de rodaments, peces de bombes, carcasses), elements elèctrics, elements sotmesos a aigua calenta, pròtesis.

També s'usa per a revestiments d'elevades prestacions.

Poliimides, PI

Família de plàstics d'altres prestacions, a mig camí entre els termoplàstics i els termostables. Entre les seves variants hi ha: Poliarilimides, *PI*; Poliamidamides, *PAI*; polieterimides, *PEI*.

La poliimida, *PI*, té una resistència i una rigidesa elevades i un ampli ventall de temperatures de servei (entre $-240\div 250^{\circ}\text{C}$, amb puntes de fins a 450°C ; la *PAI* admet temperatures de servei encara superiors), però una tenacitat baixa. Destaca el bon comportament a lliscament (millora amb el grafit i el MoS_2) i una bona resistència a l'abradió, especialment a elevades temperatures. Té bones propietats elèctriques i dielèctriques. Resisteix els dissolvents alifàtics i aromàtics i els àcids diluïts, però no els àcids i els àlcalis concentrats, ni l'aigua bullent ni el vapor d'aigua. S'autoextingeix a la flama, però no és adequat per a llargues exposicions a la intempèrie. A causa de la dificultat de fondre el material, la *PI* tan sols es transforma per mitjà de la sinterització o es mecanitza a partir de productes semielaborats, mentre que la *PEI* admet la injecció.

Les poliimides s'utilitzen en peces que requereixin alhora una bona resistència mecànica i bones propietats lliscants (rodes dentades, coixinets, anells de pistó, seients de vàlvula), en aplicacions elèctriques i electròniques que treballen a temperatura elevada (connectors, nuclis de bobina, circuits impresos) i en aplicacions aeronàutiques (resistència a les radiacions).

Plàstics de cristall líquid, LCP

Són termoplàstics de tipus polièster o poliester carbonats molt aromàtics en què les macromolècules, en ser transformades en estat fos, s'orienten en una direcció determinada a mode de fibres (efecte d'*autoreforç*), de manera que s'obtenen característiques mecàniques extraordinàriament elevades en aquesta orientació. En el disseny cal tenir en compte l'anisotropia (resistència menor en direccions diferents) que sovint es pal·lia per mitjà de la polimerització amb molècules més flexibles o amb l'addició de càrregues o reforços.

Tenen característiques mecàniques elevades (resistència, rigidesa, tenacitat) i una elevada resistència a la deformació per calor (temperatures de servei entre $185\div 250^{\circ}\text{C}$), un comportament químic excel·lent (fins i tot a temperatures molt elevades) i a la intempèrie, són difícilment inflamables i la tendència a la fissuració per tensions és pràcticament nul·la.

Malgrat la seva gran resistència, els motius de l'aplicació dels plàstics de cristall líquid, *LCP*, són l'estabilitat dimensional (baixa dilatació, gran rigidesa i parets fines) i la resistència a l'agressió química i al foc. Té aplicacions molt especialitzades i de baix consum en la indústria elèctrica i electrònica (substrates de xips i circuits impresos, nuclis de bobina, encapsulaments, connectors per a fibra òptica), en l'automoció, l'aviació o l'aeronàutica.

Plàstics especials

Polietilè de pes molecular ultra elevat, PE-UHMW

Variante del *PE-HD* (vegeu «Plàstics de consum», pàg. 81) de cadena extraordinàriament llarga (pes molecular $>10^6$), que proporciona un augment important de la tenacitat, de la resistència a la calor i de l'estabilitat química i, sobretot, una millora del coeficient de fricció i un extraordinari augment de la resistència al desgast, però també repercuteix negativament en l'aptitud per a la transformació, ja que, com que no mostra un punt de fusió clar, obliga a la fabricació de productes semielaborats mitjançant procediments de sinterització, amb la corresponent repercussió en el cost.

Les aplicacions es relacionen especialment en les magnífiques propietats de lliscament: coixinets, guies, rodes dentades, revestiments antidesgast.

Plàstics cel·lulòsics, CA, CAB

Família de termoplàstics fabricats a partir de l'esterificació de la cel·lulosa (un dels pocs productes naturals usats en la fabricació de plàstics), entre els quals hi ha: acetat de cel·lulosa, *CA*; acetobutirat de cel·lulosa, *CAB*. La *celofana* és una pel·lícula transparent de cel·lulosa regenerada.

Tenen una resistència i una rigidesa moderades, una bona tenacitat i una baixa duresa, però la seva gran elasticitat superficial produeix un efecte d'autopoliment (poc sensible, doncs, a les ratllades). El fet que aquests plàstics cedeixin a les tensions permet la incorporació d'inserts metàl·lics sense perill de fissures. Destaquen per la gran transparència (90%) i la brillantor. Resisteixen bé la gasolina, els dissolvents orgànics i la suor de les mans, però malament l'aigua calenta, els àcids i els àlcals i no són adequats per a aliments. El *CAB* té una resistència mecànica inferior, però és adequat per a aplicacions a la intempèrie. Les temperatures de servei són molt baixes i, en contacte amb el foc, mantenen la flama.

S'utilitzen especialment en aplicacions que requereixen transparència (pilots d'automòbil, plafons publicitaris, articles de dibuix), el contacte humà (botoneres, manetes, volants, determinades carcasses, montures d'ulleres) o peces amb inserts.

Poli(metacrilat de metil), PMMA

Termoplàstic que resulta de la polimerització del metacrilat de metil (també conegut per *plexiglas*).

Rígid i molt dur (no es ratlla amb facilitat), de resistència mitjana i resistència a l'impacte moderada (n'hi ha versions amb la tenacitat millorada). Destaca per la seva gran transparència incolora (transmet el 92% de la llum) i brillantor, i es pot tenyir amb diferents colors perquè adopti aspectes translúcids i opacs.

Bona resistència química (però no als dissolvents polars ni als àcids concentrats), excel·lent resistència a la intempèrie (radiacions UV) i a l'envel·liment, però tendència a la tensofissuració. Les temperatures de servei són moderades i crema amb una flama brillant.

Les aplicacions giren a l'entorn de les seves bones propietats òptiques junt amb la duresa, la rigidesa i la resistència a la intempèrie: làmines transparents, fanals, lents, rètols, envasos transparents, instruments de dibuix.

Plàstics fluorats: PTFE, FEP, PFA, E/TFE

Formen una llarga família de termoplàstics (coneguts també pel nom comercial de *Teflon* de Du Pont) entre els quals el més conegut és: polite-trafluoroetilè, *PTFE*. Altres membres destacats són: copolímer de tetrafluoroetilè/hexafluoropropilè (o *etilè/propilè perfluorat*), *FEP*; copolímer de perfluoroalcoxi, *PFA*; copolímer d'etilè/tetrafluoroetilè, *E/TFE*.

El *PTFE* i, en general, els polímers amb un contingut elevat de fluor presenten un interessant conjunt de propietats: una extraordinària inèrcia química, una baixíssima absorció d'aigua, una gran estabilitat a la intempèrie i són pràcticament incombustibles. Les propietats lliscants i antiadherents són excel·lents (les millors entre tots els plàstics), així com les qualitats d'aïllant i de dielèctric. Poden usar-se en un ampli ventall de temperatures de servei (dels més amplis entre tots els plàstics). Els factors que en limiten l'ús són les baixes característiques mecàniques (resistència, rigidesa, duresa, resistència a l'abració), els elevats costos i les dificultats de transformació (l'elevada viscositat del *PTFE* no permet l'extrusió, la injecció, la termoconformació ni la soldadura; la transformació es realitza per sinterització, mecanització o en forma recobriments). El *FEP*, més flexible que el *PTFE*, a costa d'una reducció de les propietats tèrmiques i químiques, es pot transformar com un termoplàstic (extrusió, injecció). El *PFA*, més rígid que el *PTFE*, aconsegueix les qualitats tèrmiques i químiques d'aquest amb les capacitats de transformació del *PFE*. Finalment, el copolímer *E/TFE*, el més rígid de tots, es comporta com un veritable termoplàstic (semblant al *PE*), però amb una temperatura de servei màxima sensiblement més baixa que la del *PTFE*.

Les principals aplicacions del *PTFE* i els altres plàstics fluorats es relacionen amb les seves propietats: *a*) Coixinets, guies, juntes (per la baixa fricció; es reforça amb fibra de vidre, grafit o bronze per a reduir la dilatació, millorar la conductivitat tèrmica i disminuir l'abració); *b*) Bombes, vàlvules, conductes per a la indústria química (per la inalterabilitat i resistència a la calor); *c*) Recobriments de paelles, de planxes elèctriques (per la inalterabilitat química, les propietats antiadhesives i les elevades temperatures de servei); *d*) Cinta aïllant, recobriments de cables i altres aplicacions elèctriques (per les seves qualitats d'aïllament i dielèctriques).

Taula 14.4 Plàstics

| Plàstics de consum (termoplàstics) | | | | | | |
|---|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|---|--|------------------|
| Grup de plàstic | Poliolefines | | | Plàstics clorats | | |
| Denominació (ISO, ASTM, DIN) | PE-LD Polietilè baixa densitat | PE-HD Polietilè alta densitat | PP Polipropilè | PVC-U Poli(clorur de vinil) (rígid) | PVC-P Poli(clorur de vinil) (plastif.) | |
| Propietats físiques | Unitats | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | 0,91÷0,93 | 0,94÷0,96 | 0,90÷0,91 | 1,38÷1,40 | 1,20÷1,35 |
| Pp. òptiques (transm.) | % | Trp | Opac | Trp/Opac | Trp/Opac | Trp/Opac |
| Coefficient dilatació | µm/m·K | 250 | 200 | 160÷200 | 70÷80 | 150÷210 |
| Calor específic | J/kg·K | 2100÷2500 | 2100÷2700 | 2000 | 850÷900 | 900÷1800 |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | 0,32÷0,40 | 0,38÷0,51 | 0,17÷0,22 | 0,14÷0,17 | 0,15 |
| Temp. termodeflectió ⁽¹⁾ | °C | 35 | 50 | 45/120 | 60÷82 | - |
| Resistivitat volumètrica | Ω·m | >10 ¹⁵ | >10 ¹⁵ | 10 ¹⁵ ÷10 ¹⁶ | >10 ¹³ | >10 ⁹ |
| Constant dielèctrica | - | 2,29/2,28 | 2,35/2,34 | 2,3/2,6 | 3,5/3,0 | 4÷8/4÷4,5 |
| Fact. pèrdues dielèctr. | 10 ⁻⁴ | 1,5/0,8 | 2,4/2,0 | 4,0/5,0 | 110/150 | 800/1200 |
| Rigidesa dielèctrica ⁽²⁾ | MV/m | 80÷100 | 80÷100 | 50÷75 | 35÷70 | 25÷35 |
| Propietats mecàniques | Unitats | | | | | |
| Resistència tracció | MPa | 8÷23 | 18÷35 | 21÷37 | 50÷75 | 10÷25 |
| Allarg. límit elàstic | % | 15÷20 | 10÷12 | 10÷16 | 3÷7 | - |
| Allargament a ruptura | % | 300÷1000 | 100÷1000 | 20÷800 | 10÷50 | 170÷400 |
| Mòdul elasticitat (trac) | GPa | 0,20÷0,50 | 0,70÷1,40 | 1,10÷1,30 | 1,0÷3,5 | - |
| Mòdul fluència (10 ³ h) ⁽³⁾ | GPa | 0,06/- | 0,50/- | 0,46/0,24 | 2,40/- | - |
| Coefficient de Poisson | - | - | - | - | 0,38 | - |
| Impacte Charpy | kJ/m ² | no es trenca | no es trenca | no es trenca | n.e.t.÷>20 | no es trenca |
| (amb entalla) | kJ/m ² | no es trenca | no es trenca | 3÷17 | 2÷50 | no es trenca |
| Resistència fatiga 10 ⁷ | MPa | - | 16÷20 | 24 | - | - |
| Duresa a la bola | MPa | 13÷20 | 40÷65 | 36÷70 | 75÷155 | 50÷95 ShA |
| Coefficient de fricció | - | 0,50÷0,60 | 0,25÷0,30 | 0,25÷0,30 | - | - |
| Propietats tecnològiques | Unitats | | | | | |
| Cost | pta/kg | 95 | 95 | 100 | 120 | 120 |
| Transformació | pàg.63 | Ex/EB/Ij | Ij/Ex/EB | Ij/Ex/Tc | Ex/Ij | Cal/Ex |
| Contracció | % | 1,0÷3,0 | 1,5÷3,0 | 1,3÷2,5 | 0,4÷0,8 | 0,7÷3,0 |
| Temp. servei (mínima) | °C | -50 | -50 | 0÷-30 | -5 | 0÷-20 |
| (màxima contínua) | °C | 60÷75 | 70÷80 | 100 | 65÷85 | 50÷55 |
| (màxima punta) | °C | 80÷90 | 90÷120 | 140 | 75÷100 | 55÷65 |
| Absorció d'aigua (24 h) | % | <0,01 | <0,01 | 0,01÷0,03 | 0,04÷0,4 | 0,15÷0,75 |
| Comport. a la flama | [1÷5] ⁽⁴⁾ | [2] HB | [2] HB | [2] HB | [4] | [3÷4] |
| Resistència desgast | [1÷5] | [3] | [4] | [4] | - | - |
| intempèrie | [1÷5] | [4] | [4] | [3] | [5] | - |
| àcids | [1÷5] | [4] | [4] | [5] | [4÷5] | [2] |
| àlcals | [1÷5] | [5] | [5] | [5] | [5] | [4] |
| dissolvents orgànics | [1÷5] | [4] | [4] | [3÷4] | [3] | [3] |

⁽¹⁾ HDT/A / HDT/B; ⁽²⁾ 50 Hz / 10⁶ Hz; ⁽³⁾ (a partir de les corbes isòcronas): 20 °C / 60 °C; ⁽⁴⁾ Els nivells representen: [1] Fàcilment combustible; [2] Combustible; [3] Difícilment combustible; [4] Autoextingible; [5] Incombustible; les altres

Plàstics tècnics (termoplàstics)

| Polímers de l'estirè | | | | Polièsters saturats | | Poliacetals | |
|--|--|--|--|--|---|--|--|
| PS Poliestirè | SAN Estirè/acri- nitril | S/B Estirè/ butadiè | ABS Acronitril/ butadiè/estirè | PET Poli(tereftalat d'etilè) | PBT Poli(tereftalat de butilè) | POM Poli(òxid de metilè) (hom.) | POM Poli(òxid de metilè) (cop.) |
| 1,05 Trp (>90) 70 1300 0,17 80÷110 >10 ¹⁴ 2,5/2,5 2/2 30÷70 | 1,08 Trp 80 1300 0,18 90÷104 >10 ¹⁴ 3,0/2,8 70/90 40÷50 | 1,03÷1,05 Opac 70 1300 0,17 82÷104 >10 ¹⁴ 2,4/4,4 12/12 30÷60 | 1,03÷1,06 Opac 60÷110 1500 0,18 80/120 >10 ¹³ 2,4/4,4 50/100 35÷50 | 1,37 Trp/Opac 70 1200 0,24 80 2·10 ¹⁴ 4,0/4,0 20/20 42 | 1,31 Opac 60 1350 0,21 65/190 5·10 ¹⁴ 3,0/3,0 20/20 42 | 1,42 Opac 90 1460 0,23 124/170 >10 ¹³ 3,7/3,7 50/50 38÷50 | 1,41 Opac 110 1460 0,31 110/160 >10 ¹³ 3,7/3,7 50/50 38÷50 |
| 45÷65 - 3÷4 3,20 2,10/0,75 0,33 5÷20 2÷2,5 19 120÷130 0,32 | 75 - 5 3,60 2,65/- - 8÷20 2÷3 27 130÷140 0,33 | 26÷38 - 25÷60 1,80÷2,50 - - 10÷80 5÷13 18÷20 80÷130 0,50 | 32÷45 2,5 15÷30 1,90÷2,70 1,70/0,80 0,50 70÷No tr 7÷20 13÷21 80÷120 0,35 | 47 4,0 70 2,80 2,70/- - No trenca 4 30 95÷150 0,25 | 40 4,0 200 2,60 1,30/0,32 - No trenca 4 28 120÷130 0,25 | 68÷70 8÷12 15÷70 3,00÷3,60 1,70/0,85 0,35 No trenca 3,5 26÷30 160÷170 0,21 | 62÷68 8÷14 25÷75 2,80÷3,10 1,10/0,65 0,35 No trenca 6÷9 26÷30 150÷160 0,21 |
| 145 Ij 0,4÷0,7 -10 50÷70 60÷80 0,03÷0,1 [1] HB [2] [2] [3] [5] [1] | 230 Ij/Ex 0,4÷0,6 -20 85 95 0,2÷0,3 [2] HB [1] [2] [3] [5] [1÷2] | - Ij/Ex/Tc 0,4÷0,7 -20 50÷70 60÷80 0,05÷0,06 [2] HB - [3] [5] [1÷2] | 230 Ij/Tc 0,4÷0,7 -40 75÷85 85÷100 0,2÷0,45 [2] HB - [3] [5] [1÷2] | 175 EB/Tj/Ex 1,6÷2,0 -20 100 200 0,30 [2] HB [1] [2] [3] [3] [3] | 450 Ij/Ex 1,0÷2,2 -30 120 165 0,08 [2] HB [1] [2] [3] [3] [3] | 335 Ij/Mec 1,5÷2,5 -60 90÷110 110÷140 0,22÷0,25 [2] HB [4] [2] [3] [5] [4÷5] | 335 Ij/Mec 1,5÷2,5 -60 90÷110 110÷140 0,22÷0,25 [2] HB [3] [2] [3] [5] [4÷5] |

indicacions corresponen a la norma americana UL-94

Taula 14.4 Plàstics (continuació)

Plàstics tècnics (termoplàstics) (continuació)

| Grups de plàstics | | Poliamides | | | | |
|---|----------------------|----------------------------|--|---------------------------------------|------------------------------|--|
| Denominació (ISO, ASTM, DIN) | | PA 6 ε-caprolactama | PA 66 Hexametilendi- amina+a.adípica | PA 11 Acid 11-ami- noundecanoic | PA 12 w-lauro- lactama | PA 6-3-T trimetilhexa- metilè+a.teref. |
| Propietats físiques | Unitats | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | 1,13 | 1,14 | 1,04 | 1,02 | 1,12 |
| Pp. òptiques (transm.) | % | Trl/Opac | Trl/Opac | Trl/Opac | Trl/Opac | Trp |
| Coefficient dilatació | µm/m·K | 80 | 80 | 130 | 110 | 80 |
| Calor específic | J/kg·K | 1700 | 1700 | 1260 | 1500 | 1600 |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | 0,23 | 0,27 | 0,23 | 0,30 | 0,23 |
| Temp. termodeflectió ⁽¹⁾ | °C | 80/190 | 105/200 | 130/150 | 140/150 | 140/180 |
| Resistivitat volumètrica | Ω·m | >10 ¹⁰ | >10 ¹⁰ | >10 ¹⁵ | >10 ¹¹ | >10 ⁹ |
| Constant dielèctrica | - | 3,7 | 3,8/3,4 | 3÷7/3,5 | 4,2/3,1 | 4,0/3,0 |
| Fact. pèrdues dielèctr. | 10 ⁻⁴ | 100/300 | 1400/800 | 600/400 | 400/300 | 300/400 |
| Rigidesa dielèctrica ⁽²⁾ | MV/m | 40 | 60 | 43 | 45 | 35 |
| Propietats mecàniques | Unitats | | | | | |
| Resistència tracció | MPa | 80 _(sec) /40 | 85 _(sec) /65 | 55 | 55÷65 | 70÷85 |
| Allarg. límit elàstic | % | 6 _(sec) /20 | 5 _(sec) /18 | 10 _(sec) /22 | 8 _(sec) ÷27 | 9÷10 |
| Allargament a ruptura | % | 200÷300 | 150÷300 | 500 | 300 | 70÷150 |
| Mòdul elasticitat (trac) | GPa | 3,10 _(sec) /1,4 | 3,30 _(sec) /2,0 | 0,80÷1,30 | 1,20÷1,60 | 2,90÷3,00 |
| Mòdul fluència (10 ³ h) ⁽³⁾ | GPa | 0,55/0,28 | 0,70/0,35 | 0,45/- | 0,58/0,20 | 1,35/1,20 ⁽⁶⁾ |
| Coefficient de Poisson | - | 0,30 | 0,39 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| Impacte Charpy | kJ/m ² | no es trenca | no es trenca | no es trenca | no es trenca | no es trenca |
| (amb entalla) | kJ/m ² | 3÷6 | 2÷3 | 6÷15 | 6÷15 | 13 |
| Resistència fatiga 10 ⁷ | MPa | 19÷32 | 21÷34 | - | - | 27 |
| Duresa a la bola | MPa | 160 _(sec) /60 | 170 _(sec) /80 | 75÷90 | 75÷100 | 140÷170 |
| Coefficient de fricció | - | 0,30 | 0,28 | 0,32 | 0,32 | 0,32 |
| Propietats tecnològiques | Unitats | | | | | |
| Cost | pta/kg | 350 | 325 | - | 500 | 650 |
| Transformació | pàg 63 | Ij/Mec | Ij/Mec | Ij/Mec | Ij/Mec | Ij |
| Contracció | % | 0,8÷2,5 | 0,8÷2,5 | 1,0÷2,0 | 1,0÷2,0 | 0,5÷0,6 |
| Temp. servei (mínima) | °C | -30 | -30 | -70 | -70 | -70 |
| (màxima contínua) | °C | 80÷100 | 80÷120 | 70÷80 | 70÷80 | 80÷100 |
| (màxima punta) | °C | 140÷180 | 170÷200 | 140÷150 | 140÷150 | 130÷140 |
| Absorció d'aigua (24 h) | % | 1,7/9,5 ⁽⁵⁾ | 1,5/8,5 ⁽⁵⁾ | 0,3/1,9 ⁽⁵⁾ | 0,25/1,5 ⁽⁵⁾ | 1,5/6,5 ⁽⁵⁾ |
| Combustibilitat | [1÷5] ⁽⁴⁾ | [2] V-2 | [2] V2 | [2] | [2] | - |
| Resistència desgast | [1÷5] | [5] | [5] | [5] | - | - |
| intempèrie | [1÷5] | [2] | [2] | [2] | [2] | [2] |
| àcids | [1÷5] | [2] | [2] | [2] | [2] | [2] |
| àlcals | [1÷5] | [4] | [4] | [4] | [4] | [4] |
| dissolvents orgànics | [1÷5] | [4÷5] | [4÷5] | [4÷5] | [4÷5] | [4÷5] |

