

CIÈNCIA DELS MATERIALS

2a edició

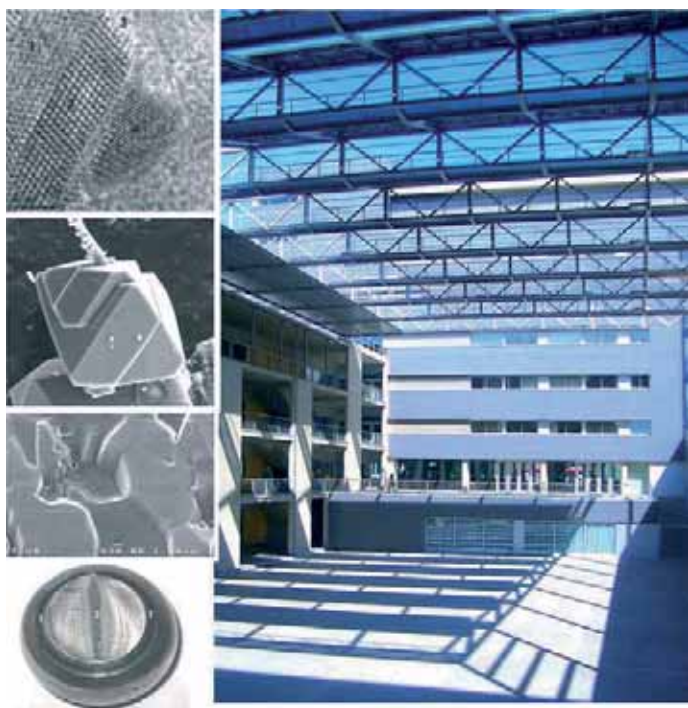
Montserrat Cruells

Núria Llorca

Pere Molera

Antoni Roca

Joan Viñals



CIÈNCIA DELS MATERIALS

Montserrat Cruells
Núria Llorca
Pere Molera
Antoni Roca
Joan Viñals

ÍNDIX

1. INTRODUCCIÓ	13
1.1. Conceptes	13
1.2. Classificació dels materials	13
1.3. Competitivitat i complementarietat entre materials	15
1.4. Perspectives futures en el camp de la Ciència i l'Enginyeria de Materials	16
1.4. Bibliografia	19
2. ESTRUCTURES	21
2.1. Estructures desordenades	22
2.1.1. Sòlids amorfs	23
2.2. Estructures ordenades	24
2.2.1. Sòlid policristal·lí	25
2.2.2. Sòlid monocristal·lí	26
2.2.3. Nanocristalls	26
2.3. Estat d'ordre intermedi	27
2.3.1. Polímers cristal·litzats	27
2.3.2. Polímers amorfs	28
2.4. Cristalls líquids	28
2.5. Xarxes cristal·lines	29
2.5.1. Relacions puntuals i de simetria en els cristalls	29
2.5.2. Representació gràfica dels cristalls	34
2.6. Sistemes cristal·lins	36
2.7. Estructures compactes	40
2.8. Al·lotropia	46
2.9. Estructures complexes del sistema cúbic	47
2.9.1. Tipus clorur de sodi (NaCl)	47
2.9.2. Tipus clorur de cessi (CsCl)	48
2.9.3. Tipus fluorita o fluorur de calci (CaF ₂)	48
2.9.4. Tipus blenda o esfalerita (ZnS)	49
2.9.5. Tipus perovskita (CaTiO ₃)	50
2.9.6. Tipus espinel·la (AB ₂ O ₄)	50
2.10. Estructures complexes del sistema hexagonal	51
2.10.1. Tipus corindó (Al ₂ O ₃)	51
2.11. Estructures complexes tetragonals	52
2.11.1. Tipus silicat (SiO ₄ ⁴⁻)	52
2.11.2. Tipus rutil (TiO ₂)	53
2.12. Evidència experimental de l'estructura cristal·lina	53
2.12.1. Difracció de raigs X	53
2.12.2. Quasi cristalls	56
2.13. Bibliografia	56
3. DEFECTES DE PUNT, DE LÍNIA, DE SUPERFÍCIE I DE VOLUM	57
3.1. Defectes de punt	57
3.1.1. Vacants	57
3.1.2. Àtoms intersticials	58

3.1.3. Àtoms substituionals. Dissolucions sòlides	59
3.1.4. Defectes de Schottky i de Frenkel	61
3.2. Defectes de línia: dislocacions	61
3.2.1. Dislocacions de falca o aresta	62
3.2.2. Dislocacions helicoïdals o de caragol	62
3.2.3. Dislocacions mixtes	64
3.3. Defectes de superfície	65
3.3.1. Límit de macla	65
3.3.2. Límit de gra o de cristall	66
3.3.3. Altres defectes de superfície	69
3.4. Defectes de volum	69
3.5. Bibliografia	70
 4. DIFUSIÓ I SOLIDIFICACIÓ	 71
4.1. Difusió	71
4.2. Lleis de Fick de la difusió	72
4.2.1. Velocitat de difusió (Primera llei de Fick)	72
4.2.2. Perfil de composició (Segona llei de Fick)	74
4.3. Factors que afecten la difusió	77
4.4. Difusió en materials ceràmics	78
4.5. Difusió en polímers	79
4.6. Aplicacions industrials de la difusió	79
4.6.1. Enduriment de la superfície de l'acer	79
4.6.2. Sinterització	79
4.6.3. Preparació de semiconductors extrínsecs	80
4.7. Solidificació	80
4.8. Bases termodinàmiques de la solidificació	81
4.8.1. Solidificació homogènia	82
4.8.2. Solidificació heterogènia	86
4.9. Velocitat de solidificació	86
4.10. Tipus de creixement	89
4.11. Macroestructura de solidificació	90
4.12. Solidificació de dissolucions	91
4.13. Aplicacions industrials de la solidificació: Emmotllat	91
4.13.1. Processos d'emmotllat de metalls	91
4.13.2. Control de la microestructura en metalls emmotllats	92
4.13.3. Defectes propis de l'emmotllament	93
4.14. Emmotllat amb solidificació direccional	94
4.15. Solidificació de monocristalls	94
4.16. Bibliografia	95
 5. DIAGRAMES DE FASES EN EQUILIBRI	 97
5.1. Sistemes monaris	98
5.2. Sistemes binaris. Consideracions generals	99
5.3. Sistemes isomorfs binaris	99
5.4. Determinació del percentatge de fases. Regla de la palanca	100
5.5. Solidificació fora de l'equilibri. Segregació	101
5.6. Sistemes eutèctics binaris	103
5.7. Evolució de les microestructures en sistemes eutèctics	104
5.8. Sistemes peritèctics binaris. Altres reaccions invariants	107
5.9. Diagrames de fase amb compostos i fases intermèdies	108
5.10. Diagrama ferro-carboni	111
5.11. Sistemes ternaris	116
5.12. Bibliografia	119

