

Índice

Prólogo	XV
---------	----

1. Introducción	1
------------------------	----------

1.1. Un poco de historia: los materiales y el hombre	2
1.2. Ciencia e Ingeniería de los Materiales	5
1.3. Propiedad y estructura	5
1.4. Clasificación de los materiales	8
1.4.1. Materiales metálicos	9
1.4.2. Materiales cerámicos	9
1.4.3. Materiales moleculares	9
1.4.4. Materiales poliméricos	10
1.4.5. Materiales híbridos	10
1.5. Una propiedad básica: la densidad	10
1.6. ¿Por qué estudiar los materiales?	13
1.6.1. Las energías renovables	13
1.6.2. Los transportes	13
1.6.3. La tecnología aeroespacial	15
1.6.4. El medioambiente	15
1.6.5. La construcción	15

Bloque 1

La escala atómica de los materiales. Orden y desorden

2. Estructura íntima de los materiales	19
---	-----------

2.1. Introducción	20
2.2. Las fuerzas interatómicas	20
2.2.1. Enlace iónico	21
2.2.2. Enlace covalente	23

2.2.3. Enlace secundario	24
2.2.4. Enlace metálico	25
2.2.5. Consideraciones finales	26
2.3. Enlaces y tipos de materiales	27
2.4. Orden y desorden	28
2.5. Celdilla elemental y sistemas cristalinos	30
2.6. Notación cristalográfica	31
2.6.1. Direcciones	33
2.6.2. Planos	34
2.7. Características de una estructura cristalina	35
2.7.1. Volumen de la celdilla unidad	35
2.7.2. Número de átomos por celdilla unidad	35
2.7.3. Concentración atómica	35
2.7.4. Fracción de empaquetamiento atómico	36
2.7.5. Densidad teórica	36
2.7.6. Forma y número de los intersticios	37
2.7.7. Número de coordinación	37

3. La escala atómica de los materiales metálicos	43
---	-----------

3.1. Introducción	44
3.2. Estructuras cristalinas de los metales	45
3.2.1. Estructura cúbica centrada en el interior (CCI)	45
3.2.2. Estructura cúbica centrada en las caras (CCC)	47
3.2.3. Estructura hexagonal compacta (HC)	48
3.2.4. Comparativa entre las diversas estructuras	49
3.3. Un nuevo enfoque: apilamiento de planos	50
3.4. Deformabilidad y estructura cristalina	52
3.5. Soluciones sólidas metálicas	54
3.5.1. Soluciones sólidas sustitutivas (SSS)	55
3.5.2. Soluciones sólidas intersticiales (SSI)	57
3.6. Vidrios metálicos	58

