

ÍNDICE

Prólogo	15
<i>Tema 1.</i> INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES	17
1.1. Introducción	19
1.2. Los materiales en la sociedad actual	19
1.3. Propiedades de los materiales	23
1.3.1. Propiedades físicas	24
1.3.2. Propiedades físico-químicas y tecnológicas	26
1.4. Estructura atómica y enlaces químicos	28
1.4.1. Estructura atómica	29
1.4.2. Enlaces químicos	38
1.4.3. Tipos de enlace	43
1.4.3.1. Enlace metálico	45
1.4.3.2. Enlace iónico	48
1.4.3.3. Enlace covalente	51
1.4.3.4. Enlaces secundarios	55
1.4.3.5. Enlaces mixtos	57
1.5. Clasificación de los materiales	58
1.5.1. Materiales metálicos	58
1.5.2. Materiales poliméricos	60
1.5.3. Materiales cerámicos y vidrios	62
1.5.4. Materiales compuestos	65
1.5.5. Otros materiales	67
1.6. Cuestiones y ejercicios	71
<i>Tema 2.</i> ESTRUCTURA INTERNA DE LOS MATERIALES. SISTEMAS CRISTALINOS ...	73
2.1. Introducción	75
2.2. Estado sólido	76
2.2.1. Tipos de sólidos cristalinos	80
2.3. Sistemas cristalinos. Red espacial	83
2.4. Isomorfismo y alotropía	89

2.5.	Índices de Miller	91
2.6.	Redes cristalinas de los metales	106
	2.6.1. Densidad teórica y parámetros de red	107
	2.6.2. Radio atómico y parámetros de red	111
	2.6.3. Índices de coordinación	113
	2.6.4. Factor de empaquetamiento	114
	2.6.5. Densidades atómicas y parámetros de red	118
	2.6.6. Distancia entre planos reticulares y parámetros de red ..	122
2.7.	Intersticios en las redes cristalinas	124
2.8.	Técnicas para caracterizar estructuras internas	128
	2.8.1. Técnicas espectroscópicas	129
	2.8.2. Análisis térmico	131
	2.8.3. Técnicas de difracción	132
2.9.	Cuestiones y ejercicios	139

Tema 3. DEFECTOS EN LA ESTRUCTURA CRISTALINA. SOLIDIFICACIÓN DE ME-

TALES	143	
3.1.	Introducción	145
3.2.	Imperfecciones cristalinas	145
3.3.	Defectos de punto	146
	3.3.1. Defectos puntuales intrínsecos. Vacantes	147
	3.3.2. Defectos puntuales intrínsecos. Intersticiales	148
	3.3.3. Defectos puntuales extrínsecos	149
3.4.	Difusión en el estado sólido	152
	3.4.1. Mecanismos de difusión	152
	3.4.2. Leyes de Fick	154
	3.4.2.1. Primera ley de Fick. Flujo estacionario	155
	3.4.2.2. Segunda ley de Fick. Flujo no estacionario	156
	3.4.3. Factores que influyen en la difusión	159
3.5.	Defectos de línea. Dislocaciones	163
	3.5.1. Tipos de dislocaciones	164
	3.5.2. Caracterización de dislocaciones. Vector de Burgers ..	166
3.6.	Deformación de cristales	173
3.7.	Defectos de superficie	176
3.8.	Solidificación y cristalización de metales	178
	3.8.1. Proceso de solidificación/cristalización	179
	3.8.2. Fronteras de grano	184

3.8.3. Morfología de los granos. Metalografía	187
3.9. Solidificación direccional	193
3.10. Solidificación rápida. Sinterización	195
3.11. Defectos producidos durante la solidificación	197
3.12. Técnicas para la inspección de defectos	199
3.13. Cuestiones y ejercicios	207

<i>Tema 4. CONSTRUCCIÓN DE LAS ALEACIONES METÁLICAS. DIAGRAMA DE FASES. TRANSFORMACIONES</i>	211
4.1. Introducción	213
4.2. Aleaciones metálicas	214
4.3. Soluciones sólidas	216
4.3.1. Soluciones sólidas sustitucionales	216
4.3.2. Soluciones sólidas intersticiales	221
4.4. Compuestos y soluciones intermedias	225
4.5. Soluciones sólidas ordenadas	226
4.6. Insolubilidad	227
4.7. Diagramas de fases	228
4.7.1. Sistemas de aleación binarios	232
4.7.1.1. Dos metales totalmente solubles en los estados líquido y sólido	233
4.7.1.2. Dos metales totalmente solubles en estado líquido y totalmente insolubles en el sólido. Transformación eutéctica	247
4.7.1.3. Dos metales totalmente solubles en estado líquido y parcialmente solubles en el sólido. Transformación eutéctica	255
4.7.1.4. Diagramas de fases con compuestos y fases intermedias. Transformación peritética	266
4.7.1.5. Dos metales parcialmente solubles en estado líquido. Transformación monotética	279
4.7.1.6. Transformaciones en el estado sólido	284
4.7.1.6.1. Alotropía	284
4.7.1.6.2. Transformaciones orden-desorden	285
4.7.1.6.3. Transformación eutectoide	287
4.7.1.6.4. Transformación peritectoide	293
4.8. Cuestiones y ejercicios	300