6. TRACTAMENTS TÈRMICS, MECÀNICS I QUÍMICS	121
6.1. Tractaments tèrmics de metalls ferris	121
6.1.1. <i>Recuites i tractaments complementaris</i>	125
6.1.2. <i>Tractament d'enduriment per tremp</i>	129
Transformació isotèrmica de l'austenita	130
Transformació perlítica	130
Transformació bainítica	130
Transformació martensítica	130
Tractaments tèrmics isotèrmics industrials dels acers: tractaments escalonats	132
Martempering o tractament de tremp escalonat martensític	132
Austempering o tractament escalonat bainític	132
Recuita isotèrmica	132
Transformació anisotèrmica de l'austenita	132
6.1.3. <i>Reveniment després d'enduriment per tremp</i>	134
6.1.4. <i>Tractaments tèrmics per a les foses de ferro</i>	135
6.2. Tractaments tèrmics per als metalls no ferris	137
<i>Enduriment per precipitació</i>	137
6.3. Tractaments tèrmics aplicats a les ceràmiques	140
6.3.1. <i>Assecatge i eliminació d'aglutinants</i>	141
6.3.2. <i>Sinterització i consolidació de ceràmiques</i>	141
6.3.2.1. Tipus de sinterització	142
6.3.2.2. Etapes de sinterització	142
6.3.2.3. Exemples de sinterització	143
6.3.2.4. Desvitrificació	144
6.4. Processos mecànics aplicats a metalls	145
6.4.1. <i>Processos mecànics en fred</i>	145
Extrussió en fred	145
Laminatge	146
Trefilatge	146
Embotició i estampació	147
6.5. Processos termomecànics aplicats a metalls	147
6.5.1. <i>Tractament termomecànic a baixa temperatura: Ausconformat (Ausforming)</i>	148
6.5.2. <i>Tractament termomecànic d'alta temperatura: TMAT (HTMT)</i>	148
6.5.3. <i>Isoconformat (Isomorfing)</i>	148
6.6. Tractaments químics	148
6.6.1. <i>Revestiments obtinguts per conversió</i>	150
6.6.1.1. Passivació	150
6.6.1.2. Fosfatació	150
6.6.1.3. Pavonatge	151
6.6.1.4. Anodització	152
6.6.2. <i>Electrorevestiments</i>	153
6.6.3. <i>Revestiments químics</i>	153
6.6.4. <i>Revestiments per immersió en calent</i>	155
6.6.5. <i>Projecció tèrmica</i>	156
6.6.6. <i>Pintat</i>	156
6.6.7. <i>Esmaltatge</i>	157
6.7. Bibliografia	158
7. PROPIETATS MECÀNIQUES	161
7.1. Comportament mecànic dels materials	161
7.2. Conceptes de tensió i deformació	161
7.3. Comportament elàstic dels materials	163
7.4. Comportament plàstic dels materials	167
7.4.1. <i>Deformació plàstica dels monocristalls</i>	168
7.4.2. <i>Deformació plàstica dels materials metàl·lics policristal·lins</i>	169
7.4.3. <i>Deformació plàstica dels polímers termoplàstics i dels vidres</i>	169

7.5. La fallada dels materials	170
7.5.1. Col·lapse plàstic	170
7.5.2. Fractura fràgil	171
7.5.3. Fatiga	174
7.5.4. Termofluència	178
7.6. Propietats tecnològiques de naturalesa mecànica: caracterització	179
7.6.1. L'assaig de tracció	180
7.6.2. L'assaig de compressió	184
7.6.3. L'assaig de flexió	186
7.6.4. L'assaig de duresa	186
7.6.5. L'assaig d'impacte	189
7.6.6. L'assaig de fatiga	191
7.6.7. Assajos de termofluència	192
7.7. Aplicabilitat dels assajos mecànics	193
7.8. Bibliografia	195
 8. PROPIETATS ELÈCTRIQUES I MAGNÈTIQUES	 197
8.1. Conductivitat elèctrica	197
8.1.1. Conductivitat electrònica	197
8.1.1.1. Metalls	198
8.1.1.2. Polímers	201
8.1.2. Conductivitat iònica	201
8.2. Semiconductivitat	202
8.2.1. Semiconductors intrínsecs	202
8.2.2. Semiconductors extrínsecs	204
8.2.3. Aplicacions dels semiconductors	208
8.3. Dielèctrics	209
8.3.1. Propietats dels dielèctrics	209
8.3.1.1. Constant dielèctrica	209
8.3.1.2. Rigidesa dielèctrica	212
8.3.1.3. Factor de pèrdua dielèctrica	212
8.3.2. Estructura de dielèctrics	213
8.3.3. Ferroelectricitat	214
8.3.4. Materials piezoelèctrics	215
8.4. Propietats magnètiques	216
8.4.1. Tipus de magnetisme	218
8.4.2. Estructura de dominis ferromagnètics o de Weiss	220
8.5. Materials magnètics	221
8.5.1. Materials magnètics tous	221
8.5.2. Materials magnètics durs	224
8.6. Superconductivitat	226
8.7. Bibliografia	228
 9. PROPIETATS TÈRMiques I ÒPTIQUES	 229
9.1. Propietats tèrmiques	229
9.1.1. Capacitat calorífica	229
9.1.2. Dilatació tèrmica	230
9.1.3. Conductivitat tèrmica	231
9.1.4. Tensions tèrmiques	232
9.2. Propietats òptiques	232
9.2.1. La llum	233
9.2.1.1. Interaccions de la llum amb els sòlids	234
9.2.1.1.1. Reflexió i refracció	235
9.2.1.1.2. Absorció	236
9.2.1.1.3. Transmissió	237