⁽¹⁾ HDT/A / HDT/B; ⁽²⁾ 50 Hz / 10⁶ Hz; ⁽³⁾ (a partir de les corbes isòcronas): 20 °C / 60 °C; ⁽⁴⁾ Els nivells representen: [1] Fàcilment combustible; [2] Combustible; [3] Difícilment combustible; [4] Autoextingible; [5] Incombustible; les altres

| Plàstics tècnics (termostables) | | | | | | | |
|---|---|---|--|--|---|---|--|
| | | Fenoplasts | Aminoplasts | | | | |
| PC Policarbonat | PPE Poli(èter de fenilè) modif. | PF Fenol-formaldehid | UF Urea-formaldehid | MF Melamina-formaldehid | UP Polièster insaturat | EP Resines epoxi | PUR Poliuretà (termostable) |
| 1,20 Trp 89 60÷70 1200 0,21 130/145 10 ¹⁵ 3,0/2,9 7/100 30 | 1,06÷1,10 Opac 60÷70 1400 0,16÷0,22 100/140 10 ¹⁴ 2,6/2,6 4/9 35 | 1,24÷1,32 Opac 30÷50 1300 0,35 150/190 10 ¹¹ 6/4,5 1000/300 30÷40 | 1,50÷1,60 Opac 50÷60 1200 0,40 130/- 10 ¹¹ 8/7 400/300 30÷40 | 1,50÷1,60 Opac 50÷60 1200 0,50 180/- 10 ¹¹ 9/8 600/300 28÷30 | 1,10÷1,35 Opac 60÷80 1200÷1900 0,60 55÷90/- 10 ¹² ÷10 ¹⁵ 6/5 400/200 25÷53 | 1,17÷1,25 Opac 40÷70 1400 0,17÷0,23 140 >10 ¹⁴ 4/4 10/100 30÷40 | 1,05 Trp 10÷20 1760 0,58 90/- 10 ¹⁶ 3,6/3,4 500/500 24 |
| 63÷65 6÷8 65÷100 2,3÷2,4 2,15/1,70 0,39 no es trenca 20÷35 18÷24 100÷110 0,38 | 55÷68 2÷7 30÷50 3,1 2,65/1,50 ⁽⁷⁾ 0,38 no es trenca 15÷20 12÷18 85÷100 0,27÷0,36 | 25 - 0,4÷0,8 5,6÷12 - - >6 >1,5 - 250÷320 - | 30 - 0,5÷1,0 7,0÷10,5 - - >6,5 >2,5 - 260÷350 - | 30 - 0,6÷0,9 4,9÷9,2 - - >7 >1,5 - 260÷410 - | 30-50 - 2÷3 3,0÷4,5 - - 0,37 10÷12 - - - - | 45÷60 - 6÷8 3,5÷6,0 - - 0,38 - 10÷25 3 - - - | 70÷80 - 3÷6 4,0 - - - - - - - 0,37 |
| 385 I/Ex/EmB - -100 130 160 0,35 [4] V-2 - [4] [3] [1] [2÷3] | 470 Ij/Ex 0,5÷0,7 -30 90÷100 150 0,15÷0,35 [4] V-1 [1] [1÷4] [4] [4] [4] [3] [4] [3] | 160 EP/Ij - - 100÷120 150 0,3÷1,2 [4] - - [2] [2] [5] | 80 EP/Ij - - 80 100 0,4÷0,8 - - [2÷3] - - [5] | 80 EP/Ij - - 80 120 0,1÷0,6 [4] - - [2÷3] - - [5] | 185 Col 4,0÷8,0 - 100÷140 140÷160 0,1÷0,3 - - - [3] [2÷3] [4] | 500÷800 Col 1,0÷2,0 - 100÷120 180 0,1÷0,4 [3] - - [3÷4] [4] [3] | 150÷400 RIM - - 80 100 0,1÷0,2 [2] - [4] [2] [3] [3÷4] |

indicacions corresponen a la norma americana UL-94; ⁽⁵⁾ Absorció d'aigua: 24 hores /saturació; ⁽⁶⁾ a 80°C; ⁽⁷⁾ a 60°C

Taula 14.4 Plàstics (continuació)

| Plàstics d'altres prestacions | | | | | | |
|---|----------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Grups de plàstics | | | | | | |
| Denominació (ISO, ASTM, DIN) | PSU Polisulfona | PPS Poli(sulfur de fenilè) | PEEK Polietere- cetona | PI Polimida | LCP Plàstics de cristall líquid | |
| Propietats físiques | Unitats | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | 1,24 | 1,34 | 1,29 | 1,27÷1,42 | 1,35÷1,40 |
| Pp. òptiques (transm.) | % | Trp/Opac | Opac | Opac | Opac | - |
| Coefficient dilatació | µm/m·K | 50÷56 | 99 | 48÷100 | 50÷63 | 0÷25 |
| Calor específic | J/kg·K | 1090 | - | - | 1300 | - |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | 0,26 | 0,29 | - | 0,60 | - |
| Temp. termodeflectió ⁽¹⁾ | °C | 174/180 | 135/- | 150/- | 280÷360/- | 185÷350/- |
| Resistivitat volumètrica | Ω·m | 5·10 ¹⁴ | 10 ¹⁴ | 6,5·10 ¹⁶ | 10 ¹⁶ ÷10 ¹⁷ | 10 ¹⁵ ÷10 ¹⁶ |
| Constant dielèctrica | - | 3,5/3,5 | 3,1 | 3,3 | 3,4 | 2,6÷3,3 |
| Fact. pèrdues dielèctr. | 10 ⁻⁴ | 8/30 | 4/7 | - | 20/50 | - |
| Rigidesa dielèctrica ⁽²⁾ | MV/m | 18 | 24 | - | - | 34÷43 |
| Propietats mecàniques | Unitats | | | | | |
| Resistència tracció | MPa | 70÷100 | 70÷75 | 70÷100 | 75÷115 | 135 |
| Allarg. límit elàstic | % | 5÷6 | - | - | - | - |
| Allargament a ruptura | % | 25÷30 | 3,0 | 35÷50 | 8,0÷10,0 | 1,2÷3,8 |
| Mòdul elasticitat (trac) | GPa | 2,60÷2,75 | 3,40÷3,80 | 3,80 | 2,00 | 7,0÷13,0 |
| Mòdul fluència (10 ³ h) ⁽³⁾ | GPa | - | - | - | - | - |
| Coefficient de Poisson | - | 0,37 | - | - | 0,41 | - |
| Impacte Charpy | kJ/m ² | no es trenca | - | no es trenca | - | 30÷130 |
| (amb entalla) | kJ/m ² | 2÷5 | - | - | - | 20÷80 |
| Resistència fatiga 10 ⁷ | MPa | 7 | - | - | 35 | - |
| Duresa a la bola | MPa | 140 | - | 126 | - | - |
| Coefficient de fricció | - | 0,37 | 0,24 | - | 0,29 | - |
| Propietats tecnològiques | Unitats | | | | | |
| Cost | pta/kg | 1320 | - | 16000 | 4400 | - |
| Transformació | pàg 63 | Ij/Ex/Tc | Ij/EP/Tc | Ij/Mec | Sint/Mec | - |
| Contracció | % | 0,6÷0,8 | 1,0 | 1,1 | - | - |
| Temp. servei (mínima) | °C | -100 | -170÷-200 | - | -240 | - |
| (màxima contínua) | °C | 150 | 200÷230 | 250 | 260 | 250 |
| (màxima punta) | °C | 180 | 300 | 270 | 450 | - |
| Absorció d'aigua (24 h) | % | - | 0,2 | - | 0,32 | 0,0 |
| Combustibilitat | [1÷5] ⁽⁴⁾ | [4] V-0 | - | [5] V-0 | [4] V-0 | - |
| Resistència desgast | [1÷5] | - | - | - | [5] | - |
| intempèrie | [1÷5] | [4] | [2] | [2] | [4] | - |
| àcids | [1÷5] | [4] | [3] | [4] | [3] | - |
| àlcals | [1÷5] | [4] | [4] | [4] | [3] | - |
| dissolvents orgànics | [1÷5] | [2÷3] | [5] | [4÷5] | [4] | - |

⁽¹⁾ HDT/A / HDT/B; ⁽²⁾ 50 Hz / 10⁶ Hz; ⁽³⁾ (a partir de les corbes isòcronas): 20 °C / 60 °C; ⁽⁴⁾ Els nivells representen: [1] Fàcilment combustible; [2] Combustible; [3] Difícilment combustible; [4] Autoextingible; [5] Incombustible; les altres

| Plàstics especials (termoplàstics) | | | | | | | |
|---|--|--|---|---|--|--|--|
| | Plàstics cel·lulòsics | | | Plàstics fluorats | | | |
| PE-UHMW pes molecular ultraelevat | CA Acetat de cel·lulosa | CAB Acetobutirat de cel·lulosa | PMMA poli(metacrilat de metil) | PTFE Politetra- fluoroetilè | FEP Etilè/propilè perfluorat | PFA Copol. per- fluoroalcoxi | E/TFE Etilè/tetra- fluoretilè |
| 0,94 Opac 200÷220 - 0,42 45/- 2·10 ¹⁴ 2,1/3,0 3/3 36 | 1,27÷1,34 Trp (<92) 110÷160 1500÷1900 0,25÷0,28 90/- 10 ¹⁰ ÷10 ¹⁴ 3,2÷7,0 200/300 10÷24 | 1,15÷1,22 Trp (<92) 110÷160 1300÷1700 0,29÷0,33 60/70 10 ¹¹ ÷10 ¹⁵ 3,4÷6,4 60/210 10÷16 | 1,17÷1,20 Trp 0,92 60÷70 1500 0,17÷0,20 60/100 >10 ¹⁴ 2,8/2,8 500/200 30÷32 | 2,15÷2,20 Opac 100 1000 0,24÷0,27 55/135 >10 ¹⁶ 2,1÷2,1 0,5/0,7 16÷20 | 2,15÷2,20 Opac 80 1120 0,20÷0,23 -70 10 ¹⁶ 2,1÷2,1 0,3/0,7 20÷24 | 2,12÷2,17 Trp/Opac 120 - 0,26 -74 10 ¹⁶ 2,1÷2,1 0,9÷1,1 79 | 1,70÷1,77 Trp/Opac 40 900 0,22÷0,24 71/104 10 ¹⁴ 2,6÷2,6 8/50 19 |
| 20÷22 15÷18 >600 0,72÷0,80 0,55÷0,20 - no es trenca no es trenca 20 38 0,21 | 18÷36 - 2,5÷3,0 1,80÷2,20 - - 65 15 - 35÷90 - | 19÷34 - 4,0÷4,5 1,40÷1,60 - - no es trenca 30÷35 - 30÷80 - | 50÷80 - 2÷8 2,70÷3,20 1,50/- - 18 2 - 180÷200 0,45 | 25÷36 - 350÷550 0,35÷0,70 0,15÷0,05 0,46 no es trenca 13÷15 - 27÷35 0,05÷0,25 | 15÷21 - 250÷330 0,35÷0,50 - 0,48 no es trenca - - 30÷32 0,33 | 15÷30 - 300÷350 0,60÷0,70 - - no es trenca - - 35 0,21 | 35÷54 - 400÷500 1,00÷1,10 - - - - - 65 0,40 |
| - Sint/Mec - -260 100 400 <0,4 [2] [5] [4] [5] [4] [4] [4] | 250 Ij/Ex 0,3÷0,5 -40 70 80 1,7÷4,5 [1] HB - - [1] [1] [1] [2÷3] | 215 Ij/Ex/Tc 0,3÷0,5 -40 60÷115 80÷120 0,9÷2,2 [1] HB - [4] [1] [1] [1] | 390 Ij/Ex/Tc 0,3÷0,8 -40 65÷90 85÷100 0,1÷0,4 [1] HB [4] [4÷5] [2] [4] [1] | 1200 Sint/Mec 1,0÷1,5 -200 260 300 0 [5] V-0 [1] [5] [5] [5] [5] | - Ex/Ij 3,0÷6,0 -100 205 250 - <0,1 [5] V-0 - [5] [5] [5] [5] | - Ex/Ij 4,0 -200 260 - 0,03 [5] V-0 - [5] [5] [5] [5] | - Ij/Ex 2,0÷4,0 -190 150÷180 220 0,03 [5] V-0 - [5] [5] [5] [4] |

indicacions corresponen a la norma americana UL-94

Selecció del material i disseny de peces de plàstic

La selecció del material plàstic més adequat per a la fabricació d'una peça o element difícilment es pot realitzar per mitjà d'una simple selecció de propietats estàndard dels materials. Hi ha diverses dificultats: *a)* En primer lloc, molt sovint els criteris de selecció determinants fan referència a propietats o característiques difícilment quantificables (aspecte o color, facilitat de transformació, guerxament de la peça, electricitat estàtica); *b)* En segon lloc, les possibilitats de modificació dels plàstics són molt grans a través d'additius (reforços, càrregues, plastificants) i de mescles de materials; *c)* I, en tercer lloc, les condicions en què es fan els prototipus (mecanització de materials extruïts o motlles més barats fabricats en epoxi o alumi-ni) són, en general, molt diferents de les condicions finals de transformació (generalment injecció).

A títol de recordatori, a continuació s'esmenten alguns dels principals punts que cal tenir en compte en el moment d'elegir el material i dissenyar una peça o element de plàstic:

- Cost del material i cost de transformació
- Possibilitats de transformació i formes que es poden obtenir
- Aspecte i acabat superficial (brillant, mat, pintura, recobriments)
- Temperatures de servei, màxima (contínua i curta duració) i mínima
- Sol·licitacions mecàniques segons la temperatura
- Sol·licitacions de càrregues permanents (fluència)
- Sol·licitacions de càrregues repetides (fatiga)
- Sol·licitacions a impactes (tenacitat)
- Exposició a agents químics
- Exposició a la intempèrie (raigs UV, ozó)
- Comportament lliscant i resistència a l'abrasió
- Estabilitat dimensional (en la fabricació i durant l'ús)
- Propietats elèctriques (resistència elèctrica i dielèctrica)

Recomanacions per a alguns elements de màquines

A continuació es descriuen alguns dels materials plàstics més aptes per a determinats elements de les màquines:

Guies i coixinets de lliscament

En les guies de lliscament, en general s'exigeixen baixos coeficients de fricció dinàmics i resistència al desgast. Els materials més usats a temperatura ambient són *PE-UHMW* i a temperatures superiors, *PET* i *PBT*. Amb càrregues o reforços és molt freqüent l'ús de *PTFE*.

Els materials per a peces que fan de coixinet de lliscament, o que n'inclouen un, han d'oferir unes propietats anàlogues a les de les guies de lliscament, probablement amb capacitat de pressions de contacte més grans. Un dels materials més utilitzats són les poliamides. Tanmateix, l'inflament que experimenten a causa de l'absorció d'aigua, pot conduir al bloqueig o malfuncionament de les peces. En general, les poliamides s'utilitzen amb additius MoS_2 , grafit, *PTFE* que, a més d'augmentar les seves propietats lliscants, milloren l'estabilitat dimensional.

Molles i elements elàstics

En la fabricació de peces de plàstic molt sovint calen elements que fan de molla (per exemple, el tap d'un bolígraf) o ecliquetats (peces que entren a pressió deformant-se elàsticament). En aquests casos, cal que el material guadeixi d'una bona recuperació elàstica amb una elevada resistència a la fluència o a la relaxació (segons els casos). Probablement el plàstic que millor s'adequa a aquestes funcions és el *POM*. També tenen un bon comportament elàstic els plàstics reforçats amb fibra (vidre, carboni, aràmida), però aleshores la deformació admissible és relativament reduïda.

Carcasses

Les carcasses són elements fonamentals en moltes màquines o aparells (electrodomèstics, ràdio, televisió, ordinadors i material informàtic). Aquestes peces han de tenir una bona rigidesa, estabilitat dimensional, una bona presència exterior (textura, color), una fàcil transformació en peces de formes complexes tridimensionals (facilitat d'emmotllament per injecció) i que ofereixin un bon acabat superficial (el poliestirè, *PS*, i el *SAN* són una solució barata a aquests requeriments). Una altra característica que sovint s'exigeix és la resistència a l'impacte (l'*ABS* compleix bé aquesta condició amb un preu moderat). Si, a més, es requereixen un bon comportament a temperatura, a la intempèrie o al foc, calen materials de millors característiques (el policarbonat, *PC*, i el poli(èter de fenilè) modificat, *PPE*, cobreixen aquests aspectes, a costa d'un preu més alt). Darrerament s'ha difós molt, amb uns resultats excel·lents, el polipropilè, *PP*, i la poliamida *PA 66* reforçats amb fibra de vidre.

Elements estructurals

Els elements estructurals intervenen cada dia de manera més decisiva en nombroses aplicacions, entre les quals destaquen els vehicles (carrosseries d'automòbils, xassís de bicicletes, parts del fusellatge dels avions, embarcacions). Quan les exigències no són molt altes, els materials usats normalment són les resines de polièster amb fibres de vidre, *UP+FV* (carrosseries d'automòbil, embarcacions, cascs de motorista), mentre que, quan les exigències són més altes, s'utilitzen les resines epoxi amb fibra de carboni, *EP+FC* (quadres de bicicletes, elements del fusellatge d'avions).

14.3 Elastòmers

Introducció

Els elastòmers són materials basats en polímers de comportament elàstic i de consistència flexible (experimenten grans deformacions amb esforços moderats) i resiliència elevada.

El seu desenvolupament és recent i la seva incidència en el disseny de màquines no ha fet més que augmentar en moltes aplicacions decisives (junttes, retenidors, articulacions elàstiques, elements de suspensió, proteccions flexibles, conduccions), en les quals difícilment tenen alternativa. Vers els anys 50 es coneixien mitja dotzena d'elastòmers (*NR*, *SBR*, *BR*, *NBR*, *CR* i *IIR*), mentre que actualment es disposa de més de 30 famílies, amb propietats orientades a una gran diversitat d'aplicacions.

Grups d'elastòmers

Elastòmers termoplàstics

Materials que combinen les propietats de servei dels elastòmers amb les facilitats de conformació dels termoplàstics (propietats elàstiques situades entre les dels termoplàstics flexibles i les dels elastòmers). Aquest fet es deu a la presència simultània de segments rígids, normalment semicristal·lins (fan d'enllaços encreuats), amb una temperatura de reblaniment T_m més alta que la de servei (possibilitat de conformació com a termoplàstic), i segments elàstics, normalment amorfs, amb una temperatura de transició vítria T_g més baixa que la de servei.

Hi ha diverses famílies d'elastòmers termoplàstics (poliolefines, *TPE-O*; poliestirens, *TPE-S*; polièsters, *TPE-E*; poliamides, *TPE-A*; i poliuretans, *TPE-U*), cada una de les quals té característiques pròpies. Els elastòmers termoplàstics de duresa més baixa, o més elàstics (fonamentalment els estirens i parcialment les olefines), a causa de la seva limitada temperatura de servei màxima, no poden substituir fàcilment els elastòmers permanents. En canvi, els elastòmers termoplàstics de duresa més alta (fonamentalment els poliuretans, els polièsters i les poliamides), tot i tenir una resistència més baixa que la dels termoplàstics tècnics, tenen una elasticitat molt més elevada, que permet la seva aplicació a elements d'amortiments, molles, paraxocs i tubs flexibles, entre d'altres. Malgrat que els materials de *TPE* són cars, el procés de transformació és més simple i barat, i en resulten peces més precises amb un cost global més baix.