4. La escala atómica de los materiales cerámicos 65

4.1. Introducción..... 66

4.2. Estructuras cristalinas sencillas 68

 4.2.1. Estructura del cloruro sódico..... 68

 4.2.2. Estructura del cloruro de cesio 70

 4.2.3. Estructura del sulfuro de cinc 70

 4.2.4. La estructura del diamante 72

4.3. Estructuras cristalinas algo más complejas 73

 4.3.1. La estructura de la fluorita..... 73

 4.3.2. La estructura de la perovskita 73

 4.3.3. La estructura de la espinela..... 74

 4.3.4. Soluciones sólidas cerámicas 74

4.4. Estructuras cristalinas muy complejas: los silicatos 76

 4.4.1. Silicatos en isla 77

 4.4.2. Silicatos en doble isla..... 77

 4.4.3. Silicatos en anillo..... 78

 4.4.4. Silicatos de cadenas sencillas 78

 4.4.5. Silicatos de cadenas dobles 79

 4.4.6. Silicatos laminares 79

 4.4.7. Silicatos reticulares o en armazón 80

4.5. Vidrios cerámicos 82

5. La escala atómica de los materiales moleculares 89

5.1. Introducción..... 90

5.2. Soluciones líquidas moleculares..... 93

 5.2.1. Soluciones de gases en líquidos moleculares 93

 5.2.2. Soluciones de líquidos moleculares 93

 5.2.3. Disolución de sólidos en un líquido 96

5.3. Cristales líquidos 100

5.4. Geles moleculares 102

5.5. Las formas moleculares del carbono 102

 5.5.1. Grafito, grafeno y grafino..... 103

 5.5.2. Fullerenos 104

6. La escala atómica de los materiales poliméricos 109

6.1. Introducción..... 110

6.2. La polimerización 110

 6.2.1. Polimerización por adición..... 110

 6.2.2. Polimerización por condensación 113

 6.2.3. Agentes coadyuvantes 115

 6.2.4. Ramificación, isomerías y copolimerización 115

6.3. Tipos de materiales poliméricos..... 117

 6.3.1. Termoplásticos 118

 6.3.2. Elastómeros 124

 6.3.3. Termoestables..... 127

 6.3.4. Soluciones sólidas poliméricas..... 128

 6.3.5. Aditivos..... 128

6.4. Más allá de los polímeros convencionales..... 129

7. Imperfecciones cristalinas 137

7.1. Introducción..... 138

7.2. Clasificación de los defectos..... 138

7.3. Defectos volumétricos..... 139

7.4. Defectos superficiales..... 140

 7.4.1. Superficies..... 140

 7.4.2. Límites de grano 142

 7.4.3. Defectos de apilamiento..... 144

 7.4.4. Límites de macla..... 144

7.5. Defectos lineales 145

 7.5.1. Dislocaciones de cuña 145

 7.5.2. Dislocaciones de tornillo 147

 7.5.3. Dislocaciones mixtas 147

 7.5.4. Energía de una dislocación 148

 7.5.5. Una consideración termodinámica..... 148

 7.5.6. Movimiento de dislocaciones..... 149

7.6. Defectos puntuales 151

 7.6.1. Impurezas..... 151

 7.6.2. Vacantes 152

 7.6.3. Defectos puntuales en materiales poliméricos..... 155

 7.6.4. Movilidad atómica y difusión 155

Bloque 2
La escala microscópica de los materiales.
Transformaciones de fases y microestructura

8. Transformaciones de fases. Aspectos generales 171

8.1. Introducción..... 172

8.2. Fase y transformación de fase 172

8.3. «Pasaporte» termodinámico 173

8.4. Tipos de transformaciones de fase 174

8.5. El carácter invariante 177

8.6. Etapas de una transformación de fase 178

8.7.	Nucleación homogénea	178
8.7.1.	Valores críticos del radio y la energía libre	179
8.7.2.	Influencia de la temperatura en los valores críticos	180
8.7.3.	Nucleación homogénea a partir de vapor...	182
8.7.4.	Nucleación homogénea a partir de sólido	182
8.8.	Nucleación heterogénea.....	183
8.9.	Crecimiento.....	185
8.10.	Cinética de una transformación de fase.....	187
8.10.1.	Velocidad de nucleación	187
8.10.2.	Velocidad de crecimiento.....	189
8.10.3.	Velocidad de transformación global	189
8.10.4.	La ley de Avrami.....	191
8.10.5.	Tiempos característicos.....	192
8.10.6.	Diagramas TTT.....	192
8.11.	Solidificación vítrea	193
8.12.	Solidificación de materiales poliméricos	195

**9. Transformaciones de fases.
Sistemas multicomponentes** **203**

9.1.	Introducción.....	204
9.2.	Transformaciones eutéctica y eutectoide	204
9.2.1.	Transformación y morfologías eutécticas.....	204
9.2.2.	Aspectos termodinámicos.....	205
9.2.3.	Velocidad de crecimiento	207
9.2.4.	La variante eutectoide	209
9.2.5.	Aspectos cinéticos	209
9.3.	Transformaciones de precipitación.....	209
9.3.1.	Precipitación en estado líquido	210
9.3.2.	Precipitación en estado sólido	212
9.4.	Transformaciones monotéctica y monotectoide	215
9.5.	Transformaciones peritética y peritectoide	216
9.5.1.	Transformación peritética	216
9.5.2.	Aspectos cinéticos	216
9.5.3.	La variante peritectoide	218
9.6.	Transformaciones polimórficas	218
9.7.	Transformaciones martensíticas	219
9.7.1.	Aspectos generales	219
9.7.2.	Aspectos termodinámicos y cinéticos	221
9.8.	Transformaciones orden-desorden	221
9.9.	Recristalización.....	222
9.9.1.	Aspectos termodinámicos.....	224
9.9.2.	Aspectos cinéticos.....	225
9.9.3.	Temperatura de recristalización.....	227
9.10.	Una reflexión final.....	228