9.2.1.2. Color	237
9.2.1.2.1. Propietats	238
9.2.1.2.2. Mescles	239
9.2.1.3. Opacitat i translucidesa	240
9.2.2. Luminiscència	240
9.2.3. Fotoconductivitat	242
9.2.4. Làsers	242
9.3. Bibliografia	244
10. CORROSIÓ	245
10.1. Corrosió segons la naturalesa de la reacció	245
10.1.1. Corrosió seca o química	245
10.1.2. Corrosió humida o electroquímica	248
10.1.2.1. Potencials d'elèctrode	249
10.1.2.2. Potencial de Nernst	251
10.1.3. Passivació	251
10.1.4. Velocitat de corrosió	252
10.1.5. Polarització	253
10.1.6. Velocitat de corrosió a partir de polarització	254
10.2. Factors	254
10.2.1. Factors metal·lúrgics	255
10.2.2. Factors ambientals	258
10.2.3. Factors de disseny	259
10.3. Tipus de corrosió	261
10.3.1. Aparença	261
10.3.1.1. Atac uniforme	262
10.3.1.2. Picades	262
10.3.1.3. Corrosió filiforme	262
10.3.1.4. Caleix	262
10.3.2. Corrosió metàl·lica	262
10.3.2.1. Corrosió atmosfèrica	264
10.3.2.2. Corrosió galvànica	264
10.3.2.3. Corrosió biològica o bacteriana	268
10.3.2.4. Corrosió per erosió	270
10.3.2.5. Corrosió sota tensions	271
10.3.2.6. Corrosió per hidrogen	273
10.3.2.7. Corrosió intercrystal·lina	274
10.3.2.8. Corrosió per fricció	275
10.3.2.9. Fatiga amb corrosió	276
10.3.2.10. Corrosió per aireig diferencial	277
10.3.2.11. Corrosió per corrents erràtics	277
10.3.2.12. Corrosió per eliminació selectiva	278
10.3.3. Corrosió ceràmica	278
10.3.4. Corrosió polimèrica	279
10.3.4.1. Dissolució	279
10.3.4.2. Inflament	279
10.3.4.3. Radiació	281
10.3.4.4. Calor	282
10.3.4.5. Reaccions químiques	282
10.3.5. Degradació de la fusta	282
10.3.5.1. Insecticides i fungicides	283
10.4. Bibliografia	283
10.4.1. Organismes i institucions	284
11. PROPIETATS TECNOLÒGIQUES	285
11.1. Colabilitat	285
11.2. Ductilitat	285

11.3. Enduriment per tremp	286
11.4. Facilitat de mecanitzat	288
11.5. Reciclabilitat	288
11.6. Soldabilitat	288
11.7. Bibliografia	289
12. MATERIALS METÀL·LICS	291
12.1. Ferro	292
12.1.1. Producció de l'acer	293
12.1.2. Afaïçonament	297
12.1.3. Acers al carboni	298
12.1.4. Efecte en els acers dels elements d'aliatge	303
12.1.5. Acers de baix aliatge	307
12.1.6. Acers d'alt aliatge. Inoxidables	308
12.1.7. Foses	312
12.2. Alumini	315
12.2.1. Producció de l'alumini	315
12.2.2. Efectes dels elements d'aliatge	317
12.2.3. Aliatges d'alumini	318
12.3. Magnesi	320
12.3.1. Producció del magnesi	320
12.3.2. Aliatges de magnesi	321
12.4. Titani	321
12.4.1. Producció del titani	322
12.4.2. Aliatges de titani	322
12.5. Coure	325
12.5.1. Producció del coure	325
12.5.2. Propietats específiques del coure	328
12.5.3. Materials base coure	331
12.6. Níquel	333
12.7. Bibliografia	335
13. MATERIALS CERÀMICS	337
13.1. Ceràmiques convencionals	337
13.1.1. Síntesis i conformació	337
13.1.2. Ceràmiques sílice/caolinita/feldspat	342
13.1.3. Ceràmiques $\text{SiO}_2/\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$	344
13.1.4. Refractaris	344
13.1.5. Vidrats i esmalts	346
13.1.6. Ciments	347
13.2. Vidres	348
13.2.1. Estructura dels vidres de base sílice	348
13.2.2. Viscositat dels vidres	349
13.2.3. Principals tipus de vidres	350
13.2.4. Processat dels vidres	351
13.2.5. Tractaments tèrmics dels vidres	353
13.2.6. Vitroceràmica	353
13.3. Ceràmiques d'ús específic en enginyeria	354
13.3.1. Propietats mecàniques de les ceràmiques	354
13.3.2. Ceràmiques d'altres propietats mecàniques	357
13.3.3. Materials del carboni	359
13.3.4. Bioceràmiques	364
13.4. Bibliografia	364
14. POLÍMERS	365
14.1. Polimerització	366
14.1.1. Tipus de polimerització	367