<i>Tema 5. PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES METÁLICOS. ENSAYOS</i>	309
5.1. Introducción	311
5.2. Deformación dependiente y no dependiente del tiempo	312
5.3. Deformación no dependiente del tiempo	316
5.3.1. Ensayo de tracción	316
5.3.2. Ensayo de compresión	334
5.3.3. Ensayo de flexión	336
5.3.4. Ensayo de dureza	338
5.3.5. Ensayo de impacto	346
5.3.6. Ensayo de fatiga	349
5.4. Deformación dependiente del tiempo. Fluencia	351
5.5. Deformación de materiales policristalinos	354
5.5.1. Efecto del trabajo en frío	355
5.6. Mecanismos de endurecimiento y reforzamiento	357
5.6.1. Endurecimiento por deformación plástica	358
5.6.2. Reforzamiento por solución sólida	360
5.6.3. Reforzamiento por dispersión de partículas	361
5.7. Fenómenos de restauración	362
5.7.1. Recuperación	363
5.7.2. Recristalización	363
5.7.3. Crecimiento de grano	365
5.8. Cuestiones y ejercicios	368
<i>Tema 6. ALEACIONES FÉRREAS DE INTERÉS INDUSTRIAL. TRATAMIENTOS Y CARACTERÍSTICAS</i>	373
6.1. Introducción	375
6.2. Diagrama hierro - carburo de hierro	376
6.3. Enfriamiento lento del acero. Evolución microestructural ...	382
6.3.1. Aceros hipoeutectoides	382
6.3.2. Acero eutectoide	384
6.3.3. Aceros hipereutectoides	385
6.4. Transformaciones isotérmicas de la austenita	390
6.4.1. Diagramas TTT	392
6.5. Tratamientos térmicos de los aceros	395
6.5.1. Recocido	397
6.5.1.1. De homogeneización	397
6.5.1.2. De regeneración	398
6.5.1.3. De globulización	399

6.5.1.4. De estabilización	400
6.5.1.5. Isotérmico	400
6.5.2. Normalizado	401
6.5.3. Temple	402
6.5.4. Revenido	405
6.5.5. Martempering y austempering	406
6.5.6. Templabilidad. Ensayo Jominy	407
6.6. Tratamientos superficiales	409
6.6.1. Sin alteración de la composición superficial	410
6.6.2. Con alteración de la composición superficial	411
6.6.2.1. Tratamientos termoquímicos	411
6.6.2.2. Implantación iónica	413
6.6.3. Con formación de una capa diferente	414
6.7. Conformado de metales	416
6.8. Aleaciones férricas	420
6.8.1. Aceros	420
6.8.1.1. Aceros al carbono	423
6.8.1.2. Aceros aleados	425
6.8.1.2.1. Aceros de baja aleación	429
6.8.1.2.2. Aceros de alta aleación	431
6.8.2. Fundiciones	434
6.8.2.1. Clasificación de las fundiciones	437
6.8.2.1.1. Fundiciones blancas	438
6.8.2.1.2. Fundiciones grises	440
6.8.2.1.3. Fundiciones dúctiles	442
6.8.2.1.4. Fundiciones maleables	444
6.9. Cuestiones y ejercicios	449

Tema 7. ALEACIONES NO FÉRREAS DE INTERÉS INDUSTRIAL. TRATAMIENTOS Y CARACTERÍSTICAS

7.1. Introducción	455
7.2. Aleaciones no férricas	456
7.2.1. Aleaciones ligeras	457
7.2.1.1. Aleaciones de aluminio	457
7.2.1.1.1. Endurecimiento por precipitación .	460
7.2.1.1.2. Clasificación de las aleaciones de Al .	465
7.2.1.2. Aleaciones de magnesio	469
7.2.1.2.1. Clasificación de las aleaciones de Mg	470

7.2.1.3.	Aleaciones de titanio	472
7.2.1.3.1.	Clasificación de las aleaciones de Ti	476
7.2.1.4.	Aleaciones de berilio	477
7.2.2.	Aleaciones según el componente mayoritario	478
7.2.2.1.	Aleaciones de cobre	479
7.2.2.1.1.	Latones	480
7.2.2.1.2.	Bronces	486
7.2.2.1.3.	Cuproaluminios	488
7.2.2.1.4.	Cuproníqueles	491
7.2.2.1.5.	Alpacas	492
7.2.2.1.6.	Aleaciones endurecibles	493
7.2.2.1.7.	Otras aleaciones	494
7.2.2.2.	Aleaciones de níquel	495
7.2.2.3.	Aleaciones de cobalto	502
7.2.3.	Aleaciones de metales refractarios	504
7.2.4.	Aleaciones de metales blancos	506
7.3.	Cuestiones y ejercicios	512
<i>Tema 8.</i>	MATERIALES POLIMÉRICOS DE INTERÉS INDUSTRIAL	515
8.1.	Introducción	517
8.2.	Moléculas de polímeros	518
8.3.	Estructuras moleculares de polímeros	522
8.4.	Estructuras cristalinas de polímeros	529
8.5.	Clasificación de los polímeros	532
8.6.	Funcionalidad de aditivos en plásticos	537
8.7.	Comportamiento de los plásticos	540
8.7.1.	Comportamiento térmico	541
8.7.2.	Comportamiento mecánico	543
8.8.	Conformado de polímeros	546
8.8.1.	Moldeo	548
8.8.2.	Otros procesos de conformado	552
8.8.3.	Transformación de elastómeros	554
8.9.	Ensayos de polímeros	555
8.9.1.	Ensayos mecánicos	555
8.9.2.	Otros tipos de ensayos	568
8.10.	Termoplásticos de interés industrial	571
8.11.	Termoestables de interés industrial	582
8.12.	Elastómeros de interés industrial	584