Elastòmers de bones propietats mecàniques (cautxús de consum)

Elastòmers d'excel·lent resistència a la tracció i a l'abració, però poc resistents als agents atmosfèrics i als olis i amb una temperatura de servei inferior a 100°C. Són el cautxú natural, *NR*, i diversos cautxús sintètics (*IR*, *SBR*, *BR*). El seu consum és molt elevat (més del 80% de tots els elastòmers, repartit a parts iguals entre el *NR* i els *SBR/BR*, essent el consum d'*IR* molt reduït). La principal aplicació de tots ells és la fabricació de pneumàtics, mentre que el *NR* presenta altres aplicacions relacionades amb la seva excel·lent resiliència de rebot.

Elastòmers resistents als agents atmosfèrics

Tenen una bona resistència a l'ozó i als agents atmosfèrics, però un mal comportament als olis. Les propietats mecàniques són bones i les temperatures de servei, intermèdies (100÷150°C). Comprenen els cautxús butils (*IIR*, *CIIR* i *BIIR*), d'alta impermeabilitat als gasos, usats en cambres i revestiments interiors de pneumàtics (5% del consum d'elastòmers), i els elastòmers d'etilè/propilè (*EPM* i *EPDM*), avui dia els materials estàndard en aplicacions que exigeixen una bona resistència química i als agents atmosfèrics però no als olis (6% del consum d'elastòmers).

Elastòmers resistents als olis

Es caracteritzen per ser resistents als olis i oferir temperatures de servei mitjanes o baixes (*CR*, *AU*). Els més usats són el policloroprè, *CR*, i el cautxú nitril, *NBR* (cada un, 4% del consum d'elastòmers), el segon més resistent als olis però menys resistents als agents atmosfèrics; els etilens clorats i clorosulfonats (*CM*, *CSM*) mostren una excel·lent resistència als agents químics i atmosfèrics i s'usen per a recobriments de cables elèctrics; el copolímer d'etilè/acetat de vinil, *EVM*, destaca per l'excel·lent resistència als agents atmosfèrics i per l'alta temperatura de servei; els poliuretans, *AU*, destaquen per les elevades característiques mecàniques, però també per la limitada temperatura de servei; finalment, els elastòmers d'epiclorhidrina (*CO*, *ECO*) i els nitrils hidrogenats (*H-NBR*) ofereixen un compendi de les millors característiques del grup, però, també, un cost elevat.

Elastòmers resistents a altes temperatures

Es caracteritzen per treballar a temperatures superiors a 150°C. Entre ells hi ha els cautxús acrílics (*ACM*, *EAM*), amb temperatures de servei compreses entre 150÷175°C; els elastòmers de silicona (*VMQ*, *FVMQ*), amb temperatures de servei màximes superiors a 175°C i un extraordinari comportament a temperatures molt baixes, però les seves característiques mecàniques són moderades; finalment, els elastòmers fluorats (*FPM*, *PFE*) ofereixen els valors més alts de temperatures de servei màximes i una gran estabilitat química tot mantenint unes propietats mecàniques acceptables.

Taula 14.5 **Llista dels elastòmers**

| Elastòmers (ISO 1629:1987) | | |
|----------------------------|--|---------|
| Símbols | Denominació química | (1) |
| ACM | Poliacrilat (cautxú acrílic) | -22÷-40 |
| AU | Poliuretà basat en polièster | -35 |
| BIIR | Cautxú butil bromat | -66 |
| BR | Cautxú de polibutadiè | -112 |
| CIIR | Cautxú butil clorat | -66 |
| CM | Polietilè clorat | -25 |
| CO | Homopolímer d'epiclorhidrina | -26 |
| CR | Elastòmer de cloroprè | -45 |
| CSM | Polietilè clorosulfonat | -25 |
| EAM | Copolímer d'etilè/acrilat | -40 |
| ECO | Copolímer d'epiclorhidrina/òxid d'etilè | -45 |
| EPDM | Terpolímer d'etilè/propilè/diè | -55 |
| EPM | Copolímer d'etilè/propilè | -55 |
| ETER | Terpolímer d'epiclorhidrina/òxid d'etilè/diè | - |
| EU | Poliuretà basat en polièter | -55 |
| EVM | Copolímer d'etilè/acetat de vinil | -30 |
| FPM | El. fluorur de vinilidè/hexafluoropropilè | -18÷-50 |
| FVMQ | Cautxú de silicona fluorada | -70 |
| H-NBR | Cautxú nitril hidrogenat | -30 |
| IIR | Isobutilè/isoprè (cautxú butil) | -66 |
| IR | Cautxú de poliisoprè sintètic | -120 |
| NBR | Butadiè/acrilonitril (cautxú nitril) | -20÷-45 |
| NR | cis-1,4 poliisoprè (cautxú natural) | -72 |
| PFE | Perfluorelastòmer (terpolímer) | - |
| PVMQ | Polimetilfenilvinilsiloxà | - |
| (PUR) | Elastòmers poliuretans (genèric) | - |
| (SI) | Elastòmers de silicona (genèric) | - |
| SBR | Cautxú de estirè/butadiè | -50 |
| SBS | Copolímer d'estirè/butadiè/estirè | - |
| SIS | Copolímer d'estirè/isoprè/estirè | - |
| SR | Elastòmers sintètics (genèric) | - |
| TM | Cautxú de polisulfur | - |
| (TPE) | Elastòmers termoplàstics (genèric) | - |
| (TPE-A) | Elastòmers termoplàstics de poliamides | - |
| (TPE-E) | Elastòmers termoplàstics de polièsters | - |
| (TPE-O) | Elastòmers termoplàstics de poliolefines | - |
| (TPE-S) | Elastòmers termoplàstics de poliestirens | - |
| (TPE-U) | Elastòmers termoplàstics de poliuretans | - |
| VMQ | Polimetilvinilsiloxà | - |

(1) Temperatura de transició vítria, T_g (en °C)

Propietats dels elastòmers

A causa de la gran deformabilitat i de les especials condicions de treball, els elastòmers tenen característiques particulars, per la qual cosa s'han desenvolupat mètodes d'assaig específics (Taula 14.6, pàg. 110).

Propietats físiques

Els elastòmers són materials de densitat molt baixa ($0,85 \div 2 \text{ Mg/m}^3$), mal conductors de la calor i de l'electricitat. Els coeficients de dilatació (afecta la contracció durant la fabricació) i els calors específics són elevats. Les propietats elèctriques més usuals són les que els caracteritzen com a aïllants i com a dielèctrics (aplicació a recobriments de cables, aïllaments).

Propietats mecàniques

Duresa

És la propietat més usual en la caracterització mecànica dels elastòmers, malgrat la poca precisió de la mesura (± 5 punts). Es mesura per mitjà de dos mètodes àmpliament acceptats: *a) Duresa IRHD (international rubber hardness degree)*, relacionada amb la diferència de penetració d'una bola entre dues càrregues predeterminades (escala $10 \div 98$); *b) Duresa Shore*, relacionada amb la inversa de la penetració d'un punxó que, impulsat per una molla, sobresurt del pla d'aplicació d'un duròmetre, aparell de butxaca d'utilització fàcil (escala Shore A, $10 \div 90$, pràcticament coincident amb IRHD, per als elastòmers més tous; escala Shore D, $30 \div 90$, per als elastòmers més durs i els plàstics més tous).

Tracció, compressió i cisallament

Els principals paràmetres que es deriven de l'assaig a tracció dels elastòmers (no compleixen la llei de Hooke), la *resistència a la tracció*, l'*allargament a la ruptura* i la *tensió* (o *mòdul*) *a allargament de 100% o 300%* (valors molt variables en funció dels additius i el procés de vulcanització), s'usen com a control en la preparació de barreges i en la fabricació, però tenen una utilitat limitada per al projectista. En molles i elements elàstics de goma sol·licitats, l'elastòmer sol treballar a cisallament o a compressió en la zona de tensions baixes ($\geq 15\%$ de la de ruptura), on el material es comporta de manera aproximadament lineal. Per al cisallament s'acostuma a establir una relació entre el mòdul de rigidesa i la duresa, mentre que, per a la compressió, el mòdul d'elasticitat, $E \approx 3 \cdot G$ (el coeficient de Poisson és $\nu \approx 0,5$), ha de ser afectat per un factor de forma igual al quocient entre la superfície que transmet la força i la superfície lateral lliure.

Fatiga

Els elastòmers esdevenen tenaços amb les vibracions, de manera que el mòdul d'elasticitat dinàmic dels elastòmers de baixa resiliència de rebot (alta histèresi) pot arribar a ser més del doble de l'estàtic. Aquests valors s'obtenen en assaigs dinàmics amb provetes sotmeses a vibracions forçades.

Altres propietats mecàniques

Deformació permanent: percentatge de la deformació inicial que resta des-prés d'un temps determinat d'haver cessat la càrrega (acostuma a definir-se per a compressió); també, relaxació de la tensió a deformació constant.

Resiliència de rebot: percentatge d'energia recuperada per un pèndol o una bola que rebotja sobre una proveta d'elastòmer; una resiliència alta equival a una histèresi baixa, una dissipació d'energia petita i un escalfament molt baix del material; la resiliència varia amb la temperatura.

Resistència a l'esquinçament (tear strength): dificultat que ofereix un elastòmer a la propagació d'un esquinç ja iniciat; mesura la resistència en unes condicions d'assaig particulars i constitueix un índex de comparació.

Propietats tecnològiques

Probablement les propietats tecnològiques són les més determinants en la selecció dels elastòmers. S'estableixen quatre grups de característiques que són igualment importants: *a)* Cost i transformació; *b)* Temperatures de servei; *c)* Resistència al deteriorament; *d)* Altres propietats tecnològiques.

Cost i transformació

El cost de la major part dels elastòmers de consum és baix o moderat, aspecte que es beneficia de la baixa densitat de molts d'ells. Tanmateix, els elastòmers resistents als olis de millors prestacions i els resistents a altes temperatures es troben entre els materials cars.

La fabricació de peces o components d'elastòmer comprèn tres fases diferents: *a)* *Preparació del material*, elaboració de la mescla del polímer de base amb els additius en mescladores especials, en què s'obté un producte cru semielaborat; *b)* *Conformació de la peça* o producte per calandratge (o laminació, en la formació de làmines, revestiments o impregnació de teixits), per extrusió (perfils, mànegues, recobriment de cables), per emmotllament per compressió, transferència o injecció (juntres, components goma-metall, productes amb forma); *c)* *Vulcanització* de la peça o producte que pot anar lligada o no a la fase de conformació; s'efectua a temperatura i consisteix en la reticulació espacial per mitjà de compostos de sofre (ponts de S) o de peròxids (ponts d'O). D'aquesta manera l'elastòmer adquireix les propietats elàstiques.

Els elastòmers termoplàstics, *TPE*, es poden conformar amb els mitjans dels materials termoplàstics de productivitat elevada i no comporten el procés de vulcanització. Els processos més habituals són l'emmotllament per injecció, l'extrusió, el calandratge i la termoconformació. Els *TPE* més elàstics es poden transformar a temperatures més baixes i emmotllar en les màquines habituals de la indústria del cautxú.

Temperatures de servei

A temperatures baixes, els elastòmers es caracteritzen per tres valors: la *temperatura de fragilització*, T_s , per sota de la qual el material esdevé fràgil; la *temperatura de transició vítria*, T_g , per sobre de la qual el material experimenta una gran disminució de la rigidesa (el mòdul d'elasticitat pot variar més de 100 vegades) i adquireix el màxim valor d'amortiment; i la *temperatura límit*, T_r , amb una rigidesa no superior en més de 2,5÷10 vegades a la de la temperatura ambient (valor usat com a temperatura de servei mínima).

A temperatures altes, els elastòmers han de mantenir les seves característiques elàstiques i no s'han de degradar. Les temperatures de servei màximes en continu van dels des 70÷90°C del *NR* i altres elastòmers (*IR*, *BR*, *AU* i la majoria dels *TPE*) fins als més de 200°C dels elastòmers resistents a altes temperatures (*VMQ*, *FPM*, *PFE*).

Resistència al deteriorament

Envelliment: pèrdua de propietats dels elastòmers amb el pas del temps que es manifesta de diferents maneres: *fissuració*, causada per l'ozó; *degradació de la capa superficial*, que esdevé enganxosa en el *NR*, o dura i rígida en el *SBR*, causada per l'acció combinada de l'oxigen, les radiacions i la temperatura. Dels assaigs de fissuració per l'ozó, i d'envelliment a la intempèrie, s'avalua la resistència als agents atmosfèrics, mentre que de l'assaig d'envelliment accelerat a temperatura i del comportament mecànic en calent, s'estima la temperatura de servei màxima.

Absorció de líquids (olis, aigua calenta): els elastòmers són insolubles però poden absorbir quantitats més o menys importants de líquids, que donen lloc a un inflament i a un deteriorament de les propietats mecàniques. En molts elastòmers (*NR*, *IIR*, *EPDM*), la baixa resistència als olis és un factor limitatiu, mentre que, en d'altres (*AU*, *VMQ*), ho són la baixa resistència a l'aigua calenta o al vapor d'aigua.

Atac de productes químics: els elastòmers es veuen sotmesos a una gran varietat d'ambients químics agressius; molts fabricants d'aquests materials proporcionen llistes amb la resistència química dels elastòmers a aquests productes.

Altres propietats tecnològiques

Assaig de permeabilitat. Mesura de la facilitat amb què un líquid o un gas pot passar a través d'una làmina de l'elastòmer, propietat important en la fabricació de cambres de pneumàtics, membranes, conduccions i recipients.

Color. Hi ha elastòmers que són necessàriament negres, mentre que d'altres es poden acolorir (aspecte exterior).

Taula 14.6 Normes d'assaig dels elastòmers

| | ISO | ASTM | DIN |
|---|---------|--------|-----------|
| <i>Propietats físiques</i> | | | |
| Densitat | 2781 | D 792 | 53479 |
| Coefficient de dilatació tèrmica lineal | | D 696 | 53792 |
| Calor específic | | D 351 | |
| Conductivitat tèrmica | | C 177 | 52612 |
| Resistivitat elèctrica (volumet./superficial) | 1853 | D 991 | 53482 |
| Constant dielèctrica / factor de dissipació | IEC 250 | D 150 | 53483 |
| Rigidesa dielèctrica | IEC 249 | D 449 | 53981 |
| <i>Propietats mecàniques</i> | | | |
| Assaig de tracció | 37 | D 412 | 53504 |
| Assaig de compressió | 7743 | D 575 | |
| Propietats dinàmiques (cisall. altern.) | 4664 | D 945 | 53520 |
| Duresa internacional (IRHD) | 48/1400 | D 1415 | 53519 |
| Duresa Shore (A i D) | 868 | D 2240 | 53505 |
| Deformació permanent (<i>compression set</i>) | 815 | D 395 | 53517/8 |
| Resiliència de rebot | 4662 | D 1054 | 53512 |
| Resistència a l'esquinçament (<i>tear strength</i>) | 34/816 | D 624 | 53507 |
| Resistència a l'abració | 4649 | D 1630 | 53516 |
| Formació de fissures per fatiga | 132 | D 430 | 53522-1/2 |
| | 133 | D 813 | 53522-3 |
| <i>Propietats tecnològiques</i> | | | |
| Característiques a baixa temperatura (test T_r) | 2921 | D 1329 | |
| Temperatura límit de no fragilitat | 812 | D 746 | 53546 |
| Temperatura mínima de rigidització | 1432 | | 53548 |
| Envelliment accelerat a temperatura | 188 | D 573 | 53508 |
| Resistència a la fissuració per ozó | 1431 | D 1149 | 53509 |
| Envelliment a la intempèrie | 4665 | D 572 | |
| Efecte líquids (inflament per oli, aigua) | 1817 | D 471 | 53521 |
| Resistència química | TR 7620 | | |
| Permeabilitat als gasos | 2782 | D 814 | 53536 |

Descripció i aplicacions dels elastòmers

Cautxús de bones propietats mecàniques

Cautxú natural, NR; poliisoprè sintètic, IR

El cautxú natural, *NR*, és un producte derivat del làtex de l'arbre *havela brasiliensis*. Destaca per les excel·lents propietats mecàniques: resistència a la tracció, a l'esquinçament, a l'abradió i a la fatiga, i alta tenacitat (tant si la seva composició inclou o no càrregues), sols superades per les dels poliuretans. També destaca per la baixa deformació permanent a 20°C, pel bon comportament a baixa temperatura (sols superat pel *BR* i els elastòmers de silicona) i per les bones propietats elèctriques. Tanmateix, el seu ús presenta algunes limitacions, com són: temperatura de servei màxima moderada i mal comportament als agents atmosfèrics i als olis. Entre l'àmplia gamma d'aplicacions destaquen aquelles en què el material està sotmès a sol·licitacions dinàmiques (pneumàtics d'altres prestacions; elements de suspensió), gràcies a l'excel·lent resistència mecànica, a la bona resistència a la fatiga i a la baixa dissipació per histèresi.

El cis-1,4 poliisoprè, *IR*, és un material sintètic equivalent a *NR*. Les seves propietats són anàlogues a les del cautxú natural, però presenten una uniformitat més gran, tot i que el preu també és lleugerament superior. S'utilitza en peces tècniques en substitució del *NR*.

Cautxú d'estirè/butadiè, SBR

Copolímer d'estirè/butadiè, també conegut per *buna-S*, que, a diferència del *NR*, si es presenta en forma de goma pura sense càrregues no té interès pràctic. Amb les càrregues adequades, ofereix unes propietats mecàniques anàlogues a les del *NR*: la resistència a la tracció i a l'esquinçament, i la resiliència són inferiors però la resistència a la fatiga i a l'abradió són superiors, i respon millor a la temperatura que el *NR*. Té un mal comportament als agents atmosfèrics (lleugerament millor que el *NR*) i als olis. Cautxú de gran consum que, gràcies al seu baix cost, és una alternativa al *NR* quan no s'exigeixen característiques elàstiques elevades; combinat amb el *BR* millora el comportament a baixa temperatura i s'usa massivament en la fabricació de pneumàtics d'automòbil. També s'aplica a peces emmotllades, recobriments de cables, corretges, tubs i perfils.

Cautxú de polibutadiè, BR

La composició és cis-1,4-polibutadiè. Les propietats mecàniques són discretes (inferiors a *NR* i *SBR*), però té una excel·lent resistència a l'abradió i una bona resiliència de rebot. També destaca el bon comportament a baixa temperatura,

tot i que la temperatura de servei màxima és molt moderada. S'usa pràcticament sempre mesclat amb *NR* i *SBR* (millora la resistència a l'abració i el comportament a baixes temperatures), fonamentalment en la fabricació de pneumàtics, però també en bandes transportadores.

Elastòmers resistents als agents atmosfèrics

Cautxús butils: IIR, BIIR, CIIR

Els principals components d'aquesta família són el copolímer d'isobutilè/isoprè, *IIR*, el cautxú butil clorat, *CIIR*, i el cautxú butil bromat, *BIIR*.

L'*IIR* destaca per l'elevada impermeabilitat als gasos, la bona resistència als agents atmosfèrics, a la calor i a l'atac químic, la baixa resiliència de rebot, la bona flexibilitat a baixa temperatura i el bon aïllament elèctric, mentre que té com una de les principals limitacions el mal comportament als olis. S'usa en cambres i recobriments interiors de pneumàtics, aïllaments de cables elèctrics, tubs, corretges i elements de dissipació.

El cautxú butil *BIIR* ofereix una millor impermeabilitat als gasos, i millor resistència química i als agents atmosfèrics que l'*IIR*, mentre que el cautxú butil clorat, *CIIR*, té propietats intermèdies entre l'*IIR* i el *BIIR*. Darrerament, els cautxús butils halogenats estan desplaçant l'*IIR*.

Cautxús d'etilè/propilè: EPM, EPDM

Els principals cautxús són el copolímer d'etilè/propilè, *EPM*, reticulat amb peròxid, i el terpolímer d'etilè/propilè/diè, *EPDM*, reticulat amb sofre o també amb peròxid. Destaquen per l'excel·lent resistència als agents atmosfèrics, la bona resistència a l'atac químic (àcids diluïts, àlcalis i fluids hidràulics) i l'elevada temperatura de servei (130÷150°C). Les propietats mecàniques són bones (tot i que inferiors a les del *SBR*) i les propietats elèctriques són excel·lents. En el cantó negatiu cal ressenyar el mal comportament als olis. Entre ells, l'*EPM*, reticulat amb peròxid, ofereix una millor resistència als agents atmosfèrics, mentre que l'*EPDM*, reticulat amb sofre, té una resistència a la fatiga excel·lent. La combinació del cost moderat amb les bones qualitats mecàniques i el bon comportament pel que fa a l'envelliment i als agents químics inorgànics, fa que sigui l'elastòmer estàndard per a aplicacions que no comporten el contacte amb olis o dissolvents (tubs i conduccions, perfils de finestra, juntes, retenidors).