14.1.2 . Pes molecular i grau de polimerització	367
14.1.3. Composició: homopolimers i copolimers	369
14.1.4. Forma molecular	370
14.1.5. Estructura molecular	371
14.1.6. Configuracions moleculars	372
14.1.7. Polimers cristal·litzats	373
14.1.7.1. Cristal·linitat a partir de dispersions	374
14.1.7.2. Cristal·linitat a partir de masses foses	375
14.1.7.3. Grau de cristal·linitat	376
14.2. Propietats mecàniques	376
14.2.1. Comportament esforç-deformació	376
14.2.2. Duresa	378
14.2.3. Resistència a l'impacte	378
14.2.4. Fatiga	379
14.2.5. Mecanisme de la deformació de polimers termoplàstics semicristal·lins	379
14.2.6. Fractura de polimers	380
14.2.7. Viscoelasticitat	380
14.2.7.1. Relaxació viscoelàstica	381
14.2.7.2. Termofluència viscoelàstica	382
14.3. Temperatures de fusió i de transició vítria	383
14.4. Polimers termoplàstics	383
14.5. Polimers termoestables	385
14.6. Elastòmers	388
14.7. Additius	390
14.8. Tècniques d'obtenció	390
14.9. Tècniques de conformació	391
14.10. Bibliografia	395
15. MATERIALS COMPOSTOS	395
15.1. Classificació i característiques dels materials compostos	396
15.2. Matriu	396
15.3. Reforç	400
15.3.1. Fibres sintètiques inorgàniques	402
15.3.1.1. Fibres de carboni	402
15.3.1.2. Fibres d'alúmina	402
15.3.1.3. Fibres de vidre	403
15.3.1.4. Fibres de SiC	403
15.3.2. Fibres sintètiques orgàniques	404
15.3.3. Whiskers	404
15.3.4. Partícules	405
15.4. Materials Compostos de Matriu Metàl·lica (CMM)	406
15.5. Materials Compostos de Matriu Ceràmica (CMC)	408
15.6. Materials Compostos de Matriu Polimèrica (CMP)	411
15.7. Consideracions finals	413
15.8. Bibliografia	413
16. RECICLATGE	415
16.1. Reciclatge de metalls	415
16.1.1. Reciclatge de l'alumini	418
16.1.2. Reciclatge del ferro i de l'acer	422
16.1.3. Reciclatge del coure i els seus aliatges	425
16.1.4. Reciclatge del plom i els seus aliatges	428
16.2. Reciclatge de polimers	431
16.3. Reciclatge del vidre	435
16.4. Bibliografia	438
ÍNDIX TERMINOLÒGIC	439

PRÒLEG A LA SEGONA EDICIÓ

Aquestes línies tenen per finalitat donar la benvinguda al lector que vol endinsar-se en el món del coneixement dels materials guiat per un conjunt de professors del Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica de la Universitat de Barcelona, que formen part d'un grup de recerca, anomenat *Caracterització i Processos en Ciència de Materials*, el qual, al seu torn, forma part d'un grup d'innovació docent, més nombrós i consolidat, anomenat *Estructura, Propietats i Processat dels Materials*.

Són professors que, després de més de quinze anys d'impartir assignatures de Ciència dels Materials als estudis de Ciències Químiques, Enginyeria Química i Enginyeria de Materials, han volgut transmetre les seves ensenyances mitjançant un llibre sobre aquest tema.

Els materials constitueixen un món tan pròxim com interessant, tan útil com engrescador, tan científic com tècnic, tan complex com comprensible. Un món que posem a l'abast de l'estudiós, tot destacant l'estructura i el processat dels materials per justificar-ne les propietats mecàniques, físiques, químiques i tecnològiques. El coneixement ampli i profund de les propietats dels materials és fonamental per suggerir l'aplicació més adient a la ciència, a la indústria, als serveis, a l'oci i a la cultura d'aquests estris tan versàtils i tan precisos alhora com són els materials.

Aquest llibre es complementa amb aplicatius penjats al web de la Universitat de Barcelona, que són el MICROMET, el PROCER, el POLIMAT i l'AUTOMAT. El MICROMET és una base de dades de diferents metalls i aliatges. Per a cadascun d'ells s'hi pot trobar una fitxa amb nomenclatura, composició, classificació, microestructura, propietats i diagrames de fases i de tractament tèrmic. El PROCER és un aplicatiu en què es recullen diferents materials ceràmics amb les seves composicions, primeres matèries utilitzades per a la seva obtenció, productes que els formen, macroestructures i microestructures, diagrames de fases, propietats, mètodes d'obtenció, de conformat i aplicacions. El POLIMAT és un aplicatiu per caracteritzar, per conèixer l'estructura, per discernir el processat i per saber les propietats dels principals polímers que s'apliquen en l'actualitat. L'AUTOMAT és un programa per a l'autoavaluació en Ciència de Materials. Per a cada tema hi ha 25 preguntes de diferent nivell, amb quatre possibilitats de resposta i tan sols una de correcta. L'estudiant pot avaluar el seu grau de coneixement de cada tema i saber en quins punts cal que aprofundeixi.

La primera edició d'aquest llibre s'ha exhaurit en tres anys. Aquesta segona edició recull els suggeriments i les propostes fetes pels lectors i companys de l'assignatura, als quals els agraïm la seva valuosa col·laboració. Continuem esperant més suggeriments.

Finalment, en l'apartat gratulatori fem constar la nostra gratitud a la companya Esther Vilalta per les seves aportacions a l'hora d'il·lustrar aquest llibre de text.