8.13.	Otras formas de polímeros y sus aplicaciones	586
8.14.	Cuestiones y ejercicios	591
<i>Tema 9.</i>	MATERIALES CERÁMICOS DE INTERÉS INDUSTRIAL	593
9.1.	Introducción	595
9.2.	Estructuras de los materiales cerámicos	596
9.2.1.	Estructuras cristalinas de cerámicas iónicas	598
9.2.2.	Estructuras cristalinas de cerámicas covalentes	605
9.2.2.1.	Estructuras del tipo sulfuro de cinc	605
9.2.2.2.	Estructuras del carbono	606
9.2.3.	Estructuras cristalinas de silicatos	609
9.3.	Defectos en cerámicas	613
9.4.	Diagramas de fases de cerámicas	614
9.5.	Propiedades mecánicas de cerámicas	617
9.6.	Propiedades térmicas de cerámicas	621
9.7.	Propiedades eléctricas y magnéticas de cerámicas	622
9.8.	Conformado de cerámicas	624
9.9.	Clasificación de los materiales cerámicos	628
9.9.1.	Vidrios	628
9.9.1.1.	Estructura y composición de los vidrios	629
9.9.1.2.	Temperatura de transición vítrea	631
9.9.1.3.	Viscosidad de los vidrios	632
9.9.1.4.	Conformado de los vidrios	634
9.9.1.5.	Tratamientos de los vidrios	636
9.9.2.	Materiales cerámicos tradicionales	638
9.9.3.	Materiales cerámicos refractarios	638
9.9.4.	Materiales cerámicos abrasivos	639
9.9.5.	Cementos	639
9.9.6.	Cerámicas vítreas	642
9.9.7.	Cerámicas técnicas	642
9.9.8.	Otras cerámicas de interés	644
9.10.	Cuestiones y ejercicios	647
<i>Tema 10.</i>	MATERIALES COMPUESTOS DE INTERÉS INDUSTRIAL	649
10.1.	Introducción	651
10.2.	Formación de materiales compuestos	652
10.2.1.	Matrices	653
10.2.1.1.	Tipos de matrices	654

10.2.2. Refuerzos	662
10.2.2.1. Tipos de refuerzos	666
10.2.3. Cargas y aditivos	674
10.3. Consideraciones sobre elección de constituyentes	676
10.4. Materiales compuestos reforzados con fibras	681
10.4.1. Fibras continuas y alineadas	681
10.4.2. Fibras discontinuas	687
10.5. Materiales compuestos reforzados con partículas	690
10.5.1. Hormigón	691
10.6. Procesos de transformación de materiales compuestos de matriz polimérica	693
10.6.1. Por contacto a mano	694
10.6.2. Por proyección simultánea	696
10.6.3. Por inyección	698
10.6.4. Por compresión	700
10.6.5. Por centrifugación	702
10.6.6. Por enrollamiento	703
10.6.7. Por pultrusión	705
10.6.8. Procesos de transformación de termoplásticos reforzados	706
10.7. Otros materiales compuestos	708
10.8. Aplicaciones de los materiales compuestos	714
10.9. Cuestiones y ejercicios	716
 BIBLIOGRAFÍA	 719

9.2. ESTRUCTURAS DE LOS MATERIALES CERÁMICOS

Las propiedades de los materiales cerámicos son consecuencia de la particular estructura de este tipo de materiales, basada en la naturaleza del enlace interatómico (iónico y/o covalente) y en la disposición espacial de los átomos, encontrándose orden de largo alcance en cerámicas cristalinas como por ejemplo los silicatos tradicionales, y orden de corto alcance en las cerámicas amorfas, como es el caso de los vidrios basados en su mayoría en la sílice (SiO_2) y caracterizados por un conjunto de propiedades mecánicas y ópticas que son consecuencia de su falta de cristalinidad.

La naturaleza del enlace químico es un factor fundamental en el ordenamiento de la estructura de los materiales cerámicos. El carácter direccional del enlace covalente y el número de enlaces necesarios en un compuesto cerámico covalente determina el número de vecinos más próximos a un átomo dado y el orden más probable. En el caso de la sílice, el Si necesita cuatro átomos de O para generar una estructura tetraédrica y por tanto un orden de corto alcance, tal como se observa en la figura 9.1.

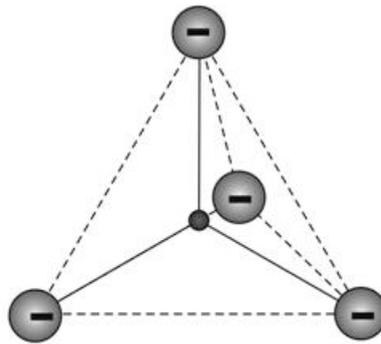


Figura 9.1.

Mientras que si el enlace es de carácter iónico, será la distribución de cargas eléctricas el factor dominante para el ordenamiento de las diferentes especies aniónicas y catiónicas, como puede observarse en la figura 1.17 que corresponde al NaCl y que se expuso en el estudio del enlace iónico.