Elastòmers resistents als olis

Cautxús nitrils: NBR, H-NBR

Els principals membres són el copolímer de butadiè/acrilonitril, *NBR*, i el cautxú nitril hidrogenat (parcialment o totalment), *H-NBR*.

El *NBR* destaca pel seu bon comportament als olis i dissolvents (millor que el *CR*), per les bones característiques mecàniques (resistència a la tracció i a l'abrasió) i per la bona resistència a la temperatura (superior al *CR*), essent el cost moderat. Tanmateix, en limiten l'ús la resistència moderada als agents atmosfèrics i la baixa resistència a la flama. S'aplica en usos de caràcter general que exigeixen treballar en presència d'olis (juntres i rete-nidors, cintes de transport, mànegues, recobriments de corròns).

El *H-NBR* destaca per l'excel·lent resistència als agents atmosfèrics i als olis, la bona resistència a l'atac químic, les notables característiques mecàniques (fins i tot a temperatures elevades) i el bon comportament a temperatures baixes. Com a inconvenients cal esmentar el seu preu molt elevat i que petits graus d'insaturació en redueixen considerablement les propietats. S'usa, especialment en automoció, per a peces que exigeixen un bon comportament mecànic en medis de forta agressió química i ambiental a temperatura elevada, en substitució del *CR* i del *NBR* i sovint en competència amb el *FPM*.

Cautxú de cloroprè, CR

Aquest cautxú, també conegut per *neoprè*, es compon de 2-cloro,1-3-buta-diè. Destaca per les excel·lents propietats mecàniques (resistència a la tracció, a l'abrasió i a l'esquinçament pròximes a les del *NR*), fins i tot sense càrregues de reforç, la bona resiliència, la bona resistència a l'ozó i als agents atmosfèrics (millor que el *NBR*) i el bon comportament a la flama (és autoextingible), tot i que la seva combustió produeix fums corrosius (HCl). En canvi, té una temperatura màxima de servei moderada, un comportament als olis i els dissolvents orgànics més baix que el *NBR* i el seu preu és relativament elevat. S'aplica a productes tècnics de cautxú de bona resistència mecànica que hagin de resistir els agents atmosfèrics i moderadament els olis: peces emmotllades i extruïdes; juntres, perfils, mànegues, revestiments, corretges trapezoïdals; recobriment de cables resistents a la flama.

Polietilè clorat, CM; polietilè clorosulfonat, CSM

El polietilè clorat, *CM*, es reticula per mitjà de peròxids, mentre que el polietilè clorosulfonat, *CSM* (també conegut per *Hypalon*), és més difícil de processar. Tant l'un com l'altre destaquen per les bones propietats mecàniques (especialment a fatiga), el bon comportament als olis (fins i tot en calent), a l'ozó i als agents atmosfèrics, la bona resistència a l'atac químic i als oxidants, la molt bona estabilitat a la calor i el bon comportament a la flama, malgrat que, en cas de combustió, produeixen fums corrosius. S'usen en aquelles aplicacions en què cal una bona resistència als olis, als agents atmosfèrics i a l'atac químic, i també a la flama (recobriments de cables, mànegues, peces emmotllades, membranes).

Elastòmer d'etilè/acetat de vinil, EVM

És un copolímer d'etilè/acetat de vinil, també designat per *EVA*. Destaca per l'excel·lent resistència a l'aire calent (fins a 160°C) i als agents atmosfèrics, i per la molt baixa deformació permanent a alta temperatura; amb càrregues d'alúmina hidratada té un bon comportament a la flama (pot competir amb el *CR*, el *CM* i el *CSM*), una bona estabilitat dels colors i un bon comportament fisiològic. La principal limitació és el seu comportament mecànic moderat (baixa resistència a l'esquinçament i a l'abradió). S'usa en elements de segellatge resistents a la calor (150°C) i en cables, perfils i membranes. També pot formar aliatges amb *NR* i *SBR* per a millorar-ne el comportament als agents atmosfèrics.

Elastòmer de poliuretà, AU, EU

Hi ha elastòmers de poliuretà basats en polièsters, *AU*, i basats en poli-èters, *EU*. Destaquen per l'excel·lent comportament mecànic (tenen les resistències a la tracció, a l'abradió i a l'esquinçament més altes entre tots els elastòmers), la baixa deformació permanent a temperatura ambient, i la molt bona resistència a l'ozó, als agents atmosfèrics, als olis i dissolvents orgànics. Les principals limitacions provenen de la baixa temperatura de servei (inferior a 100°C), la poca resistència al vapor d'aigua i el cost relativament elevat. S'aplica a productes tècnics que exigeixin unes altes característiques mecàniques, alhora que una bona resistència als olis i als agents atmosfèrics: juntes flexibles, elements de transmissió, absorbidors de xocs o vibracions, suports de suspensió, recobriments de corrons i de rodes.

Elastòmers d'epiclorhidrina: CO, ECO, ETER

Els membres més coneguts d'aquesta família d'elastòmers són: l'homopolímer d'epiclorhidrina, *CO*; el copolímer d'epiclorhidrina/òxid d'etilè, *ECO*; i el terpolímer d'epiclorhidrina/òxid d'etilè/diè (reticulat amb sulfur o peròxid), *ETER*. Aquests elastòmers destaquen per l'excel·lent resistència a l'ozó, als agents atmosfèrics i als olis (fins i tot en calent), la bona resistència a l'atac químic i als oxidants, la molt alta impermeabilitat als gasos (especialment *CO*), el bon comportament a la flama i la bona flexibilitat a baixa temperatura, mentre que les principals limitacions provenen de les moderades propietats mecàniques i l'elevat cost. Les temperatures de servei màximes són: *CO*, 150°C; *ECO* i *ETER*, 135°C; mentre que les temperatures de servei mínima són: *CO*, -10°C; *ECO* i *ETER*, -25°C. S'usen en aplicacions que exigeixin un conjunt equilibrat de propietats, millors que *NBR* (juntes, diaframes, conduccions flexibles, corretges, recobriments de corrons). El *CO* s'usa en aplicacions que requereixin una elevada impermeabilitat als gasos a temperatura alta.

Elastòmers resistents a altes temperatures

Elastòmers acrílics: ACM, EAM

Copolímers d'èsters acrílics amb monòmers, *ACM*, i terpolímer d'etilè/acrilat de metil/àcid acrílic, *EAM* (també conegut per *Vamac*).

Els elastòmers acrílics *ACM* destaquen per l'excel·lent resistència als olis a elevada temperatura i, en particular, olis que contenen additius d'extrema pressió (utilitzats en engranatges molt sol·licitats amb grans velocitats de lliscament); resisteixen temperatures elevades ($160\div 180^{\circ}\text{C}$) sense degradar-se, però s'estoven considerablement (per a compensar-ho, acostumen a incorporar càrregues i additius). El seu ús es veu limitat per l'escassa resistència al vapor d'aigua, als àcids i als àlcalis, un comportament moderat a temperatura baixa i unes característiques mecàniques moderades. El seu camp d'aplicació es troba entre el *NBR* i el *FPM*, i s'usa en retenidors i juntes que han de treballar a alta temperatura.

L'elastòmer acrílic *EAM* destaca per l'excel·lent manteniment de les característiques elàstiques a alta temperatura (fins a 175°C), sols superades pel *VMQ*. Té propietats anàlogues a l'*ACM*, però amb molt millor resistència al vapor d'aigua i millor comportament a temperatura baixa. La seva moderada resistència als olis (comparable al *CR*) és una limitació. S'usa en juntes, mànegues i suports que han de mantenir l'elasticitat a alta temperatura.

Elastòmers de silicona: VMQ, PVMQ, FVMQ

Entre els elastòmers de silicona hi ha: el polimetilvinilsiloxà, *VMQ*; el polimetilfenilvinilsiloxà, *PVMQ*; i la fluorsilicona, *FVMQ*.

Els elastòmers *VMQ* i *PVMQ* destaquen per l'ampli ventall de temperatures de servei quan es troben en espais oberts (des de -60°C fins a 200°C , amb puntes de fins a 300°C), per l'excel·lent manteniment de les característiques elàstiques, tant a temperatura elevada com a temperatura molt baixa (*VMQ* fins a -65°C , i *PVMQ* fins a -90°C), per la bona resistència als agents atmosfèrics (el *PVMQ* és especialment resistent a les radiacions), per ser excel·lents aïllants elèctrics, per ser autoextingibles a la flama i per la bona compatibilitat fisiològica. Les seves principals limitacions són la baixa resistència mecànica, la poca resistència a l'atac químic i al vapor d'aigua a més de 120°C , la moderada resistència als olis (comparable a la del *CR*) i l'elevat cost. S'usa allà on altres elastòmers fallen, especialment en el manteniment de les qualitats elàstiques a elevades temperatures (aplicacions aeronàutiques, elèctriques, químiques, de l'automoció).

Les fluorsilicones *FVMQ* combinen l'excel·lent resistència als olis dels polímers fluorats amb la flexibilitat de les silicones a baixa temperatura. Les principals limitacions en el seu ús provenen de les moderades característiques mecàniques i del cost molt elevat.

Fluorelastòmers: FPM, PFE

Constitueixen una àmplia família de polímers fluorats, amb les característiques pròpies dels elastòmers, entre els quals els més interessants són: els copolímers, terpolímers o tetrapolímers de hexafluoropropilè, tetrafluoro-etilè, 1-hidropentafluoroetilè i fluorur de vinilidè, *FPM* (*FKM*, segons ASTM; variants conegudes també per *Viton*, de Du Pont); terpolímer del tipus perfluoroelastòmer, *FPE* (conegut també per *Kalrez*, de Du Pont).

Els elastòmers fluorats *FPM* destaquen per l'excel·lent resistència a la temperatura (fins a 230°C amb puntes de més de 300°C), a l'atac químic (olis, hidrocarburs alifàtics, aromàtics i clorats) i als agents atmosfèrics, per les bones propietats mecàniques (es redueixen molt, però, amb la temperatura), per ser autoextingibles a la flama, per les excel·lents propietats elèctriques i per la molt baixa permeabilitat als gasos. Les limitacions provenen de la moderada resistència als àcids i als àlcals, del comportament moderat a temperatura baixa i de cost molt elevat. Els *FPM* han esdevingut els elastòmers estàndard per a aplicacions en ambients agressius a molt elevada temperatura (juntes, retenidors).

L'elastòmer *PFE*, amb propietats anàlogues al *FPM*, destaca per una resistència molt superior a l'atac químic, tot i que el cost és extremadament elevat. Té aplicacions anàlogues als fluorelastòmers *FPM*, però en medis químics extramadament agressius.

Elastòmers termoplàstics (TPE)

Elastòmers termoplàstics olefínics, TPE-O

Es componen d'aliatges d'elastòmer i termoplàstic (generalment l'*EPM* o l'*EPDM* amb el *PP* o el *LPDE*) i, segons la proporció dels components, les propietats elàstiques s'acosten més a les d'un termoplàstic o d'un elastòmer. Destaquen per la gran resistència a l'envelliment i a l'atac químic de productes inorgànics, pel bon comportament a temperatura (fins a 120°C), la bona resistència a l'abració i a la propagació de fissures, i a les excel·lents propietats elèctriques. Les principals limitacions són el mal comportament als olis i la moderada resistència mecànica. S'apliquen en la indústria elèctrica (recobriments de cables), en l'automoció (paraxocs, alerons, carcasses flexibles), en conductes de rentadores o en corrons d'impressora. El cost moderat fa que n'augmenti l'ús.

Elastòmers termoplàstics d'estirè, TPE-S

Es componen de copolímers de bloc d'estirè, amb segments intercalats de polibutadiè, *SBS*, o poliisoprè, *SIS*. Són els elastòmers termoplàstics que permeten una gamma de dureses més pròxima als cautxús. Destaquen per l'excel·lent comportament a baixes temperatures (-70°C), la bona elasticitat fins a 60°C i les bones propietats elèctriques, però la resistència mecànica és limitada i presenten un pobre comportament a temperatura. Es poden conformar tant amb les tecnologies dels termoplàstics com amb les dels cautxús i són fàcils d'acolorir. S'usen en aplicacions de poc compromís en què el cost del material i del procés són fonamentals: perfils de porta, proteccions de manxa, estores, soles de sabata, mànegues de jardí.

Elastòmers termoplàstics de polièster, TPE-E

Són copolímers de bloc polièter/èster. Destaquen per les dureses relativament elevades (de 85 Shore A a 70 Shore D), per les bones característiques mecàniques i d'elasticitat (tot i que experimenten una considerable fluència després d'una càrrega prolongada), i per la bona resistència als agents atmosfèrics i als olis, però són atacats per hidrocarburs clorats i, a temperatura elevada, són deteriorats pels àcids i els alcohols i el seu cost és relativament elevat. Tendeixen a substituir els termoplàstics flexibles. S'usen en cables, revestiments de corròns, molles, elements de transmissió, tubs flexibles (hidràulics i per a olis), amortidors i membranes de bomba.

Elastòmers termoplàstics de poliamida, TPE-A

Són copolímers de bloc de poliètermida/àcid dicarboxílic. Es comporten com a elastòmers termoplàstics tècnics de dureses relativament elevades (de 60 Shore A a 70 Shore D). Destaquen per la bona elasticitat i resistència mecànica, per l'excel·lent amortiment del soroll i la resistència als carburants, però la temperatura de servei màxima és molt baixa (80°C) i presenten una limitada resistència als olis, als àcids i als àlcalis. S'apliquen a l'automoció (tubs flexibles, juntes, elements d'insonorització), a botes d'esquí i a sellons de bicicleta.

Elastòmers termoplàstics de poliuretà, TPE-U

Variants termoplàstiques dels elastòmers poliuretans, de dureses compreses entre 75 Shore A i 75 Shore D. Destaquen per les elevades característiques mecàniques (resistència a la tracció de 30-45 MPa, resistència a l'abració, resiliència de rebot i tenacitat, amb allargaments a la ruptura considerables), les bones propietats a baixes temperatures, la bona resistència a l'envelliment (intempèrie, radiacions) i les bones propietats elèctriques, essent les principals limitacions la moderada temperatura de servei màxima i el cost. Tenen aplicacions anàlogues als elastòmers permanents de poliuretà (*AU*, *EU*) i competeixen amb els *TPE-E* i els *TPE-A*.

Taula 14.7 Elastòmers

| | | Elastòmers termoplàstics | | | | |
|--|-------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Grup d'elastòmers | | | | | | |
| Denominació ISO 1629 (entre parèntesis, denominacions no normalitzades) | | (TPE-O) Olefinic | (TPE-S) Estirènic | (TPE-E) Polièster | (TPE-A) Poliamida | (TPE-U) Poliuretà |
| Propietats físiques | Unitats | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | - | - | - | - | 1,13÷1,25 |
| Coefficient dilatació | µm/m·K | - | 42 | - | - | - |
| Calor específic | J/kg·K | - | - | - | - | - |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | - | 0,150 | - | - | - |
| Resistivitat elèctrica | Ω·m | - | - | - | - | - |
| Constant dielèctrica | - | - | - | - | - | - |
| Rigidesa dielèctrica | MV/m | - | - | - | - | - |
| Propietats mecàniques | Unitats | | | | | |
| Resistència a tracció ⁽¹⁾ | MPa | 3 | 3 | 15 | 20 | 20 |
| Allargament a ruptura | % | 20 | 14 | 44 | 50 | 55 |
| Tensió (mòdul) ⁽²⁾ | MPa | - | 350÷1300 | - | - | 600 |
| Mòdul elasticitat ⁽³⁾ | MPa | - | - | - | - | - |
| Duresa (Sh A≈IRHD) | Sh A | 55A÷75D | 30÷85 | 85A÷72D | 60A÷70D | 75A÷75D |
| Def. permanent -40°C | % | - | - | - | - | - |
| 20°C | % | [1] | [1] | [2] | [3] | [3] |
| 120°C | % | - | - | - | - | - |
| Resiliència (rebot) ⁽⁴⁾ | [1÷5] | [1] | [1] | [3] | [3] | [3] |
| Resist. a esquinçament | [1÷5] | - | - | - | - | [4] |
| a abrasió | [1÷5] | [2] | [2÷3] | [3] | [2] | [3] |
| Propietats tecnològiques | Unitats | | | | | |
| Cost | pta/kg | >> | > | >>> | >>>> | >>> |
| Conformació | pàg. 63 | - | - | - | Inj/RIM | Inj/Ext |
| T. de servei (mínima) | °C | -40÷-50 | -70 | -50 | -40 | -40 |
| (màxima contínua) | °C | 100÷120 | 60÷80 | 150 | 80 | 100 |
| (màxima 5 h) | °C | - | - | - | - | 120 |
| Resistèn. ozó+ag.atm. | [1÷5] | [3] | [1÷3] | [3] | [2] | [1] |
| olis+dis.org. | [1÷5] | [1] | [1] | [4] | [2] | [3] |
| aigua 100°C | [1÷5] | - | - | - | - | [4] |
| àcids | [1÷5] | [3] | - | - | [2] | [1] |
| àlcals | [1÷5] | [4] | - | - | [2] | [1] |
| flama | [1÷5] | - | - | - | - | - |
| Impermeabilitat gasos | [1÷5] | - | - | - | - | - |
| Color (negre o color) | [N/C] | - | - | - | C | C |

⁽¹⁾ goma pura / goma amb càrregues; ⁽²⁾ deformació 100% / 300%; ⁽³⁾ mòdul d'elasticitat estàtic (deformació < 15%);

| Elastòmers termostables | | | | | | | |
|---|---|---|---|--|---|---|---|
| de bones propietats mecàniques | | | | resistents als agents atmosfèrics | | | |
| NR Cautxú natural | IR Polisoprè sintètic | SBR Cautxú d'es-tirè/butadiè | BR Cautxú de polibutadiè | IIR Cautxú butil | CIIR/BIIR Cautxú butil halogenat | EPDM Copolímer etilè/propilè | EPDM Terp. d'etilè/propilè/diè |
| 0,93 216 2500 0,165 10 ¹³ ÷10 ¹⁵ 2,3÷3,0 16÷24 | 0,93 216 2500 0,165 10 ¹⁴ ÷10 ¹⁵ 2,3÷3,0 16÷24 | 0,94 216 - 0,248 10 ¹³ 2,9 - | 0,94 208 - - - - - | 0,92 194 - 0,092 10 ¹⁵ 2,1÷2,4 - | 0,92/0,93 216 - 0,142 10 ¹⁴ - - | 0,86 - - - 10 ¹³ ÷10 ¹⁵ 3,2÷3,3 30 | 0,86 - - - 10 ¹³ ÷10 ¹⁵ 3,0÷3,5 30÷35 |
| 20/28 300÷900 -/- 1÷10 30÷95 15 8 70 [4÷5] [5] [3÷4] | 20/24 300÷850 -/- - 35÷90 15 8 70 [4÷5] [5] [3÷4] | 7/25 400÷600 -/- - 40÷95 - - - [3] [3] [4] | 3/18 450÷600 -/- - 40÷85 - - - [4÷5] [3] [4÷5] | 5/21 650÷800 -/- - 40÷80 12 10 60 [1] [2÷3] [2] | 5/21 650÷800 -/- - 40÷80 12 10 60 [1÷2] [2] [2] | 5/20 300÷650 -/- - 40÷90 20 4 10 [4] [2] [2÷3] | 7/25 300÷700 -/- - 40÷95 20 8 50 [3÷4] [2÷3] [2÷3] |
| 100 - -45 70÷90 150 [1] [1] [1÷2] [1÷2] [1÷2] [1] [1÷2] [N/C] | 110 - -45 70÷90 150 [1] [1] [2÷3] [2] [2] [1] [1÷2] [N/C] | 90 - -30 80÷100 190 [1] [1] [2÷3] [2] [2] [1] [2] [N/C] | 120 - -45÷-70 75 170 [1] [1] [2÷3] [2] [2÷3] [1] [-] | 200 - -38 110÷130 200 [3] [1] [3] [4] [1] [4] [N/C] | 220 - -38 115÷135 200 [4] [1] [2] [3] [4] [1] [4] [N/C] | 200 - -35 140÷150 220 [4÷5] [1] [4] [3÷4] [4÷5] [1] [2] [N/C] | 190 - -35 130÷145 200 [4÷5] [1] [4] [3] [4] [1] [1÷2] [N/C] |

⁽⁴⁾ resiliència de rebot a 20°C: NR=85%;