10. Diagramas de equilibrio **233**

10.1.	Introducción.....	234
10.1.1.	El concepto de equilibrio termodinámico	234
10.1.2.	Tipos de equilibrio.....	235
10.1.3.	La regla de las fases.....	235
10.1.4.	Diagramas de fases.....	236
10.1.5.	Microestructura y microconstituyentes.....	237
10.2.	Diagramas binarios de tipo I.....	238
10.2.1.	Descripción	238
10.2.2.	La regla de la palanca.....	240
10.2.3.	Efectos debidos a la ausencia de equilibrio	241
10.3.	Diagramas binarios de tipo II.....	243
10.3.1.	Descripción	243
10.3.2.	Curvas de enfriamiento características	244
10.3.3.	Efectos debidos a la ausencia de equilibrio	246
10.4.	Diagramas binarios de tipo III	247
10.4.1.	Descripción	247
10.4.2.	Curvas de enfriamiento características	248
10.4.3.	Efectos debidos a la ausencia de equilibrio	249
10.5.	Diagramas binarios de tipo IV	251
10.5.1.	Descripción	251
10.5.2.	Curvas de enfriamiento características	252
10.5.3.	Efectos debidos a la ausencia de equilibrio	253
10.6.	Diagramas binarios más complejos.....	255
10.7.	Diagramas ternarios.....	259
10.7.1.	Regla de las fases	259
10.7.2.	Composiciones	260
10.7.3.	Secciones.....	261
10.7.4.	Regla de la palanca	262

11. Determinación de diagramas de equilibrio **275**

11.1.	Introducción.....	276
11.2.	Técnicas experimentales	276
11.2.1.	Curvas de enfriamiento.....	276
11.2.2.	Calorimetría diferencial de barrido	278
11.2.3.	Estudio metalográfico	278
11.2.4.	Difracción de rayos X.....	279
11.2.5.	Dilatometría.....	279
11.3.	Computación de diagramas	279
11.3.1.	El método de la tangente común	279

16. Propiedades mecánicas de los materiales.

Fallo mecánico 449

16.1.	Fractura	450
16.1.1.	Fractura dúctil.....	450
16.1.2.	Fractura frágil.....	453
16.1.3.	Influencia de la estructura cristalina y la temperatura.....	455
16.1.4.	Fractura de materiales poliméricos	457
16.1.5.	Fractura de materiales híbridos.....	458
16.1.6.	Mecánica de la Fractura	458
16.2.	Fractura por termofluencia.....	462
16.3.	Fatiga.....	463
16.3.1.	Descripción macroscópica	463
16.3.2.	Descripción microscópica	468
16.3.3.	Fatiga y Mecánica de la Fractura.....	469
16.3.4.	Una reflexión final	472

17. Propiedades eléctricas de los materiales.

Bandas y conductores 477

17.1.	Introducción	478
17.2.	La conductividad eléctrica	478
17.3.	Clasificación eléctrica de los materiales.....	479
17.4.	El modelo de bandas de energía.....	480
17.4.1.	Origen de las bandas de energía.....	481
17.4.2.	Estructura de bandas de conductores, semiconductores y aislantes.....	482
17.5.	Conducción en conductores.....	484
17.5.1.	Conducción según el modelo de enlace.....	484
17.5.2.	Conducción según el modelo de bandas.....	487
17.5.3.	La controvertida dependencia térmica	491
17.5.4.	Contribuciones a la resistividad	492
17.5.5.	Conductividad eléctrica de una aleación.....	496
17.5.6.	Otras propiedades de los conductores.....	498
17.5.7.	Materiales conductores de interés tecnológico.....	501
17.5.8.	Superconductividad.....	503

18. Propiedades eléctricas de los materiales.

Semiconductores 513

18.1.	Conducción en semiconductores.....	514
18.1.1.	Según el modelo de enlace.....	514
18.1.2.	Según el modelo de bandas	517

18.1.3.	Cálculo de la concentración de portadores.....	518
18.1.4.	Posición del nivel de Fermi.....	521
18.1.5.	Dependencia térmica de la conductividad.....	522
18.1.6.	Otros factores que afectan a la conductividad.....	526
18.1.7.	Corriente eléctrica de difusión	527
18.2.	Uniones semiconductoras	527
18.2.1.	Recombinación de pares	527
18.2.2.	El diodo de unión pn.....	528
18.2.3.	El transistor	530
18.3.	Semiconductores de interés tecnológico	533
18.3.1.	Cerámicos covalentes cristalinos.....	533
18.3.2.	Cerámicos covalentes amorfos	536
18.3.3.	Óxidos no estequiométricos.....	537
18.3.4.	Fullerenos, grafenos y grafinos.....	538
18.3.5.	Poliméricos.....	538