Desde el punto de vista del ordenamiento interno, sea de corto alcance o de largo alcance, los materiales cerámicos pueden ser amorfos o cristali-

nos y según el enlace predominante serán cerámicos iónicos o cerámicos covalentes.

Los cerámicos covalentes están generalmente compuestos por dos elementos, como puede ser el caso del SiO_2 o del TiC , aunque también pueden ser elementos puros, como el diamante (C) o el Si. El enlace covalente se realiza compartiendo los electrones entre los átomos que intervienen, por lo que dos átomos unidos por un enlace covalente deben contribuir cada uno de ellos con al menos un electrón, siendo el número de enlaces covalentes que es capaz de realizar un átomo $8-E$, siendo E el número de electrones que dispone el átomo en la última capa (electrones de valencia). Por ejemplo, al carbono con $E = 4$ le corresponden cuatro ($4 = 8 - 4$), y así el diamante presenta una estructura en la que cada átomo de C está unido a través de cuatro enlaces covalentes con otros cuatro átomos de C, tal como se puede observar en la figura 9.2.

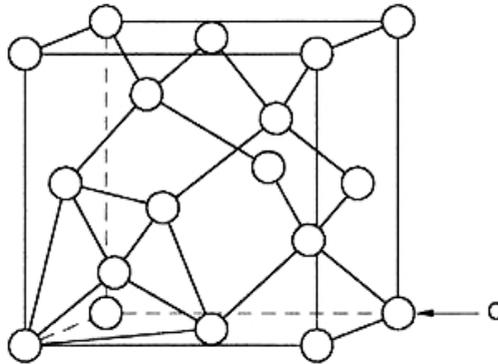


Figura 9.2.

El enlace covalente sólo fija el orden de corto alcance, es decir la posición y el número de átomos vecinos y dependiendo de cómo se una la estructura básica con otras idénticas, se generan estructuras con orden de largo alcance (cerámicos covalentes cristalinos) o de corto alcance (cerámicos covalentes amorfos).

Los cerámicos de carácter iónico corresponden normalmente a compuestos de un metal con un no-metal, como son los casos del cloruro sódico (NaCl), magnesia (MgO), alúmina (Al_2O_3) o circonia (ZrO_2), cuyos ele-

mentos se unen presentando diferentes electronegatividades. En el proceso de cesión y aceptación de electrones se producen especies con carga eléctrica (aniones y cationes), siendo su enlace de naturaleza electrostática, lo que conlleva que el ordenamiento espacial esté determinado, en gran medida, en cómo pueden empaquetarse los iones positivos y negativos, de manera que las fuerzas electrostáticas de atracción sean máximas (distancias mínimas entre los iones de carga contraria) y las de repulsión mínimas (que los iones del mismo signo estén alejados), resultando empaquetamientos estables aquello que requieran mínima energía.

La realidad indica que los átomos de muchas cerámicas participan de ambos tipos de enlaces, iónico y covalente. El grado de participación de un tipo u otro tipo de enlace viene determinado por las posiciones relativas en la tabla periódica de los elementos constituyentes del compuesto. Cuanto mayor sea la separación en dicha tabla (tanto horizontal como verticalmente), más iónico será el enlace. Mientras que, cuanto más cercanos estén los elementos, el enlace será más covalente.

9.2.1. Estructuras cristalinas de cerámicas iónicas

La naturaleza del enlace iónico da lugar a estructuras cristalinas compactas, con una estructura resultante que depende de las reglas o principios de Pauling, siendo las más importantes las relacionadas con la magnitud de la carga eléctrica de cada ión y con los tamaños relativos de los aniones y cationes. La primera de ellas establece que la estructura debe ser tal que el cristal sea eléctricamente neutro, por lo que la carga positiva de los cationes debe ser neutralizada con la carga negativa de los aniones. La segunda establece la geometría necesaria para que el catión permanezca en contacto con los aniones que le rodean en función del número de coordinación (número de aniones que rodean a un catión) que está determinado por el cociente entre el radio del catión y el del anión (r_C/r_A).

Cada número de coordinación tiene asociado un poliedro, que establece la disposición de los aniones alrededor del catión central, y un valor mínimo del cociente r_C/r_A para el que la configuración sea estable, tal y como se muestra en la tabla 9.1. Esta regla no siempre se cumple y a veces

Tabla 9.1. Condiciones de estabilidad en cerámicas iónicas

Número de coordinación	Disposición de los aniones alrededor del catión central	r_c/r_A mínimo
8	Vértices de un cubo	0,73 - 1,00
6	Vértices de un octaedro	0,41 - 0,73
4	Vértices de un tetraedro	0,22 - 0,41
3	Vértices de un triángulo	0,15 - 0,22
2	En línea, a ambos lados del catión	< 0,15

es posible un número de coordinación mayor que el permitido. Por ejemplo, el cociente de los radios iónicos del Al y O es 0,38; por lo que el número de coordinación debería ser inferior a 4, pero el número de coordinación real es 6 (el catión Al^{3+} rodeado de los 6 aniones O^{2-}).