Taula 14.7 Elastòmers (continuació)

| Elastòmers termostables (continuació) | | | | | | |
|--|--------------------------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| Grups d'elastòmers | resistents als olis | | | | | |
| Denominació ISO 1629 (entre parèntesis, denominacions no normalitzades) | NBR Acilonitril/ butadiè | CR Policloroprè | CM Polietilè clorat | CSM Polietilè clorosulfonat | EVM Cop. d'etilè/ acetat vinil | |
| Propietats físiques | Unitats | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | 0,95÷1,00 | 1,24 | 1,10÷1,25 | 1,10÷1,27 | 0,98÷1,07 |
| Coefficient dilatació | µm/m·K | 196 | 200 | - | 150 | - |
| Calor específic | J/kg·K | - | 2500 | - | - | - |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | 0,248 | 0,204 | - | 0,112 | - |
| Resistivitat elèctrica | Ω·m | 10 ⁸ | 10 ¹⁰ | - | 10 ¹² | - |
| Constant dielèctrica | - | 13,0 | 6,7 | - | 7,0÷10,0 | - |
| Rigidesa dielèctrica | MV/m | - | 16÷24 | - | 18 | - |
| Propietats mecàniques | Unitats | | | | | |
| Resistència a tracció ⁽¹⁾ | MPa | 7/22 | 12/25 | 10/- | 18/20 | 5/18 |
| Allargament a ruptura | % | 250÷450 | 350÷800 | - | 200÷450 | 400÷500 |
| Tensió (mòdul) ⁽²⁾ | MPa | -/- | -/- | -/- | -/- | -/- |
| Mòdul elasticitat ⁽³⁾ | MPa | - | - | - | - | - |
| Duresa (Sh A ≈ IRHD) | Sh A | 30÷95 | 20÷90 | 50÷98 | 40÷95 | 60÷95 |
| Def. permanent -40°C | % | 45 | 50 | - | - | 95 |
| 20°C | % | 8 | 10 | - | - | 40 |
| 120°C | % | 50 | 30 | - | - | 4 |
| Resiliència (rebot) ⁽⁴⁾ | [1÷5] | [3] | [4] | [2] | [2÷3] | [2÷3] |
| Resist. a esquinçament | [1÷5] | [3÷4] | [4÷5] | [3] | [3] | [2÷3] |
| a abrasió | [1÷5] | [3÷4] | [3÷4] | [3] | [3÷4] | [1÷2] |
| Propietats tecnològiques | Unitats | | | | | |
| Cost | pta/kg | 250 | 320 | 280 | 420 | 260 |
| Transformació | pàg. 63 | - | - | - | - | - |
| T. de servei (mínima) | °C | -20 | -25 | -20÷-30 | -15 | -15÷-30 |
| (màxima contínua) | °C | 100÷130 | 85÷100 | 130÷145 | 120÷140 | 120÷160 |
| (màxima 5 h) | °C | 180 | 180 | 160 | 200 | 200 |
| Resistència ozó+ag.atm. | [1÷5] | [1÷2] | [2÷4] | [5] | [5] | [4÷5] |
| olis+dis.org. | [1÷5] | [3÷4] | [2] | [2÷3] | [2÷3] | [2÷3] |
| aigua 100°C | [1÷5] | [3] | [2] | [2] | [2÷3] | [3] |
| àcids | [1÷5] | [1÷2] | [2] | [3] | [3] | [1÷2] |
| àlcalis | [1÷5] | [2÷3] | [2÷3] | [2÷3] | [4] | [1÷2] |
| flama | [1÷5] | [1÷2] | [3] | [3] | [3÷4] | [1] |
| Impermeabilitat gasos | [1÷5] | [3÷4] | [3] | [3] | [3÷4] | [3] |
| Color (negre o color) | [N/C] | [N] | [N] | [-] | [N/C] | [N/C] |

⁽¹⁾ goma pura / goma amb càrregues; ⁽²⁾ deformació 100% / 300%; ⁽³⁾ mòdul d'elasticitat estàtic (deformació < 15%);

| resistents a altes temperatures | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| AU Poliuretà | ECO Copolímer d' epiclorhidrina | H-NBR Cautxú nitril hidrogenat | ACM Cautxú acrílic | VMQ Elastòmer de silicona | FVMQ Elastòmer de fluorsilicona | FPM Elastòmer fluorat | PFE Elastòmer perfluorat |
| 1,15÷1,23 | 1,27 | 0,95÷0,98 | 1,10÷1,15 | 1,10÷1,35 | 1,35÷1,50 | 1,80÷1,90 | 1,90÷2,00 |
| - | - | - | - | 250 | 250 | - | 230 |
| - | - | - | - | 1250 | - | - | 945 |
| - | - | - | - | 0,225 | 0,225 | 0,225 | 0,190 |
| 10 ⁹ ÷10 ¹² | - | - | - | 10 ¹³ ÷10 ¹⁴ | 10 ¹¹ ÷10 ¹³ | 10 ¹¹ ÷10 ¹³ | 5·10 ¹⁵ |
| 5,0÷8,0 | - | - | - | 2,8÷3,0 | 6,0 | 5÷15 | 4,9 |
| 12÷18 | - | - | - | 25 | 15 | 10÷20 | 18 |
| 20/45 | 6/15 | 8/25 | 4/15 | 3/9 | -/10 | 5/15 | -/21 |
| 250÷450 | 300÷700 | - | 100÷250 | 250÷500 | 200÷400 | 100÷450 | 30÷180 |
| -/- | -/- | -/- | -/- | -/- | -/- | -/- | -/- |
| 10÷400 | - | - | - | - | - | - | - |
| 30÷99 | 40÷90 | 40÷95 | 50÷95 | 20÷80 | 20÷80 | 55÷95 | 65÷95 |
| 25 | - | - | 25 | 10 | - | 50 | - |
| 7 | - | - | 5 | 2 | - | 18 | - |
| 70 | 20 | 30 | 10 | 3 | 30 | 20 | 30 ⁽⁵⁾ |
| [3÷4] | [3] | [4] | [1÷2] | [3] | [2] | [1] | [1] |
| [3÷5] | [3÷4] | [2÷3] | [2] | [1÷2] | [2] | [2] | [2÷3] |
| [5] | [2] | [4] | [1÷2] | [1÷2] | [1] | [2÷3] | [2÷3] |
| 900 | 750 | 2000 | 800 | 1000 | 6500 | 5000 | >>>> |
| - | - | - | - | - | - | - | - |
| -20÷-30 | -40÷-50 | -18 | -20÷-35 | -65 | -55 | -10÷-20 | -10÷-20 |
| 70÷90 | 120÷135 | 120÷145 | 160÷180 | 180÷220 | 175÷200 | 200÷230 | 240÷260 |
| 170 | 220 | 230 | 240 | 280 | >300 | >300 | >300 |
| [3÷4] | [4] | [5] | [3÷4] | [5] | [5] | [5] | [5] |
| [4] | [4] | [4] | [4] | [2] | [4÷5] | [5] | [5] |
| [1] | [1] | [-] | [1] | [3÷4] | [4] | [3÷4] | [5] |
| [1] | [1] | [-] | [1] | [1] | [1÷2] | [2÷3] | [4÷5] |
| [1] | [1] | [-] | [1] | [1] | [1÷2] | [1÷2] | [5] |
| [1÷2] | [2÷3] | [-] | [1÷2] | [1÷2] | [1] | [5] | [5] |
| [3÷4] | [3÷5] | [-] | [3] | [1] | [1] | [4÷5] | [4÷5] |
| [N/C] | [N] | [-] | [N/C] | [C] | [C] | [N] | [C] |

⁽⁴⁾ resiliència de rebot a 20°C: NR=85%; ⁽⁵⁾ a 200°C

14.4 Materials compostos

Introducció

Moltes de les aplicacions d'avui dia (aeronàutica, vehicles, esports d'alta competició, activitats subaquàtiques) exigeixen un conjunt de qualitats (resistència, rigidesa i tenacitat elevades; bona estabilitat dimensional; resistència al deteriorament; i, alhora, una densitat i cost baixos) que difícilment es poden assolir amb un material homogeni, ja que, sovint, la millora d'una d'elles va en detriment d'una altra (per exemple: resistència versus tenacitat o rigidesa versus densitat).

Els materials compostos (*composites* en anglès) s'han concebut per superar aquestes limitacions a partir dels punts bàsics següents: *a)* Dos o més materials treballen de manera combinada; *b)* La disposició mútua dels components és un element de disseny important. *c)* Es busca una millora de les característiques dels materials components (augmentar la resistència, la rigidesa, la tenacitat, l'estabilitat química i tèrmica; disminuir la densitat, el cost).

Quan s'analitzen a un nivell de detall suficient, la majoria de materials estan formats per parts diferenciades (fases en els metalls i les ceràmiques; additius dispersos en els polímers); tanmateix, quan es parla de materials compostos es fa referència a la combinació de materials no miscibles en estructures macroscòpiques (generalment visibles) amb la geometria controlada a través del procés de fabricació.

Malgrat les grans possibilitats de combinació existents, en molts dels materials compostos utilitzats en el disseny de màquines i aparells, com a mínim un dels components és un polímer. A continuació es tracten breu-ment els següents tipus de materials compostos:

a) Polímers reforçats. Materials compostos (polímers i fibres) que adquireixen millors propietats mecàniques i tèrmiques a partir de combinar una matriu de polímer (termoplàstic o termostable) amb fibres resistents.

b) Polímers escumats o expandits. Materials compostos (polímer i un gas) que obtenen una baixa densitat gràcies a la formació, durant la fabricació, d'un gran nombre de cel·les plenes d'aire o d'un gas en el si del polímer.

c) Fustes. Materials compostos naturals (els més utilitzats), formats per llargues fibres de cel·lulosa parcialment cristal·litzada i una matriu de lignina i semicel·lulosa amorfa.

En el límit entre materials i productes o peces elaborades hi ha:

d) Materials compostos estructurals. Materials compostos amb estructures distintes en diferents parts (per exemple, superfície i nucli), a fi d'aprofitar les millors propietats dels materials en cada una d'elles (per exemple, resistència en les capes externes, lleugeresa en les internes). Entre els materials compostos estructurals hi ha les escumes estructurals i els taulells formats per un nucli en forma de rusc d'abella (de cartró o d'alumini), unit a làmines externes de fusta contraplacada, plàstic reforçat o alumini.

Polímers reforçats

Uns dels materials compostos que tenen més aplicacions en la indústria són els polímers reforçats, entre els quals cal distingir: *a) Plàstics reforçats amb fibra curta*, de matriu termoplàstica o termostable i fibra de reforç curta incorporada com a additiu; *b) Plàstics reforçats amb fibra llarga*, generalment de matriu termostable i fibres llargues, sovint disposades segons geometries preestablertes. Cal esmentar també, els productes de cautxú o d'altres elastòmers reforçats amb fibres o teixits de reforç (conductes a pressió, corretges, pneumàtics).

Les fibres, d'una rigidesa molt més alta que la matriu, suporten la major part de la càrrega, però, com que estan separades entre elles, transmeten i reparteixen les forces a través de la matriu (tan sols les parts centrals de les fibres treballen a ple rendiment, mentre que en els extrems es produeix una disminució de les tensions fins a zero). Per a cada fibra hi ha una longitud crítica (20÷150 vegades el diàmetre; 0,5÷1 mm en les de vidre i de carboni) per a la qual el punt central treballa a la màxima tensió; longituds inferiors de la fibra no permeten aprofitar tot el seu potencial resistent, mentre que longituds majors augmenten l'aprofitament. Les fibres curtes es poden incorporar a la matriu com un additiu, fet que facilita el reforçament de molts materials termoplàstics (i alguns de termostables), que poden ser injectats o extruïts, mentre que la fibra llarga exigeix, en general, processos de transformació específics, en els quals o es parteix de masses d'emmotllament preparades, o es col·loquen independentment la fibra i la resina, o es treballa amb fibra contínua impregnada.

Plàstics reforçats amb fibra curta

Els termoplàstics tenen, per la seva pròpia naturalesa, algunes característiques que imposen limitacions en el seu ús, com ara una baixa estabilitat dimensional (coeficients de dilatació molt elevats), una sensible fluència sota càrrega o *creep* (fins i tot a temperatura ambient) i, relacionat amb l'anterior, unes temperatures de servei màximes molt moderades.

Per a millorar aquests aspectes, la major part dels termoplàstics (poliolefines, *PE* i *PP*; poliestirè, *PS*, i els seus copolímers *ABS* i *SAN*; polièsters saturats, *PET* i *PBT*; poliacetals, *POM*; poliamides, *PA 6*, *PA 66*, *PA 11* i *PA 12*; policarbonat, *PC*; poli(èter de fenilè), *PPE*; polisulfones, *PSU*; plàstics fluorats, *PTFE*) es poden reforçar amb fibres curtes. En efecte, molts dels materials termoplàstics que els fabricants ofereixen en el mercat

(especialment, el *PP* i els plàstics tècnics), són reforçats amb fibra, generalment de vidre. El procés de transformació més habitual en els termoplàstics reforçats és l'emmotllament per injecció (a alta pressió) a partir d'un granulat, preparat per mitjà d'una extrusió prèvia, que incorpora la fibra. També es poden transformar per extrusió, emmotllament per bufatge, emmotllament rotacional i termoconformació.

Les millores aportades per les fibres són un fort augment de l'estabilitat dimensional (entre 5÷10 vegades; dilatació de les fibres molt baixa o negativa), un millor comportament a temperatura, sobretot a fluència (les temperatures de servei màximes augmenten uns 15÷30°C en els estirens, uns 50÷70°C en les poliolefines i més de 100°C en les poliamides) i un sensible augment de les característiques mecàniques (resistència a la tracció, mòdul d'elasticitat; però disminueix dràsticament l'allargament a ruptura i en certa mesura la tenacitat).

Plàstics reforçats amb fibra llarga

Aquests materials compostos obtenen la resistència i la rigidesa gràcies a una disposició adequada de fibres resistents (vidre, carboni, aràmida) i a la consistència gràcies a una matriu de resina (polièster, epoxi). Les seves principals propietats són una baixa densitat, una resistència i rigidesa altes (modulables depenent del tipus, el contingut i la disposició de les fibres de reforç), i unes bones estabilitat dimensional i resistència química. Els plàstics reforçats amb fibra llarga han mostrat la seva eficàcia en un ampli camp d'aplicacions (automòbils, embarcacions, avions, cascs, dipòsits, conduccions, carcasses, antenes parabòliques, pales d'aerogenerador, canyes de pescar, raquetes, quadres de bicicletes, esquís), però la fabricació de peces i elements requereix, en la major part dels casos, processos i utilitats específics per a col·locar les fibres i la resina de forma adequada.

Fibres

Les fibres s'han de col·locar en el si del material compost de manera que siguin sol·licitades a tracció, tensions que suporten molt bé. Entre la diversitat de fibres existents (*fibra de bor*, *B*, i *fibra de carbur de silici*, *SiC*, de característiques excel·lents, però de preu molt alt; *fibra de polietilè*, *PE-UHMW*, que, a causa de la fluència s'usa combinada amb altres fibres), les que es troben més fàcilment en el mercat són:

Fibres de vidre

Van ser les primeres a aparèixer i avui dia són les més utilitzades. La seva fabricació es basa en la reunió dels filaments procedents de la filada del vidre fos amb un estiratge a gran velocitat. En la composició de les fibres de vidre hi entren diversos òxids, el principal dels quals és el de silici, SiO_2 (com més alt n'és el percentatge, més altes són les propietats mecàniques i la temperatura de servei). La *fibra de vidre E* (inicialment destinada a usos elèctrics) és la que s'utilitza habitualment i la de cost més baix, mentre que la *fibra de vidre R* (de resistència, o S, de *strength*) té propietats mecàniques més elevades i la *fibra de vidre C* (de *chemical*), té una estabilitat química millorada.

Fibres de carboni

Fibres basades en diferents estats alotròpics del carboni que ofereixen una rigidesa més elevada que la del vidre. Tenen un coeficient de dilatació negatiu en la direcció de la fibra, que compensa en part el coeficient de dilatació positiu de la matriu (peces de gran estabilitat dimensional). La *fibra de carboni HT* (*high tenacity*), la primera que va ser desenvolupada, presenta un bon equilibri de propietats mecàniques, mentre que la *fibra de carboni HM* (*high modulus*) té la màxima rigidesa i la *fibra de carboni HST* (*high strain and tenacity*) és adequada per a suportar impactes.

Fibres d'aràmida (Kevlar)

Són fibres de poliamides aromàtiques que destaquen per la seva lleugeresa i l'enorme capacitat per a absorbir impactes (armilles antibales); són auto-extingibles i resistent als agents químics i, anàlogament a les fibres de carboni, tenen un coeficient de dilatació negatiu en el sentit longitudinal.

Matrius

Les missions de les matrius dels plàstics reforçats amb fibra llarga són mantenir les fibres en la disposició geomètrica elegida, transmetre els esforços a les fibres, evitar que treballin a compressió i protegir-les de l'entorn. Algunes matrius són termoplàstiques (*PP*, *PS*, *PEI*, *PEEK*), però habitualment s'usen resines termostables (*UP* i *EP*; Secció 14.2).

Resines de polièsters insaturats, UP

Junt amb la fibra de vidre són les resines més utilitzades en la fabricació de polímers reforçats amb fibra llarga i donen lloc a materials compostos de bones característiques i de cost moderat. Experimenten una contracció important durant la reticulació, però tenen un ventall suficient de temperatures de servei per a la major part d'aplicacions.

Resines epoxi, EP

Resines de característiques mecàniques més elevades i millor resistència tèrmica que els polièsters insaturats, UP, però també de preu substancialment més elevat. Cal tenir present la forta tendència a absorbir humitat, la qual repercuteix en una disminució de les propietats mecàniques.

Materials intermedis

La fabricació de polímers reforçats amb fibra llarga fa recomanable la preparació de materials intermedis que facilitin el procés de transformació (presentacions de fibres, masses d'emmotllament, *prepregs*).

Presentacions de fibres

Les fibres adopten diferents formes segons la seva aplicació: a) *Roving*, fil sense torsió enrotllat en bobines, base de diversos processos de fabricació com ara la pultrusió, emmotllament per bobinatge continu o discontinu (Figura 14.14, pàg. 129); tallat s'usa també en l'emmotllament per projecció i en la fabricació de *mat*. b) *Mat*, feltre de fils tallats disposats de forma plana en direccions aleatòries que manté la consistència gràcies a una substància aglomerant; s'usa en la fabricació de masses d'emmotllament (*mat* impregnat, SMC) i en l'emmotllament per contacte. c) *Fils tallats*, de diverses longituds (3, 6, 12½, 25, 35 i 50 mm) destinats a l'emmotllament per projecció o a la preparació de *mat* i de masses d'emmotllament.