ELS AUTORS

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Conceptes

Els materials són substàncies que poden ser processades de forma adequada perquè siguin útils a la societat en forma d'objectes, components o estructures. Els materials són, en essència, la pràctica totalitat dels sòlids, cristal·lins i amorfs.

La ciència de materials és el conjunt de coneixements bàsics sobre l'*estructura*, les *propietats* i el *processat* dels materials. L'enginyeria de materials utilitza aquests coneixements per a convertir els materials en productes necessaris per a la societat: apareix un nou terme, *aplicacions* dels materials. No obstant això, en la realitat no existeix un punt concret en el qual finalitza el camp de la ciència de materials i comença el de l'enginyeria. Si la disciplina a impartir pertany a una llicenciatura corresponent al camp de les ciències bàsiques, caldrà donar una major èmfasi a la ciència de materials, sense oblidar-se dels aspectes més enginyerils; si pertany al camp de les enginyeries, s'haurà de centrar en els aspectes més tecnològics, sense oblidar els aspectes fonamentals.

En definitiva, un curs sobre Materials haurà de versar necessàriament en la Ciència i Enginyeria de Materials.

1.2. Classificació dels materials

La classificació dels materials pot portar-se a terme de diverses maneres. Quan es fa en funció de la seva estructura interna i, per tant, de l'enllaç, els materials es poden classificar en:

- metalls,
- ceràmiques,
- polímers,
- compostos.

Els metalls es caracteritzen perquè presenten enllaç metàl·lic i perquè s'ordenen generant estructures cristal·lines en la pràctica totalitat dels casos; l'excepció en aquesta ordenació són els anomenats vidres metàl·lics. No se sol subclassificar aquesta categoria de materials seguint la base de l'estructura; alguns autors classifiquen els materials metàl·lics en funció de la seva composició, en ferris (acers i foses) i no ferris (que inclou la resta de materials metàl·lics). A pesar que en un grup hi ha el ferro i els seus aliatges i en l'altre grup la resta d'aliatges metàl·lics, la utilització en enginyeria té lloc en una proporció aproximada de 90 a 10, respectivament.

Entre els metalls s'hi troben materials tan diversos com:

- ferro: acers al carboni, acers de baix aliatge, acers d'alt aliatge, entre ells els inoxidables, així com foses de ferro,
 - alumini i els seus aliatges,
 - coures i els seus aliatges (bronzes, llautons...),
 - aliatges de magnesi, de titani, de níquel,
 - metalls refractaris,
- entre molts altres materials metàl·lics.

Els materials ceràmics són materials inorgànics que presenten enllaços iònics i/o covalents entre els elements que els componen. Segons l'estructura, les ceràmiques es poden subclassificar en: vidres i ceràmiques cristal·lines o semicristal·lines; al seu torn, els materials inclosos en aquesta segona categoria es poden classificar en tradicionals i ceràmiques d'ús específic en enginyeria. Exemples de ceràmiques són:

- *vidres*: sodo-càlcic, de sílice, borosilicat, aluminosilicat, vidres al plom, vitroceràmiques,
- *ceràmiques tradicionals*: productes obtinguts de l'argila, com rajoles, totxos o canonades, porcellanes i ciments,
- *ceràmiques d'ús específic en enginyeria*: carbur de silici, zircònia, alumina, nitrur de silici, titanat de bari, ferrita de zinc, sílice.

Els polímers es caracteritzen per la presència d'àtoms de carboni i hidrogen constituint llargues cadenes o estructures tridimensionals; també participen en la seva estructura, entre d'altres, elements com l'oxigen, nitrogen i sofre. Hi ha materials polimèrics en què el silici substitueix el carboni: són les silicones. Els polímers es poden subclassificar segons l'estructura en: termoplàstics, termostables i elastòmers. El terme *plàstics* s'utilitza sovint per a referir-se als termoplàstics i termostables comercials. Exemples de polímers són:

- *termoplàstics*: polietilè, polipropilè, poliestirè, policarbonat, poliamides, polièster, políclorur de vinil,
- *termostables*: resines epòxid, polièsters insaturats, resines epoxi-fenòliques, resines alquídiques, melamines,
- *elastòmers*: cautxú natural, cis-poliisoprè, policloroprè, cautxú de nitril, silicones.

Els materials compostos es fabriquen mesclant materials que pertanyen als grups anteriors amb la finalitat de millorar alguna de les propietats del material matriu. El que es pretén en la majoria de situacions és la millora de les propietats mecàniques de la matriu. Una manera de classificar els materials compostos és, en base al material matriu, en: materials de matriu metàl·lica, de matriu ceràmica o de matriu polimèrica. Es donen a continuació alguns exemples de les diferents subcategories de materials compostos:

- *compostos de matriu metàl·lica (CMM)*: habitualment s'utilitzen matrius d'aliatge d'alumini, reforçades amb fibra contínua de carbur de silici o bor, fibra discontinua o partícules de carbur de silici (reforçants de naturalesa ceràmica),
- *compostos de matriu polimèrica (CMP)*: resina epòxid o resina de polièster insaturat reforçats habitualment per fibres de carboni, vidre o aràmida (Kevlar), entre d'altres (reforçants de naturalesa ceràmica, a excepció de les fibres d'aramida, que són poliamides aromàtiques),
- *compostos de matriu ceràmica (CMC)*: formigó, format per ciment, sorra i pedres de diversa mida (de naturalesa ceràmica); formigó armat (formigó reforçat amb barres d'acer); nitrur de silici o alumina reforçats per carbur de silici.

Un exemple de materials compostos naturals el constitueixen les fustes, formades per cel·lulosa i lignina. La seva aplicabilitat és en Enginyeria de la Construcció, des de la Prehistòria i fins avui dia.