19. Propiedades eléctricas de los materiales.

Aislantes 547

19.1.	Conducción en aislantes.....	548
19.1.1.	Ruptura dieléctrica	549
19.1.2.	Corrientes de fuga por conducción electrónica	550
19.1.3.	Corrientes de fuga por conducción iónica	551
19.2.	Comportamiento dieléctrico	552
19.2.1.	Polarización de la materia	552
19.2.2.	Mecanismos de polarización	556
19.2.3.	Comportamiento dependiente del tiempo	562
19.3.	Fenómenos dieléctricos.....	565
19.3.1.	Piezoelectricidad.....	566
19.3.2.	Piroelectricidad.....	568
19.3.3.	Ferroelectricidad.....	569
19.4.	Materiales aislantes de interés tecnológico.....	572

20. Propiedades magnéticas de los materiales

579

20.1.	Introducción	580
20.2.	Conceptos básicos	580
20.2.1.	Dipolos magnéticos	580
20.2.2.	Origen atómico del magnetismo	581
20.2.3.	Materiales con momento dipolar magnético	584

11.3.2.	Fundamento teórico del método de la tangente común	284
11.3.3.	Modelado de soluciones y compuestos.....	285
11.4.	Una reflexión final.....	288

12. Diagramas de equilibrio de interés tecnológico 293

12.1.	Introducción.....	294
12.2.	El sistema hierro-carbono.....	294
12.2.1.	El diagrama metaestable Fe-Fe ₃ C: aceros	295
12.2.2.	El diagrama estable Fe-C: fundiciones.....	319
12.2.3.	El sistema Fe-C-Cr.....	326
12.3.	Principales sistemas del aluminio.....	327
12.3.1.	Aleaciones envejecibles.....	328
12.3.2.	Aspectos microestructurales.....	331
12.4.	Los sistemas Cu-Sn y Cu-Zn.....	333
12.4.1.	Diagrama de fases Cu-Sn.....	333
12.4.2.	Diagrama de fases Cu-Zn.....	335
12.5.	El sistema SiO ₂ -Al ₂ O ₃	337
12.6.	Circonas y zirconos.....	338
12.7.	El sistema Ga-As.....	340
12.8.	Diagramas de sistemas moleculares.....	341
12.9.	Diagramas de sistemas poliméricos.....	342

Bloque 3
La escala macroscópica de los materiales.
Propiedades macroscópicas

13. Propiedades mecánicas de los materiales. Elasticidad 357

13.1.	Introducción.....	358
13.2.	Descripción macroscópica del comportamiento elástico.....	358
13.2.1.	El módulo de Young.....	359
13.2.2.	Otras constantes elásticas.....	360
13.2.3.	Valores característicos de las constantes elásticas.....	361
13.2.4.	Esfuerzos y deformaciones reales.....	363
13.3.	Descripción microscópica del comportamiento elástico.....	363
13.3.1.	Explicación atómica de la elasticidad.....	363
13.3.2.	Interpretación atómica del módulo de Young.....	364

13.4.	Factores que afectan a las propiedades elásticas.....	366
13.5.	Elasticidad en materiales multifásicos.....	368
13.6.	Determinación experimental de las constantes elásticas.....	370
13.7.	Más allá de la elasticidad.....	371

14. Propiedades mecánicas de los materiales. Plasticidad 377

14.1.	Ensayos y curva de esfuerzo-deformación.....	378
14.1.1.	Ensayo de tracción.....	378
14.1.2.	Ensayo de flexión transversal.....	378
14.1.3.	Ensayo de compresión.....	379
14.1.4.	Ensayo de torsión.....	379
14.1.5.	Ensayo de dureza.....	379
14.2.	Descripción macroscópica del comportamiento plástico.....	381
14.2.1.	Tipos básicos de curvas s-e.....	384
14.2.2.	Endurecimiento y estrangulamiento.....	386
14.2.3.	Un inciso: efecto Bauschinger y envejecimiento tras la deformación.....	388
14.2.4.	La ecuación de Hollomon.....	390
14.2.5.	Ductilidad y fragilidad.....	392
14.2.6.	Influencia de la temperatura y de la velocidad de deformación.....	393
14.2.7.	Factores que producen endurecimiento.....	398
14.2.8.	Resistencia a la tracción de materiales multifásicos.....	399
14.3.	Descripción microscópica del comportamiento plástico.....	400
14.3.1.	Deformación por maclado.....	405
14.3.2.	Deformación por deslizamiento de planos.....	409
14.3.3.	Comportamiento de las dislocaciones.....	409
14.3.4.	Explicación del efecto Bauschinger.....	409
14.3.5.	Explicación del envejecimiento tras la deformación.....	410
14.3.6.	Explicación de los mecanismos de endurecimiento.....	410