Taula 14.8 Propietats de les fibres

| | | vidre | carboni | | aràmida |
|---------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Tipus de fibra | | E | HT | HM | Kevlar 49 |
| Propietats físiques | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | 2,60 | 1,75÷1,80 | 1,80÷1,90 | 1,45 |
| Coefficient de dilatació | µm/m·K | 5 | -0,1÷-0,7 | -0,5÷-1,3 | -2÷-6 |
| Propietats mecàniques | | | | | |
| Resistència tracció | MPa | 3400÷3500 | 2700÷3500 | 2000÷3200 | 2800÷3400 |
| Allargament ruptura | % | 3,3÷4,8 | 1,2÷1,4 | 0,4÷0,8 | 1,9÷2,4 |
| Mòdul d'elasticitat | GPa | 72÷73 | 228÷238 | 350÷490 | 120÷186 |
| Resistència específica | MPa·m ³ /Mg | 1300÷1350 | 1500÷1900 | 1050÷1750 | 1950÷2350 |
| Mòdul E específic | MPa·m ³ /Mg | 28 | 125÷135 | 185÷270 | 83÷128 |
| Propietats tecnològiques | | | | | |
| Cost | Pta/kg | 200÷650 | 6000÷8000 | 18000 | 4000÷6000 |
| Diàmetre filament | µm | 3÷25 | 7÷8 | 6,5÷8 | 12 |
| T. de servei (màxima) | °C | 850 | 2500÷3000 | 2500÷3000 | 150 (400) |

Taula 14.9 Termoplàstics reforçats amb fibra curta

| | | PP | | PA 66 | | PC | |
|------------------------------------|-------------------|-------|------|--------|-------|-------|-------|
| Fibra de vidre (%) | | - | 30 | - | 30 | - | 30 |
| Propietats físiques | | | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | 0,90 | 1,14 | 1,14 | 1,37 | 1,20 | 1,44 |
| Coefficient de dilatació | µm/m·K | 180 | 70 | 80 | 25 | 65 | 27 |
| T. termodefl. HDT/A | °C | 45 | 140 | 105 | 255 | 130 | 145 |
| Propietats mecàniques | | | | | | | |
| Resistència tracció | MPa | 28 | 80 | 65 | 130 | 65 | 132 |
| Allargament ruptura | % | 500 | 3 | 250 | 5 | 80 | 3,6 |
| Mòdul d'elasticitat | GPa | 1,20 | 6,20 | 2,00 | 6,50 | 2,30 | 8,60 |
| Mòdul fluència (10 ³ h) | GPa | 0,46 | 3,20 | 0,70 | 4,00 | 2,15 | 6,00 |
| Charpy (sen./amb ent.) | kJ/m ³ | Nt/10 | 22/6 | Nt/2,5 | 56/13 | Nt/28 | 30/11 |
| Duresa a la bola | MPa | 50 | 110 | 80 | 185 | 105 | 145 |
| Propiet. tecnològiques | | | | | | | |
| Cost | Pta/kg | 105 | - | 325 | - | 385 | - |
| T. de servei (màxima) | °C | 100 | - | 100 | - | 130 | - |

Taula 14.10 Plàstics termostables reforçats amb fibra llarga

| | | UP | | EP | | |
|------------------------------------|-------------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fibra de reforç | | vidre-E | vidre-E | Vidre-E | aràmida | carb.-HT |
| Disposició | | <i>mat</i> | <i>roving</i> | <i>teixit</i> | <i>roving</i> | <i>roving</i> |
| (%) | | 30 | 50 | 60 | 30 | 30 |
| Propietats físiques | | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | 1,65 | 1,95 | 1,75 | 1,40 | 1,60 |
| Coefficient de dilatació | µm/m·K | 25 | 12 | - | 0 | -0,2÷0,3 |
| Propietats mecàniques | | | | | | |
| Resistència tracció ⁽¹⁾ | MPa | 110 | 750/22 | 1300/- | 380 | 1400/38 |
| Allargament ruptura ⁽¹⁾ | % | 2,0 | 1,8/0,2 | 1,8/- | 2,0 | 0,8/0,6 |
| Mòdul d'elasticitat ⁽¹⁾ | GPa | 8,50 | 38/10 | 75/- | 22 | 220/7 |
| Propiet. tecnològiques | | | | | | |
| Cost | Pta/kg | - | - | - | - | - |
| T. de servei (màxima) | °C | 150 | 180 | 180 | 80 | 260 |

⁽¹⁾ En les disposicions de roving unidireccional: sentit longitudinal / sentit transversal

Masses d'emmotllament

Masses pastoses compostes per una resina (normalment UP), el reforç de fibra, l'enduridor i altres additius, preparada per al seu emmotllament (premsatge, injecció), que ha de conservar-se refrigerada per tal d'evitar una reticulació prematura. Les formes més freqüents són: *a) SMC (shet moulding compound)*, si les fibres (vidre, carboni, aràmida) tenen orientacions aleatòries en un pla (*mat*), destinats a peces o elements de forma laminar; *b) BMC (bulk moulding compound)*, si les fibres tenen orientació tridimensional, destinades a peces o elements també de formes tridimensionals. Quan contenen estirè per a facilitar l'emmotllament, s'anomenen *premix*.

Prepregs

Teixits de fibra de reforç impregnat de resina amb l'enduridor i altres additius, preparats per a l'emmotllament i que, abans d'usar-se, ha d'emmagatzemar-se en un frigorífic per a evitar una reticulació prematura.

Processos de fabricació amb plàstics reforçats

Hi ha nombrosos processos per a fabricar productes semielaborats, elements i peces amb polímers reforçats, molts d'ells específics per a aquest tipus de material i amb un elevat component manual. Es poden agrupar en: *a) Fabricació de materials intermedis i productes semielaborats; b) Fabricació de peces i elements en processos de motlle obert; c) Fabricació de peces i elements en processos de motlle tancat.*

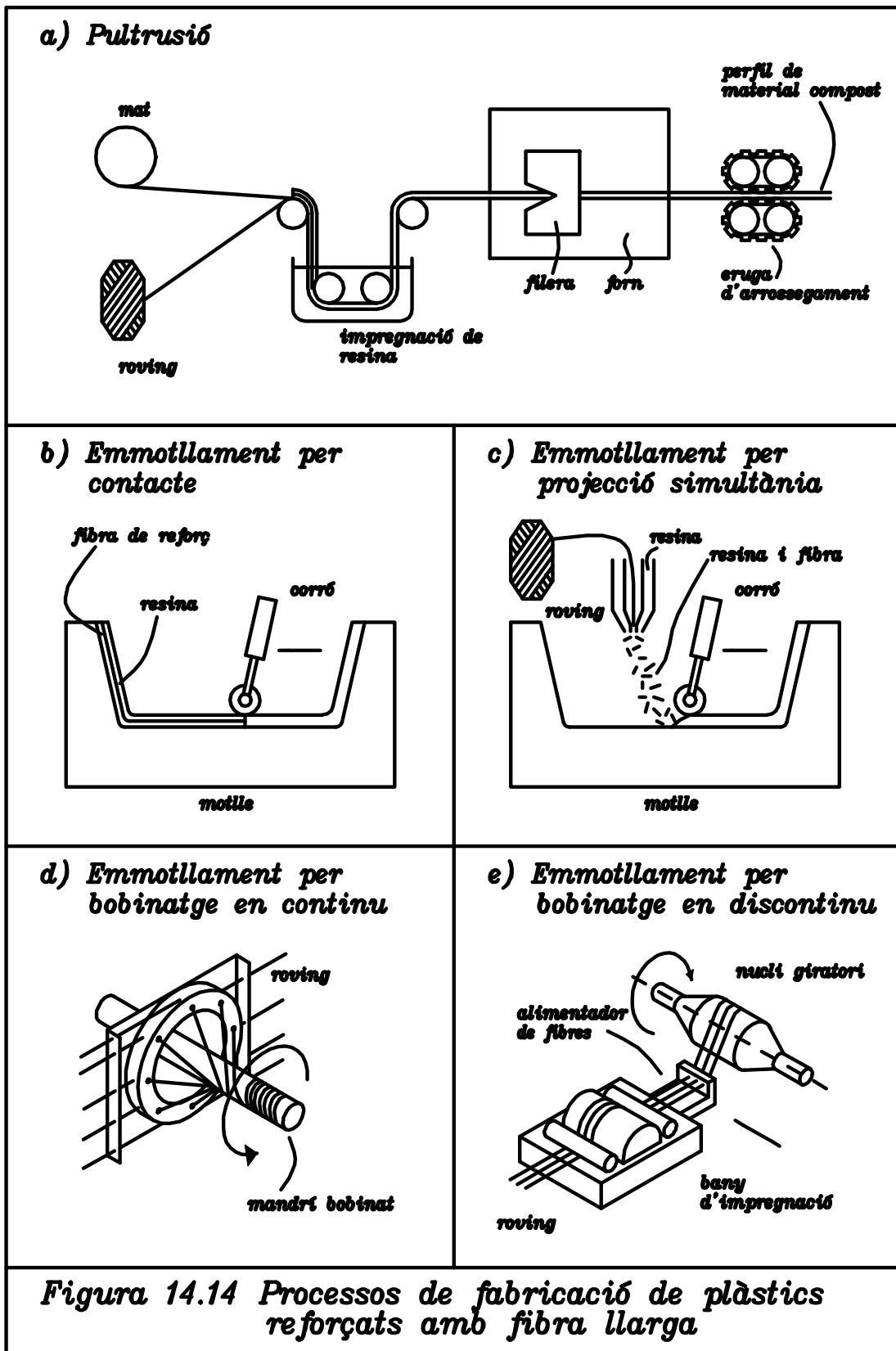
Fabricació de materials intermedis i productes semielaborats

Fabricació de SMC

La fabricació dels SMC es basa a dipositar una capa de resina amb additius sobre una pel·lícula de suport, la qual passa sota un capçal que talla i projecta la fibra en direccions aleatòries; una segona pel·lícula, també impregnada de resina, es reuneix amb la primera per la part superior i, per mitjà d'un tren de corròns, s'assegura la barreja i es calibra el gruix. El conjunt s'emmagatzema en un refrigerador per a la transformació posterior.

Pultrusió

Procés anàleg a l'extrusió que permet obtenir productes semielaborats de fibra contínua (barres, perfils, plaques) d'elevades característiques. Es parteix d'una alimentació de fibres longitudinals i de capes de *mat* que passen per una estació d'impregnació amb resina, les quals es concentren en una filera calefactada amb la forma de la secció final on es produeix la reticulació. Per a fer avançar el material, cal un robust sistema d'estiratge (tren d'erugues o mordasses de moviment alternatiu). Figura 14.14a.



Fabricació de peces en processos de motlle obert

Emmotllament per contacte, per projecció, al buit

L'emmotllament per contacte (Figura 14.14b, pàg. 129) consisteix a aplicar sobre un motlle de fusta (o d'un material anàleg), amb el negatiu de la forma de la peça que s'ha de fabricar, primer una capa antiadherent (*gelcoat*) i, després, capes successives de fibra i de resina líquida fins a obtenir el gruix desitjat. És un procés manual senzill i versàtil, de baixa inversió en utilitatges, que permet fabricar peces de grans dimensions (dipòsits, carros-series, embarcacions) utilitzant un reforç en forma de *mat* o de *teixits*.

L'emmotllament per projecció és una variant de l'anterior que permet una certa automatització per mitjà d'una pistola que talla la fibra i, juntament amb la resina, projecta el material sobre el motlle, on és compactat a mà amb un corró. L'emmotllament al buit també és una variant de l'emmotllament per contacte en el qual, mitjançant el recobriment de la peça per una membrana elàstica i l'aplicació de buit entre la peça i la membrana, s'assegura una compactació que millora les característiques de la peça (en alguns casos es pot aplicar un contramotlle).

Emmotllament per centrifugació

Variant de l'emmotllament per projecció que es realitza projectant la fibra juntament amb la resina en l'interior d'un tub que gira a gran velocitat per mitjà d'un capçal col·locat a l'extrem d'una llança; la força centrífuga produeix la compactació. També pot introduir-se manualment el *mat* o teixit en el tub abans d'iniciar-se el procés.

Emmotllament per bobinatge en continu, en discontinu

Processos que es realitzen per mitjà del bobinatge o trenatge de fibres *roving* prèviament impregnades sobre un nucli giratori amb la forma interior de la peça (el nucli s'extreu o queda formant-ne part), que resulta d'elevada resistència. Si la forma és tubular, permet el bobinatge en continu (Figura 14.14d, pàg. 129), mentre que si és irregular o tancada, cal un bobinatge en discontinu per mitjà d'un robot (Figura 14.14e).

Fabricació de peces en processos de motlle tancat

Els processos en motlle tancat són els ja descrits per als plàstics termostables (Secció 14.1): a) *Emmotllament per compressió* (materials SMC, BMC o introduint prèviament les fibres en forma de *mat*, o teixit, en el motlle); b) *Emmotllament per transferència* (materials BMC o introduint les fibres en el motlle); c) *Emmotllament per injecció-reacció* (R-RIM i S-RIM), introduint prèviament la fibra de reforç en el motlle.

Polímers escumats (escumes) o expandits

Materials obtinguts per escumació o expandiment d'un polímer. Estan formats per una matriu de plàstic o elastòmer (reforçats o no) i unes cel·les d'aire o gas disposades de manera que disminueix la densitat del conjunt.

Els polímers escumats (o escumes) han anat adquirint una importància creixent en aplicacions com ara l'alleugeriment de peces (paraxocs, taulers d'automòbil), en els entorns de relació home-màquina (interiors de vehicles, mobiliari), en l'aïllament tèrmic (edificis, dipòsits, calefaccions, frigorífics) i en l'aïllament acústic (edificis, interiors de vehicles), fins a representar avui dia prop del 10% dels materials basats en polímers.

Processos

Per a escumar els polímers s'usen o bé gasos comprimits, que s'injecten a altes pressions, o bé *agents escumants* que actuen a baixes pressions per mitjà de principis físics (productes de baix punt d'ebullició) o químics (productes que, per descomposició, desprenen gasos del tipus CO , CO_2 , N_2 , NH_3 ; especialment utilitzat en els *PUR*).

Amb l'escumació s'obtenen dos tipus de materials: *a) Escumes homogènies*, generalment de baixa densitat i propietats mecàniques moderades, fabricades normalment per extrusió i que es presenten en blocs, làmines (sovint termoconformables) i perfils. *b) Escumes estructurals (o integrals)*, en què es forma una pell exterior compacta i unes densitats decreixents vers el nucli, distribució que proporciona un comportament mecànic excel·lent; s'obtenen mitjançant extrusió, emmotllament per injecció-escumeig, per bufatge i per rotació, en els termoplàstics; i mitjançant emmotllament per injecció-reacció (RIM, o R-RIM) en els termostables (especialment els *PUR*). El poliestirè (*PS*) expandit (també conegut per *Porexpan*) s'obté pel sistema *styropor* (també aplicat a les poliolefines): el material s'escuma inicialment amb aigua a $100^\circ C$ per a formar unes boletes, les quals després s'expandeixen mitjançant vapor a $110\div 120^\circ C$ en l'interior del motlle.

Propietats

Les *escumes rígides* poden ser *fràgils* (sotmeses a sobrecàrregues es trenquen, com les de *PF*), *tenaces* (cedeixen a les sobrecàrregues, com les de *PVC-U*) o *flexibles* (admeten grans deformacions elàstiques, com les de *PVC-P* o *PUR* tou). Les escumes tenen unes millors relacions rigidesa/densitat i resistència/densitat que les dels materials de base. Cal destacar també l'elevat aïllament tèrmic i acústic, origen de moltes de les seves aplicacions. Altres propietats dels polímers escumats, especialment la resistència química i a l'envelliment, i el comportament a diferents temperatures, poden assimilar-se a les dels materials de base. Les propietats particulars dels polímers escumats donen lloc a assaigs específics (Taula 14.11, pàg. 132).

Materials i aplicacions

En principi qualsevol plàstic o elastòmer és susceptible d'escumar-se (o expandir-se), però els més freqüents són els termoplàstics *PS*, *PE*, *PP* i *PVC*, els termostables *PF*, *UF* i *UP* i, especialment, els versàtils poliuretans, *PUR*, que han tingut un gran desenvolupament en l'automòbil.

Escumes de poliuretà

Hi ha una gran diversitat d'escumes de poliuretà, tant homogènies com estructurals (normalment obtingudes per processos RIM), amb una àmplia gamma d'aplicacions: *a) Escuma rígida de PUR*, material molt reticulat de cel·les tancades, entre tenaç i fràgil, amb densitats de $0,250 \div 0,600 \text{ Mg/m}^3$, que s'utilitza en nuclis d'estructures sandvitx (laminats d'alumini, panells), per a escumar parts buides (automòbils, embarcacions) i com a aïllament tèrmic (frigorífics, dipòsits); *b) Escuma flexible de PUR*, material poc reticulat de cel·les petites i obertes, flexible i elàstic, amb densitats de $0,020 \div 0,060 \text{ Mg/m}^3$, bon aïllant acústic i permeable a l'aire, que s'utilitza per a coixins, seients i tapisseries (mobles, vehicles), esponges, revestiments i elements d'insonorització; *c) Escuma semirígida de PUR*, material de cel·les majoritàriament obertes, excel·lent amortidor de xocs i bon aïllant acústic, amb densitats de $0,060 \div 0,250 \text{ Mg/m}^3$ que, emmotllat, s'usa

Taula 14.11 Normes d'assaig dels polímers escumats

| | ISO | ASTM | DIN |
|---|------|--------|---------|
| <i>Propietats físiques</i> | | | |
| Densitat aparent | 845 | D 1622 | 53420 |
| Conductivitat tèrmica aparent | 2581 | C 518 | 52616 |
| <i>Propietats mecàniques</i> | | | |
| Assaig de tracció (rígids) | 1926 | D 1623 | 53504 |
| Assaig de tracció (flexibles) | 1796 | | 53571 |
| Assaig de compressió (rígids) | 844 | D 1621 | 53421 |
| Assaig de flexió (rígids) | 1209 | D 790 | 53423 |
| Assaig de cisallament (rígids) | 1922 | C 272 | 53427 |
| Deformació per compressió (flexibles) | | D 1546 | 53572 |
| Deformació sota càrrega (flexibles) | 3386 | | 53577 |
| Amortiment dinàmic, resiliència per impacte (flexibles) | 4651 | D 1596 | (53573) |
| <i>Propietats tecnològiques</i> | | | |
| Estabilitat dimensional | 2796 | D 2136 | 53431 |
| Absorció d'aigua | 2896 | D 2842 | 53433 |
| Difusió de vapor d'aigua | 1663 | C 355 | 53429 |
| Comportament a la flama | 3582 | D 1692 | 75200 |

Taula 14.12 Escumes rígides

| | | Poliestirens | | PUR | |
|---------------------------------|-------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | | Styropor | Extrusió | Extrusió | Estructural |
| Propietats físiques | | | | | |
| Densitat aparent | Mg/m ³ | 0,010÷0,030 | 0,025÷0,050 | 0,020÷0,100 | 0,400÷0,600 |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | 0,036 | 0,036 | 0,024 | - |
| Propietats mecàniques | | | | | |
| Resistència tracció | MPa | 0,10÷0,50 | 0,50 | 0,20÷1,10 | 0,10÷0,50 |
| Resistènc. compressió | MPa | 0,06÷0,25 | 0,15÷0,40 | 0,10÷0,90 | 0,06÷0,25 |
| Resistència flexió | MPa | 0,20÷0,50 | 0,40 | 0,20÷1,50 | 0,20÷0,50 |
| Resistència cisallament | MPa | 0,40÷1,20 | 0,90 | 0,10÷1,20 | 0,40÷1,20 |
| Mòdul elast. flexió | GPa | - | - | 0,002÷0,020 | 0,600÷1,050 |
| Propietats tecnològiques | | | | | |
| Cost | Pta/kg | - | - | - | - |
| T. de servei (mínima) | °C | - | - | -200 | -50 |
| (màxima contínua) | °C | 70÷80 | 80÷85 | 130 | 120 |
| (màxima punta) | °C | 100 | 100 | 200 | - |
| Abs. d'aigua (7 dies) | % | 2÷3 | 2 | 1÷4 | - |

Taula 14.13 Escumes semirígides i flexibles

| | | PE | | PVC | PUR |
|-------------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | Styropor | Extrusió | Alta pres. | Extrusió |
| Propietats físiques | | | | | |
| Densitat aparent | Mg/m ³ | 0,025÷0,040 | 0,030÷0,200 | 0,050÷0,100 | 0,020÷0,045 |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | 0,036 | 0,040÷0,050 | 0,020÷0,040 | 0,040÷0,050 |
| Constant dielèctrica | - | 1,05 | 0,4 | 1÷4 | 1,45 |
| Propietats mecàniques | | | | | |
| Resistència tracció | MPa | 0,10÷0,20 | 0,30÷2,00 | 0,30÷0,50 | 0,20 |
| Resistènc. compressió | MPa | 0,03÷0,06 | 0,10÷0,80 | 0,02÷0,04 | - |
| Allargament a ruptura | MPa | 30÷50 | 90÷200 | 80÷150 | 200÷300 |
| Propiet. tecnològiques | | | | | |
| Cost | Pta/kg | - | - | - | - |
| T. de servei (mínima) | °C | - | -70 | -60 | -40 |
| (màxima contínua) | °C | 100 | 70÷110 | 50 | 100 |
| (màxima punta) | °C | - | - | - | - |
| Abs. d'aigua (7 dies) | % | 1÷2 | 0,4÷0,5 | 3 | - |

en paraxocs i revestiments; *d) Escuma estructural rígida de PUR*, material emmotllat per injecció-reacció (RIM), de malla tupida amb cel·les tancades i una pell externa compacta (densitats $0,400 \div 0,600 \text{ Mg/m}^3$ en el nucli i de $1,200 \text{ Mg/m}^3$ a la pell), amb fibres de reforç o sense, que s'aplica a carcasses d'electrodomèstics, components de carrosseria i marcs i perfils de finestra (sobre ànima metàl·lica); *e) Escuma estructural flexible de PUR*, material elàstic emmotllat per injecció-reacció (RIM), de reticulació poc densa, malla espaiosa i una pell semblant al cuir, amb densitats de $0,080 \div 0,300 \text{ Mg/m}^3$, que s'aplica a revestiments de seguretat (volant de l'automòbil), a determinats recobriments de tapisseria i a soles de sabata.

Escumes de poliestirè

El poliestirè és la base de diversos plàstics expandits de densitat molt baixa amb importants aplicacions: *a) Escuma rígida (PS o SAN) (Porexpan)*, fa-bricada pel sistema *styropor* (estructura granulada) de color blanc, de cel·la tancada i densitats de $0,010 \div 0,080 \text{ Mg/m}^3$; s'aplica per a l'aïllament tèrmic i sonor, l'embalatge d'objectes delicats i com a element de reompliment per a la construcció (variant ignífuga); *b) Escuma extruïda de PS*, de qualitat millor que l'anterior i densitats de $0,025 \div 0,050 \text{ Mg/m}^3$; es fabrica per extrusió en forma de blocs, làmines (admeten la termoconformació), perfils i cossos bufats (envasos d'un sol ús, aïllament tèrmic); *c) Escuma estructural (S/B o ABS, eventualment amb fibres de reforç)*, de consistència llenyosa i densitats de $0,400 \div 900 \text{ Mg/m}^3$; s'usa en peces i components per a embalatges, en la indústria del moble i per a l'aïllament tèrmic.