Des del punt de vista de les seves propietats rellevants, els materials es classifiquen en:

- *Estructurals*: o que se seleccionen en base a les seves propietats mecàniques (rigidesa, resistència mecànica, tenacitat, etc.),
- *Òptics*: en base a la seva interacció amb les radiacions, especialment amb llum visible (absorció, reflexió, transmissió, etc.).
- *Magnètics*: en base al seu comportament en front d'un camp magnètic (paramagnètics, ferromagnètics, ferrimagnètics, etc.).
- *Conductors*: en base a la seva capacitat de conduir el calor (conductors i aïllants) o l'electricitat (conductors, semiconductors, aïllants, i superconductors).

- *Resistents ambientalment*: en base a la seva resistència a la degradació ambiental, a medis agressius o al desgast.

S'han introduït en aquest apartat quatre termes molt utilitzats en Ciència i Enginyeria de Materials: *estructura*, *propietats*, *processat* i *aplicacions*. A aquestes quatre paraules, molt citades dins d'aquest camp, es pot afegir el terme *caracterització*; això és a causa del fet que el gran progrés esdevingut en el camp dels materials en els últims dos-cents anys es deu a la introducció de les tècniques de caracterització d'estructures, de propietats, i a l'aplicació d'aquestes o altres tècniques per a millorar el processat o per a obtenir informació sobre el comportament en servei dels materials. Aquests termes, paraules clau en el camp de la Ciència i Enginyeria de Materials, apareixen de forma constant al llarg d'un curs sobre Materials.

Exercici 1.1. Definiu els termes que s'inclouen a continuació i situeu-los en el context en què pertanyen: *material*, *ciència de materials*, *aliatge metàl·lic*, *metalls no ferris*, *bronze*, *llautó*, *termoplàstic*, *polycarbonat*, *resina epòxid*, *elastòmer*, *silicona*, *vidre*, *ceràmica d'ús específic en enginyeria*, *vitroceràmica*, *porcellana*, *ciment*, *productes de l'argila*, *diamant*, *material compost*, *matriu d'un material compost*, *materials de reforç d'un material compost*, *fibra de vidre*, *fibra d'aramida*, *fusta*, *formigó*, *formigó armat*.

En la figura 1.1 es presenta una esfera, anomenada primera esfera de coordinació, en què s'inclouen els cinc termes esmentats en el paràgraf anterior: *estructura*, *propietats*, *processat*, *aplicacions* i *caracterització*. En una segona esfera de coordinació o segon nivell, i en relació al terme *estructura* poden col·locar-se les quatre categories de materials citades anteriorment en funció de la seva estructura. Respecte al terme *propietats*, es poden incloure els distints tipus de materials que emanen de les propietats de naturalesa mecànica, física o química i que se seleccionen en enginyeria en base a les propietats dites. El terme *processat* inclou tant els processos d'obtenció dels materials (fusió, polimerització, purificació, etc.) com els de conformació, ja sigui per emmotllament, sinterització o afaïonament (mecanització, forja, extrusió, laminatge, embotició, estiratge, etc.). Finalment, apareixen les *aplicacions* en enginyeria civil, aeronàutica, naval, automoció, electrònica, telecomunicacions, etc. I així es pot anar construint el món de la ciència i enginyeria de materials afegint més esferes a partir de la segona, la tercera, etc.

En la taula 1.1 s'inclouen materials de naturalesa diversa, escollits de les seves aplicacions en enginyeria com: construcció, automoció, naval, aeronàutica, medicina, etc. En aquesta taula s'inclou la situació de cada material segons la seva estructura i respecte a les propietats.

1.3. Competitivitat i complementarietat entre materials

Quan l'enginyer de materials ha de portar a terme el procés de selecció de materials per a cada component d'una estructura o d'un producte, la primera fase consisteix a determinar quina és la propietat rellevant, a efectes de selecció, i quines són les altres propietats, secundàries, però no per això menys importants; quan es té el coneixement de la millor combinació de propietats (procés d'optimització de propietats) és quan es pot triar el material més adequat per a una aplicació concreta.

Durant el procés de selecció, els materials competeixen entre si. Aquest procés es porta a terme per a cadascun dels components de l'estructura o del producte. Al final de tot del procés s'han seleccionat tants materials com components; els materials que es conjunten per constituir l'estructura es complementen entre si per a la consecució del producte final.

Un clar exemple d'estructura per a la qual s'han de seleccionar els múltiples materials que la formaran és un automòbil; aquest està constituït per milers de components. Per a seleccionar cada component competeixen els més de 100.000 materials disponibles en enginyeria, dels quals, després d'efectuar els corresponents processos de selecció, en quedarà un en cada cas; el conjunt dels materials emprats per a construir l'automòbil són complementaris entre si.