15. Propiedades mecánicas de los materiales. Termofluencia y viscoelasticidad 423

15.1.	Termofluencia.....	424
15.1.1.	Descripción macroscópica.....	424
15.1.2.	Descripción microscópica.....	429
15.2.	Viscoelasticidad.....	434
15.2.1.	Descripción macroscópica.....	434
15.2.2.	Descripción microscópica.....	441

20.3.	Campo magnético en el interior de un material	585
20.4.	Tipos de magnetismo	586
20.4.1.	El campo local	587
20.4.2.	Diamagnetismo	588
20.4.3.	Paramagnetismo	590
20.4.4.	Ferromagnetismo	593
20.4.5.	Antiferromagnetismo	596
20.4.6.	Ferrimagnetismo	597
20.5.	Estructura de dominios	598
20.6.	Curva de histéresis	599
20.7.	Materiales magnéticos de interés tecnológico	602
20.7.1.	Materiales magnéticamente blandos	603
20.7.2.	Materiales magnéticamente duros	604
20.8.	Magnetorresistividad gigante y espintrónica	606
 21. Propiedades ópticas de los materiales		613
21.1.	La doble naturaleza de la luz	614
21.2.	Clasificación óptica de los materiales	616
21.3.	Coefficientes de transmisión, reflexión y extinción	616
21.4.	Transmisión y extinción	617
21.4.1.	Velocidad de propagación	617
21.4.2.	Índice de refracción	618
21.4.3.	Extinción o amortiguamiento	624
21.4.4.	Color por transmisión y translucidez	627
21.4.5.	Mecanismos de absorción y reemisión	628
21.5.	Reflexión	634
21.5.1.	Reflexión especular y difusa	634
21.5.2.	Modelos teóricos de la reflectividad	636
21.5.3.	Color por reflexión	636
21.6.	Polarización	638
21.6.1.	Tipos de polarización	638
21.6.2.	Polarización por absorción	639
21.6.3.	Polarización por reflexión	639
21.6.4.	Interpretación fotónica de la polarización	640
21.6.5.	Actividad óptica	640
21.7.	Emisión	643
21.7.1.	Emisión térmica	643
21.7.2.	Luminiscencia	645
21.7.3.	Dispositivos emisores de luz	646
21.8.	Otras aplicaciones ópticas	651
21.8.1.	Celula fotovoltaica	651
21.8.2.	Fotocopiadoras	652
21.8.3.	La fibra óptica	653
21.8.4.	Dispositivos de almacenamiento óptico	653

22. Propiedades térmicas de los materiales		659
22.1.	Introducción	660
22.2.	Un modelo elemental de las vibraciones térmicas	660
22.3.	Dilatación térmica	661
22.3.1.	Relacion con el enlace	662
22.3.2.	Comparativa de comportamientos	663
22.3.3.	Esfuerzos térmicos	665
22.3.4.	Choque térmico de materiales frágiles	666
22.4.	Capacidad térmica	667
22.4.1.	La contribución de la red cristalina	668
22.4.2.	La contribución electrónica	672
22.4.3.	Otras contribuciones	673
22.5.	Conducción térmica	674
22.5.1.	Conductividad térmica	674
22.5.2.	Mecanismos de conducción del calor	675
22.5.3.	Comparativa de comportamientos	677
22.6.	Fenómenos termoelectricos	680
22.6.1.	Efecto Seebeck en metales	680
22.6.2.	Efecto Peltier en metales	683
22.6.3.	Termoelectricidad en semiconductores	684
22.7.	Efectos electrocalórico y magnetocalórico	686
 23. Propiedades químicas de los materiales		693
23.1.	Introducción	694
23.2.	Corrosión de materiales metálicos	694
23.2.1.	Aspectos elementales de electroquímica	694
23.2.2.	Formas de la corrosión	706
23.3.	Corrosión de materiales cerámicos	716
23.4.	Degradación de materiales poliméricos	716
23.4.1.	Hinchamiento y disolución	716
23.4.2.	Ruptura del enlace	717
23.5.	Catalisis	718
23.5.1.	Tipos de catalizadores	719
23.5.2.	Materiales para catalizadores heterogéneos	720
23.6.	Biocompatibilidad	721
23.6.1.	Concepto	721
23.6.2.	Biomateriales	721
 Epílogo		727
Apéndices		733
Ejercicios resueltos		739
Índice de términos		835