Escumes de clorur de polivinil

Polímers escumats basats en el PVC: *a) Escuma estructural PVC-U* de densitat $0,700 \text{ Mg/m}^3$; s'usa en la construcció (interiors i exteriors) en forma de panells termoconformables; *b) Escuma de PVC-U*, de cel·les tancades i densitats de $0,040 \div 0,130 \text{ Mg/m}^3$; s'usa, en blocs o làmines, com a nucli en materials sandvitx per a embarcacions, boies i contenidors criogènics; *c) Escuma de PVC-P*, de cel·les tancades i densitats de $0,050 \div 0,150 \text{ Mg/m}^3$; s'usa, en blocs o làmines, com a material de gran resiliència per amortir vibracions en les màquines; *d) Escuma de PVC-P*, de cel·les obertes i densitats de $0,070 \div 0,300 \text{ Mg/m}^3$; s'usa en l'aïllament del so.

Escumes de poliolefines

Polímers escumats basats en el PE (darrerament també en el PP), reticulats o no, de semirígid a rígids, amb cel·la tancada, que tenen una gran capacitat d'absorbir xocs sense trencar-se. Es poden fabricar tant pel sistema *styropor*, com per extrusió (làmines) o per injecció-escumeig. S'usa per a nuclis de paraxocs, embalatge d'objectes delicats, contenidors i palets.

Fustes i productes derivats

Materials compostos naturals que es componen fonamentalment de cèl·lules longitudinals molt resistents de *cel·lulosa* (fibres) unides per la *lignina* (matriu) amb forts ellaços tridimensionals. Les fustes havien estat els materials de base per a la fabricació de les estructures i les bancades de les màquines, però avui dia han estat substituïdes pels metalls. Tanmateix, les fustes mantenen una gran importància en diversos sectors industrials (mo-ble, construcció, embarcacions) i algunes aplicacions relacionades amb les màquines (models de fosa, mànecs d'eines, bastides, prototipus).

Propietats

Les fustes són materials fortament anisòtrops, més resistents en la direcció de les vetes (longitudinal del tronc) que en les direccions perpendiculars (radial i tangencial al tronc) i més resistents a tracció que a compressió. Són molt sensibles al contingut d'humitat que afecta fonamentalment les propietats mecàniques (com més seques més resistents) i la contracció (des de fusta verda a fusta assecada). Si bé les fustes són menys resistents i rígides que els metalls, les baixes densitats proporcionen relacions de resistència/densitat i rigidesa/densitat de valors molt acceptables.

Contingut d'humitat, contracció i densitat

El *contingut d'humitat* (CH , en %) és el percentatge d'aigua expressat sobre el pes de la fusta assecada al forn. En el *punt de saturació de les fibres*, PSF , les fustes retenen la màxima quantitat d'aigua combinada ($\sim CH=30\%$, en la majoria d'elles). Les *fustes verdes* normalment retenen quantitats addicionals d'aigua en els intersticis del lumen ($CH=30\div 200\%$), més altes en l'albeca que en el cor, efecte més acusat en les fustes toves que en les dures (Taula 14.14, pàg. 139). La humitat ambiental i la temperatura determinen un *contingut d'humitat d'equilibri*.

Per damunt del PSF les fustes són dimensionalment estables i les propietats mecàniques són aproximadament constants, mentre que, per a continguts d'humitat inferiors, es contreuen alhora que milloren les propietats mecàniques. Les contraccions més altes són la tangencial i la radial mentre que la longitudinal té valors molt petits (normalment $<0,2\%$); la contracció volumètrica és aproximadament la suma de les tres anteriors. Atès que les fustes són fortament anisòtrops, en assecar-se es guerxen de diferent manera segons la zona de la secció del tronc d'on provenen.

La *densitat específica* (vegeu la *densitat real* en el paràgraf següent), quocient entre la massa de l'estructura de fusta (sense aigua) i el volum que ocupa, augmenta quan la fusta perd humitat per sota del PSF (es poden interpolar els valors de la Taula 14.14) i es manté constant per damunt d'aquest valor.

Propietats físiques

Les *densitats reals* de les fustes (comptant la humitat), obtingudes multiplicant les densitats específiques pel factor $(1+CH/100)$, són baixes ($0,2\div 1,1 \text{ Mg/m}^3$) i la major part d'aquests materials floten en aigua. El coeficient de dilatació longitudinal és molt baix ($3\div 4,5 \mu\text{m/m}\cdot\text{K}$) mentre que el radial i tangencial és més elevat ($20\div 35$ i $30\div 45 \mu\text{m/m}\cdot\text{K}$). El calor específic depèn de la temperatura i del contingut d'humitat ($580\div 630 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ per a les fustes seques). La conductivitat tèrmica és molt més baixa que la dels metalls i fins i tot que la de les ceràmiques i plàstics ($0,10\div 0,15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) i, per tant, són excel·lents aïllants tèrmics. La conductivitat elèctrica és de $10^{14}\div 10^{16} \Omega\cdot\text{m}$, en les fustes seques, i de $10^3\div 10^4 \Omega\cdot\text{m}$, en el *PSF*. La constant dielèctrica de les fustes seques és de $2\div 5$ i la de les fustes humides és de $5\cdot 10^3\div 10^6$. El factor de pèrdues dielèctriques va de 0,01 per a fustes toves seques fins a 0,95 per a fustes dures saturades.

Propietats mecàniques

Per a caracteritzar el comportament mecànic fortament anisòtrop de les fustes són necessaris 3 mòduls d'elasticitat, 3 mòduls de rigidesa i 6 coeficients de Poisson (9 d'ells independents) i les resistències corresponents, però se solen donar només alguns d'aquests valors: resistència i mòdul d'elasticitat a flexió en el sentit longitudinal de les vetes; resistència a compressió en el sentit longitudinal i perpendicular a les vetes; resistència a cisallament en el sentit longitudinal a les vetes. En alguns casos també es donen la resistència a l'impacte a flexió, la resistència a tracció perpendicular a les vetes i la duresa per penetració d'una bola. El coeficient de fricció contra una superfície llisa va de $0,3\div 0,5$ per a fustes seques a $0,7\div 0,9$ per a fustes en el punt de saturació de les fibres.

Propietats tecnològiques

Les fustes es treballen bé (normalment, millor com més baixa és la densitat) i és apreciada la facilitat de poliment (funció de la naturalesa fibrosa i no necessàriament relacionada amb l'aptitud per al tall). Amb la llum, les fustes perden el color i esdevenen grises (capa fina de cel·lulosa degradada i microorganismes). Si estan constantment humides o seques, mantenen bé les propietats mecàniques, però, si la humitat i la temperatura varien, experimenten un decaïment de la resistència amb el temps. Les fustes tenen una bona resistència a l'atac químic (més als àcids i a les sals que als àlcalis), però, per l'acció de l'aigua o de diversos líquids orgànics, poden inflar-se de forma irreversible o degradar-se per hidròlisi de la cel·lulosa. Les fustes cremen amb facilitat i algunes són atacades per insectes o diversos microorganismes. Hi ha diferents tractaments de la fusta que milloren la resistència química, al foc i a l'atac d'insectes i fongs.

Tipus de fusta

Segons la naturalesa de les espècies, les fustes es poden classificar en *fustes fortes*, *fustes toves*, *fustes resinoses* i *fustes exòtiques*. Algunes de les més utilitzades són:

Fustes fortes

Acàcia. Fusta dura i elàstica que no és atacada pels corcs i resisteix bé a la intempèrie i sota l'aigua, però s'esquerda amb facilitat. S'utilitza en mobles, embarcacions i models de fosa.

Faig. Fusta d'un color rosat molt tenaç i que es pot corbar. És densa i resistent, però es corca amb relativa facilitat. S'utilitza per a paviments, mànecs d'eina i mobles.

Freixe. Fusta de color molt clar (quasi blanca), molt elàstica i amb poques deformacions permanents, més dura i resistent que el roure, però poc resistent a la intempèrie i és afectada pels fongs. S'utilitza en elements de carrosseria, en aparells de gimnàstica, esquís, mànecs d'eines i remos.

Noguera. Fusta dura de color marró fosc, de textura fina, que es treballa bé a màquina (bon poliment i acabament), però es corca fàcilment. S'utilitza en la construcció de mobles, tant massissos com aplacats, en marqueteria i en culates d'escopeta de vi.

Roure/alzina. Fustes dures i elàstiques que presenten problemes en l'assecatge. Poden resistir diversos segles submergides en aigua i s'utilitzen en la construcció de ponts, bastides, vaixells, mobles, paviments, models de fosa, bótes

Fustes toves

Bedoll. Fusta de fibres rectes i fines, de color groc pàl·lid, que no resisteix a la intempèrie i és atacada pels corcs. És molt utilitzada en la fabricació de contraplacats.

Pollancre. Fusta de color blanc, molt tova, lleugera i fàcil de treballar, però molt poc resistent. S'utilitza en mobles corrents, caixes d'embalatge, contraplacats i, també, en la fabricació del paper.

Tell (o *til·ler*). Fusta de color rosa pàl·lid, de veta fina i homogènia, que es treballa bé però és atacada pels corcs. S'utilitza per a pasta de paper.

Fustes resinoses

Avet. L'*avet comú*, de fusta blanquinosa amb molts nusos durs (sovint sal-ten), és poc resistent a la intempèrie i és atacada per fongs, però el seu cost és baix; s'utilitza en mobles barats i en la construcció. L'*avet roig*, d'estructura fina més apreciada, s'utilitza en elements per a petits avions.

Cedre. Fusta de color rogenc rosat, de textura uniforme, fàcil de treballar i resistent als insectes. S'utilitza en revestiments d'embarcacions i revestiments interiors de mobles (l'olor allunya els insectes).

Melis. Fusta molt compacta de color rogenc, amb una forta impregnació de resina i gairebé sense nusos, amb una gran estabilitat a la humitat (submergida en aigua es va endurent cada cop més) i no és atacada pels insectes. Es treballa bé i és resistent al desgast. S'utilitza en bigues, mobles, pals i travesses de ferrocarril.

Pi. El *pi blanc* és una fusta lleugera que s'asseca fàcilment al forn, mode-radament resistent i fàcil de treballar, de petita contracció i cost baix. S'utilitza en la construcció, en marcs de portes i finestres, en caixes i en mobles barats. El *pi roig* (també conegut per pi de Flandes) és una fusta tova de fibra recta i contínua, fàcil de treballar, tot i que presenta petits nusos. Té aplicacions anàlogues a les del pi blanc.

Fustes exòtiques

Balsa. És la fusta més lleugera. D'estructura basta, porosa i tova, ofereix una fàcil elaboració i s'utilitza en l'aïllament tèrmic i acústic i en la fabricació de petits avions i en aerodelisme.

Banús (o *èben*). Fusta de color negre, molt dura i compacta, més densa que l'aigua, que es poleix molt bé. S'usa en mobles de luxe i pianos.

Caoba. Fusta molt fina i compacta que no s'altera per la humitat ni és atacada pels corcs. S'usa en mobles de cost elevat i en hèlices d'avió.

Productes derivats de la fusta

La grandària de les peces de fusta depèn en gran mesura de la dimensió dels arbres, de l'anisotropia de la fusta i de la presència de nusos. Per a aprofitar millor la fusta dels arbres i per a obtenir materials de més uniformitat, millors característiques mecàniques i dimensions més grans, la fusta es transforma en diversos tipus de productes derivats:

Fustes laminades-encolades

Productes llargs o plans, rectes o corbats, de bona estabilitat dimensional, que s'obtenen encolant, per mitjà d'una resina termostable (les fenòliques són les que resisteixen millor la humitat), llistons o elements de reduïdes dimensions amb les vetes disposades paral·lelament. S'usen per a raquetes de tennis, esquís i bigues o estructures d'edificis.

Contraplacats

Làmines fabricades encolant diverses fulles primes de fusta (obtingudes per tall en el sentit de desenrotllament d'un tronc), unes sobre altres amb les fibres segons direccions alternativament perpendiculars i en nombre imparell per a equilibrar la tendència a l'arqueig. Tenen propietats mecàniques iguals en totes les direccions del pla i bona estabilitat dimensional.

Conglomerats

Plafons de dimensions semblants als contraplacats i gruixos generalment superiors formats a partir d'encenalls i de partícules llargues de fusta que, després d'assecades, s'untent amb una resina termoendurable i es conformen per premsatge. Malgrat que les propietats mecàniques són baixes, permet aprofitar fins el 90 % de la fusta dels arbres (50% en les peces serrades).

Taula 14.14 **Fustes**

| Nom de l'arbre | Fustes toves | | Fustes fortes | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-----------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| | Pi blanc | Avet | Roure | Faig | Freixe | |
| Propietats físiques | | | | | | |
| Densitat específica ⁽¹⁾ | Mg/m ³ | 0,35/0,38 | 0,37/0,39 | 0,60/0,68 | 0,56/0,64 | 0,55/0,60 |
| Propietats mecàniques | | | | | | |
| Resistència flexió ⁽²⁾ | MPa | 33/68 | 41/68 | 58/106 | 60/104 | 66/105 |
| Mòdul elastic. flexió ⁽²⁾ | GPa | 8,3/10,2 | 8,1/10,5 | 8,7/12,5 | 9,5/12 | 10/12 |
| Resist. compres. ⁽²⁾⁽³⁾ | MPa | 17/35 | 20/41 | 25/52 | 25/50 | 28/52 |
| Resist. compres. ⁽²⁾⁽⁴⁾ | MPa | 1,3/3,3 | 1,9/3,7 | 4,7/7,5 | 3,8/7 | 4,7/8,1 |
| Resist. cisallam. ⁽²⁾⁽³⁾ | MPa | 4,7/7,3 | 5,3/7,7 | 8,7/14 | 9/14 | 9,5/13,4 |
| Propiet. tecnològiques | | | | | | |
| Cost | Pta/kg | 50÷60 | - | - | - | - |
| Contingut humitat ⁽⁵⁾ | % | 62/148 | 98/160 | 64/78 | 55/72 | 46/44 |
| Contracció radial/tang. | % | 2,1/6,1 | 3,3/7 | 5,6/10,5 | 5,5/11,9 | 4,9/7,8 |
| Contracció volumètrica | % | 8,2 | 9,8 | 16,3 | 17,2 | 13,3 |

⁽¹⁾ La densitat específica (estructura de la fusta, sense aigua): CH=30% / CH=12%; ⁽²⁾ CH= 30% / CH=12%;

⁽³⁾ Direcció paral·lela a la veta (o gra); ⁽⁴⁾ Direcció perpendicular a la veta (o gra); ⁽⁵⁾ CH fusta verda: cor / albeca

14.5 Ceràmiques

Introducció

Les ceràmiques són materials inorgànics de composició fixa, units per enllaços iònics o covalents, constituïts per metalls i no metalls, que poden tenir una gran diversitat d'estructures cristal·lines. El seu nom prové del terme grec *keramikos*, que significa "cremat", atès que el procés normal d'obtenció d'aquests materials demana un tractament tèrmic o una cocció a temperatura elevada.

Les propietats més destacades de les ceràmiques més habituals són: *a*) Densitat relativament baixa ($2,20 \div 5,60 \text{ Mg/m}^3$); *b*) Dilatació tèrmica molt baixa ($0,5 \div 15 \text{ } \mu\text{m/m}\cdot\text{K}$), que redunda en una bona estabilitat dimensional; *c*) Conductivitat elèctrica baixa (fora d'algunes ceràmiques conductores, com el grafit) i conductivitat tèrmica també baixa (entre la dels metalls i la dels polímers), ja que no disposen d'electrons lliures; *d*) Rigidesa ($60 \div 460 \text{ GPa}$) i duresa ($350 \div 3000 \text{ HK}$) molt elevades; *e*) Resistència mecànica moderadament alta ($60 \div 850 \text{ MPa}$); *f*) Tenacitat i ductilitat baixes; *g*) Resistència química molt elevada a causa de l'estabilitat dels enllaços químics forts. *h*) Les temperatures de fusió són molt elevades ($2000 \div 4500 \text{ }^\circ\text{C}$) i, generalment, també ho són les temperatures de servei.

Les ceràmiques inclouen una gran diversitat de materials utilitzats en una gran varietat de sectors econòmics: els productes estructurals derivats de l'argila (maons, rajoles, teules) i els ciments en la construcció; les *porcellanes* (vaixelles, sanitaris); les *ceràmiques refractàries* (revestiment de forns); les *ceràmiques abrasives* (moles i elements abrasius); els *vidres* (portes, finestres, parets, claraboies, vasos i ampolles, lents); i les *ceràmiques d'enginyeria* (peces estructurals de les màquines, coixinets, segells, aïllaments tèrmics i elèctri

compostos, ja sigui com a fibres de reforç (vi-dre, carboni), com a partícules (*cermets*, materials compostos obtinguts per sinterització entre una ceràmica i una matriu de metall que proporciona tenacitat al conjunt; un d'ells és la *widia*) o com a veritables materials compostos de ceràmica-ceràmica (fibres i matriu).

A continuació s'analitzen els dos grups de materials ceràmics que tenen una incidència més important en el disseny de màquines: els vidres i les ceràmiques d'enginyeria.

Vidres

Constitueixen un grup de materials ceràmics, amorfs i transparents, de gran importància pràctica (finestres, òptica, recipients, elements elèctrics) formats per combinacions de diversos òxids, el principal dels quals és l'òxid de silici (SiO_2), mentre que d'altres (Na_2O , K_2O , CaO , BaO , MgO , Al_2O_3 , B_2O_3 , PbO) entren en diferents proporcions segons el tipus de vidre.

Propietats

Els vidres són materials durs i fràgils, de resistència a tracció moderada (molt més resistents a compressió) i de mòdul d'elasticitat semblant al de l'alumini. Mals conductors de la calor i de l'electricitat, però de bones propietats dielèctriques (alguns són excel·lents) i de gran resistència a l'atac químic. També es distingeixen per ser molt impermeables.

El comportament tèrmic dels vidres és particular, ja que no presenten una temperatura de fusió definida en la qual el material es transforma de líquid a sòlid. Hi ha, en canvi, una temperatura de transició vítria, T_g , marcada per un canvi de pendent en la corba de volum específic (inversa de la densitat), per sota de la qual el material es considera que és un vidre i per damunt, primer un líquid sobrefredat i després un líquid.

A la pràctica es distingeixen quatre temperatures d'interès per a la fabricació, transformació i utilització del vidre, que, en ordre decreixent, són: *a) Punt de treball* (viscositat aproximada de 1000 Pa·s), per sobre del qual el vidre es pot deformar plàsticament; *b) Punt d'ablaniment* (viscositat de $4 \cdot 10^6$), en què el vidre es pot manipular sense produir deformacions significatives; *c) Punt de recuita* (viscositat de 10^{12}), en el qual la difusió atòmica és suficient per a produir en un temps breu prefixat (1/4 hora) l'alliberament de tensions; *d) Punt de deformació*, (viscositat $3 \cdot 10^{13}$) en què es produeix la fractura abans que la deformació (la temperatura de transició vítria és més alta que aquest punt).

Fabricació i productes

Transformació

Les peces i els elements de vidre es poden fabricar per mitjà de diferents procediments, alguns dels quals guarden gran similitud amb els descrits per als plàstics: *a) Laminació en calent*. Procediment per a fabricar làmines planes de vidre gruixut; s'aboca el vidre en una taula de manera que forma una capa que és laminada i estirada per corròns; *b) Estiratge vertical*. A partir del material

fos del forn, es realitza un estiratge en sentit ascendent per mitjà d'un tren de parelles de corròns que alhora controlen el gruix; és el procediment utilitzat per a obtenir làmines de vidre primes (finestres, portes); *c) Premsatge*. A partir d'una certa quantitat de massa pastosa, es realitza l'emmotllament per mitjà d'una matriu i un punxó (o contramatriu amb forma); s'obtenen peces de parets gruixudes (per exemple, les peces que constituïran els tubs de televisió); *d) Bufatge*. A partir d'una petita massa de material, es bufa aire en el seu interior i, per tant, passa a formar-se un cos buit; aquest procés es pot realitzar a l'interior d'un motlle (emmotllament per bufatge); ampolles, làmpades elèctriques; *e) Formació de fibres*, obtingudes a partir d'un estiratge del material a gran velocitat després de passar per unes fileres amb uns petits orificis.