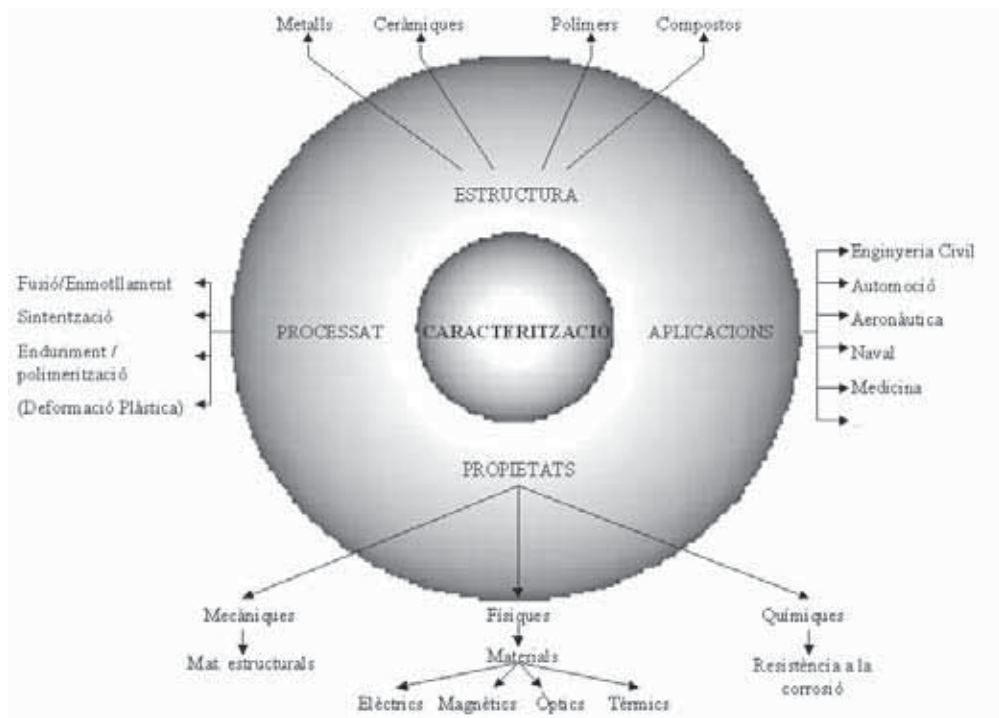


Figura 1.1. Diagrama que inclou les dues primeres esferes de coordinació en el camp de la ciència i enginyeria de materials.

1.4. Perspectives futures en el camp de la Ciència i Enginyeria de Materials

El progrés de la Humanitat ha estat sempre associat al món dels materials i ha avançat amb l'evolució d'aquests, de manera que al costat d'aquest progrés han aparegut noms com edat de pedra, edat de bronze o edat de ferro. Des dels primers materials utilitzats en la Prehistòria, pedres, ossos, fustes i pells, passant posteriorment pels metalls i aliatges, fins els materials utilitzats en els inicis del segle XXI, s'ha recorregut un llarg camí. Al principi, la Humanitat només *aplica* uns pocs materials; en el Neolític, a més de les aplicacions, alguns materials ja es *processen*. A partir del segle XIX s'introdueixen les tècniques modernes de *caracterització de propietats*; a mitjan d'aquest segle i en la primera meitat del segle XX ja es poden *caracteritzar les estructures*, cosa que permet correlacionar aquestes amb les propietats corresponents. Al voltant de 1950 es comencen a introduir les tècniques d'assajos no destructius que, juntament amb els assajos mecànics, permeten obtenir una informació més acurada del comportament en servei dels materials. D'aquesta manera, plantejada una necessitat en enginyeria, es determinen les propietats del material necessàries, que implica una estructura determinada i, com a conseqüència, es requereix un processat determinat. El procés invers també funciona perfectament.

Els materials emprats en l'actualitat en diferents camps d'Enginyeria així com les perspectives de consolidació o de canvi, referits a les enginyeries de la construcció, automoció, aeroespacial i naval, s'inclouen a continuació:

- **Construcció:** en les darreres dècades, els materials més emprats en enginyeria de la construcció han estat el formigó (barreja de ciment, sorra i pedra petita), rajoles i maons, roques industrials, guix, aliatges d'alumini i vidres. A aquests materials cal afegir les fustes que, a més de ser emprades per a fabricar múltiples components, són emprades en edificacions en molts països. Com es pot veure, a excepció dels polímers, la resta de categories de materials apareixen en enginyeria de la construcció. Darrerament, s'estan emprant alguns termostables per a la reparació de defectes en estructures base formigó. En els propers anys s'incrementarà el consum d'aquests materials i no s'espera la introducció de nous materials en quantitats significatives.

Taula 1.1. Alguns materials, tipus i aplicacions en Enginyeria.

Material	Classificació en base a la seva estructura	Classificació en base a les propietats Material:	Aplicacions en Enginyeria
Acer al carboni ordinari	Aliatge metàl·lic	Estructural	Construcció, Automoció, Naval
Aliatge d'alumini-coure	Aliatge metàl·lic	Estructural	Construcció, Aeronàutica
Coure del 99,99%	Aliatge metàl·lic	Elèctric (Conductor)	Elèctrica, Electrònica
Rajoles per a la construcció	Ceràmica	Estructural	Construcció
Porcellana	Ceràmica	Estructural Elèctric (aïllant)	Construcció Elèctrica
Aliatges Ni-Fe (50-50)	Aliatge metàl·lic	Magnètic	Elèctrica Electrònica
Ferrita d'estronci	Ceràmica	Magnètic	Elèctrica Electrònica
Fibra òptica	Ceràmica	Òptic	Telecomunicacions
Refractari de magnesita	Ceràmica	Tèrmic	Processat de materials
Polietilè	Polímer	Elèctric (aïllant) Resistència química (contenidors, canonades)	Elèctrica Química
Poliamida	Polímer	Estructural Elèctric (aïllant) Resistència química	Automoció Elèctrica Química
Resina epòxid	Polímer	Elèctric (aïllant) Estructural (reforçat amb fibra)	Elèctrica Electrònica Naval, Aeronàutica
Cautxú de silicona	Polímer	Elèctric (aïllant)	Elèctrica Electrònica
Fusta	Compost natural	Estructural	Construcció
Formigó	Compost	Estructural	Construcció
Polièster insaturat-fibra de carboni	Compost	Estructural	Naval Aeronàutica

- **Automoció:** en els automòbils de sèrie els acers i les foses són els materials més emprats (65-68% en pes del vehicle) i ho continuaran essent en els propers anys; els aliatges no ferris se situen entre el 5 i 10%, i s'espera un lleuger increment en els pròxims anys. La seva utilització permet disminuir el pes del vehicle atesa la baixa densitat relativa dels aliatges esmentats.