Para cocientes mayores que 1 el número de coordinación es 12. Las situaciones más estables corresponden a las de número de coordinación mayor, siendo los más normales 4 y 6, que son los correspondientes a los huecos intersticiales de dos estructuras compactas, como son la (ccc) y la (hc).

La estructura (ccc) tiene 4 nudos netos por celda, 3 por la contribución de los 6 nudos del centro de las caras (cada uno compartido por 2 celdas) más 1 por la contribución de los 8 nudos situados en los vértices (cada uno compartido por 8 celdas). De igual manera, presenta 4 huecos netos octaédricos por celda, 1 localizado en el centro de la celda y los 3 restantes por la contribución de los situados en el centro de cada arista, 12 aristas compartidas por 4 celdas, de tal manera que el número de nudos por celda coincide con el de huecos octaédricos por celda. Además, existen 8 huecos tetraédricos (número de coordinación 4) dentro de la celda (ccc) por lo que en este caso habrá 2 huecos tetraédricos por nudo. En la figura 9.3 se muestran los nudos y huecos de la estructura (ccc).

Esta estructura compacta (ccc) es característica de diferentes materiales cerámicos iónicos, permitiendo diversas relaciones entre el catión (C) y el anión (A), resultando tipos de estructuras tales como AC o A_xC_y o tipo $A_xC_yC'_z$ cuando existe más de un tipo de catión.

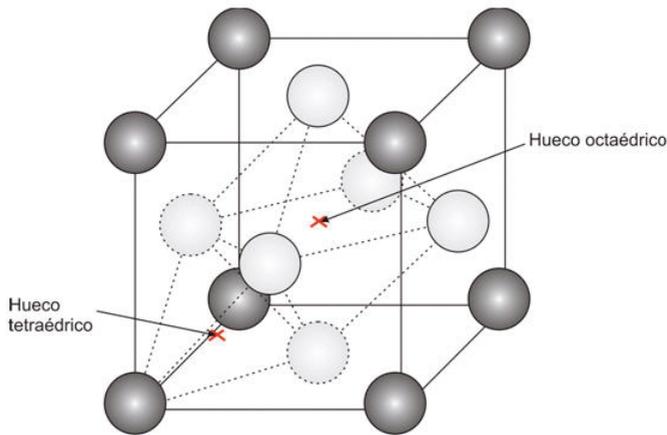


Figura 9.3.

Estructuras cristalinas tipo AC

Son los compuestos cerámicos más sencillos, puesto que están constituidos solo por dos tipos de átomos y en la misma relación. Se les denomina tipo AC y entre ellos se encuentran NaCl, CsCl y ZnS.

La estructura cristalina del cloruro sódico NaCl presenta una relación anión y catión de 1:1, siendo el cociente de los radios iónicos $r_{\text{Na}^+}/r_{\text{Cl}^-} = 0,54$ e induciendo a que el número de coordinación más probable sea 6. Por la regla de neutralidad de la carga, el número de cationes debe ser igual al de aniones. La estructura del NaCl es (ccc), correspondiendo a la que se representa en la figura 9.4, con los aniones Cl^- situados en los nudos de la red (círculos vacíos) y los cationes Na^+ en los huecos octaédricos (círculos llenos), satisfaciendo tanto la regla del número de coordinación que en este caso es 6, como la de neutralidad de la carga, ya que en la estructura (ccc) hay un hueco octaédrico por cada nudo de la red. Esta estructura está formada por dos redes cúbicas centradas en las caras que penetran entre sí, de forma que una está constituida por aniones y la otra por cationes.

La estructura de cloruro de cesio CsCl presenta una celda unidad compuesta por aniones en los vértices del cubo y por el catión en el centro del mismo, dando lugar a una aparente estructura cúbica centrada en el cuerpo, siendo solo aparente porque no son iguales todos los iones que ocupan la red. El número de coordinación de esta estructura es 8.

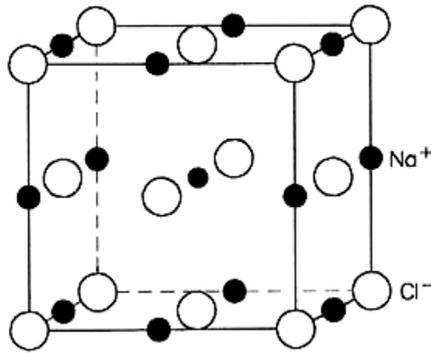


Figura 9.4.

Compuestos cerámicos que tienen la misma estructura que el NaCl son: MgO, CaO, NiO y FeO. Entre ellos destaca la magnesia MgO, ya que se utiliza como materia prima para la fabricación de silicatos y además es refractaria.

Estructuras cristalinas tipo A_xC_y

Existen muchos compuestos cerámicos cuya relación entre las valencias de los átomos que forman parte es distinta de 1:1, como es el caso del CaF_2 , Al_2O_3 , y ZrO_2 , entre otros, denominándose a este grupo de forma genérica A_xC_y , destacando en él por su importancia la fluorita CaF_2 y la alúmina Al_2O_3 .

La estructura cristalina de la fluorita CaF_2 presenta una relación aniónica de 2:1, siendo el cociente de radios iónicos de $\sim 0,8$ correspondiendo a un número de coordinación de 8. La estructura cristalina de tipo (fcc) permite que se cumpla la neutralidad de la carga con los iones Ca^{2+} situados en los nudos de la red y los iones F^- en los huecos tetraédricos, puesto que en la red hay 2 huecos de este tipo por cada nudo de la red. Entre las cerámicas más importantes que presentan esta estructura se encuentran ZrO_2 , ThO_2 , TeO_2 y UO_2 .