Tractaments

El vidre es pot sotmetre a tractaments posteriors per proporcionar-li determinades característiques o formes: *a) Corbament o ondulació*. Es deforma el vidre després d'escalfar-lo per damunt del punt de deformació (procés anàleg a la termoconformació dels termoplàstics); *b) Recuita*. S'escalfa el vidre fins al punt de recuita i es refreda lentament, amb l'objectiu d'eliminar tensions; *c) Tremp*. S'escalfa el vidre per sobre del punt d'ablaniment i es refreda ràpidament, amb l'objectiu d'introduir tensions residuals de compressió en les capes superficials del material per tal d'augmentar la resistència (portes de vidre, parabrises d'automòbil, lents).

Processos especials

A partir del vidre també s'obtenen altres productes especials: *a) Vidres laminats*, constituïts per diferents làmines superposades unides per un material orgànic; tenen més resistència que els vidres no laminats, ja que les fissures no es propaguen d'una làmina a l'altra; *b) Vidres armats*, proveïts interiorment d'una tela metàl·lica que s'incorpora en el moment de fabricar-los, també més resistents que els vidres convencionals; *c) Desvitri-ficació*, transformació del vidre amorf en cristal·lí (es perd la transparència) controlada a través de determinats agents nucleants (òxid de titani) per tal d'obtenir les *vitroceràmiques*.

Tipus de vidre

Hi ha diversos tipus de vidre, que es diferencien per la combinació d'òxids de què està format, les propietats i les aplicacions. A continuació es descriuen els tipus de vidre més freqüents.

Taula 14.15 Vidres

| | | Sílice (pura/96%) | Vidre sosa- calç | Vidre boro- silicat | Vidre alumino- silicat | Vidre alt % plom |
|-------------------------------|-------------------|----------------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------|
| Composició | | | | | | |
| SiO_2 | % | 96÷100 | 70÷74 | 80,5 | 57 | 35 |
| Diversos òxids ⁽¹⁾ | % | - | 24÷28 | 4,4 | 18,5 | - |
| Al_2O_3 | % | - | 0,5÷2,5 | 2,2 | 20,5 | - |
| B_2O_3 | % | 0÷4 | - | 13,9 | 4 | - |
| PbO | % | - | - | - | - | 58 |
| Propietats físiques | | | | | | |
| Densitat | Mg/m ³ | 2,50 | 2,22 | 3,22 | - | - |
| Coefficient de dilatació | µm/m·K | 0,55 | 9 | 3,2 | 42 | 91 |
| Conductivitat tèrmica | W/m·K | 1,3 | 1,7 | 1,4 | - | - |
| Resistivitat elèctrica | Ω·m | >10 ¹⁸ | >10 ¹⁰ | 10 ¹³ | - | - |
| Propietats mecàniques | | | | | | |
| Resistència tracció | MPa | 110 | 60 | 65 | - | - |
| Resistència compressió | MPa | - | 1000 | 1200 | - | - |
| Mòdul d'elasticitat | GPa | 75 | 73 | 69 | - | - |
| Coefficient de Poisson | - | 0,16 | 0,23 | 0,20 | - | - |
| Duresa | HK | - | - | - | - | - |
| Propiet. tecnològiques | | | | | | |
| Cost | Pta/kg | - | 140 | 280 | - | - |
| Temperatura de fusió | °C | 1500÷1660 | 730 | 820 | 915 | 580 |

⁽¹⁾ Suma dels percentatges de Na_2O , K_2O , CaO , BaO i MgO .

Vidres de sílice fosa; vidres d'alt contingut de sílice (Vycor)

Els vidres de sílice fosa d'un elevat grau de puresa i poden utilitzar-se fins a 1000°C, tenen un coeficient de dilatació tèrmica molt baix i una resistència al xoc tèrmic elevada, però són difícils de fondre i el seu cost és molt alt. Per mitjà d'un procés complex (desenvolupament d'una estructura bifàsica que, per lixiviació amb un àcid, se n'elimina una per donar un material de sílice bastant pur, el qual es compacta en un forn a més de 1000°C, amb una reducció del 30% del volum) s'obtenen vidres d'alt contingut de sílice (96%) amb un cost inferior, malgrat tenir característiques lleugerament inferiors a la sílice pura. S'utilitzen per a material de laboratori.

Vidres de sosa-calç

La incorporació de sosa, Na_2O , i calç, CaO , a l'òxid de silici produeix una reducció dràstica de la temperatura de fusió fins a uns 730°C i, per tant, se'n

facilita molt la fabricació. Aquests vidres són transformats per prem-satge o bufatge i el seu cost és molt moderat, però tenen una resistència química i una resistència a la calor moderades. Són els vidres més utilitzats (més del 80%) en aplicacions com ara finestres, envasos, làmpedes elèctriques.

Vidres de borosilicat (pyrex)

En aquests tipus de vidre s'han substituït la major part dels òxids alcalins per òxid de bor. Destaquen pel baix coeficient de dilatació, la bona resistència al xoc tèrmic i la bona estabilitat química. S'utilitzen especialment a la indústria química.

Vidres d'aluminosilicat

Vidres amb un baix contingut de sílice, on augmenta molt l'alúmina i l'òxid de magnesi en detriment dels òxids de sodi i de calci. Destaquen per la seva resistència a temperatura i pel baix coeficient de dilatació.

Vidres al plom

Vidres caracteritzats per un baix percentatge de sílice i un alt percentatge d'òxid de plom. La temperatura de fusió és baixa i s'utilitzen per a fer tanques hermètiques per soldadura. La propietat d'absorbir els raigs X li proporciona aplicacions en finestres absorbents, làmpedes fluorescents i tubs de TV. Els elevats índexs de refracció proporcionen aplicacions en lents acromàtiques i vidres decoratius.

Vidres E

Amb un baix contingut d'òxids alcalins i amb percentatges creixents d'òxid de bor, alúmina i òxid de calci (8,5 14,5 i 22%) s'utilitzen en forma de fibra per a la fabricació de materials compostos resina-fibra.

Vidres elèctrics

Vidres de diverses composicions (alt contingut d'òxid de bor, 28%, i 70% de sílice; contingut moderat d'òxid de plom, 21%, i 63% de sílice), amb elevada resistència elèctrica i baixes pèrdues dielèctriques, destinats a diverses aplicacions en electricitat i electrònica.

Vitroceràmiques

Materials de composicions anàlogues a les dels vidres d'aluminosilicat que, per mitjà d'agents nucleants (7÷15% d'òxid de titani, TiO_2), es desvitrifiquen i adquireixen un gra molt fi que proporciona interessants propietats mecàniques (bona resistència) i tèrmiques (coeficient de dilatació molt baix, petit xoc tèrmic, conductivitat tèrmica elevada), amb interessants aplicacions (cuines i forns, aïllaments elèctrics, circuits integrats).

Ceràmiques d'enginyeria

Les ceràmiques d'enginyeria en general estan formades per un sol compost pur o quasi pur i ofereixen un conjunt de propietats (gran estabilitat a temperatures elevades, bones propietats lliscants i a l'abradió, aïllament tèrmic, propietats elèctriques, magnètiques i òptiques) que les fan úniques en determinades aplicacions, malgrat que moltes d'elles no han trobat un lloc destacat en el mercat. En aquest apartat s'estudien les ceràmiques d'enginyeria usades en aplicacions termomecàniques, entre les quals les més freqüents avui dia són l'alúmina, Al_2O_3 ; el carbur de silici, SiC ; el nitrur de silici, Si_3N_4 ; l'òxid de zirconi (o zircònia), ZrO_2 ; i els sialons.

Propietats

Propietats físiques

Les propietats físiques més destacades de les ceràmiques d'enginyeria són: *a)* Densitats baixes en comparació amb els metalls (és un estímul per a la reducció de masses); *b)* Dilatacions tèrmiques petites (peces de gran estabilitat dimensional); *c)* Conductivitat tèrmica baixa (la zircònia s'utilitza com a aïllant; però la calor generada per fricció també pot originar-hi microfissures per xoc tèrmic); *d)* Bones propietats com a aïllants elèctric i com a dielèctrics (aplicacions en electricitat i electrònica).

Propietats mecàniques

Les ceràmiques d'enginyeria destaquen per les propietats mecàniques següents: *a)* Duresa elevada (es mesura amb els assaigs Vickers i Knoop), es-tretament relacionada amb l'elevada resistència al desgast; *b)* Rigidesa elevada (el mòdul d'elasticitat acostuma a ser més alt que el dels metalls); *c)* Baixa tenacitat (acostuma a ser molt inferior a la dels metalls i plàstics), que, combinada amb la baixa plasticitat i l'elevat mòdul d'elasticitat, dona lloc a concentracions d'esforços sobre les protuberàncies i la producció de microfissures i ruptures; *d)* Moderada resistència mecànica (en general les ceràmiques se sotmeten a l'assaig de flexió, més fàcil de realitzar que el de tracció, i després s'estableix la resistència a tracció equivalent); la naturalesa de les ceràmiques, amb una gran sensibilitat a les microfissures, fa recomanable de prendre tensions admissibles per al càlcul compreses entre el 10÷12% de la resistència a flexió; la resistència a compressió és de 7÷10 vegades més elevada que la de tracció; *e)* Bones propietats lliscants i bona resistència a l'abradió, especialment en materials amb el gra inferior a una micra (zircònia estabilitzada, ceràmiques vítries); en altres ceràmiques, l'acció del frec produeix una transformació superficial que indueix tensions de compressió en les capes externes o una tendència a autopolir-se.

Propietats tecnològiques

En general, les ceràmiques d'enginyeria són extraordinàriament resistents a l'atac químic tot i que, sotmeses a determinats medis agressius (àcids i àlcalis forts) o medis oxidants a altes temperatures, poden experimentar un deteriorament.

Processos de fabricació

Els processos de conformació de les ceràmiques d'enginyeria comprenen generalment tres etapes: preparació de matèries primeres, conformació del material "en verd" i processos tèrmics de consolidació.

Preparació de matèries primeres

Les matèries primeres utilitzades en la fabricació de peces de ceràmica són subministrades habitualment en forma de pólvores d'elevada puresa amb unes dimensions ($0,1 \div 20 \mu\text{m}$) i distribucions de partícules adequades.

Conformació del material "en verd"

Els procediments més utilitzats per a donar la forma a les peces de ceràmica són: *a) Premsatge en sec*: s'omple una matriu amb pólvores i per mitjà d'un punxó es compacten a altes pressions; és el procés més eficient quan es tracta de fabricar grans sèries de peces de bona precisió dimensional, de formes relativament senzilles per a evitar les diferències de compactació; *b) Premsatge isostàtic*: les pólvores del material es col·loquen a l'interior d'un motlle d'elastòmer que se segella i se submergeix en un bany a elevada pressió hidrostàtica; és adequat per a peces de formes més complexes amb una gran uniformitat de densitats, però de precisió dimensional baixa.

Processos tèrmics de consolidació

Després de la conformació, els materials compactats s'exposen a elevades temperatures per tal que adquireixin la consistència i augmentin la resistència. Els processos més utilitzats són: *a) Vitrificació*: procés de fusió parcial a temperatura elevada que consolida la peça per efectes capil·lars, alhora que, en refredar-se, es forma una fase vítria; és adequat per a ceràmiques formades per diversos components; *b) Sinterització*: procés de difusió en estat sòlid a alta temperatura en què s'uneixen les superfícies dels grans; és adequat per a materials que difícilment formen fases líquides.

Principals ceràmiques d'enginyeria i aplicacions

Les propietats de moltes de les ceràmiques d'enginyeria no depenen tan sols de la composició del material, sinó que també cal fer referència al procés de fabricació.

Alúmina, Al_2O_3

L'alúmina, òxid d'alumini quasi pur, té unes bones propietats mecàniques, tèrmiques i de lliscament i, gràcies al seu preu relativament baix, és la més usada de les ceràmiques d'enginyeria. S'utilitza en segells mecànics, en vàlvules d'aixeta i d'altres tipus, pistons, components de la indústria química i petroquímica. Les baixes pèrdues dielèctriques de l'alúmina li proporcionen aplicacions elèctriques (aïllant de bugies, aparells electrònics).

Carbur de silici, SiC

El carbur de silici es pot obtenir per dos procediments diferents: a) El SiC sinteritzat per reacció és un material poc resistent; b) El $SiC-\alpha$ pot ser sinteritzat sense pressió per a donar lloc a un material compactat al 98%, però experimenta una contracció del 18% durant el procés. És una ceràmica més dura i resistent al desgast que l'alúmina i té una excepcional resistència a l'oxidació a elevades temperatures i bona resistència química

Taula 14.16 Ceràmiques d'enginyeria

| | Alúmina | Carbur de silici | Nitrur de silici | Zircònia | Sialons |
|--|-----------|----------------------|--------------------------|------------------------|---------|
| | Al_2O_3 | SiC ⁽¹⁾ | Si_3N_4 ⁽²⁾ | ZrO_2 ⁽³⁾ | |

| Propietats físiques | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|------------|-----------|------------|-----------|-------|
| Densitat | Mg/m ³ | 3,30 | 2,98/3,14 | 2,50/3,19 | 5,20/5,78 | 3,2 |
| Coefficient de dilatació | $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ | 8,0 | 3,4/4,0 | 2,8/2,8 | 8,0/10,6 | 30 |
| Calor específic | | 1170 | 710/670 | 710/710 | 730/540 | 710 |
| Conductivitat tèrmica | | 25 | 87/104 | 10/25 | 1,16/2,0 | 18÷20 |
| Resistivitat elèctrica | | $>10^{12}$ | 10^{-2} | $>10^{12}$ | - | - |
| Propietats mecàniques | | | | | | |
| Resist. tracció equiv. | MPa | 450 | 210/275 | 120/485 | 140÷240 | 450 |
| Resist. tracció admis. | MPa | 25÷50 | 45/54 | 20/80 | 30/75 | 78 |
| Resistència compressió | MPa | 3000 | 2000 | 1200 | 2000 | 2000 |
| Mòdul d'elasticitat | GPa | 360 | 330/410 | 160/310 | -/200 | 290 |
| Coefficient de Poisson | - | 0,27 | 0,13/0,14 | 0,24 | -/0,30 | 0,23 |
| Duresa | HK | 1600 | 1860/2800 | 1000/1800 | 400/1200 | 2000 |
| Propietats tecnològiques | | | | | | |
| Cost | Pta/kg | - | - | - | - | - |
| Temperatura de fusió | °C | 2320 | 3110 | 2170 | 2840 | - |

⁽¹⁾ Propietats dels carburs de silici (sinteritzat per reacció / SiC -alfa)

⁽²⁾ Propietats dels nitrurs de silici (enllaçat per reacció / premsat en calent)

⁽³⁾ Propietats de les zircònies (projectada / parcialment estabilitzada)

(especialment als àcids), però és fràgil i el seu cost és unes tres vegades més elevat que el de l'alúmina. S'utilitza com a reforç de fibra en materials compostos de matriu metàl·lica o ceràmica.

Nitrur de silici, Si_3N_4

El nitrur de silici es dissocia per damunt dels 1800°C, fet que ha donat origen a diversos processos de fabricació: a) *Si_3N_4 enllaçat per reacció*: després de donar la forma inicial a unes pólvores de silici-metall per mitjà dels procediments habituals, es nitrura en una atmosfera de nitrogen abans de la sinterit

pocs canvis dimensionals entre la peça compactada i la sinteritzada, però, per a facilitar la nitruració, cal una porositat d'un 10% que repercuteix en la resistència mecànica i en l'oxidació a elevades temperatures, sensiblement menors que les d'altres ceràmiques d'enginyeria. b) *Si_3N_4 premsat en calent*: les peces, necessàriament de formes molt simples, es fabriquen per sinterització a uns 1700°C a una pressió d'uns 14 MPa (compactació pròxima al 100%) i s'aconsegueix la resistència més elevada entre les ceràmiques d'enginyeria; el cost, però, és molt elevat ja que la forma final de les peces s'obté per rectificació.

Zircònia, Zr_2O_3

La zircònia, amb una capacitat d'aïllament tèrmic excepcional, també es fabrica per mitjà de dos processos: a) *Zircònia projectada* (recobriments de metalls): immediatament després d'eliminar la capa d'òxid superficial del metall, s'inicia la projecció del material, que canvia gradualment de composició des del metall de base (níquel, crom o alumini) fins a zircònia pura (gruixos d'1÷2,5 mm); aquesta tecnologia s'usa amb èxit en els motors de reacció de la indústria aeronàutica; b) *Zircònia parcialment estabilitzada*: quan la zircònia es refreda per sota dels 1170°C experimenta una transformació cristal·lina amb contracció del volum i perill de ruptura; però en combinació amb altres òxids (magnesi, calci, itri) s'obté l'anomenada *zircònia parcialment estabilitzada*, que no canvia de fase i que aconseguix una tenacitat elevada; per conformació sota pressió isostàtica (230 MPa), una sinterització parcial posterior, una mecanització i una sinterització final, s'obtenen peces de gran precisió i elevada resistència.

Sialons

Família de materials similars al nitrur de silici fabricats per mescla de nitrur de silici, sílice, alúmina i nitrur d'alumini. Després de compactar el material mitjançant les tècniques habituals, se sinteritza en nitrogen a 1800°C, tot experimentant una contracció del 20%. S'utilitza en eines de tall i s'han fet proves en components de motors d'explosió. Sembla que, com a materials estructurals, presenten avantatges respecte al Si_3N_4 .

Bibliografia

- AMSTEAD, B.H.; OSTWALD, PH.F.; BEGEMAN, M.L. [1987] *Manufacturing Processes*. John Wiley & Sons, Nova York.
- ASHBY, M.F. [1992] *Materials Selection in Mechanical Design*. Pergamon Press, Oxford.
- ASM HANDBOOK COMMITTEE [1990] *Metals Handbook. Volume 1. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys* (desena edició). ASM International, Metals Park, Ohio (EUA).
- ASM HANDBOOK COMMITTEE [1990] *Metals Handbook. Volume 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* (desena edició). ASM International, Metals Park, Ohio (EUA).
- ASM [1985] *Metals Handbook. Volume 8. Mechanical Testing* (novena edició). ASM International, Metals Park, Ohio (EUA).
- AVNER, S.H. [1979] *Introducción a la metalurgia física*. McGraw-Hill, México.
- CAHN, R.W.; HAASEN, P.; KRAMER, E.J. (editors) [1992] *Materials Science and Technology. Constitution and Properties of Steels (Vol 7)*. VHC Verlagsgesellschaft, Weinheim (Alemanya) i Nova York.
- CALLISTER JR, W.D. [1996] *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materials*. Editorial Reverté S.A., Barcelona.
- CARTER, G.F.; PAUL, D.E. [1991] *Materials Science & Engineering*. ASM International (EUA).
- CRANE, F.A.A.; CHARLES, J.A. [1984] *Selection and Use of Engineering Materials*. Butterworth & Co. (Publishers) Ltd., Londres.
- CRAWFORD, R.J. [1990] *Plastics Engineering* (2a edició). Pergamon Press, Oxford.
- DI CARPIO, G. [1987] *Los aceros inoxidable*. S.A. EBRISA (Grupinox), Barcelona.
- DOMINGHAUS, H. [1992] *Plastics for Engineers. Materials, Properties, Applications*. Hanser Publishers, Munic.
- DORLOT, J.M.; BAÏLON, J.P.; MASOUNAVE, J. [1986] *Des matériaux* (2a edició).

Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, Montreal.

FONTANA, M.G. [1987] *Corrosion Engineering* (3a edició). McGraw-Hill International Editions, Nova York.

FOREST PRODUCT LABORATORY [1989] *Handbook of Wood and Wood-based Materials for Engineers, Architects, and Builders*. Hemisphere Publishing Corporation, Nova York.

GNAUCK, B.; FRÜNDT, P. [1989] *Iniciación a la química de los plásticos*. Hanser Editorial, Barcelona.

HELLERICH, W.; HARSCH, G.; HAENLE, S. [1989] *Guía de materiales plásticos. Propiedades, ensayos, parámetros*. Hanser Editorial, Barcelona.

HOFMANN, W. [1989] *Rubber Technology Handbook*. Hanser Publishers, Munic.

HUFNAGEL, W. (editors) [1992] *Manual del aluminio*. Editorial Reverté, Barcelona.

MAÑÀ I REIXACH, FRUITÓS (editors) [1989] *Fustes per a la construcció. Propietats, macroestructura i microestructura*. ITEC (Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya), Barcelona.

MORTON, M. [1981] *Rubber Technology*. Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar (Florida, EUA).

RICHARDSON, D.W. [1992] *Modern Ceramic Engineering. Properties, Processing and Use in Design*. Marcel Dekker, Inc., Nova York.

SAECHTLING, H. [1992] *International Plastics Handbook for the Technologist, Engineer and User*. Hanser, Munic.

SHACKELFORD, J.F. [1985] *Introduction to Materials Science for Engineering*. Macmillan Publishing Company, Nova York.

SMITH, W.F. [1993] *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (2a edició). McGraw-Hill, Madrid.

VIDAL DE CÁRCER, M. [1984] *Cauchos y elastómeros*. Editado por el autor (impreso por I.G. Manual Pareja), Barcelona.