En les darreres dècades, la utilització de polímers, atenent també la seva baixa densitat, ha anat augmentant fins a situar-se, en l'actualitat, al voltant del 10%, sense comptar el cautxú; no sembla que aquest percentatge pugui presentar variacions significatives, almenys en un futur immediat. L'augment dels aliatges lleugers i els polímers es deu a la necessitat de disminuir el pes dels vehicles per a reduir el consum energètic i la contaminació ambiental.

La resta de materials, entre els quals cal incloure els vidres, se situen al voltant del 10%. En els automòbils de competició, disminueix de manera important la utilització dels aliatges ferris, d'elevada densitat, i s'incrementa significativament la utilització de materials compostos, més lleugers.

Com a novetat significativa en l'aplicació de nous materials, un intermetàl·lic, l'aluminur de titani s'utilitzarà per a substituir els acers inoxidable austenítics en la fabricació de vàlvules del motor.

- **Aeroespacial:** els materials de densitat més elevada utilitzats fa anys estan essent substituïts per materials de baixa densitat, fonamentalment, aliatges d'alumini d'alta resistència i materials compostos de matriu polimèrica i reforç ceràmic; la raó és la mateixa comentada en l'apartat anterior. Per als propers anys s'espera un increment en la utilització del titani i els seus aliatges, així com d'intermetàl·lics com aluminurs de titani, de níquel o de ferro.

En la figura 1.2 es mostra el darrer model d'avió de l'empresa europea Airbus, en el qual aproximadament un 25% en pes de la seva estructura està fabricat amb materials compostos que redueixen el pes, estalvien combustible i, per tant, disminueixen la contaminació.

En la figura 1.3 es mostra la part inferior del transbordador espacial de la NASA, en què s'observen les rajoles de material ceràmic (constituïdes per fibres de sílice), que protegeixen la nau de la calor durant el procés d'entrada a l'atmosfera.

- **Naval:** en els grans vaixells els acers seguiran essent els materials més emprats com ho han estat en les últimes dècades; en vaixells de competició, però, s'ha anat substituint les fustes emprades antigament per materials compostos de matriu polimèrica i reforçant ceràmic, així com alguns aliatges d'alumini, que permeten reduir-ne el pes de manera significativa.

Com es pot observar, els materials emprats per a fabricar un component, un objecte o una estructura, satisfan els requeriments tècnics establerts pel disseny. De tota manera, aquests requeriments van canviant al llarg del temps en funció de les necessitats establertes per l'enginyeria, de la mateixa manera que apareixen nous materials disponibles per a la seva selecció; això és el que fa que la substitució d'uns materials per d'altres es produeixi de forma contínua. A això cal afegir el cost com un paràmetre de màxima importància en enginyeria i que cal tenir present en la majoria dels dissenys, excepte en els que són d'elevada responsabilitat o estratègics.

Exercici 1.2. Indiqueu a quina classe de materials pertany el poli-clorur de vinil. Quines són les propietats que presenta? Quines són les seves aplicacions en enginyeria?

Exercici 1.3. Indiqueu a quina classe de materials pertanyen els aliatges de titani. Quines són les propietats que presenta? Quines són les seves aplicacions en enginyeria?



Figura 1.2. Imatge de l'aeronau de passatgers Airbus 380 (cortesia d'Airbus Industries).

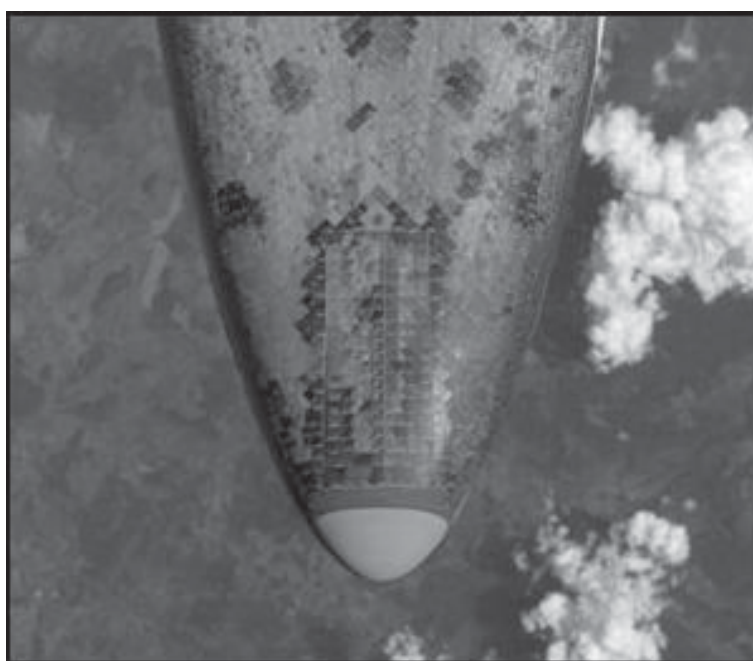


Figura 1.3. Imatge de la part inferior del transbordador espacial de la NASA.

1.5. Bibliografia

- CALLISTER, W.D. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Materiales*, Barcelona: Editorial Reverté S.A, 1995.
- NUÑEZ, C., ROCA, A., JORBA, J., *Comportamiento Mecánico de los Materiales. Volumen 1: Conceptos Fundamentales*, Barcelona: Universitat de Barcelona, 2002. (Text Docent 254).
- SHAKELFORD, J.F., *Materials Science for Engineers*, 3a ed., New York, USA: MacMillan Pub. Co., 1992.
- SMITH, W.F., *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. 3a edició, Madrid: McGraw-Hill, 2004.