En la figura 9.5 se presenta la representación gráfica de la estructura cristalina de la fluorita.

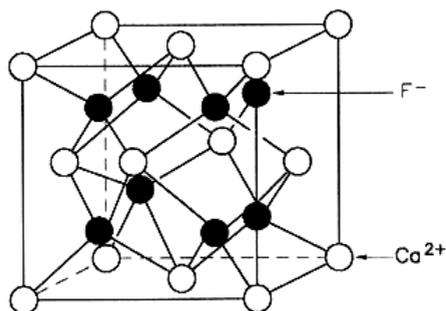


Figura 9.5.

Este tipo de estructura tiene la particularidad de disponer de un gran hueco en el centro del cubo, razón por la cual el UO_2 puede ser utilizado como combustible nuclear, ya que puede acomodar los productos de fisión¹ en dicho hueco. La circonia ZrO_2 , de gran importancia por dar lugar a una familia de cerámicas tenaces, presenta esta misma estructura, aunque algo distorsionada puesto que cristaliza en el sistema monoclinico.

La alúmina u óxido de aluminio Al_2O_3 presenta una estructura (hc). El número de coordinación del ión Al^{3+} es 6 por lo que debe situarse en posiciones octaédricas y para mantener la neutralidad de carga debe haber 2/3 de iones Al^{3+} por cada ión O^{2-} , por lo que de los 6 huecos octaédricos existentes, sólo habrá ocupados 4 por iones Al^{3+} . En la figura 9.6 se puede observar la representación esquemática de la estructura de la alúmina.

La alúmina se utiliza tanto como materia prima en las mezclas cerámicas como en estado puro en diferentes aplicaciones. En la naturaleza se encuentran cristales de alúmina con colores diversos (rubí², zafiro³, etc.) debido a la presencia en ella de metales, tales como Cr, Fe y Ti. Debido a su alto punto de fusión, la alúmina se emplea como material refractario fabricado por sinterización a alta temperatura, para fabricar ladrillos, tubos y crisoles⁴. Los tubos de alúmina se utilizan para lámparas de iluminación

¹ Productos de fisión: son productos resultantes de la interacción entre neutrones y núcleos atómicos que tienen lugar en el campo nuclear.

² Rubí: es un mineral de elevada dureza y color rojizo que se debe a la presencia de Fe y Cr.

³ Zafiro: es una piedra preciosa cuya composición química es una mezcla de óxidos de Al, Fe y Ti, su característico color azul se debe a la presencia de Ti.

⁴ Crisol: es un recipiente en el que se funden metales.

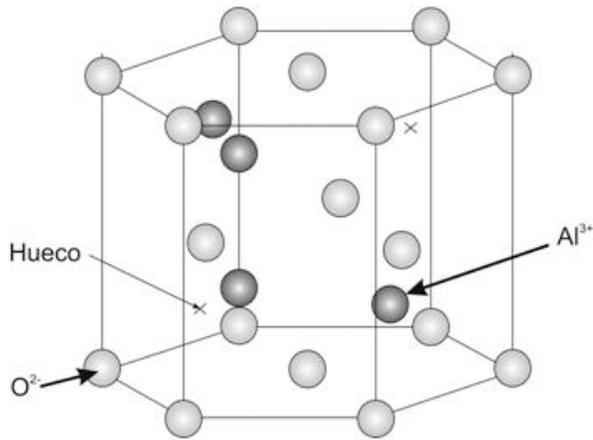


Figura 9.6.

con vapor de Na, debido a la resistencia al ataque de estos vapores y a su elevada transmisión óptica, cercana al 90%. Dada su elevada dureza se utiliza en recubrimientos de herramientas de corte para mecanizado. Otra de sus muchas aplicaciones se sitúa en el campo de la metalografía para efectuar el pulido final de muchas aleaciones metálicas.

Estructuras cristalinas tipo $A_xC_yC'_z$

Existen materiales cerámicos que tienen más de un tipo de catión. Cuando son dos (C y C') presentan estructuras cúbicas en las que el empaquetamiento compacto se suele basar en los aniones, con el O situado en los centros de las caras de la red compacta (ccc) y los cationes situados en huecos octaédricos o tetraédricos parcial o totalmente ocupados. A estas estructuras pertenecen muchos de los superconductores con alta temperatura de transición recientemente descubiertos. Las perovskitas ferroeléctricas, entre las que se encuentran el BaTiO₃, KNbO₃ y NaNbO₃, son algunos ejemplos de este tipo de estructuras.

El titanato de bario BaTiO₃, que tiene dos cationes Ba²⁺ y Ti⁴⁺ y cuya estructura es (ccc), con los cationes Ba²⁺ en los vértices y los aniones O²⁻ en el centro de las caras de la celda unidad, tal como se puede observar en la figura 9.7. Cada O²⁻ está rodeado de 4 Ba²⁺ y 8 O²⁻ y cada Ba²⁺ está rodea-

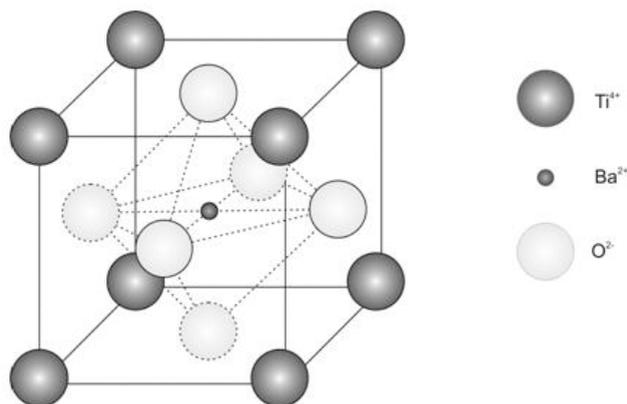


Figura 9.7.

do de 12 O^{2-} . El pequeño catión Ti^{4+} se localiza en la posición octaédrica⁵ intersticial situada en el centro de la celda unidad, coordinado a 6 O^{2-} .

El titanato de bario interesa por ser un material ferroeléctrico⁶ y piezoeléctrico⁷ por debajo de 120 °C (temperatura de Curie)⁸, debido a que esta estructura cúbica solo es estable por encima de los 120 °C, siendo tetragonal sin centro de simetría a temperaturas inferiores. Otros materiales que presentan este tipo de estructura son el $SrTiO_3$, $CaZrO_3$, $SrZrO_3$ y $LaAlO_3$, y por lo tanto con propiedades ferroeléctricas y piezoeléctricas. Todos ellos se utilizan en aplicaciones electrónicas una vez que se han sinterizado.

La estructura cristalina de la espinela $MgAl_2O_4$ ⁹ es otra estructura característica de algunos de los materiales cerámicos más importantes. Así, ciertos óxidos tienen la estructura de espinela, que presenta la fórmula general CC_2O_4 , donde C es un catión metálico de valencia +2 y C' es un catión

⁵ Posición octaédrica: se denomina así cuando el hueco está rodeado por 6 esferas, 3 de cada uno de los dos planos. Al unir los centros de las esferas se produce un octaedro.

⁶ Material ferroeléctrico: es un material que presenta un aumento brusco de polarización cuando se le aplica un campo eléctrico.

⁷ Material piezoeléctrico: es un material en el que se produce una respuesta de carácter eléctrico al serle aplicada una presión mecánica y viceversa.

⁸ Temperatura de Curie: es la temperatura que por encima de ella un material ferromagnético pierde su magnetismo, por lo que se comporta como paramagnético.

⁹ $MgAl_2O_4 = MgO \cdot Al_2O_3$.

metálico de valencia +3. En la estructura de espinela, los aniones O forman la red (ccc), los cationes C ocupan los huecos tetraédricos y los cationes C' los octaédricos. Compuestos con esta estructura, entre los que destaca el NiFe_2O_4 denominado ferrita de Ni, son muy utilizados como materiales magnéticos no metálicos para aplicaciones electrónicas, variando las características magnéticas según la ocupación de los huecos tetraédricos y octaédricos.

9.2.2. Estructuras cristalinas de cerámicas covalentes

La cerámica cristalina covalente más representativa es la estructura tipo diamante, aunque la estructura tipo cinc blenda también se puede considerar incluida en este grupo. El enlace covalente impone condiciones de tipo direccional y sólo afecta a los átomos más próximos que integran la estructura elemental; es decir, al orden de corto alcance. Esta estructura elemental, también denominada monómero, se puede ordenar en el espacio de manera periódica o de manera que no se produzca orden de largo alcance, como puede suceder en algunos materiales inorgánicos, caso de los silicatos (vidrios).

9.2.2.1. Estructuras del tipo sulfuro de cinc

La estructura del sulfuro de cinc ZnS , denominado blenda, presenta un número de coordinación de 4, luego los iones se encuentran en los vértices de un tetraedro, de forma que los átomos de S ocupan todos los vértices y los centros de las caras de la celda cúbica unidad, mientras que los átomos de Zn se encuentran en las posiciones tetraédricas¹⁰ de su interior. El tipo de enlace es mayoritariamente covalente (alrededor del 87%), por lo que su estructura cristalina está caracterizada principalmente por este tipo de enlace. La relación atómica es de 1:1 y la estructura natural corresponde a la (ccc), de manera que el Zn o el S ocupan las posiciones de los nudos de la red y el Zn o el S ocupan 4 de los huecos tetraédricos alternados según

¹⁰ Posiciones tetraédricas: Cuando 4 átomos, 3 en un plano y 1 solo en el adyacente, rodean a un hueco, se encuentran en posición tetraédrica, ya que si se trazan líneas rectas desde los centros de las esferas circundantes se forma un tetraedro.

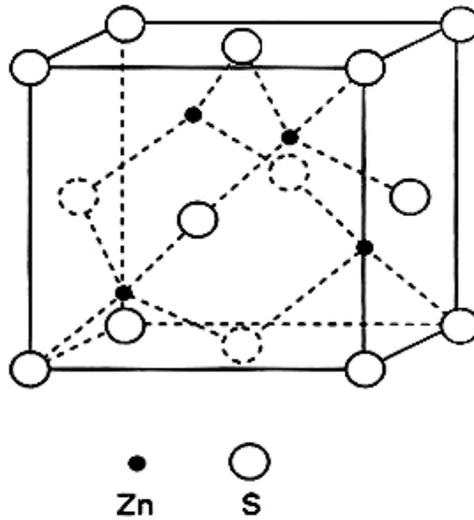


Figura 9.8.

puede observarse en la figura 9.8, quedando definido de esta forma la estructura denominada blenda. Estructura que presentan muchos compuestos utilizados como semiconductores, tales como InAs, InSb y CdS.

9.2.2.2. Estructuras del carbono

El C presenta diferentes estados alotrópicos con diferentes propiedades y estructuras cristalinas, tales como el diamante, grafito y otros que actualmente se están desarrollando como son los fullerenos y los nanotubos de C, que tipifican las distintas estructuras cristalinas del C.

Tipo diamante

El modelo de estructura que corresponde al sistema (ccc) con 4 huecos tetraédricos ocupados de forma alternada por C y unidos mediante enlaces covalentes, es similar a la estructura de la blenda. Presenta alta simetría y es el material más duro de los conocidos, además es rígido y presenta alta conductividad térmica y muy baja conductividad eléctrica, características

propias de su enlace covalente. El diamante sintético se utiliza como revestimiento en general y para herramientas de corte.

Materiales como el SiC, extremadamente duros, presentan la estructura tipo diamante con la única sustitución de 4 Si por 4 C, tal como se puede observar en la figura 9.9.

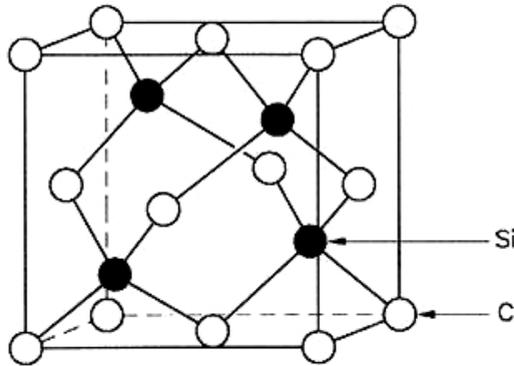


Figura 9.9.

Tipo grafito

El grafito tiene una estructura hexagonal tipo laminar, tal como se pudo observar en la figura 2.13, en la que los átomos de C pertenecientes a cada capa se encuentran unidos por enlaces covalentes, mientras que las capas o láminas se encuentran unidas mediante enlaces débiles que permiten el deslizamiento entre ellas. Debido a estos débiles enlaces entre planos presentan gran capacidad de lubricar.

El grafito presenta anisotropía y puede fabricarse en fibras dando lugar a las denominadas fibras de C que se utilizan como refuerzo en materiales compuestos. El grafito se emplea en la fabricación de elementos calefactores para hornos, como refractario a altas temperaturas, en electrodos de baterías, etc.

Otros tipos de interés

Los fullerenos son otra de las formas alotrópica del C que se descubrió en 1985. Presentan una estructura molecular que está formada por una red

esférica de 60 átomos de carbono (C_{60}), estando formada cada molécula por grupos de átomos configurados en forma de hexágonos o pentágonos al enlazarse. Esta unión constituye una especie muy similar a un «balón de fútbol», con diferentes números de C y por ello diferentes diámetros y unidos mediante enlace covalente. Estos «balones» se disponen según una estructura cristalina (ccc) unidos entre ellos por fuerzas débiles, lo que les confiere propiedades similares al grafito.

Los fullerenos con impurezas de metales alcalinos, especialmente K, alcanzan elevadas conductividades eléctricas con buenas características mecánicas, cuyo primer ejemplo es el K_3C_{60} . Otras aplicaciones se encuentran en desarrollo en los campos electrónicos y en el de celdas de combustible.

Los denominados nanotubos de carbono son otro estado alotrópico del C, cuya estructura equivale a una lámina de grafito cerrada en forma de tubo de diámetro del orden de los nanómetros. La resistencia a la tracción en la dirección principal del tubo se estima que es del orden de 20 veces mayor que la de un acero de elevadas prestaciones, así como el módulo elástico. Todo ello unido a su elevada conductividad eléctrica y térmica y a su baja densidad, representa un material candidato a estar presente en los futuros avances tecnológicos. Actualmente ya encuentra aplicaciones en pantallas planas, sensores, fibras de refuerzo, etc.

En la tabla 9.2 se presentan algunos ejemplos de los diferentes tipos de materiales cerámicos cristalinos.

Tabla 9.2. Materiales cerámicos cristalinos

Iónicos	Tipo AC: NaCl, CsCl, ZnS, MgO, CaO, NiO, FeO
	Tipo A_xC_y: Al_2O_3 , CaF_2 , ZrO_2 , ThO_2 , TeO_2 , UO_2
	Tipo $A_xC_yC'_z$: $BaTiO_3$, $KNbO_3$, $NaNbO_3$, $CaTiO_3$, $SrTiO_3$, $CaZrO_3$, $SrZrO_3$, $SrSnO_3$, $LaAlO_3$, $MgAl_2O_4$, $FeAl_2O_4$
Covalentes	Tipo blenda: ZnS, ZnTe, InAs, InSb, CdS, TiN, TiC
	Tipo diamante: C (diamante), SiC
	Tipo grafito: C (grafito)
	Otros tipos: Fullerenos (K_3C_{60}) y Nanotubos de C